XV CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA

CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

“El rol de la tecnología en tiempos de pandemia y post-pandemia: innovación y desarrollo para sectores sociales y productivos estratégicos.”

Libro de memorias

ISBN: 978-958-44-5254-2 Vol. 11

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Proyectos Curriculares de Tecnología en Electrónica Industrial, Ingeniería en Control y Automatización e Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá D.C. (Colombia) 26 y 27 de noviembre de 2020



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

Editorial

El Decimoquinto Congreso Internacional de Electrónica, Control y Telecomunicaciones (CIECT XV), realizado los días 26 y 27 de noviembre de 2020, de manera virtual, asumió el slogan: *EL ROL DE LA TECNOLOGÍA EN TIEMPOS DE PANDEMIA Y POST-PANDEMIA: INNOVACIÓN Y DESARROLLO PARA SECTORES SOCIALES Y PRODUCTIVOS ESTRATÉGICOS.*

La anterior selección, motivados por la aseveración de Manuel Castells -hace casi 20 años ya- que la *innovación y la difusión de la tecnología* parecía *ser la herramienta apropiada para el desarrollo en la era de la información*. Este 2020, sin embargo, ante la situación disruptiva que aquejó y aqueja a la *sociedad red* como una estructura social emergente de la *Era de la Información* basada en redes de producción, energizadas por el poder y la experiencia; falló y debe reencontrar su rumbo. Es así que los problemas *acuciantes,* ahora, fueron: la *atención sanitaria y la superación de la epidemia de Sars Cov 2;* tomó forma la, hasta entonces, visión irrealista de Castells que … *no podemos avanzar con nuestros modelos de desarrollo actual, destruyendo nuestro entorno y excluyendo a la mayor parte de la humanidad de los beneficios de la revolución tecnológica más extraordinaria de la historia, sin sufrir una devastadora reacción por parte de la sociedad y la naturaleza.*

Fue así que el *Cuarto Mundo,* específicamente, donde la suficiencia de recurso humano, de capital, trabajo, información y mercado -vinculados todos a través de la tecnología- supuso que atendería

eficazmente a través de la población que podía por su capacidad hacer uso racional y profesional del conocimiento, las necesidades de la mayoritaria población vulnerable y vulnerada.

Por lo anterior, poner en el centro a las personas, en entornos de tarea y trabajo globales hiperconectados combinando espacios físicos, corrientes de información con canales de conexión expeditos, y formando profesionales del conocimiento que asuman y afronten los retos derivados de la transformación digital de empresas, universidades, y organizaciones, pero en condiciones de equidad y sujetos de prosperidad, será el desafío en los escenarios presentes y futuros inmediatos.

Ante tales circunstancias, el CIECT XV fue un evento académico organizado por el proyecto curricular de Tecnología en Electrónica industrial de la Facultad Tecnológica de la UDFJ de C, que buscó vincular su sector académico dedicado a la investigación con el sector productivo, la comunidad académica y universitaria local, regional, nacional e internacional, para implementar soluciones innovadoras en sectores estratégicos de recuperación durante y luego de la pandemia: el mundo productivo mutado requiere soluciones adaptadas para una sociedad en vigor y expectante.

Por lo expuesto, este escenario, el del estado del conocimiento científico y tecnológico universal en las Universidades Colombianas y sus comunidades en la gran área de la Electrónica, el Control y las Telecomunicaciones; se centró en:

- Procesamiento de Señales. Donde el tratamiento, análisis y manipulación de la información contenida en una señal, digitalmente, se ha convertido en una actividad cotidiana y casi obligatoria en el mundo moderno. Sigue vigente, entonces, la necesidad del procesamiento digital de señales para solucionar múltiples y diversas problemáticas de la electrónica, el control y las telecomunicaciones.

- Sistemas inteligentes. Donde el continuo interés por acercarse a procesos de implementación del razonamiento, pensamiento y aprendizaje en dispositivos electrónicos a nivel de hardware-software, ha llevado a los sectores empresariales, industriales y académicos -en diferentes áreas del conocimiento- a realizar investigaciones que evidencien desarrollos en Sistemas Inteligentes.

- Control-Automatización. Donde los recientes avances tecnológicos se han enfocado en la generación de nuevos productos y servicios introduciendo sistemas altamente automatizados.

- Bioingeniería. Donde sectores clínico-hospitalarios, de la industria de la bioingeniería, grupos académicos y de investigación, así como múltiples organizaciones científicas centran en esta disciplina actividades intensivas de conocimiento e innovación.

- TIC. Donde los recursos, herramientas y programas que se utilizan para procesar, administrar y compartir información, además de que sus soportes tecnológicos han avanzado en portabilidad y velocidad, los servicios derivados han permeado casi absolutamente todos los ámbitos de la vida social.

- Energías. Donde, para los ámbitos productivos, empresariales, industriales y académicos, es orientador, como objetivo, impulsar el Desarrollo Sostenible a todo nivel.

Fue, entonces, esta la oportunidad para reiterar la búsqueda continua -desde la Investigación, la Formación y la Extensión- por *Transformar Digitalmente* la esfera de lo público incluyendo socialmente a los profesionales que formamos, incrementando sus capacidades individuales adaptativas en red, con atributos personales de liderazgo con vocación de poder, a través de estructura y recursos que

enriquezcan sus experiencias proclives al cambio y a la evolución continua: no hay otra forma de contribuir desde nuestros proyectos curriculares a la solución de las problemáticas generadas por la Pandemia y construir con optimismo pero con certeza el futuro social productivo pospandémico.

Finalmente, y coincidiendo con las conclusiones de la ONU sobre su "*Informe de políticas: La educación durante la COVID-19"* de agosto de este año, el CIECT XV reafirmó que… *el impacto de la crisis provocada por la COVID19 en la educación no tiene precedentes. Ha retrasado el logro de los objetivos internacionales en materia de educación y ha afectado de manera desproporcionada a los más pobres y vulnerables. Sin embargo, la comunidad educativa se ha mostrado resiliente y ha sentado las bases para la recuperación.*

No obstante… *Sigue existiendo el riesgo de una caída en espiral en un bucle de retroalimentación negativa de exclusión y pérdidas en materia de aprendizaje.*

Pero…*sin embargo, toda espiral negativa de agravación de las circunstancias socioeconómicas da a entender que existe una imagen opuesta, la de una espiral positiva que puede conducirnos al futuro educativo que queremos, un futuro de cambio inclusivo en la enseñanza, de aprovechamiento del potencial de las personas y de realización colectiva, en todos los ámbitos de la vida, mediante la inversión en educación.*

Por lo tanto, conviene indicar que …*existen un impulso ilimitado y recursos sin explotar con los que podemos contar para el restablecimiento no solo de los servicios educativos básicos, sino de sus aspiraciones fundamentales. Es responsabilidad de los Gobiernos y de la comunidad internacional mantenerse fieles a los principios y llevar a cabo reformas, no solo para devolver a los niños y los*

jóvenes el futuro prometido, sino para que todos los agentes educativos encuentren su función a fin de hacerlo realidad.

Como colofón de esta editorial a las memorias del evento, se deja como declaratoria intelectual la de *aprender a desaprender para reaprender*, como lo indicaba Walter Mignolo -también hace más de una década-.

A continuación, se listan los trabajos allegados.



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

COPYRIGHT

Derechos de Autor y Permiso de Reimpresión:

Se permite extraer partes del libro siempre y cuando se den los créditos a la fuente. Se les permite fotocopiar a las bibliotecas para su uso privado, así como a los docentes y estudiantes, artículos por separado, sin costo, para fines académicos no comerciales.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

ISBN: 978-958-44-5254-2 Vol 11.

Los artículos de este libro constituyen las memorias del congreso mencionado en la portada y en el título. Estos artículos reflejan las opiniones de los propios autores con el propósito de una distribución oportuna; se publican tal y como fueron presentados y los cambios obedecieron a la evaluación hecha por pares académicos, y cuidando el carácter inédito. La inclusión de dichos artículos en esta publicación fue autorizada por todos y cada uno de los autores.



El equipo estructurado para el CIECT XV fue el siguiente: director general; staff de codirectores; staff de comité de publicaciones; staff de directores de sección; staff comité de organización; staff de comité de programa; y staff de logística:

General Chair

- ***Harold Vacca-González***. MSc. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

General Co-Chairs

- ***Ana Cecilia Villa Parra.*** PhD. Docente Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador
- ***Angélica María Ramírez***. PhD. Universidad Central, Colombia.
- ***Daissy Carola Toloza Cano***. PhD. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.
- ***Gabriel Ascanio Gasca***. PhD. Investigador Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- ***Terrence Chambers*****,** Cátedra Donald & Janice Mosing BORSF en Ingeniería Mecánica, y director del Centro de Eficiencia Energética y Energía Sostenible (EESE) de la Universidad de Louisiana en Lafayette.
- ***Marco Aurelio Cárdenas Juárez***. PhD. Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí –UASLP-, coordinador de la Licenciatura en Ingeniería de Telecomunicaciones.
- ***Jan Sykora*****.** PhD**.** director del Grupo de Radiocomunicaciones Digitales en la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Técnica Checa en Praga –DiRaC-.
- ***José Ignacio Huertas Cardozo.*** PhD**.** Escuela de Ingeniería y Ciencias del Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Toluca, México.

- ***Juan Ignacio Pastore***. PhD. Docente investigador de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.
- ***Luis Mancera.*** PhD. Ingeniería IMAK GmbH. Ingolstadt, Alemania
- ***Marcelo Ferreyra***. Ing. Fundador y director de Dataxplore, Argentina.
- ***Miguel Ángel Padilla Castañeda***. PhD. Investigador del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico CCADET –UNAM, México.
- ***Nicola A. Maffiuletti*.** PhD. Laboratorio de Performance Humana, Clínica Schulthess en Zurich, Suiza.
- ***Paula Andrea Niño***. PhD. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, México
- ***Vladimir Espartaco Robles Bykbae***. PhD. Investigador Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Publication Committee

- ***Esperanza Camargo Casallas***. PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
- ***Hermes Javier Eslava Blanco.*** PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
- ***Luis Fernando Pedraza****.* PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Directors of Sections

- Signals processing: MSc. ***Miguel Pérez Pereira***
- Intelligent Systems: MSc. ***Giovanni Rodrigo Bermúdez***
- Control-Automation: MSc***. Eduardo Alberto Delgadillo Gómez***

- Bioengineering: PhD**.** ***Aldemar Fonseca Velásquez***
- ICT: PhD**.** ***Luis Fernando Pedraza***
- Energies**:** PhD**.** ***Camilo Andrés Arias Henao***

Organizing Committee

- ***Lely Adriana Luengas Contreras*****.** PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
- ***Luis Alejandro Rojas Castellar*****.** MSc. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
- ***Giovanni Rodrigo Bermúdez Bohórquez*****. MSc**. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
- ***Javier López Macías*****.** MSc. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
- ***Enrique Yamid Garzón González*****.** MSc. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Program Committee

- ***Aldemar Fonseca Velásquez****.* MSc. En Bioingeniería. Universidad Nacional de Colombia.
- ***Alexander Jiménez Triana.*** PhD. En Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia.
- ***Andrés Escobar Díaz*****.** MBA. Universidad de los Andes.

- ***Camilo Andrés Arias Henao.*** PhD. En Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla.
- ***Cesar Augusto Hernández Suárez***. PhD. En Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad Nacional de Colombia.
- ***Clara Inés Buriticá Arboleda***. PhD. En Gestión Eficiente de la Energía Eléctrica. Universidad Politécnica de Valencia.
- ***Daissy Carola Toloza Cano***. PhD. En Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana.
- ***Danilo Alfonso López Sarmiento***. PhD. En Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ***Edgar Javier Mantilla Bautista.*** MSc. en Teleinformática. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ***Eduardo Alberto Delgadillo Gómez***. MSc. En Ingeniería Electrónica y de computadores. Universidad de los Andes.
- ***Elvis Eduardo Gaona García*.** PhD. En Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ***Felipe Forero Rodríguez.*** PhD. En Ciencias de la Información. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ***Germán Arturo López Martínez*.** MSc. En Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes.
- ***Giovanni Rodrigo Bermúdez Bohórquez***. MSc. En Ingeniería Electrónica y de Computadores. Universidad de los Andes.

- ***Henry Montaña Quintero***. MSc. En Ingeniería Industrial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ***Hermes Javier Eslava Blanco***. PhD. En ingeniería de sistemas y computación. Universidad Nacional de Colombia.
- ***Jorge Eduardo Porras Bohada***. MSc. En Ing. De Software. Universidad internacional de La Rioja.
- ***Jose David Cely Callejas***. Universidad Distrital Francisco José de Caldas
- ***José Vicente Reyes Mozo***. MSc. En Ciencias de la Información y las Comunicaciones. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- ***Juan Jairo Vaca-González***. PhD. En Materiales e Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia-Universidad Politécnica de Valencia.
- ***Lely Adriana Luengas Contreras*.** PhD. En Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana.
- ***Luis Fernando Pedraza Martínez***. PhD. En Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad Nacional de Colombia
- ***Luis Jorge Herrera Fernández***. PhD. En Ingeniería Acústica. Universidad Politécnica de Madrid.
- ***Marcelo Herrera Martínez***. PhD. En acústica. Czech Technical University in Prague.
- ***Miguel Ricardo Pérez Pereira***. MSc. En Ciencias de la Educación. Universidad San Buenaventura.

- ***Néstor Sergio Gutiérrez*.** MSc. En Ciencias Técnicas. Universidad Drusby Narodov.
- ***Nicolás Francisco Amézquita Gómez***. PhD. En Inteligencia Artificial. Universidad Politécnica de Cataluña
- ***Oscar Gabriel Espejo Mojica***. Esp. En Informática y Automática Industrial. Universidad Autónoma de Colombia
- ***Óscar Iván Ojeda Ramírez***. Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia.
- ***Ricardo A. Espinosa Medina***. MSc. En Ingeniería Biomédica. Universidad de Entre Ríos.
- ***Sergio Andrés Sánchez Sanjuán***. Ingeniero Electrónico, Universidad Sergio Arboleda.

Para el soporte de recursos teleinformáticos y de transmisión se contó con la red RITA -dirigida por el PhD. Roberto Ferro Escobar- y su equipo de trabajo: Juddy Yinet Morales Peña, Felipe Gutiérrez, Daniel Rodríguez, Andrés Felipe Cruz Ocampo, Jheshua Dannand Jared Larrota Alférez.

Para la asistencia logística y organizativa, se contó con estudiantes y laboratoristas del proyecto curricular: Andrés Camilo Guzmán Méndez, Fausto Leonardo Moreno León, José Luis Mejía Pinzón, Maykol Steban Pineda Casas, Brayan Jean Carlo Camargo Ramírez, Ingrith Tatiana Guevara Guevara, William Alexander Gómez Giraldo, Nicol Castro, Ignacio Moya,

Felipe Gutiérrez, Daniel Rodríguez, Andrés Cruz, Camilo Rodríguez Gómez, Fredy Leonardo Martínez, Andrea Lorena Sánchez.

Para el uso y disposición técnica de los canales de Youtube de la Facultad Tecnológica, la administradora de la red de la Facultad Tecnológica, Loreth Pérez; y como coordinadora del equipo logístico y de protocolo, la secretaria del proyecto curricular Gloria Arcelia Rodríguez,

quien dirigió todo lo protocolario.

Para la asesoría y asistencia de evaluación de documentos y edición de memorias: Nicolás Felipe Conde González y Luisa Fernanda Mahecha Mora, integrantes del semillero de investigación EUREKA.



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

CONTENIDO

BIOINGENIERÍA 20

CLASSIFICATION OF FACIAL EXPRESSION OF POST-SURGICAL PAIN IN CHILDREN: EVALUATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS 21

ANALYSIS, MEASUREMENT AND CLASSIFICATION OF FORMS FOR THE PROCESSING OF MAGNETIC RESONANCE IMAGES TO SUPPORT THE DIAGNOSIS OF PROSTATE CANCER 50

ARTIFICIAL VISION APPLIED TO MANUFACTURING 82

RESULTS GENERATED BY BEAMS OF PHOTONS ON A SIMULATED MANNEQUIN IN GEANT4 109

PRELIMINARY RESULTS SIMULATION OF CONE BEAM XVI WITH GEANT4 123

1D NEURAL NETWORK DESIGN TO DETECT CARDIAC ARRHYTHMIAS 144

BIOMEDICAL ENGINEERING: EXPERIENCES IN THE RESEARCH FORMATION WITH MOODLE 163

3D ORGAN RECONSTRUCTION FROM COMPUTED TOMOGRAPHY (CT) IMAGES USING MATLAB 179

SIMULATOR OF SURFACE ELECTROMYOGRAPHY 196

ENERGIAS 214

PARAMETERIZATION OF A PHOTOVOLTAIC MOTOR 215

AXIAL GENERATOR FOR A LOW POWER WIND GENERATOR, SELECTION, DESIGN AND SIMULATION IN COMSOL® MULTIPHYSIC 241

LINEAR GENERATOR FOR A LOW POWER WIND GENERATOR, SELECTION, DESIGN AND SIMULATION IN COMSOL MULTIPHYSIC..... 264

METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF AN ELECTRIC BIOGAS GENERATOR FOR THE USE OF ORGANIC SOLID WASTE FROM VEGETABLE SOURCES 289

SISTEMAS INTELIGENTES 313

ALGORITHM TO DETECT THE LEVEL OF CHLOROPHYLL TYPE A AND B IN THE LEAVES FROM A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK..... 314

ARCHITECTURE OF A 2D GAME FOR ANDROID AND IOS USING COCOS2DX 337

PRELIMINARY RESULTS OF A COMPACT LINEAR ACCELERATOR FOR ONE ION BEAM 360

CAPTURE SYSTEM OF HORIZONTAL BICYCLES' KINETIC VARIABLES FOR SIMULATION: 400

ARTIFICIAL INTELLIGENT DEVICE FOR PHYSICAL AND MENTAL STATE MONITORING IN PULMONARY CANCER ONCOLOGY, A PROPOSAL..... 427

NOAA SATELLITE WEATHER STATIONS: STATE OF THE ART, PERSPECTIVE AND FUTURE PROJECTION..... 442

EVALUATION OF THE USE OF A TELEOPERATED VEHICLE, FOR EDUCATIONAL PURPOSES..... 471

TIC 494

FUNCTIONAL ANALYSIS FOR PIICO IOT PLATFORM 495

DIAGNOSTIC OF THE CURRENT SITUATION OF 5G TECHNOLOGY: SOUTH AMERICA 518



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

DESIGN OF A BIOMIMETIC WATER FILTER OF KERATIN NANOFIBERS 546

5G COVERAGE STUDY WITH ICS TELECOM 563

MATHWEB, WEB PLATFORM FOR THE TEACHING OF MATHEMATICS IN SECONDARY BASIC. PRELIMINARY RESULTS 584

BUSINESS ARCHITECTURE: KEY PILLAR OF IT TRANSFORMATION TO FACE THE CHALLENGES OF COVID-19 IN COLOMBIA 600

MACHINE LEARNING TO DATA CLEANING 634

PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES 665

KRUMBEIN ROUNDNESS INDEX USING KOHONEN SELF-ORGANIZING MAPS 666

TELEMATIC ARTIFICIAL VISION PROTOTYPE FOR RECOGNITION OF CHARACTERISTICS IN PEOPLE AND VEHICLES 690

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL 714

FARAWAY AGRICULTURE: REMOTES TECHNOLOGIES FOR PROCESSES SUPERVISION 715

ANALYSIS OF TEMPERATURE CONTROL EFFECT IN FLUIDIZED BED COFFEE ROASTER 737

AUTOMATED TECHNOLOGIES IMPLEMENTED IN THE FMS HAS200 756

DESIGN AND SIMULATION OF TEMPERATURE AND PH CONTROL FOR THE START A BATCH TYPE BIOREACTOR 781



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

CONTROL GLOVE BASED ON ANGULAR ORIENTATION. 799

MODELING AND IMPLEMENTATION OF A THERMAL PLANT 823

ROBOTS FOR CLEANING SUPPORT IN SWIMMING POOLS 843

VIRTUAL INSTRUMENTATION FOR LOAD CELL SIGNAL PROCESSING 860

STATE FEEDBACK CONTROL WITH INTEGRAL ACTION FOR MULTIRROTOR UAV 876

RESEÑA DE INVITADOS INTERNACIONALES 897

EDUARDO CUAUHTÉMOC GUÍZAR SAINZ 898

JACKELYNNE SILVA MARTÍNEZ 900

TERRENCE L. CHAMBERS 902

MARCO AURELIO CÁRDENAS JUÁREZ 904

JUAN IGNACIO PASTORE 906

KARY RITTER 908

VLADIMIR ESPARTACO ROBLES BYKBAEV 910

ANGELO MARCELO TUSSET 912

MIGUEL A. PADILLA CASTAÑEDA 914

GERARDO ABEL LAGUNA SÁNCHEZ 916

JOSÉ IGNACIO CASTILLO 918

MARCELO R. FERREYRA 920

FERNANDO ARÁMBULA COSÍO 922

JOSÉ IGNACIO HUERTAS CARDOZO 923

ALEJANDRO JIMÉNEZ MORALES 925



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

BIOINGENIERÍA

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

CLASSIFICATION OF FACIAL EXPRESSION OF POST-SURGICAL PAIN IN CHILDREN: EVALUATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Clasificación de la expresión facial de dolor postquirúrgico infantil:
Evaluación de redes neuronales convolucionales

Carolina Jiménez Moreno[1], Jenny Kateryne Aristizábal Nieto [2], Olga Lucía Giraldo Salazar [3]

Abstract

There are certain difficulties in differentiating between children's facial expression related to pain and other stimuli. In addition, the limited communication ability of children in the preverbal stage leads to misdiagnosis when the child feels pain, for example, post-surgical conditions. In this article, a classification approach of facial expression of child pain is presented based on models of pre-trained convolutional neuronal networks from the study carried out in a Colombian hospital of level 4 (Hospital Universitario San Vicente Fundación), in the recovery areas of child surgery services. AlexNet and VGG (16, 19 and Face) networks are evaluated in

[1] Engineering Physics, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Master of Engineering, Universidad de Antioquia, Colombia. Current position: Masters student, Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: carolina.jimenezm@udea.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5329-9358

[2] Bioengineering, Universidad de Antioquia, Colombia. Master of Science in Biomedical Engineering, Politecnico di Torino, Italy. Current position: Researcher and Professor, Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: jenny.aristizabal@udea.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2640-1489

[3] Medicine, Universidad de Antioquia, Colombia. Specialization in Anesthesiology and Resuscitation, Universidad de Antioquia, Colombia. Master in Clinical Epidemiology, Universidad de Antioquia, Colombia. Current position: Professor, Universidad de Antioquia, Colombia and Anesthesiologist, University Hospital of San Vicente Foundation, Colombia. E-mail: lucia.giraldo@udea.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9897-8645

the own dataset using the FLACC scale and their performances are compared in three experiments. The results show that the VGG-19 model achieves the best performance (92.9%) compared to the other networks. The effectiveness of the model and transfer learning for the classification of facial expression of child pain shows a promising solution for the assessment of post-surgical pain.

Keywords: Artificial intelligence, assessment tools, facial expression, pain, pediatrics.

Resumen

Existen ciertas dificultades para diferenciar entre la expresión facial infantil relacionada al dolor con la de otros estímulos. Además, la limitada capacidad de comunicación de los niños en la etapa preverbal conlleva a un error de diagnóstico cuando el niño siente dolor, por ejemplo, afecciones posteriores a las cirugías. En este artículo, se presenta un enfoque de clasificación de la expresión facial de dolor infantil basado en modelos de redes neuronales convolucionales pre-entrenadas a partir del estudio realizado en un hospital colombiano de nivel 4 (Hospital Universitario San Vicente Fundación), en las áreas de recuperación de los servicios de cirugía infantil. Se evalúan las redes AlexNet y VGG (16, 19 y Face) en el conjunto de datos propio utilizando la escala FLACC y se comparan sus rendimientos en tres experimentos. Los resultados muestran que el modelo VGG-19 logra el mejor rendimiento (92.9%) en comparación con las demás redes. La eficacia del modelo y el aprendizaje por transferencia

para la clasificación de la expresión facial de dolor infantil muestran una solución prometedora para la evaluación del dolor postquirúrgico.

Palabras clave: Dolor, expresión facial, herramientas de evaluación, inteligencia artificial, pediatría.

1. Introducción

La manifestación del dolor tiene gran repercusión en el entorno del paciente y en él mismo, más aún cuando el dolor no está bien controlado. Es por ello, que se necesita una óptima comunicación entre el personal tratante y el paciente para realizar la correcta interpretación del dolor al momento de la intervención médica, evaluando así la intensidad de éste para suministrar analgésicos y formular el respectivo diagnóstico. Este es un punto de partida que no puede ser reemplazado por los avances en farmacología y tecnología [1], [2].

La experiencia dolorosa de cada persona depende de su valor personal y subjetivo basado en la edad, la cultura, la experiencia previa, los sentidos derivados del contexto, entre otros factores. Por esta razón, no hay dos personas que experimenten dolor en las mismas condiciones y mecanismos fisiológicos. Esto deriva un problema para el personal de salud involucrado en el manejo del dolor, puesto que la evaluación de la intensidad del dolor depende tanto de su criterio como del reporte verbal del paciente y, además no existen medidas estrictamente objetivas y precisas para establecer el grado de dolor que sufre el paciente.

Dicha evaluación se complica cuando se trata de niños o personas con capacidad limitada para comunicarse.

El principal problema que se plantea, en el manejo del dolor pediátrico, es la valoración y autopercepción del mismo [3], [4]. El dolor en los niños se ha asociado a cambios fisiológicos y patrones conductuales, los cuales son indicadores de dolor que pueden registrarse y por tanto, cuantificarse [5]–[7]. En ese sentido, se evidencia en la literatura, el desarrollado de varias escalas tradicionales de evaluación del dolor para estimar la intensidad de este.

La autoevaluación del paciente es la medida más fiable y válida para evaluar el dolor. El paciente puede expresar la intensidad de su dolor y la ubicación de éste. Sin embargo, no es posible emplearse en personas con impedimentos comunicativos o neurológicos ni en los infantes [8], [9]., dado que no pueden cuantificar su gravedad e informar al personal médico sobre la eficacia de la analgesia [4], [5]. Para evaluar el dolor en los niños, se definieron los indicadores resumidos en la Tabla 1, que están relacionados con el dolor. Es necesario recalcar que los cambios de la expresión facial que refleja el niño en respuesta al dolor se consideran como el indicador más confiable y consistente, [10].

En los niños pequeños, las habilidades verbales siguen siendo limitadas y bastante inconsistentes. Las conductas relacionadas con el dolor son el principal indicador para las evaluaciones en este grupo de edad. Las conductas no verbales, como la expresión facial, el movimiento de las extremidades, el agarre, y el llanto, se consideran medidas de dolor más

confiables y objetivas que la autoevaluación. Las escalas de evaluación del dolor más utilizadas para este grupo de edad son [12]: *The Children's Hospital of Eastern Ontario Pain Scale (CHEOPS)*, *Face Legs Arms Cry Consolability (FLACC)*, *COMFORT Scale*, *The Observational Scale of Behavioral Distress (OSBD)*, *Observational Pain Scale (OPS)*, y *The Toddler-Preschooler Postoperative Pain Scale (TPPPS)*.

Tabla 1. Indicadores que determinan la presencia de dolor en los niños, [4], [10]–[12].

Respuesta de los niños frente al dolor			
Cambios fisiológicos		**Patrones conductuales**	
Signos vitales	Presión arterial	**Comportamiento**	Cambios en la expresión facial
	Frecuencia cardiaca		Movimiento de las piernas
	Frecuencia respiratoria		Llanto
	Saturación de oxígeno		Movimientos corporales frecuentes

Una posible forma de proporcionar una evaluación objetiva y continua del dolor es desarrollar un sistema automatizado que observe y analice diferentes indicadores conductuales / fisiológicos relacionados con el dolor [13], [14].

Es por estas razones que interesa disponer de nuevas técnicas y estrategias que permitan a los médicos y enfermeras diagnosticar mejor el dolor postoperatorio e identificar los niveles de éste.

Las recientes innovaciones en el campo de la visión por computadora han facilitado el desarrollo de enfoques automatizados para evaluar las expresiones faciales. Con el fin de minimizar los errores en el reconocimiento de las expresiones faciales dado por los fondos complejos de las imágenes, se hace uso de técnicas como, por ejemplo, la técnica de substracción de fondo que en [15], los autores exploran el potencial de ella, la cual les permitió diseñar e implementar un algoritmo de detección de movimiento. Algunos otros trabajos han considerado el uso de la técnica de segmentación de imágenes, [16].

El aumento de la potencia de cálculo en las GPU y la creación de grandes conjuntos de datos de imágenes han permitido a las redes neuronales convolucionales (CNN) mostrar un rendimiento sobresaliente en los desafíos de la visión por ordenador, como se evidencia en [17].

Es así como el presente estudio partió de la premisa que la incidencia de dolor severo en pacientes posquirúrgicos de intensidad moderada a severa es alta, y que las expresiones faciales en particular, se consideran el pilar fundamental en la evaluación del dolor puesto que se constituye como uno de los indicadores de dolor más significativos, [18]. Por lo tanto, se plantea evaluar diferentes arquitecturas de redes neuronales convolucionales (CNNs), usadas

ampliamente en el reconocimiento de las emociones, para la clasificación de la expresión facial de dolor infantil.

El documento está organizado de la siguiente manera. En el segundo apartado se describen los métodos utilizados para la construcción del conjunto de datos. La implementación se describe en detalle en el tercer apartado. Los resultados experimentales se analizan en el cuarto apartado. Finalmente, las conclusiones se presentan en el quinto apartado.

2. Materiales y Métodos

b) Definición de la población

Se construyó un conjunto de datos propio con imágenes de pacientes pediátricos del Hospital Universitario San Vicente Fundación (HUSVF) de Medellín, Colombia. Este estudio fue aprobado por el Comité de Ética y la Investigación del HUSVF y por el Comité de Biomedicina de la Universidad de Antioquia (UdeA), Medellín, Colombia.

Se definió el tamaño de muestra de 50 pacientes pediátricos (39 niños y 11 niñas), los cuales fueron registrados después de haber sido sometidos a procedimientos quirúrgicos de tipo cirugía general pediátrica, cirugía ortopédica o cirugía plástica. La edad promedio de los niños es de 16,84 meses, que varía de 1 a 36 meses (desviación estándar = 10,58). Todo niño que recibiese cirugía y su edad estuviese dentro del rango, fue elegible para el registro de los datos, después de obtener el respectivo consentimiento informado de los padres y/o acudientes del

menor. Se excluyeron los niños con enfermedades neurológicas y dimorfismos faciales o que tuviesen algún elemento obstaculizador en el rostro.

c) Adquisición de imágenes

Se utilizó la cámara integrada de un iPad Mini 4 para grabar videos de la expresión facial de los niños y se empleó la escala de evaluación del dolor FLACC (por las iniciales en inglés de sus apartados - Face, Leg, Activity, Cry, Consolability) para registrar los cambios del movimiento corporal. Todas las grabaciones se llevaron a cabo en el entorno clínico postoperatorio del HUSVF.

Se registró a cada niño durante cuatro períodos de tiempo: 1) Justo después del procedimiento quirúrgico para obtener la primera observación (toma CERO); 2) Al pasar diez minutos después del procedimiento quirúrgico (toma UNO); 3) Al pasar veinte minutos después del procedimiento quirúrgico (toma DOS); y 4) Treinta minutos después de la finalización del procedimiento doloroso (toma TRES). Cada período de tiempo fue observado por Enfermeras capacitadas y Médicos Residentes de Anestesiología para proporcionar la evaluación del dolor utilizando la escala FLACC y realizar mediciones de los signos vitales (variación en la presión arterial, frecuencia cardiaca y saturación de oxígeno), los cuales ayudaron a complementar la evaluación.

d) Escala de evaluación del dolor FLACC

No existe un instrumento de medición estándar universalmente aceptado para evaluar y medir el dolor infantil. El principio básico de la medición del dolor es elegir el instrumento adecuado para el paciente correcto, lo que significa que debe basarse en la edad de desarrollo y en el tipo de dolor o condición médica (es decir, dolor de procedimiento versus dolor postoperatorio) [12]–[14], [19]–[21].

Por estas razones, se utilizó la escala de evaluación del dolor FLACC puesto que según la literatura [14], [19], [20], [22]–[23] es la escala recomendada y mejor validada para evaluar el dolor postoperatorio en infantes debido a que es reproducible y simple de utilizar en entorno clínico y que valora en el niño su rostro, el movimiento de sus piernas, la actividad corporal, el llanto, y si es fácil de consolar, las cuales son variables observables asociadas al dolor.

Cada componente de la escala FLACC se califica con un puntaje entre 0 y 2 puntos, siendo 0 un indicador general de que el niño se encuentra tranquilo, 1, el niño está muy inquieto y 2, el niño está desesperado. Un total de 1 a 3 puntos representa dolor leve, de 4 a 6 puntos representa dolor moderado y mayor o igual a 7 puntos representa dolor severo.

Los puntajes obtenidos (0, 1, 2, 3, 4 y 5) para cada una de las tomas registradas del presente estudio se emplearon como la etiqueta para la evaluación de los modelos. Cabe resaltar, la exclusión de los registros etiquetados con los puntajes del 6 al 10, puesto que la cantidad de registros e imágenes válidas fue demasiado pequeña.

3. Implementación

El proceso propuesto para la clasificación de la expresión de dolor consta de dos etapas principales: 1) preprocesamiento de las imágenes y 2) ajuste y entrenamiento de arquitecturas de CNN pre-entrenadas. A continuación, se describe cada etapa en detalle.

- **Preprocesamiento de las imágenes**

Antes de iniciar con el preprocesamiento de las imágenes, primero se empleó la librería OpenCV [26] para extraer los fotogramas de cada uno de los 200 videos adquiridos con la cámara integrada del iPad Mini 4. El paso a continuación fue implementar el descriptor de Histogramas de Gradientes Orientados (HOG) que ofrece la librería DLIB [27], [28], en cada una de las imágenes extraídas para así detectar el rostro. Las imágenes donde los rostros no son detectados por el algoritmo fueron excluidas del análisis posterior. Se realizó además un análisis de correlación para verificar la coincidencia de las imágenes y procesar sólo las imágenes relativamente diferentes, seleccionando así sólo los fotogramas claves de cada video. Haciendo uso de nuevo de la librería DLIB [29] se obtuvieron 68 puntos de referencia faciales que permite identificar el croquis del rostro, las cejas, los ojos, la nariz y la boca. A partir de la información de las coordenadas del croquis del rostro y de las cejas, se creó una máscara para segmentar el rostro del fondo de la imagen.

Dado que el número total de fotogramas es demasiado pequeño (es decir, 2.730 fotogramas) para reentrenar una CNN y con el fin de que el modelo fuese robusto a las características que

pudiera tener el conjunto de imágenes, tales como los ángulos de las tomas, la iluminación, la similitud de las imágenes, entre otras; se realizó una serie de transformaciones al conjunto de imágenes de entrenamiento y validación, de la siguiente manera.

En primer lugar, las imágenes se voltearon horizontalmente al azar con una probabilidad del 50%. Este tipo de transformaciones son óptimas para el conjunto de datos puesto que las expresiones faciales, en estos casos, de los bebés y niños, son bastante simétricas. Seguido de esto, las imágenes fueron redimensionadas a un tamaño de 256xN, siendo N la relación de dimensiones de las imágenes. Y, por último, cada imagen se recortó al tamaño 224x224 y se normalizó ([0,0996611; 0,0800176; 0,06390216], [0,16571397; 0,14057845; 0,12316495]) con el fin de escalar los valores de las imágenes en el rango de [0,1].

- **Ajuste y entrenamiento de arquitecturas de CNN pre-entrenadas**

Se emplearon cuatro arquitecturas CNNs para la clasificación del dolor en el conjunto de datos relativamente pequeño (50 sujetos, 2.730 imágenes). Las primeras tres arquitecturas, como se observa en la Figura 1, AlexNet, VGG16 y VGG19, fueron entrenadas previamente en el conjunto de datos de ImageNet [30] la cual contiene más de 1,2 millones de imágenes para la clasificación de 1.000 clases.

La arquitectura AlexNet, que cuenta con cinco capas convolucionales y tres capas completamente conectadas, ha promovido el desarrollo del aprendizaje profundo en el campo del reconocimiento de las expresiones faciales, específicamente, reconocimiento de

emociones. En el presente estudio, se modificó la última capa de conexión para que pasara de clasificar 1.000 clases a 6 clases correspondientes a los puntajes obtenidos por la escala FLACC (0, 1, 2, 3, 4, y 5).

La cuarta arquitectura es el descriptor VGG-FACE. La familia de arquitecturas VGG, como se observa en las Figuras 1 y 2, tienen la misma estructura en los primeros tres conjuntos de capas convolucionales, y la estructura general contiene cinco conjuntos de capas convolucionales. Las redes VGG16 y VGG19 también son ampliamente utilizadas para la tarea de clasificación de emociones. En el presente estudio, se modificó la última capa de conexión de ambas redes de 1.000 a 6 clases. La red VGG-FACE fue entrenada previamente en un conjunto grande de imágenes de rostros [31], el cual contiene aproximadamente 2,6 millones de imágenes de rostros para clasificar 2.622 identidades en la tarea de reconocimiento facial. Se reemplazó igualmente las neuronas de salida de la última capa (capa fc8) por 6 clases.

La elección de estas CNNs pre-entrenadas permite investigar la diferencia entre usar redes entrenadas en un conjunto de datos relativamente similar (es decir, VGG-FACE, Face Dataset) y redes entrenadas en un conjunto de datos relativamente diferente (es decir, AlexNet, VGG16 y VGG19, ImageNet) al conjunto de datos propio.

El conjunto de imágenes se dividió aleatoriamente en conjunto de entrenamiento, conjunto de validación y conjunto de prueba. El conjunto de datos de prueba se utilizó para seleccionar el mejor clasificador, donde la función de pérdida alcanzara el mínimo.

El desafío que se presentó en el desarrollo de este presente estudio fue el número limitado de imágenes de rostros. La solución propuesta fue utilizar el aprendizaje por transferencia [32], [33] para así poder abordar el problema de la disponibilidad limitada de datos etiquetados. Al hacer uso de esta técnica, es posible, como primera opción, preservar todas las capas previamente entrenadas antes de la última capa de salida y conectar estas capas intermedias a una nueva capa diseñada para el nuevo problema de clasificación.

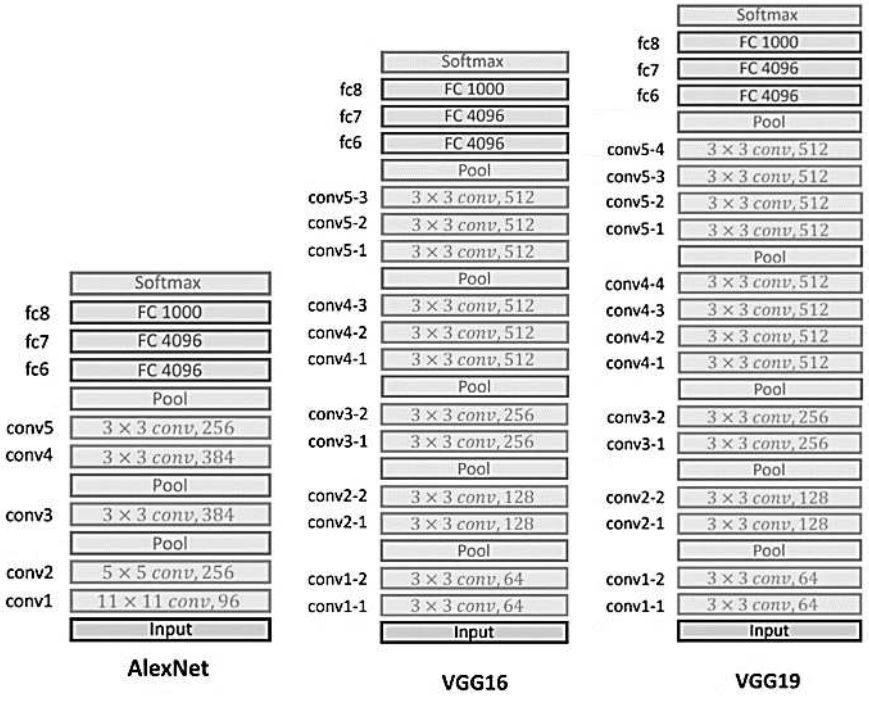


Figura 1. Arquitecturas AlexNet, VGG-16 y VGG-19. Fuente: elaboración propia.

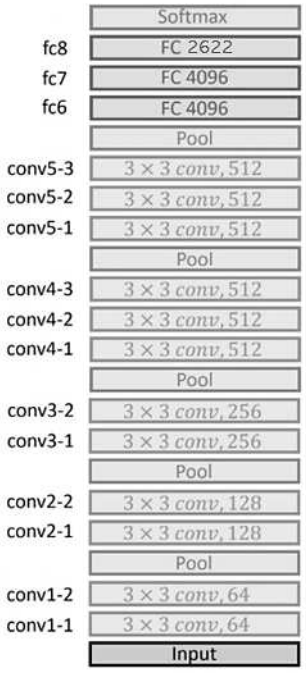


Figura 2. Arquitectura VGG-Face. Fuente: elaboración propia.

La segunda opción es ajustar más capas, o incluso todo el conjunto de capas de red pre-entrenadas. También es posible mantener fija la primera capa convolucional, ya que esta capa se usa a menudo para la extracción de bordes, que es común para problemas genéricos de procesamiento de imágenes.

En este estudio se optó por ajustar todos los parámetros de cada uno de los modelos pre-entrenados. Además, para obtener una evaluación imparcial en las clasificaciones, se emplearon tres experimentos para evaluar el rendimiento del modelo mediante el ajuste de los hiperparámetros. La selección de los hiperparámetros fue con base a los diversos estudios [34]–[40] enfocados en el área del reconocimiento de las expresiones faciales, de las

emociones y del dolor. En dichos estudios se desarrolla la política de actualización de la tasa de aprendizaje por pasos especificando los valores para cada uno de los hiperparámetros y la combinación de éstos.

El total de número de épocas para el entrenamiento fue de 100. El algoritmo de entrenamiento aplicado fue el descenso de gradiente estocástico con los hiperparámetros definidos en la Tabla 2 (momento, decaimiento de los pesos, tasa de aprendizaje inicial). La tasa de aprendizaje se redujo en un factor gamma específico cada cierto número de épocas establecido por el tamaño de los pasos. Se utilizó un tamaño de lote de 32 y 16 para el conjunto de entrenamiento y validación respectivamente.

Tabla 2. Hiperparámetros establecidos por cada experimento planteado.

Hiperparámetros \ No Experimentos	Tasa de aprendizaje inicial	Factor gamma	Momento	Tamaño de los pasos	Decaimiento de los pesos
Experimento 1	0,000001	10,0	0,99	5,0	0,0005
Experimento 2	0,001	10,0	0,9	5,0	0,0005
Experimento 3	0,001	0,1	0,9	5,0	0,0005

Fuente: elaboración propia.

Todo el conjunto de datos se dividió al azar en un conjunto de entrenamiento (±50%, 1.388 fotogramas), un conjunto de validación (±20%, 529 fotogramas) y un conjunto de pruebas (±30%, 813 fotogramas).

4. Análisis de resultados

Para clasificar la expresión facial de dolor de los bebés y los niños, se ingresaron como entrada un total de 2.730 imágenes faciales a las cuatro arquitecturas de CNNs mencionadas anteriormente para la clasificación final. Todas las redes se implementaron en el entorno de *Google Colaboratory* utilizando el lenguaje de programación *Python* y la librería *PyTorch*. Se reportó el rendimiento del entrenamiento mediante la exactitud (*accuracy*) y la pérdida (*loss*).

La primera columna de resultados de la Tabla 3, reporta el rendimiento de la evaluación del dolor al aplicar los hiperparámetros establecidos para el experimento #1 (Tasa de aprendizaje inicial: 0,000001; Factor Gamma: 10,0; Momento: 0,99; Tamaño de los pasos: 5,0; Decaimiento de los pesos: 0,0005). La evaluación de las redes se realizó de esta manera puesto que se quería evaluar cómo la escogencia de los hiperparámetros afecta el rendimiento de la clasificación. La red AlexNet, para el experimento #1, fue la que mejor desempeño tuvo, obteniendo una exactitud buena y una pérdida relativamente baja.

Tabla 3. Rendimiento de la evaluación del dolor con AlexNet, VGG-16, VGG-19 y VGG-FACE.

	Experimento #1		**Experimento #2**		**Experimento #3**	
	Exactitud (*accuracy*)	**Pérdida (*loss*)**	**Exactitud (*accuracy*)**	**Pérdida (*loss*)**	**Exactitud (*accuracy*)**	**Pérdida (*loss*)**
AlexNet	**0,641**	**0,238**	0,679	0,199	0,583	1,106
VGG-16	0,171	2,355	0,937	1,075	**0,623**	**0,342**

VGG-19	0,344	1,612	**0,929**	**0,062**	0,536	1,223
VGG-FACE	0,295	3,126	0,836	0,178	0,468	1,136

Fuente: elaboración propia.

La segunda columna de la Tabla 3, muestra el rendimiento de la evaluación del dolor al aplicar los hiperparámetros establecidos para el experimento #2 (Tasa de aprendizaje inicial: 0,001; Factor Gamma: 10,0; Momento: 0,9; Tamaño de los pasos: 5,0; Decaimiento de los pesos: 0,0005). Comparando el rendimiento de la primera y segunda columna se puede ver que los hiperparámetros elegidos para el experimento #2 mejoraron significativamente el desempeño general para cada uno de los modelos. La exactitud de la evaluación del dolor mejoró para las redes VGG16, VGG19 y VGG-FACE. Sin embargo, la pérdida obtenida para la red VGG-16 fue demasiado alta. Por lo tanto, se puede concluir que las redes VGG-19 y VGG-FACE lograron el mejor rendimiento general, ya que tienen precisiones altas y pérdidas bajas, siendo VGG-19 la mejor opción.

La última columna de la Tabla 3, proporciona el rendimiento de las redes utilizando los hiperparámetros elegidos para el experimento #3 (Tasa de aprendizaje inicial: 0,001; Factor Gamma: 0,1; Momento: 0,9; Tamaño de los pasos: 5,0; Decaimiento de los pesos: 0,0005). La red VGG-16, para el experimento #3, fue la que mejor desempeño tuvo, obteniendo una exactitud buena y una pérdida relativamente baja.

El paso siguiente fue evaluar el modelo VGG-19, en la fase de prueba, sobre cada una de las clases del conjunto de datos, las métricas estadísticas de exactitud (a*ccuracy*), dada en la ecuación (1); sensibilidad (*True Positive Rate* - TPR), ecuación (2); especificidad (*True Negative Rate* - TNR), ecuación (3); taza de falsos positivos o 1-Sensibilidad (*False Positive Rate* – FPR), ecuación (4) y taza de falsos negativos (*False Negative Rate* – FNR), mostrada en la ecuación (5).

- **Exactitud:** Representa el rendimiento general del modelo mediante el porcentaje total de los aciertos.

$$\text{Exactitud} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (1)$$

- **Sensibilidad (TPR):** Representa la fracción de pruebas positivas que son etiquetadas correctamente.

$$\text{TPR} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (2)$$

- **Especificidad (TNR):** Representa la fracción de pruebas negativas que son etiquetadas correctamente.

$$\text{TNR} = \frac{\text{TN}}{\text{TN} + \text{FP}} \quad (3)$$

- **Tasa de falsos positivos (FPR):** Representa la fracción de pruebas negativas que son etiquetadas incorrectamente como positivas.

$$\text{FPR} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{TN}} \quad (4)$$

- **Tasa de falsos negativos (FNR):** Representa la fracción de pruebas positivas que son etiquetadas incorrectamente como negativas.

$$\mathrm{FNR} = \frac{\mathrm{FN}}{\mathrm{FN}+\mathrm{TP}} \quad (5)$$

Donde los valores de TP, FP, FN, TN se explican gráficamente con la matriz de confusión, la cual se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de confusión para clasificación.

		Clasificación manual (realidad)	
		Positivo	**Negativo**
Clasificación automática (predicciones)	**Positivo**	Verdadero positivo (TP)	Falso positivo (FP)
	Negativo	Falso negativo (FN)	Verdadero negativo (TN)

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 5 presenta el rendimiento de la red VGG-19 bajo el experimento #2 en la fase de prueba. El propósito de examinar dichas métricas fue evaluar cómo los hiperparámetros seleccionados afectan al rendimiento de la clasificación junto con la tasa de verdaderos positivos (TPR) y la tasa de falsos positivos (FPR). Como se muestra en la Tabla 5, se obtienen muy buenos valores de exactitud (*accuracy*) para cada una de las clases a predecir por el modelo. Los valores de TNR y FPR en general son buenos, sin embargo, los valores de TPR son bajos y FNR muy altos. Es importante aclarar que la finalidad es obtener valores altos para

la exactitud, TPR y TNR y lograr valores bajos para FPR y FNR. Analizar estas dos últimas métricas es crucial para el caso de la evaluación del dolor, puesto que, en la literatura, se evidencian muchos estudios pediátricos donde se presenta el sobre-entrenamiento (asociado a FPR) y sub-entrenamiento (asociado a FNR). Por lo tanto, se concluye que el modelo CNN VGG-19 logró un buen rendimiento a manera general obteniendo buena especificidad, sin embargo, pudo haber sufrido de desajuste. Adicional a esto, se puede observar también que los resultados obtenidos para las clases 3, dolor leve, y 4, dolor moderado, no son óptimas.

Las posibles razones de estos resultados fueron:

1. El hecho de tener 50 pacientes, lo cual se puede ver como una debilidad del proyecto.
2. La valoración del dolor por parte de las enfermeras y médicos residentes de Anestesiología no fue independizada, por tanto, la categorización de las imágenes pudo haber estado sesgada.

Tabla 5. Matriz de confusión para clasificación.

	Exactitud	TPR	TNR	FPR	FNR
0 vs Todos	85,4%	56,1%	94,1%	5,9%	26,1%
1 vs Todos	86,7%	55,3%	96,3%	3,7%	18,0%
2 vs Todos	79,5%	34,6%	95,5%	4,5%	26,7%
3 vs Todos	72,7%	43,7%	12,2%	25,5%	90,28%
4 vs Todos	89,9%	0%	91,4%	8,6%	100%
5 vs Todos	99,5%	97,5%	1%	0%	0%

Fuente: elaboración propia.

3. Buena parte del sesgo pudo haberse dado también, por el diseño del conjunto de datos.

4. Las imágenes categorizadas en las clases 3, dolor leve, y 4, dolor moderado, probablemente no se logran diferenciar bien, por lo que el modelo no logra distinguir entre estas clases.

5. Conclusiones

La evaluación del dolor infantil puede llegar a ser inconsistente puesto que dependen en gran medida del criterio médico, y se requiere que el personal médico esté bien capacitado para garantizar el uso adecuado de las escalas de evaluación. Esto puede generar una intervención tardía y un tratamiento inadecuado del dolor. Dado que la evaluación del dolor es crucial para tratamiento del dolor, es necesario desarrollar herramientas automáticas que permitan una evaluación óptima del dolor.

Este trabajo evalúa diferentes arquitecturas de redes neuronales convolucionales, usadas ampliamente para la clasificación y detección de las emociones, en la tarea de la clasificación automática del dolor en tres experimentos diferentes. Todas las redes, AlexNet, VGG16, VGG19 y VGG-FACE se evaluaron utilizando el conjunto de datos propio. Los resultados experimentales mostraron que la selección de hiperparámetros influye en el rendimiento de los modelos. Los hiperparámetros seleccionados para el experimento #2 (Tasa de aprendizaje inicial: 0,001; Factor Gamma: 10,0; Momentum: 0,9; Tamaño de los pasos: 5,0; Decaimiento

de los pesos: 0,0005) influyeron para obtener los mejores resultados con respecto a los otros dos experimentos. Con la red VGG-19 se obtuvo el mejor rendimiento en comparación con las demás redes, logrando una exactitud del 92,9% y una pérdida del 6,2% para la fase de validación. No obstante, al analizar las métricas de exactitud, precisión, TPR, TNR, FPR y FNR en la fase de prueba, se pudo observar que el modelo a pesar de tener un rendimiento bueno a nivel general y que logró tener buena especificidad, no logró buena sensibilidad y posiblemente presentó desajuste en el entrenamiento. Las razones de ello, se considera que corresponde a la distribución de las imágenes en las diferentes clases y/o en las divisiones de los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. Para solventar dicha problemática, se propone, antes de mejorar la técnica, mejorar el conjunto de datos, y hacer un análisis exhaustivo del error de forma manual, analizando imagen por imagen, aprovechando que es un conjunto de datos relativamente pequeño, y confirmar que el etiquetado de los datos ha sido correcto y realizar las medidas necesarias, tales como fusionar clases que puedan no ser diferenciables. Esto posiblemente ayudará a mejorar el rendimiento del modelo y a no sufrir ni de sobre-entrenamiento ni de sub-entrenamiento.

Estos resultados son alentadores y sugieren que el reconocimiento automático del dolor infantil es una alternativa viable y más eficiente al estándar actual de evaluación del dolor. Al seguir las mejoras propuestas, se espera tener un sistema robusto capaz de clasificar el nivel de dolor

infantil con muy buenos resultados logrando solventar la problemática de la evaluación del dolor sesgada que se presenta día a día.

Reconocimientos

Este trabajo fue apoyado por el Grupo de Investigación en Bioinstrumentación e Ingeniería Clínica (GIBIC), el Grupo de Investigación en Medicina Perioperatoria (GRIMPA) y la Universidad de Antioquia (UdeA) a través del proyecto: 2018-23358 - “Desempeño y diseño de un modelo de dolor postquirúrgico en niños menores de 36 meses para la clasificación de dolor en comparación con la escala tradicional pediátrica FLACC” y financiado por la Universidad de Antioquia (UdeA) a través del estímulo académico de Estudiante Instructor.

Referencias

[1] H. Y. Vivian-Ip, A. Abrishami, P. W. H. Peng, J. Wong, and F. Chung, “Predictors of Postoperative Pain and Analgesic Consumption: A Qualitative Systematic review”, *Anesthesiology*, vol. 111, no. 3, pp. 657–677, september 2009. https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181aae87a

[2] O. L. Elvir-Lazo and P. F. White, “Postoperative pain management after ambulatory surgery: role of multimodal analgesia”, *Anesthesiology Clinics,* vol. 28, no. 2, pp. 217–224, june 2010. https://doi.org/10.1016/j.anclin.2010.02.011

[3] American Academy of Pain Medicine, "Get the facts on pain". [Online]. Available at: http://www.painmed.org/patientcenter/facts-on-pain/

[4] P. J. Mathew and J. L. Mathew, "Assessment and management of pain in infants", *Postgraduate Medical Journal*, vol. 79, no. 934, pp. 438–43, august 2003. http://dx.doi.org/10.1136/pmj.79.934.438

[5] M. Clarett, "Escalas de evaluación de dolor y protocolo de analgesia en terapia intensiva", Clínica y Maternidad Suizo Argentina Instituto Argentino de Diagnóstico y Tratamiento, Buenos Aires, Argentina, 2012.

[6] L. J. Duhn and J. M. Medves, "A systematic integrative review of infant pain assessment tools", *Advance in Neonatal Care*, vol. 4, no. 3, pp. 126–140, june 2004. 10.1016/j.adnc.2004.04.005

[7] R. Slater, A. Cantarella, L. Franck, J. Meek, and M. Fitzgerald, "How Well Do Clinical Pain Assessment Tools Reflect Pain in Infants?" *PLoS Medicine*, vol. 5, no. 6, p. e129, june 2008. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0050129

[8] N. C. de Knegt. et al., "Behavioral Pain Indicators in People With Intellectual Disabilities: A Systematic Review", *The Journal of Pain*, vol. 14, no. 9, pp. 885–896, september 2013. https://doi.org/10.1016/j.jpain.2013.04.016

[9] G. Zamzmi. et al., "An approach for automated multimodal analysis of infants' pain", in *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 4148–4153, 2016.

[10] V. Guruswamy, "Assessment of pain in nonverbal children", *Association of Paediatric Anaesthetists of Great Britain and Ireland*, vol. APA Leeds, no. 41st Annual Scientific Meeting in Leeds, p. 33, 2014.

[11] Registered Nurses' Association of Ontario, Assessment and management of pain, vol. 3. Toronto, Canada, 2013.

[12] R. Srouji, S. Ratnapalan, and S. Schneeweiss, "Pain in Children: Assessment and Nonpharmacological Management", *International Journal of Pediatrics*, july 2010. https://doi.org/10.1155/2010/474838

[13] K. Brand and A. Al-Rais, "Pain assessment in children", *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, vol. 20, no. 6, pp. 314–317, june 2019. https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2019.03.003

[14] D. Freund and B. N. Bolick, "Assessing a Child's Pain", *AJN, American Journal of Nursing,* vol. 119, no. 5, pp. 34–41, may 2019. 10.1097/01.NAJ.0000557888.65961.c6

[15] M. Pérez, G. A. Cavanzo Nisso, and F. Villavisán Buitrago, "Sistema embebido de detección de movimiento mediante visión artificial ", *Visión Electrónica*, vol. 12, no. 1, pp. 97-101, 2018. https://doi.org/10.14483/22484728.15087

[16] J. F. Pantoja Benavides, F. N. Giraldo Ramos, Y. S. Rubio Valderrama, and V. M. Rojas Lara, "Segmentación de imágenes utilizando campos aleatorios de Markov", V*isión Electrónica*, vol. 4, no. 2, pp. 5-16, 2010. https://doi.org/10.14483/22484728.432

[17] J. Forero C., C. Bohórquez, and V. H. Ruiz, "Medición automatizada de piezas torneadas usando visión artificial", *Visión Electrónica*, vol. 7, no. 2, pp. 36-44, 2013. https://doi.org/10.14483/22484728.5507

[18] S. Brahnam, C.-F. Chuang, R. S. Sexton, and F. Y. Shih, "Machine assessment of neonatal facial expressions of acute pain", *Decision Support System*, vol. 43, no. 4, pp. 1242–1254, august 2007. https://doi.org/10.1016/j.dss.2006.02.004

[19] A. Beltramini, K. Milojevic, and D. Pateron, "Pain Assessment in Newborns, Infants, and Children", *Pediatric. Annals*, vol. 46, no. 10, pp. e387–e395, october 2017. https://doi.org/10.3928/19382359-20170921-03

[20] X. Cong, J. M. McGrath, R. M. Cusson, and D. Zhang, "Pain Assessment and Measurement in Neonates: An Ipdated Review", *Advances in Neonatal Care*, vol. 13, no. 6, pp. 379–395, december 2013. 10.1097/ANC.0b013e3182a41452

[21] C. L. von Baeyer and L. J. Spagrud, "Systematic review of observational (behavioral) measures of pain for children and adolescents aged 3 to 18 years", *Pain*, vol. 127, no. 1–2, pp. 140–150, january 2007. https://doi.org/10.1016/j.pain.2006.08.014

[22] J. Zieliński, M. Morawska-Kochman, and T. Zatoński, "Pain assessment and management in children in the postoperative period: A review of the most commonly used postoperative pain assessment tools, new diagnostic methods and the latest guidelines for postoperative pain therapy in children", *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, vol. 29, no. 3, pp. 365–374, febrary 2020. 10.17219/acem/112600

[23] C. Greco and C. Berde, "Pain Management in Children", Gregory's Pediatric Anesthesia, Wiley, pp. 929–954, 2020. https://doi.org/10.1002/9781119371533.ch37

[24] G. Zamzmi, R. Kasturi, D. Goldgof, R. Zhi, T. Ashmeade, and Y. Sun, "A Review of Automated Pain Assessment in Infants: Features, Classification Tasks, and Databases," *IEEE Reviews in Biomedical. Engineering*, vol. 11, pp. 77–96, noviembre 2017. 10.1109/RBME.2017.2777907

[25] T. Voepel-Lewis, J. Zanotti, J. A. Dammeyer, and S. Merkel, "Reliability and Validity of the Face, Legs, Activity, Cry, Consolability Behavioral Tool in Assessing Acute Pain in Critically Ill

Patients", *American Journal of Critical Care*, vol. 19, no. 1, pp. 55–61, january 2010. https://doi.org/10.4037/ajcc2010624

[26] G. Guillen, "Digital Image Processing with Python and OpenCV", *Sensor Projects with Raspberry Pi*, Springer, pp. 97–140, 2019. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5299-4_5

[27] Momtahina, R. Hossain, M. M. Rahman, and O. A. Tania, "Image Capturing and Automatic Face Recognition", Dhaka, Bangladesh, 2019.

[28] O. Subea and G. Suciu, "Facial Analysis Method for Pain Detection", *International Conference on Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*, pp. 167–180, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23976-3_17

[29] D. E. King, "Dlib-ml: A Machine Learning Toolkit", *The Journal of Machine Learning Research*, vol. 10, pp. 1755–1758, december 2009. 10.1145/1577069.1755843

[30] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition", Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016. [Online]. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2016/html/He_Deep_Residual_Learning_CVPR_2016_paper.html

[31] O. M. Parkhi, A. Vedaldi, and A. Zisserman, "Deep face recognition", *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, vol. 1, no. 3, p. 6, september 2015. https://dx.doi.org/10.5244/C.29.41

[32] S. J. Pan and Q. Yang, "A Survey on Transfer Learning", *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, vol. 22, no. 10, pp. 1345-1359, october 2010. 10.1109/TKDE.2009.191

[33] F. Zhuang. et al., "A Comprehensive Survey on Transfer Learning", *Proceedings of the IEEE*, pp. 1-34, july 2019. 10.1109/JPROC.2020.3004555

[34] H.-W. Ng, V. D. Nguyen, V. Vonikakis, and S. Winkler, "Deep Learning for Emotion Recognition on Small Datasets using Transfer Learning", *Proceedings of the 2015 ACM on International Conference on Multimodal Interaction (ICMI '15)*, pp. 443–449, november 2015. https://doi.org/10.1145/2818346.2830593

[35] W. Ding *et al.*, "Audio and face video emotion recognition in the wild using deep neural networks and small datasets", *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI '1)*, pp. 506–513, october 2016. https://doi.org/10.1145/2993148.2997637

[36] K. Zhang, L. Tan, Z. Li, and Y. Qiao, "Gender and smile classification using deep convolutional neural networks", Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016. [Online]. Available at: https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016_workshops/w18/html/Zhang_Gender_and_Smile_CVPR_2016_paper.html

[37] V. Campos, A. Salvador, B. Jou, X. Giró-i-Nieto and B. Jou, "Diving Deep into Sentiment: Understanding Fine-tuned CNNs for Visual Sentiment Prediction", *Proceedings of the 1st International Workshop on Affect & Sentiment in Multimedia (ASM '15),* pp. 57-62, october 2015. https://doi.org/10.1145/2813524.2813530

[38] H. Ding, S. K. Zhou, and R. Chellappa, "FaceNet2ExpNet: Regularizing a Deep Face Recognition Net for Expression Recognition", *2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)*, pp. 118–126, june 2017. 10.1109/FG.2017.23

[39] F. Wang *et al.*, "Regularizing face verification nets for pain intensity regression," in *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 1087–1091, september 2017. 10.1109/ICIP.2017.8296449

[40] M. S. Hossain and G. Muhammad, "Emotion recognition using deep learning approach from audio–visual emotional big data," *Information Fusion*, vol. 49, pp. 69–78, september 2019. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.09.008

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

ANALYSIS, MEASUREMENT AND CLASSIFICATION OF FORMS FOR THE PROCESSING OF MAGNETIC RESONANCE IMAGES TO SUPPORT THE DIAGNOSIS OF PROSTATE CANCER

Análisis, medición y clasificación de formas para el procesamiento de imágenes de resonancia magnética como apoyo al diagnóstico del cáncer de próstata.

Natalia Andrea Ramírez Pérez[1], Lilia Edith Aparicio Pico[2], Camilo Andrés Pérez Triana[3]

Abstract

The male reproductive system has a gland located below the bladder and in front of the rectum: the prostate. It surrounds the urethra and has the function of producing a fluid component in the seminal fluid. Over time, this gland tends to enlarge and block the urethra, making it difficult to urinate or sexual function. This alteration is known as harmless prostatic hyperplasia, which is corrected with surgery. Sometimes it is confused with prostate cancer due to the similarity of the symptoms, which is frequent in men.

[1] Matemática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Directora en Ciencia de Datos, Buho Media, Colombia. Docente ocasional, Institución Universitaria Pascual Bravo. nata.r_1212@hotmail.com, naaramirezp@correo.udistrital.edu.co. ORCID: https//orcid.org/0000-0003-4389-7295.

[2] Licenciatura en Ciencias de La Educación Especial, Doctora en Ciencias Técnicas, Magister en Teleinformática, Especialista en Gerencia de Proyectos Educativos, Filiación: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente de planta Universidad Distrital Francisco José de Caldas. leap0763@gmail.com, medicina@udistrital.edu.co. ORCID: https//orcid.org/0000-0003-1841-4423.

[3] Matemático, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Maestría en Matemáticas, Universidad de los Andes. Investigador, ca.perezt@uniandes.edu.co, caperezt@correo.udistrital.edu.co. ORCID: https//orcid.org/ 0000-0002-8772-1892.

Diagnosis of this disease is generally made using a manual technique called a digital rectal examination and a laboratory test that measures PSA levels in the blood. It is a substance found in the blood of someone who usually has prostate cancer. Additionally, the diagnosis is supported by a transrectal ultrasound through a catheter. This comprehensive process helps to determine the extension of prostate cancer and designate the correct treatment. The status of prostate injury is assessed by practicing a Magnetic Resonance Imaging (MRI). It is a procedure performed by radio waves and a computer that creates detailed prostate area´s images. It analyzes the prostate condition and determines the procedure or treatment according to the injury´s status, for example, surgery, radiation therapy, or monitored observation. To define what kind of treatment, it is essential to analyze the different disease stages and the Gleason Score, a measurement of the histological grade, ranging from 2 to 10, that indicates the probability of spreading or extending the tumor.

This research focuses on the analysis and the extraction of measurements to classify forms of prostate lesions to support its diagnosis. It considers the PI-RADS categorization, which currently determines the probability of suffering from clinically significant prostate cancer. For this purpose, an analysis was made using a geometric interpretation from different categorizations of cancer (4-5). A digital processing of Python images on T2, ADC, and DWI was made applicating the concept of the curve, Zernike moments, fractal dimension, Caliper dimension, the total absolute curvature, the energy bending, direction, convexity, circularity,

compactness, Hu moments, dimension, eccentricity, extent, solidity, orientation, largest axis length, smallest axis length, radius, center, centroid, length, and area.

Key words: Measurement, prostate cancer, diagnosis, machine learning.

Resumen

El sistema reproductor masculino cuenta con una glándula localizada debajo de la vejiga y delante del recto la cual rodea la uretra: la próstata, la cual tiene la función de producir un fluido componente del líquido seminal. Con el tiempo esta glándula tiende a agrandarse y bloquear la uretra dificultando la orina o la función sexual, tal alteración es conocida como hiperplasia prostática benigna –que se corrige con cirugía-, pero se confunde con el cáncer de próstata por la similitud de los síntomas; este tipo de cáncer es frecuente en los hombres.

El diagnóstico se realiza generalmente con una técnica manual llamada tacto rectal, junto con la prueba de laboratorio para medir los niveles de PSA -que es una sustancia que se encuentra en la sangre de quien posee cáncer de próstata-; la ecografía transrectal apoya al diagnóstico y es realizado con una sonda; además, con una estadificación se define la extensión del cáncer en la próstata para definir el tratamiento. Para valorar el estado de la lesión de la próstata se usa la Resonancia Magnética (RM), procedimiento realizado con ondas de radio y una computadora que crean una serie de imágenes detalladas de las zonas de la próstata para analizar su estado y así determinar el procedimiento o tratamiento de acuerdo al estado de la

lesión, por ejemplo: cirugía, radioterapia o la observación vigilada. Para esta definición de tratamiento, es importante analizar los diferentes estados de la enfermedad y la puntuación de Gleason que mide el grado histológico, cuyo rango va desde 2 hasta 10, que indica la probabilidad de diseminación o extensión del tumor.

Esta investigación se centra en el análisis, y la extracción de mediciones para clasificación de formas sobre lesiones en la próstata como apoyo a su diagnóstico -teniendo en cuenta la categorización PI-RADS, que actualmente determina la probabilidad de padecer un cáncer de próstata clínicamente significativo o no-. Para esto, el análisis se realizó a través de la interpretación geométrica, tomada de las diferentes categorizaciones del cáncer (4-5), transformándola en la aplicación del concepto de curva, momentos de Zernike, dimensión fractal, dimensión de Caliper, curvatura absoluta total, flexión de energía, dirección, convexidad, circularidad, compacidad, momentos de Hu, dimensión, excentricidad, extensión, solidez, orientación, longitud del eje mayor, longitud del eje menor, radio, centro, centroide, longitud y área, utilizando el procesamiento digital de imágenes en Python sobre secuencias T2, ADC y DWI.

Palabras clave: Medición, cáncer de próstata, diagnóstico, clasificación automática.

1. Introducción.

La próstata produce el líquido seminal que transporta y alimenta el esperma; cuando este líquido seminal se acumula produce alteraciones en la glándula prostática, generándose así el denominado cáncer de próstata. Externamente, provoca dificultades para orinar debido a la obstrucción de la uretra. Como antecedente, se cuenta que el cáncer de próstata es el segundo más frecuente en hombres y el más común a nivel mundial, alcanzando los 1,6 millones de casos; por lo anterior, y a falta de un diagnóstico temprano como de ausencia de un tratamiento oportuno y adecuado, se ha acelerado la causa de muertes, [1].

No obstante, con la implementación de herramientas modernas y la ayuda de los avances tecnológicos se ha tendido a mejorar el diagnóstico, presentándose una considerable disminución a nivel mundial. Sin embargo, esto en particular no sucede en América Latina, en donde -más bien- se ha disparado la tasa de mortalidad y ha llegado a ser la primera causa de letalidad por cáncer. Según estadísticas que revelan muertes por cada 100.000 habitantes, las Bahamas es el país con mayor mortalidad, con 78,86; seguido de Barbados con 76,8; y luego aparecen, México, Brasil y Chile, [4].

Como en la primera etapa el cáncer es asintomático o presenta síntomas leves confundibles con otra anomalía denominada hiperplasia benigna, es la resonancia magnética el sistema actual más usado para el diagnóstico. La utilización de la resonancia magnética para el diagnóstico de cáncer de próstata se empezó a implementar en los años 80, tomando mayor

fuerza en la primera década del siglo XXI -hacia el año 2007-, con el objetivo de mejorar tanto la detección como la caracterización del mismo. La resonancia magnética, entonces, resultó en el método más usado para realizar el diagnóstico de cáncer de próstata, unido a las secuencias de alta resolución ponderadas en T2 y a las secuencias funcionales de difusión (DWI) que mejoran aún más la sensibilidad y especificidad sobre la prueba PSA, [20]. Por lo tanto, el apoyo matemático-computacional para interpretar el cáncer de próstata en imágenes de resonancia magnética resulta fundamental, convirtiéndose en un área muy activa de investigación, [19].

Por lo expuesto, es de gran interés obtener un correcto y pronto diagnóstico porque esto determinará el estado del tumor en un futuro, y es un punto de partida para tomar decisiones oportunas para el bienestar del paciente. Dado que en la etapa temprana de la enfermedad no existen síntomas, se debe recurrir al análisis del PSA, al examen rectal (DRE) y a la biopsia para tener justamente un diagnóstico. Sin embargo, estos procesos demandan tiempo y extensión, por lo que se requiere urgentemente investigar y analizar las herramientas de predicción objetiva para lograr un diagnóstico temprano del cáncer de próstata, sin que este haya avanzado y haya afectado la glándula en un alto grado, [18].

El presente documento expone el análisis y desarrollo de una aplicación dirigida al diagnóstico pronto de cáncer de próstata, partiendo de imágenes de Resonancia Magnética (RM) en secuencias T2 y de difusión. Así mismo, se describe la utilización de Imágenes de pacientes

donde se detectan las lesiones ubicadas en la próstata, en conjunto con el Sistema de Informes de Imágenes de próstata denominado (PI-RADS).

De lo anterior, el aporte de la presente investigación radica en que combina el aprendizaje automático en imágenes mediante clasificadores supervisados, que para la medicina significa un avance que se vale de algoritmos que logran extraer características de imágenes médicas y usa este conjunto de datos con su respectiva validación para clasificar el cáncer de próstata en pacientes logrando un diagnostico con un aceptable valor predictivo. Es decir: este estudio ofrece un aporte que, con ayuda de un sistema experto, permite diagnosticar más rápida y acertadamente las lesiones cancerígenas identificando la ubicación y evitando la evolución del cáncer, [5], [6].

El artículo se estructura así: una primera parte donde se presenta el resumen sobre la implementación de los modelos computacionales que llegan de la innovación como soporte al diagnóstico temprano de cáncer de próstata. En la segunda parte, se expone la relación de mediciones en acción para el estudio geométrico, utilizando imágenes de resonancia magnética con la ponderación en secuencia (T2W), de difusión (DWI-ADC). A esto, se suma un análisis de las estructuras afectadas a través de una extracción de características geométricas como son la medida de marcación de lesión para tres imágenes (T2,DWI y ADC), teniendo en cuenta excentricidad, dimensión de Caliper, curvatura absoluta total, flexión de energía, dirección, convexidad, circularidad, compacidad, momentos de Hu, área, longitud de

arco, puntos extremos, centroide, convexidad, radio, longitud de eje mayor y menor, orientación, solidez, extensión, diámetro, dimensión fractal por conteo de cajas. Además, se adicionan datos que muestran coordenadas de la posición de la lesión, la matriz descripción de la orientación y la escala de imagen; donde los valores de i, j y k que representan a la columna, la fila y la coordenada del corte a encontrar. De esta manera se obtiene el vector con escalares de espaciado x, y, z, con la posición de lesión TZ o Zona Transicional y PZ o Zona Periférica con AS o Estoma Fibromuscular, y con las categorías de evaluación de PI-RADS que determinan la probabilidad de un cáncer clínico significativo de próstata.

Luego, usando imágenes de Resonancia Magnética, se describe la implementación del sistema de ayuda al diagnóstico de cáncer de próstata, donde la evaluación PI-RADS es diferente para la ubicación de cada lesión, pues en la zona de transición, la evaluación PI-RADS es determinada por T2W con modificación algunas veces de puntuación DWI, mientras la zona periférica tiene evaluación PI-RADS determinada con la puntuación DWI y ADC.

Finalmente, con los datos usados de 35 pacientes, a partir de los modelos de regresión logística, red neuronal, árbol de decisión, bosques aleatorios, y sobre las categorías 4 y 5 de PI-RADS, se presentan los beneficios a los que llega el modelo de clasificación con la extracción de características geométricas adicionales a las estudiadas en [3], expresado por un sistema directo para el médico encargado del diagnóstico de cáncer, el cual por su

efectividad conllevará a brindar tranquilidad al paciente, y mejorar la toma de decisiones que definirán el destino de la enfermedad

2. Materiales y métodos.

En el diagnóstico de cáncer de próstata basado en los niveles de Antígeno Prostático Específico (PSA), que identifica la proteína producida por las células de la próstata encontrada en una prueba de sangre, se determinó que el PSA no es característico de la edad, sino que cuando se presenta cáncer de próstata estos niveles se elevan, [7]. Pero, aun así, no logran determinar con claridad el diagnóstico, pues también se muestran elevados cuando existe una infección benigna, hiperplasia prostática o agrandamiento benigno de la próstata.

Existe un cáncer de próstata neuroendocrino, y otro cáncer de próstata de pequeñas células las cuales presentan menos nivel de PSA pero que, cuando se esparce fuera de la próstata, representa mayor agresividad, [8].

La técnica de la resonancia magnética -con la valoración anatómica de alta resolución de la próstata- junto a la información metabólica, resulta en el método más usado en la actualidad para el estudio de la cirugía del cáncer de próstata, gracias a la combinación anatómica y metabólica que ofrece. Aquí, lo más importante es la localización del cáncer proyectando la posibilidad futura de fusionar las imágenes de ecografía, de resonancia magnética y el PET, para establecer nuevos parámetros en el cáncer, [9].

Actualmente, las técnicas de resonancia magnética como la espectroscopia usan tecnología convencional a la que le adicionan información metabólica de la glándula prostática, dando más fiabilidad al examen cuando se encuentra en un estado preoperatorio y con especificidad del 90% cuando hay índices de cáncer. La RM dinámica en contraste, por otr parte, usa secuencias rápidas tras la administración de contraste endovenoso (gadolinio). Estudios preliminares han mostrado una intensa captación del contraste en el primer minuto, tras su administración en el tejido neoplásico, comparativamente con la glándula normal, indicativo de angiogénesis de un tumor. Es preciso realizar más estudios y mejoras en la tecnología para valorar la posible utilidad de la técnica con contraste endovenoso en el estudio por RM del cáncer de próstata.

2.1. Categorías de evaluación de PI-RADS

La asignación de una categoría de evaluación PI-RADS para cada lesión se basa en la puntuación de las secuencias T2, DWI / ADC y DCE, según la anatomía zonal.

Zona periférica (PZ)

La zona periférica está situada en el lado posterior y lateral de la próstata, rodeando la zona de transición. Para la zona periférica, el DWI / ADC es la secuencia determinante principal (técnica dominante) para asignar la categoría de evaluación PI-RADS.

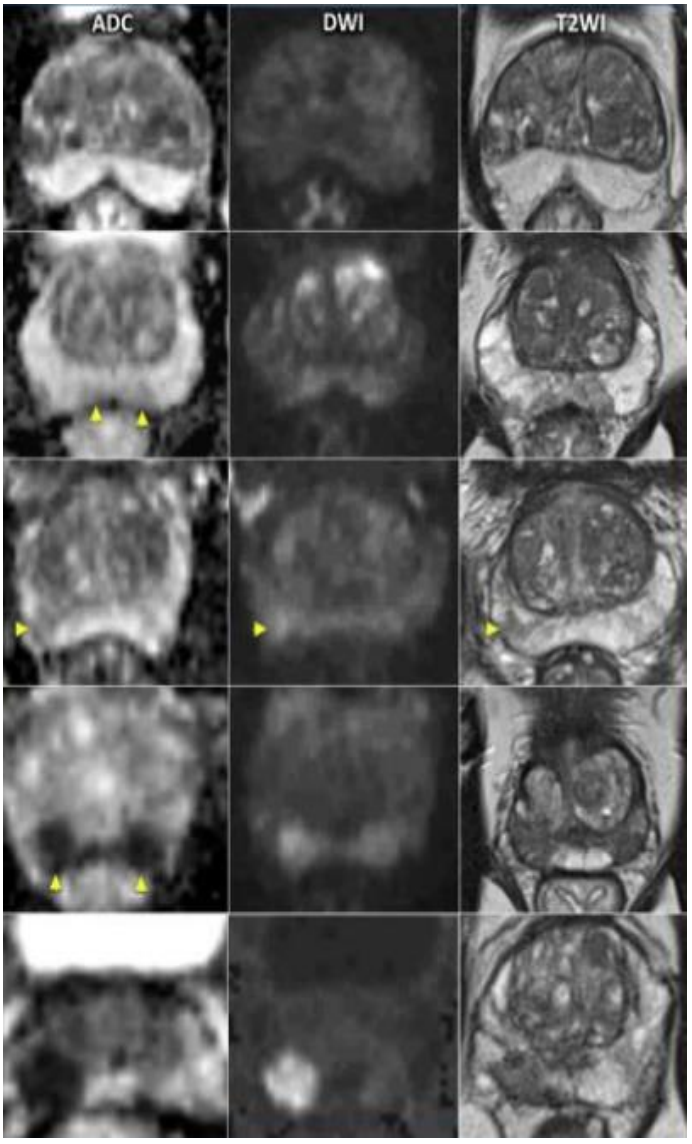
Dado que la secuencia dominante para la evaluación de PI-RADS en la zona periférica es diferente de la zona de transición, la identificación de la ubicación zonal de una lesión es vital.

Zona de transición (TZ)

La zona de transición rodea la uretra prostática y se agranda en los hombres que envejecen como resultado de una hiperplasia prostática benigna. Para la zona de transición, la imagen de T2 es la secuencia determinante principal (técnica dominante) para asignar la categoría de evaluación PI-RADS.

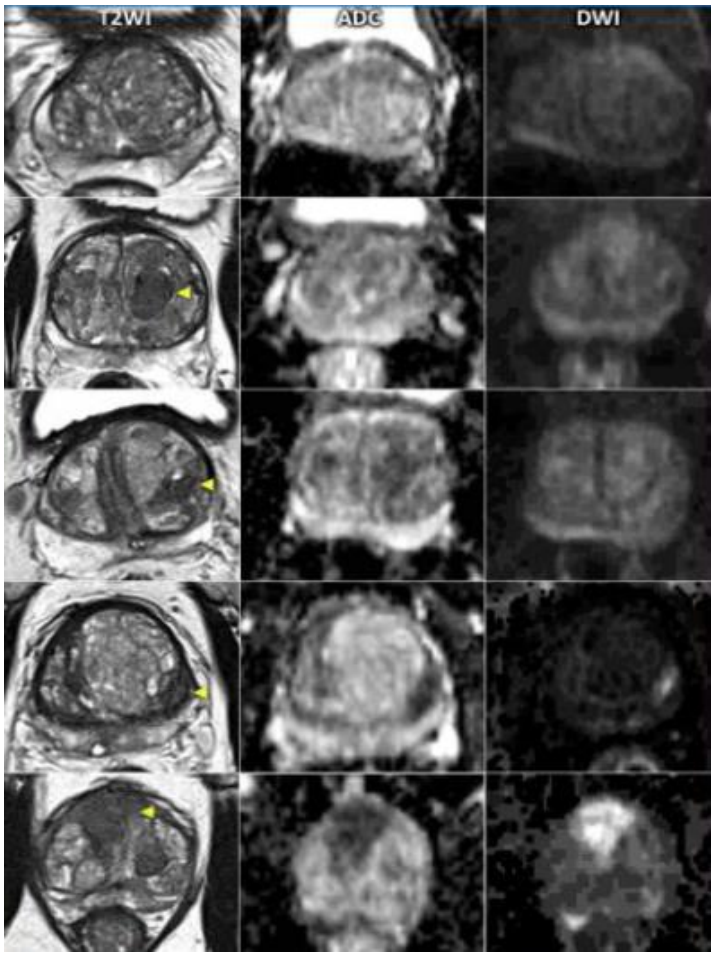
PI-RADS en zona periférica: en la zona periférica, la categoría de evaluación PI-RADS de una lesión se determina principalmente en DWI / ADC y se correlaciona con las imágenes T2W. En la figura 1 se muestran ejemplos de PI-RADS 1-5.

PI-RADS en zona de transición: En la zona de transición, la categoría de evaluación PI-RADS de una lesión se determina principalmente en imágenes T2 y se correlaciona con DWI / ADC. En la figura 2 se muestran ejemplos de PI-RADS 1-5.



1. Normal
2. ADC: Indistinto hipointenso
3. ADC: Focal leve – DWI: iso / hiperintenso leve < 1,5cm
4. ADC: Focal marcadamente hipointenso – DWI: Marcadamente hipointens < 1,5cm
5. Similar a 4 pero > 1,5cm

Figura 1. PI-RADS en zona periférica. Fuente: elaboración propia.



1. Normal
2. Nódulos encapsulados hipointensos o heterogéneos circunscritos
3. Intensidad de señal heterogénea con márgenes oscurecidos
4. Lenticular o no-circunscritos < 1.5cm
5. Similar a 4 pero >1,5cm, [10], [11]

Figura 2. PI-RADS en zona transición. Fuente: elaboración propia.

3. Modelo experimental de clasificación.

En cuanto a modelos de clasificación automática se presenta uno capacitado para discriminar [2], de manera automática, las muestras histológicas de próstata de pacientes sanos con

respecto a las de pacientes enfermos que presentan cáncer en una etapa temprana. El objetivo final es proporcionar un sistema de ayuda al diagnóstico que permita reducir la carga de trabajo, así como el nivel de subjetividad de los médicos especialistas en anatomía patológica a la hora de analizar una determinada muestra como resultado de la biopsia de la próstata. Con la aplicación de técnicas de clustering con la finalidad de encontrar elementos de interés a partir de los cuales identificar unidades de glándula, se implementa un novedoso método de segmentación conocido como *Locally Constrained Watershed Transform (LCWT)* [12], el cual genera a su salida tres tipos de objetos: artefactos, glándulas benignas o glándulas patológicas. En este punto se aplican técnicas de machine learning y técnicas de deep learning, para comparar los resultados proporcionados por ambas aproximaciones y determinar la clase de cada elemento segmentado. Se lleva a cabo una profunda extracción de características haciendo uso de descriptores de forma y de textura, en combinación con características contextuales y un análisis fractal. Se obtienen 297 características que son sometidas a un exhaustivo análisis estadístico para seleccionar únicamente aquellas que presentan información relevante, en términos de correlación entre variables y capacidad discriminatoria con respecto a la clase. A partir de las muestras disponibles procedentes de 25 pacientes (3.200 artefactos, 3.195 glándulas benignas y 3.000 glándulas patológicas) se implementa una rigurosa estrategia de partición de datos para garantizar la robustez de los modelos construidos, así como la fiabilidad de los resultados obtenidos. Una vez llevada a cabo la

partición de datos, se aborda el problema de clasificación desde una perspectiva multiclase aplicando, por un lado, clasificadores lineales y no lineales de machine learning clásico (Support Vector Machine y Perceptrón Multicapa) y, por otro lado, redes neuronales convolucionales, propias del deep learning, basadas en la arquitectura VGG19, [14]. Los resultados obtenidos se comparan con los publicados por otros estudios del estado del arte con la intención de aportar nueva información de cara al cumplimiento del objetivo final, el cual reside en el desarrollo de un sistema de ayuda al diagnóstico precoz del cáncer de próstata ver, [13].

Por otro lado, se aplican modelos de clasificación supervisada con las mediciones extraídas para cada imagen, tales como, regresión logística, arbol de decisión, bosques Aleatorios, Naive-Bayes (Gaussiano), K-vecinos, perceptron multicapa, Naive-Bayes (Bernoulli), clasificador de vectores de soporte, gradiente descendiente estocástico, clasificador de vectores de soporte (Lineal), clasificador de vectores de soporte (Nu-soporte), máquinas de soporte vectorial, haciendo énfasis en los conceptos teóricos adicionales a [2] y [3], conocimientos e investigaciones que contribuyen al apoyo del diagnóstico médico de este tipo de cáncer.

Las entradas serán, por tanto, las mediciones que resultan del proceso en el que se aplica a cada una de las imágenes por paciente; consiste en un filtrado de la imagen para lograr realzar y detectar contornos, las cuales serán los campos del conjunto de datos construido, dichas

medidas en la aplicación del concepto de curva, dimensión fractal, dimensión de Caliper, curvatura absoluta total, flexión de energía, dirección, convexidad, circularidad, compacidad, momentos de Hu, excentricidad, área, longitud de arco, puntos extremos, centroide, convexidad, centro y radio, longitud de eje mayor, longitud de eje menor, orientación, solidez, extensión, diámetro equivalente y dimensión fractal por conteo de cajas, junto con los datos de las coordenadas de la posición de la lesión, la matriz que describe la orientación y escala de la imagen, los valores de i ,j y k siendo la columna, fila y coordenada del corte a encontrar respectivamente, el vector con escalares de espaciado x, y, z, y la posición de la lesión TZ: Zona transicional, PZ: Zona Periférica y AS: Estroma Fibromuscular. Todas las medidas mencionadas se encuentran en pixeles y se realizan considerando el sistema de datos e informe en imagen prostática (PI-RADS), el cual fue creado con el fin de ayudar en la detección, localización del cáncer de próstata con resonancia magnética, con el cual se pretende disminuir la variabilidad en la interpretación de los estudios de resonancia magnética prostática.

El procesamiento de las imágenes de resonancia magnética consta, en primer lugar, de la identificación y marcación de la lesión, por medio de una conversión en escala de grises para cada imagen y como resultado la extracción de todas las mediciones sobre las imágenes binarizadas. Gracias al informe de clasificación, se determina la precisión de los diferentes modelos implementados para la predicción sobre un conjunto de datos de 20 pacientes sin

ningún tipo de valor en la categorización de PI-RADS, teniendo mejor rendimiento en términos de precisión con el clasificador de bosques aleatorios con un 94% de precisión.

El modelo de clasificación demuestra precisión para las predicciones calculadas, más la suma de predicciones positivas y negativas clasificadas divididas sobre el total de los datos. Los bosques aleatorios son realizados con pasos de carga y lectura de datos, limpieza y anomalías, datos faltantes, conjunto de entrenamiento y pruebas, predicciones en el conjunto de prueba, métricas de rendimiento para predicciones, interpretación de modelos e informe de resultados, importancia de variables, y visualización del árbol de decisión.

Se trabajó con imágenes de Resonancia Magnética de uso privado con la colaboración del Instituto Cancerológico.

Los bosques aleatorios crean un bosque aleatorio, con múltiples árboles de decisión, que al combinarlos se obtiene una predicción más precisa y estable. Es un algoritmo que agrega aleatoriedad, donde al dar crecimiento a los árboles en lugar de buscar una característica más importante al dividir un nodo, busca la mejor característica entre el subconjunto aleatorio de características, dando una amplia diversidad y un mejor modelo de clasificación, [15].

4. Modelo Matemático

4.1. Extensión Tumoral

Se define como la proporción del área del contorno respecto al área del rectángulo delimitador:

$$Extensión = \frac{Área\ de\ la\ lesión}{Área\ del\ rectángulo\ delimitador} \qquad (1)$$

4.2. Medida de compacidad

Es una cantidad numérica que representa el grado en la que cierta figura es compacta. En este artículo es lo mismo que el cociente isoperimétrico o el radio entre el área del objeto y el área del círculo (que tiene la forma más compacta) que tiene el mismo perímetro. Más precisamente, para una curva cerrada, la compacidad es calculada por la relación:

$$\boldsymbol{C} \coloneqq \frac{\boldsymbol{4\pi A}}{\boldsymbol{L^2}} \qquad (2)$$

donde A es el área del círculo y L es el perímetro. Además, la desigualdad isoperimétrica asegura que C ≤ 1 (la medida toma como máximo valor a 1, que es cuando la curva es una circunferencia) y equivalentemente, el radio isoperimétrico $\frac{\boldsymbol{L^2}}{\boldsymbol{A}}$ es al menos $4\boldsymbol{\pi}$ para toda curva.

Aquellos objetos que tienen forma elíptica o cuyo borde sea más irregular que suave, haría que la medida decrezca y en especial una curva con forma de cuadrado tiene compacidad igual a $\frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{4}}$

4.3. Redondez o circularidad

Otro factor muy común en este tipo de análisis es la circularidad, que pertenece a la misma familia de cocientes isoperimétricos. Puede ser obtenido como el cociente:

$$\boldsymbol{R}: = \frac{\boldsymbol{4\pi A}}{\boldsymbol{P^2}} \qquad (3)$$

donde A es el área del contorno y P es el perímetro de la envolvente conexa. Esta medida excluye irregularidades locales y de nuevo satisface la desigualdad isoperimétrica para un objeto que se aleja de la forma circular, exceptuando que es relativamente insensible a contornos irregulares.

4.4. Convexidad

Convexidad es una cantidad relativa a que un objeto se distinga de una figura convexa. Una medida de convexidad debería tener las siguientes propiedades básicas:

- La medida de la convexidad es un numero entre (0,1]
- La medida de la convexidad de una forma es igual a 1 si y solo si el objeto es convexo.
- Existen formas cuya medida de convexidad es arbitrariamente cercana a 0, lo que implica que no hay diferencia entre 0 y el mínimo valor posible de la medida.
- La medida de convexidad es invariante bajo transformaciones geométricas apropiadas del objeto.

Algunas veces menor robustez es deseable y se quiere tener efectos más fuertes sobre el valor de la medida, incluso si el objeto solo cambia levemente.

Así que para una forma plana K, donde K ⊆ R^2 es un polígono compacto y conexo, se define convexidad por:

$$\boldsymbol{C}:=\frac{\boldsymbol{Per}(\boldsymbol{CH}(\boldsymbol{K}))}{\boldsymbol{Per}(\boldsymbol{K})} \quad (4)$$

donde *Per* es el perímetro usual y *CH* es la envolvente conexa de *K*.

4.5. Dimensión de Caliper

También conocido como diámetro de Caliper-Feret, mide la distancia entre tangentes paralelas que atraviesan lados opuestos del objeto. Dada una orientación $\boldsymbol{\theta}$, el diámetro de Caliper es:

$$max\ (x\ cos\ (\theta)+y\ sin\ (\theta))\ -\ min\ (xcos\ (\theta)+y\ sin(\theta)) \quad (5)$$

$$(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in\boldsymbol{K} \qquad (\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in\boldsymbol{K}$$

$$(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in\boldsymbol{K} \qquad (\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in\boldsymbol{K}$$

En especial, la altura y el ancho del objeto pueden ser calculadas. En efecto si $\boldsymbol{\theta}$ = 0:

$$\boldsymbol{width}:=\boldsymbol{max}(\boldsymbol{y})-\boldsymbol{min}(\boldsymbol{y}) \quad (6)$$

$$(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{K} \qquad (\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{K}$$

O si: $\boldsymbol{\theta}=\frac{\boldsymbol{\pi}}{\boldsymbol{2}}$: $\boldsymbol{width}:=\boldsymbol{max}(\boldsymbol{x})-\boldsymbol{min}(\boldsymbol{x})$

$$(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in\boldsymbol{K} \qquad (\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\in\boldsymbol{K}$$

4.6. Dirección

Es una propiedad que tiene sentido solamente en regiones alargadas. Si la región es alargada, es decir, cuando el cociente entre la altura y el ancho del rectángulo delimitador que circunscribe el objeto (*object bounding box*), está cerca de 1.

Luego esta medida es la dirección del lado más largo de un rectángulo delimitador mínimo.

Si los momentos del objeto son conocidos, la dirección $\boldsymbol{\theta}$ es calculada:

$$\boldsymbol{\theta} := \frac{1}{2}\boldsymbol{tan}^{-1}\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20}-\mu_{02}}\right) \qquad (7)$$

Donde los $\boldsymbol{\mu_{pq}}$ son los son los momentos centrales de orden p+q. De esta formula es posible observar que la dirección es independiente de todas las transformaciones lineales excepto las rotaciones. Además, recuérdese que los momentos centrales de segundo orden miden qué tan dispersos están los píxeles respecto al centroide del objeto:

- $\boldsymbol{\mu_{20}}$ mide la distribución del objeto en filas.
- $\boldsymbol{\mu_{02}}$mide la distribución del objeto en columnas.
- $\boldsymbol{\mu_{11}}$es un término del producto cruz, representando el diferencial en la dirección en la que aumentan los índices de fila y de columna.

4.7. Descriptores de contorno: energía de curvatura y curvatura absoluta total

Para un objeto con forma irregular, la dirección del contorno es una mejor representación, aunque no es directamente usada como un descriptor de forma como si lo es el centroide, la orientación, el área, etc.

Puntos consecutivos sobre el contorno de un objeto da la posición o dirección y por tanto el concepto de códigos de cadena es necesario. Los Códigos de cadena son una notación para grabar en una lista de puntos que conforman una arista a lo largo de un contorno. Ellos especifican la dirección de un contorno en cada arista en la lista de aristas y cuantifican una de las 8 direcciones, comenzando en el primer valor de la lista y yendo en el sentido de las agujas del reloj alrededor del contorno. Por lo que la dirección son los valores en el código de cadena para la 8-vecindad de la arista (*o 8 connected number schemes*) que también representa una especie de inclinación del contorno, [16]. La tasa de cambio de una inclinación a otra es llamada curvatura. Como un contorno digital es generalmente irregular, conseguir una medida de curvatura exacta es difícil. La curvatura en un punto del contorno puede ser definido por sus segmentos de líneas adyacentes y la diferencia entre inclinaciones de dos segmentos adyacentes es una buena medida de curvatura en el punto de intersección. Esta idea entonces sugiere que la curvatura es una característica local de un objeto.

La curvatura de un contorno en $\boldsymbol{p} = (\boldsymbol{x_i}, \boldsymbol{y_i})$ puede ser estimada desde el cambio de inclinaciones dado por:

$$\boldsymbol{k(p)} := \left\{ \boldsymbol{tan^{-1}} \left(\frac{\boldsymbol{y_{i+k} - y_i}}{\boldsymbol{x_{i+k} - x_i}} \right) - \boldsymbol{tan^{-1}} \left(\frac{\boldsymbol{y_i - y_{i-k}}}{\boldsymbol{x_i - x_{i-k}}} \right) \right\} \boldsymbol{(mod 2\pi)} \qquad (8)$$

Obsérvese que el punto de vértice está en un segmento convexo cuando el cambio de inclinación en el punto es positivo, o de lo contrario el punto se encuentra en un segmento cóncavo si hay un cambio negativo.

Se le conoce como energía de curvatura a la integración del cuadrado de la curvatura *k(p)* a lo largo de la longitud *L* del contorno, e intuitivamente es la energía necesaria para doblar una varilla en la forma deseada. Este es un descriptor de forma robusta que puede ser usada para caracterizar formas:

$$\boldsymbol{E_c} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{L}} \sum_{\boldsymbol{p=1}}^{\boldsymbol{L}} \boldsymbol{k(p)^2} \qquad (9)$$

Además, $\boldsymbol{E_c}$ satisface $\frac{\boldsymbol{2\pi}}{\boldsymbol{R}} \leq \boldsymbol{E_c} \leq \infty$ y el valor de $\frac{\boldsymbol{2\pi}}{\boldsymbol{R}}$ sería obtenido para un círculo perfecto con radio *R* y el valor sería más alto en el caso de un objeto irregular.

Finalmente, la curvatura absoluta es la suma de las curvaturas sobre los puntos del contorno promediado por su respectiva longitud:

$$K_{total} = \frac{1}{L} \sum_{p=1}^{L} |k(p)| \qquad (10)$$

Aquí K_{total}satisface $2\pi \leq K_{total} \leq \infty$. Cuando el objeto es convexo, esta medida obtiene su valor mínimo y un objeto con más irregularidades tendría un valor mayor.

4.8. Momentos de Zernike

Los momentos de Zernike son un tipo de momentos complejos ortogonales donde su kernel es un conjunto de polinomios de Zernike, ortogonales completos, definidos sobre el interior de un disco unitario. Los momentos de Zernike 2-dimensionales Z_{pq}son definidos por:

$$Z_{pq} := \frac{p+1}{\pi} \iint D\, f(x,y) V_{pq}^{*}(x,y) dA \qquad (11)$$

Donde *D* es el disco unitario, *f(x,y)* es la función de intensidad de la imagen, * denota el conjugado complejo, V_{pq}son los polinomios de Zernike y *p, q* son los enteros de modo que $(p - |q|)$ es par y $|q| \leq p$. El entero *p* se le conoce como el orden del momento de Zernike. Si la integral es expresada en coordenadas polares:

$$Z_{pq} := \frac{p+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r,\theta) V_{pq}^{*}(r,\theta) r\, dr\, d\theta \quad (12)$$

y los polinomios de Zernike son:

$$V_{pq}(r,\theta) = R_{pq}(r) e^{-iq\theta} \quad (13)$$

Aquí $R_{pq}(r)$es el polinomio radial ortogonal definido por:

$$R_{pq}(r) := \sum_{s=0}^{\frac{p-|q|}{2}} (-1)^s \left[\frac{(p-s)!}{s!\left(\frac{p+|q|}{2}-s\right)!\left(\frac{p-|q|}{2}\right)!} r^{p-2s} \right] \qquad (14)$$

Ahora, todo lo anterior fue en el caso continuo; pero importa el caso discreto. Así que todas las integrales son reemplazadas por sumatorias:

$$Z_{pq} := \frac{p+1}{\pi} \sum r \sum \theta \, f(r,\theta) V_{pq}^{*}(r,\theta) r \qquad (15)$$

Para calcular los límites de las sumatorias, la imagen (o región de interés) es primero enviada a un disco unitario usando coordenadas polares, donde el centro de la imagen es enviado al origen del disco unitario. Aquellos pixeles que se encuentran fuera del disco unitario no se tienen en cuenta en el cálculo, [17].

5. Análisis de resultados.

Obsérvese que además de las variables mencionadas en [2] y [3] y la convexidad, se consideraron otras variables como los momentos de Zernike, dimensión de Caliper, curvatura absoluta total, flexión de energía y dirección. En donde se realiza una evaluación de la relevancia de atributos construídos a partir de la extracción de mediciones sobre las secuencias de imágenes, excluyendo aquellas con menor valor de importancia debido a que disminuía la precisión de los modelos de clasificación; en particular, los diferentes momentos se encuentran contenidos en los momentos de Hu al ser estos invariantes bajo translaciones, rotaciones, y reflexiones. La convexidad por su parte, generaba solamente un valor y por lo tanto no aportaba a la distinción entre los PI-RADS contemplados, gracias a que se excluyeron dichas variables se obtiene una mayor precisión por parte del modelo de clasificación bosques

aleatorios aumentando la precisión gracias al valor de relevancia para los momentos de Zernike 1,6,7 y 12, que aportan mayor información.

6. Conclusiones

Para el procesamiento de imágenes sus invariantes generalmente pueden ser extraídos desde los momentos. Ellos, por ejemplo, pueden calcular la posición de un centroide, el área, la orientación, entre otras de una imágen o más formalmente de una malla de intensidades de píxeles. Además, es bien conocido que los momentos de Hu, a diferencia de los momentos centrales, tienen la propiedad de que no cambian bajo traslaciones, escalamientos o rotaciones del objeto a analizar. Esto hace que los momentos de Hu sean una de las herramientas más adecuados para un análisis geométrico. Sin embargo, se pueden encontrar otro tipo de métodos analíticas más completas, como lo son los momentos de Zernike. Ellos aparecen desde la aplicación precisamente de un concepto más formal como el de los polinomios de Zernike, que, en el contexto del análisis de formas, brinda la suficiente información como para reconstruir el objeto de manera "ortogonal"; es decir, los valores que son calculados no son redundantes, ni se superponen gracias a la perpendicularidad de dichos polinomios. Y a pesar de que no son invariantes por traslación o por escalamiento, si son independientes de la rotación (gracias a que son funciones radiales). Por todo esto, hace que los dos momentos (Hu y Zernike) tengan mayor trascendencia que los demás parámetros elegidos en este trabajo para el análisis.

Las variables del conjunto de datos son incluidas a los modelos de clasificación y así se da a conocer su rendimiento en precisión logrando comparar resultados finales. Los clasificadores supervisados como los bosques aleatorios se destacan por manejar grandes cantidades de datos con más dimensionalidad, manejar miles de variables de entrada e identificar las más significativas y mostrar la importancia de la variable, superando el método de regresión logística, Naive-Bayes, k vecinos, perceptrón multicapa, clasificador de vectores de soporte(SVM) siendo en la clasificación de las categorías de evaluación el PI-RADS con las imágenes de Resonancia Magnética de ponderación T2 y de difusión DWI-ADC denotando precisión del 94%.

El aprendizaje automático como subgrupo de la Inteligencia Artificial (IA), se refiere al aprendizaje de las computadoras mediante bases de datos, generando algoritmos para la toma de decisiones. En la medicina es un reto entrenar algoritmos para reconocer categorías y patrones para el diagnóstico médico de cáncer de próstata, usando imágenes de resonancia magnética de pacientes unido a los clasificadores supervisados, además de incluir el Sistema de Datos de Informes de imágenes de próstata o sistema PI-RADS. Con esto se logra el desarrollo de un sistema dirigido al soporte del diagnóstico de cáncer de próstata, un proceso que se realiza convencionalmente, teniendo en cuenta el resultado del análisis de los niveles de un Antígeno Prostático Específico (PSA), sustancia que secreta de la próstata, la ecografía transrectal o biopsia de próstata, el tacto rectal realizado manualmente y las tomografías de

resonancia magnética (RM). Estos métodos han mejorado debido al avance de la ciencia y la tecnología, pero donde el diagnóstico sigue dependiendo más de la experiencia del médico profesional encargado de interpretar las imágenes para emitirlo. Por lo que el método de aprendizaje automático unido a la clasificación PI-RADS de clasificación de imágenes que apoyan al diagnóstico de cáncer de próstata, un valioso aporte al diagnóstico médico que agiliza la toma de decisiones.

El Prostate Imaging Reporting and Data System (PI-RADS) se basa en los hallazgos visualizados en secuencias morfológicas de alta resolución T2, secuencias funcionales de difusión y mapa ADC, así como imágenes contrastadas de perfusión, que en su conjunto permiten identificar lesiones sospechosas de cánceres clínicamente significativos. La descripción precisa de los hallazgos en imágenes de resonancia magnética utilizando un lenguaje común con los otros clínicos involucrados, ayuda a acercarnos al manejo individualizado del paciente más adecuado. PI-RADS recomienda seguimiento para pacientes según el puntaje que puede ser 1 ,2 3, 4,5, para asignar el paso a seguir en el tratamiento, esto se logra con la extracción de características geométricas y se realiza la caracterización numérica en pixeles de la lesión, con las categorías de evaluación PI-RADS el medico profesional encargado de emitir el diagnostico final de próstata, tendrá a disposición una útil herramienta como implementación para las imágenes obtenidas por resonancia magnética, el

valor numérico como representación sobre las categorías en evaluación del paciente de las variables extraídas, que sirven de referencia para los clasificadores.

La modelización y la simulación numérica del cuerpo es una investigación que se ha incrementado en los últimos años, el objetivo es conseguir conocimiento sobre el comportamiento mecánico y fisiológico del cuerpo humano, y poder diseñar herramientas para la simulación numérica en ordenador con miras a realizar predicciones y tomar decisiones correctas en la medicina; donde el aporte que las matemáticas ofrecen como la precisión por la cuantificación que proporcionan los métodos, para que las personas puedan establecer aplicaciones y cálculos a la hora de diagnosticar, realizar cirugías y demás procedimientos médicos. Para esto la geometría se usa en el análisis y procesamiento de imágenes, con la aplicación de ángulos, planos y medidas fundamentales. En el momento de realizar un diagnóstico médico, la base del desarrollo científico de la salud está en la matemática con su aplicación de la ciencia de los números, las matemáticas son una herramienta que ayuda a entender con sus números la propagación de una enfermedad y como detenerla, ya que a partir de sus modelos numéricos los médicos tienen la capacidad de procesar, interpretar, comunicar y actuar apoyándose en aspectos numéricos precisos. Es así como el módulo de extracción de características geométricas obtiene la información de cada imagen y donde el módulo de clasificación permite; partiendo de las características de imágenes de resonancia Magnética (T2, DWI, ADC) obtenidas en el módulo anterior, colocar la imagen dentro de una

clase y darle una clasificación. Lo que requiere del estudio de las diferentes características obtenidas de las imágenes y de un algoritmo de aprendizaje que permite clasificarlas después de extraer su contenido.

Reconocimientos.

Institución Universitaria Pascual Bravo, Grupo de Investigación en Telemedicina (GITEM++), Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Python 3.7.1 .

Referencias.

[1] “Una herramienta nueva de aprendizaje automático predice con exactitud el cáncer de próstataIndustriaMedimaging.es.”[Online].Available:https://www.medimaging.es/industria/articles/294777132/una-herramienta-nueva-de-aprendizaje-automatico-predice-con-exactitud-el-cancer-de-prostata.html. [Accessed: 06-Nov-2020].

[2] N. A. Ram, “Clasificadores supervisados del cáncer de próstata a partir de imágenes de resonancia magnética en magnetic resonance images in T2 sequences .,” no. June, pp. 19–22, 2019.

[3] Ramírez; N, Aparicio; E, Gómez; E, “SUPERVISED CLASSIFIERS OF PROSTATE CANCER. A GEOMETRIC STUDY ON MAGNETIC RESONANCE IMAGES T2 WEIGHTED (T2W), BY DIFFUSION (DWI-ADC),” *Congr. Int. electrónica, Control y telecomunicaciones*, vol. 51, no. 1, p. 51, 2018.

[4] J. C. Batlle *et al.*, “Diagnóstico del cáncer de próstata mediante espectroscopia de resonancia magnetica endorectal,” *Arch. Esp. Urol.*, vol. 59, no. 10, pp. 953–963, 2006.

[5] "Diferenciación entre prostatitis y cáncer de próstata utilizando el sistema PI-RADS |." [Online]. Available: https://cbseram.com/2016/06/22/diferenciacion-entre-prostatitis-y-cancer-de-prostata-utilizando-el-sistema-pi-rads/. [Accessed: 06-Nov-2020].

[6] T. Hambrock *et al.*, "Prospective assessment of prostate cancer aggressiveness using 3-T diffusion-weighted magnetic resonance imaging-guided biopsies versus a systematic 10-core transrectal ultrasound prostate biopsy cohort," *Eur. Urol.*, vol. 61, no. 1, pp. 177–184, 2012.

[7] "Cáncer de Próstata - SEOM: Sociedad Española de Oncología Médica © 2019." [Online]. Available: https://seom.org/info-sobre-el-cancer/prostata?showall=1. [Accessed: 06-Nov-2020].

[8] A. B. Rosenkrantz and S. S. Taneja, "Radiologist, be aware: Ten pitfalls that confound the interpretation of multiparametric prostate MRI," *American Journal of Roentgenology*, vol. 202, no. 1. pp. 109–120, Jan-2014.

[9] "The Radiology Assistant : Prostate Cancer - PI-RADS v2." [Online]. Available: https://radiologyassistant.nl/abdomen/prostate/prostate-cancer-pi-rads-v2. [Accessed: 05-Nov-2020].

[10] P. Guzmán F and A. Messina, "Cáncer de próstata, el problema del diagnóstico ¿Es la resonancia multiparamétrica de próstata la solución?," *Rev. Chil. Radiol.*, vol. 25, no. 2, pp. 60–66, 2019.

[11] I. Robles, *Identificacion de Biomarcadores Predictivos ,Pronosticos y de Respuesta al Cancer de Prostata*. 2018.

[12] J. I. Díaz, "Matemáticas y Ciencias de la Salud," pp. 65–67, 2005.

[13] R. Cuocolo *et al.*, "Machine learning applications in prostate cancer magnetic resonance imaging," *Eur. Radiol. Exp.*, vol. 3, no. 1, 2019.

[14] S. L. Goldenberg, G. Nir, and S. E. Salcudean, “A new era: artificial intelligence and machine learning in prostate cancer,” *Nat. Rev. Urol.*, vol. 16, no. 7, pp. 391–403, 2019.

[15] S. Yoo, I. Gujrathi, M. A. Haider, and F. Khalvati, “Prostate Cancer Detection using Deep Convolutional Neural Networks,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2019.

[16] I. Simon, C. R. Pound, A. W. Partin, J. Q. Clemens, and W. A. Christens-Barry, “Automated image analysis system for detecting boundaries of live prostate cancer cells,” *Cytometry*, vol. 31, no. 4, pp. 287–294, 1998.

[17] S. Sarkar and S. Das, “A Review of Imaging Methods for Prostate Cancer Detection,” *Biomed. Eng. Comput. Biol.*, vol. 7s1, p. BECB.S34255, 2016.

[18] Christian, R., Juan, F. O., y-Alejandro, M. C. (2018). Detección precoz de cáncer de próstata: Controversias y recomendaciones actuales. Revista Médica Clínica Las Condes, 29(2), 128–135. https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2018.02.013

[19] Hambrock, T., Hoeks, C., Hulsbergen-Van De Kaa, C., Scheenen, T., Futterer, J., Bouwense, S., ... Barentsz, J. (2012). Prospective assessment of prostate cancer aggressiveness using 3-T diffusion-weighted magnetic resonance imaging-guided biopsies versus a systematic 10-core transrectal ultrasound prostate biopsy cohort. European Urology, 61(1), 177–184. https://doi.org/10.1016/j.eururo.2011.08.042

[20] Nguyen, K., Sabata, B., Jain, A. K. (2012). Prostate cancer grading: Gland segmentation and structural features. Pattern Recognition Letters, 33(7), 951–961. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2011.10.001

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

ARTIFICIAL VISION APPLIED TO MANUFACTURING

Visión artificial aplicada a la manufactura

Luini Leonardo Hurtado Cortés[1], John Alejandro Forero Casallas[2], Víctor Elberto Ruiz Rosas[3]

Abstract

This article presents the results of the implementation of computer vision and image processing projects applied to a part manufacturing process. In a first scenario, three-dimensional computational geometric models of the parts to be manufactured were obtained from the capture and processing of thermographic images. In a later phase of the manufacturing process, a direct measurement system for cutting tool wear was implemented using HD images with image processing software using NI LabVIEW from National Instruments®. And in one of the final manufacturing phases of the parts, the development of a software (UDmetaL Handbook) for the quantitative metallographic analysis of micrographs for hypoeutectoid steels is presented. The software is able to determine the type of steel according to the percentage of

[1] BSc. In Mechanical engineering. M.Sc. In Engineering - Automation, Ph.D. In Engineering - Automation. Current position: Titular Professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: llhurtadoc@udistrital.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1675-9471.

[2] BSc. In Mechanical engineering. M.Sc. In Engineering - Automation. Current position: Assistant Professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: jaforeroc@udistrital.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5884-1350.

[3] BSc. In Mechanical engineering. M.Sc. In Mechanical engineering. Current position: Assistant Professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: veruizr@udistrital.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6798-2534.

carbon and based on this find the mechanical properties of the material with a database that is incorporated into the software. The software's basis of operation is computational analysis through digital processing of metallographic images obtained through experimental laboratory processes using NI LabVIEW software from National Instruments®.

Keywords: Gripper, HAS200, Robotic arm, UGV, Virtual reality environment.

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la implementación de proyectos de visión artificial y procesamiento de imágenes aplicados a un proceso de manufactura de piezas. En un primer escenario se obtuvieron modelos geométricos computacionales tridimensionales de las piezas a fabricar a partir de la captura y procesamiento de imágenes termográficas. En una fase posterior del proceso de fabricación se implementó un sistema de medición directo del desgaste de la herramienta de corte mediante imágenes HD con un software de procesamiento de imagen por medio de NI LabVIEW de National Instruments®. Y en una de las fases finales de manufactura de las piezas se presenta el desarrollo de un software (UDmetaL Handbook) para el análisis metalográfico cuantitativo de micrografías para aceros hipoeutectoides. El software es capaz de determinar el tipo de acero de acuerdo al porcentaje de carbono y con base a éste encontrar las propiedades mecánicas del material con una base de datos que viene incorporada al software. La base de funcionamiento del software es el análisis computacional mediante el procesamiento digital de imágenes metalográficas obtenidas

mediante procesos experimentales de laboratorio por medio del software NI LabVIEW de National Instruments®.

1. Introducción

Los sistemas de visión artificial y el procesamiento de imágenes están cada vez más posicionados dentro de los procesos productivos de la industria. La tecnología actual permite que muchos de los procesos tanto de manufactura como de control estén al nivel de tecnologías que antes se pensaban exclusivamente para la robótica, la inteligencia artificial y sistemas avanzados de investigación. La nueva revolución industrial 4.0 no muestra un panorama más cercano que podemos adoptar para llegar con nuevas y modernas soluciones a las actividades rutinarias del sector industrial manufacturero y en general a diversos sectores. La ingeniería inversa es una aproximación sistemática para estudiar el diseño de dispositivos existentes o sistemas. Es un proceso en el que una pieza fabricada es evaluada sin el beneficio de un cianotipo para la referencia dimensional. Los resultados son entonces revisados, refinados y la pieza es re-manufacturada. Esta es una práctica utilizada frecuentemente, por ejemplo, en la industria automovilística cuando un fabricante compra el vehículo de un competidor y puede desmontarlo y examinar las soldaduras, sellos y otros componentes del vehículo, con el propósito de reforzar sus vehículos con componentes similares. Otro tipo de ingeniería inversa involucra el procesamiento de imágenes 3D de partes fabricadas cuando un

cianotipo no está disponible para remanufacturar la pieza. Para aplicar la ingeniería inversa a una pieza, la pieza es medida en una máquina de medición por coordenadas (CMM); tal y como es capturada, una imagen 3D es generada como una nube de puntos y presentada en un monitor; después de completar la toma de datos, la imagen de la nube de puntos es dimensionada; cualquier parte puede ser diseñada inversamente usando este método.

En el actual enfoque están presentes dos factores primordiales, el desarrollo académico y el desarrollo industrial en Colombia; respecto al ámbito educativo una de las necesidades que se percibe es reconocer la importancia de realizar mediciones de calidad, en este caso específicamente en el desgaste de herramientas de corte, esto en pro de lograr mecanizados seguros y de calidad. En cuanto al ámbito industrial, se entiende muy bien que los accidentes son una de las consecuencias que más sobresale cuando los procesos no se realizan adecuadamente, en el caso de una herramienta de corte si esta se desgasta antes de lo esperado puede generarle a la empresa costos innecesarios, de ahí la importancia de monitorear el estado de la herramienta de forma directa, por lo que surge la pregunta ¿es rentable para una empresa poner en funcionamiento una tecnología de monitorización costosa y desconocida en el país como es la del láser y además dañina para la visión humana? Teniendo en cuenta que la mayoría de las empresas colombianas son microempresas, es probable que muy pocas implanten esta tecnología, puesto que la solución puede llegar a salir más costosa que el problema. Debido a que la compra de maquinaria sofisticada incluye una

capacitación de estos para su mismo cuidado, siendo poco beneficioso para la optimización que quiere realizar la empresa. De esta forma, se demuestra que no termina siendo muy llamativo para las empresas el poner en marcha este tipo de tecnología, sin embargo, implementamos un dispositivo adaptable tanto a un torno, como a un centro de mecanizado, garantizando un sistema de medición de desgaste seguro y que sea asequible para la industria colombiana.

De otro lado, la metalografía cuantitativa se define como las técnicas de muestreo utilizadas para cuantificar los aspectos morfológicos de las imágenes obtenidas de un material mediante microscopía óptica, microscopía de barrido o microscopía de transmisión. Estas técnicas son uno de los métodos más generalizados y efectivos de prueba en la ciencia de los materiales, gracias al gran avance de la tecnología de procesamiento de imágenes metalográficas. Poco a poco se ha venido automatizando este tipo de procedimientos, resultando en equipos y programas especializados en realizar de forma automatizada las pruebas de diferentes normas como la American Society for Testing and Materials (ASTM). De hecho, la misma ASTM ha desarrollado una norma para hacer pruebas de forma automatizada codificada como ASTM E1382 que permite de forma semiautomática la determinación del tamaño de granos de muestras metalográficas. En la actualidad, el análisis cuantitativo de las micrografías se hace de forma manual usando imágenes metalográficas y su análisis requiere en buena medida de la experiencia del profesional encargado para este tipo de estudio. No obstante, este tipo de

análisis manual exige mucho tiempo y puede generar errores por parte del personal, debido a factores humanos como el cansancio visual, provocando que se produzcan errores en la interpretación de características metalográficas como tipo de fases, tamaño de grano, tipo de material, propiedades mecánicas, entre otros. En este sentido, el interés por parte de la academia es la automatización de estos procesos, por ello se han desarrollado aplicativos ya que en el mercado actual el costo de este tipo de programas es muy alto, lo cual para la academia y pequeñas empresas resulta en un costo imposible de pagar, dificultando el desarrollo de la investigación y limitando el uso de los estándares. El software UDmetaL Handbook automatiza el análisis de imágenes metalográficas al determinar de manera sencilla los porcentajes presentes de las fases de una micrografía, utilizando las técnicas de procesamiento de thresholding y morfología digital de imagen, ya que son las que cumplen con los requerimientos de funcionalidad, precisión, tiempo y costo a la hora de determinar las fases metalográficas de aceros hipoeutectoides. Asi mismo, el aplicativo es capaz de determinar el tipo de acero de la norma SAE-AISI de acuerdo al porcentaje de carbono y a su vez encontrar las propiedades mecánicas del material con una base de datos que viene incorporada al software.

Por otro lado, el principio de funcionamiento del sistema propuesto está basado en la utilización de una sola cámara termográfica y en el calentamiento, controlado desde la base, de un objeto para obtener el frente de propagación térmico de toda la superficie del objeto, desde una vista

superior (Figura 1). Con una cámara convencional ubicada de la misma manera, solamente puede observarse una imagen en coordenadas X-Y; pero la cámara termográfica, además, puede entregar el histograma de cada una de las variaciones del comportamiento termográfico de la superficie del objeto. Estos histogramas X-Y pueden organizarse de tal forma que al sumar estos planos de imágenes se logra reconstruir volumétricamente el objeto. Es decir, la velocidad de propagación de la temperatura a ser procesada a través de imágenes termográficas sirve para obtener la tercera coordenada, la coordenada Z.

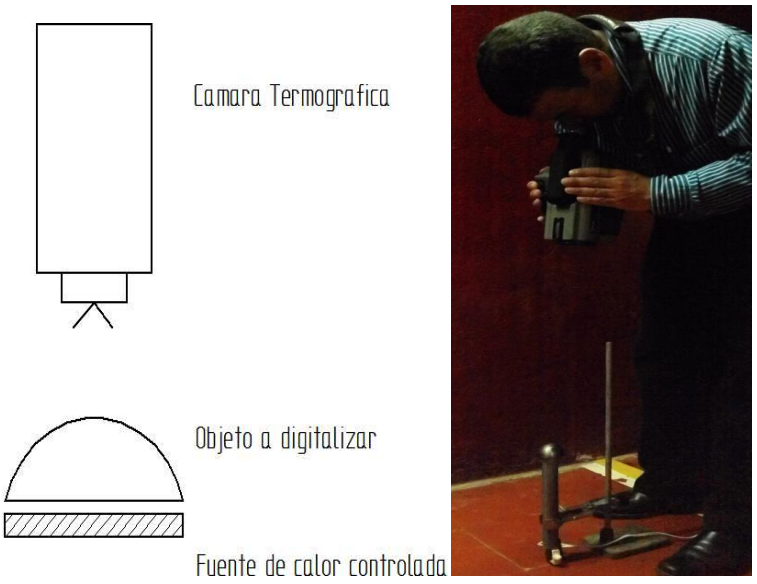


Figura 1. Sistema para digitalización 3D basado en visión artificial por termografía. Fuente: elaboración propia.

2. Materiales y métodos

El proceso metodológico adelantado para lograr la digitalización de piezas mediante el principio de la termografía fue concebido a partir de varias etapas, todas ellas interrelacionadas e indispensables para obtener el modelo digitalizado en 3D. En la primera etapa de este proceso se llevó a cabo la recopilación de información sobre los antecedentes relacionados con sistemas de reconocimiento de imágenes existentes. Con el fin de adelantar las pruebas se diseñó y fabricó la estación de trabajo para digitalización termográfica en 3D. Se desarrolló el estudio matemático de la transferencia de calor con el fin de obtener el modelo matemático que relacione la velocidad en el flujo de calor con la distancia en la coordenada Z. Debido a que no fue posible obtener teóricamente la relación matemática para incorporar en el programa de procesamiento de imágenes, se recurrió a simular computacionalmente el proceso de transferencia de calor para obtener la curva de relación entre la distancia en la coordenada Z y el flujo de calor. Se llevó a cabo el correspondiente diseño experimental con el fin de determinar el número de pruebas a realizar para llegar a la variable de respuesta esperada. Las imágenes fueron capturadas con una cámara termográfica y procesadas en un programa desarrollado en plataforma NI LabVIEW de National Instruments®, adicionalmente fue necesario el post-procesamiento de las imágenes en programas de modelamiento gráfico tales como Rapidform® y Solidworks®.

3. Diseño de las pruebas

Para llevar a cabo las pruebas de captura de imágenes termográficas para fines de digitalización tridimensional fue necesario considerar aspectos importantes como: pieza de estudio, cámara termográfica, fuente controlada de calor, ambiente propicio para los ensayos, sistema de almacenamiento de datos y equipo de cómputo para el procesamiento de imágenes, figuras 2-4. Se decidió que el material de la pieza de estudio fuera un acero comercial AISI 1020, sin importar e las complicaciones que ello trajera al proyecto, siendo este material, de los tres estudiados, el que tiene menor coeficiente de conductividad térmica.

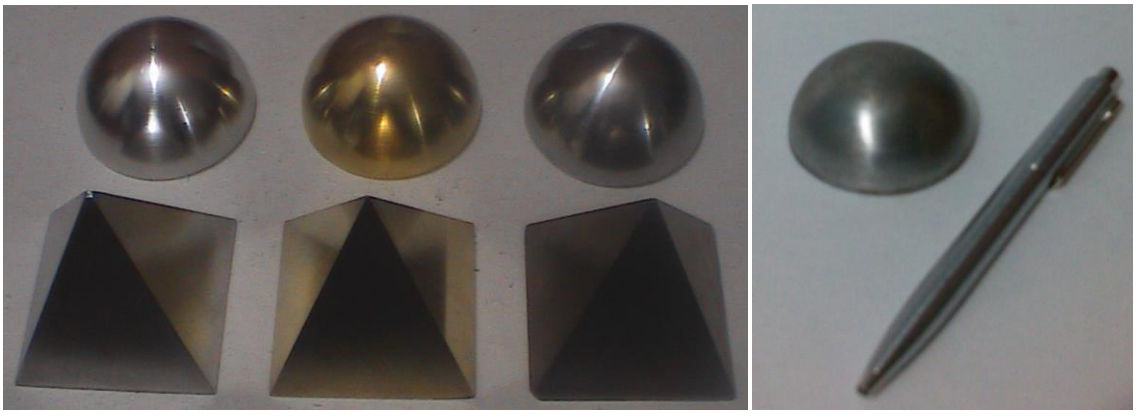


Figura 2. Objetos de estudio en la experimentación inicial (Aluminio, Bronce y Acero). Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Cámara termográfica FLIR PM 675. Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Resistencia eléctrica del sistema de calentamiento. Fuente: elaboración propia.

3.1. Simulación computacional

Con el fin de alimentar el algoritmo de procesamiento de imágenes, se hace indispensable la obtención de la relación entre la velocidad del flujo de calor en la pieza y su correspondencia en la coordenada Z del modelo. Para ello recurrimos al método de los elementos finitos a través del programa ANSYS Workbench®, figuras 5 y 6.

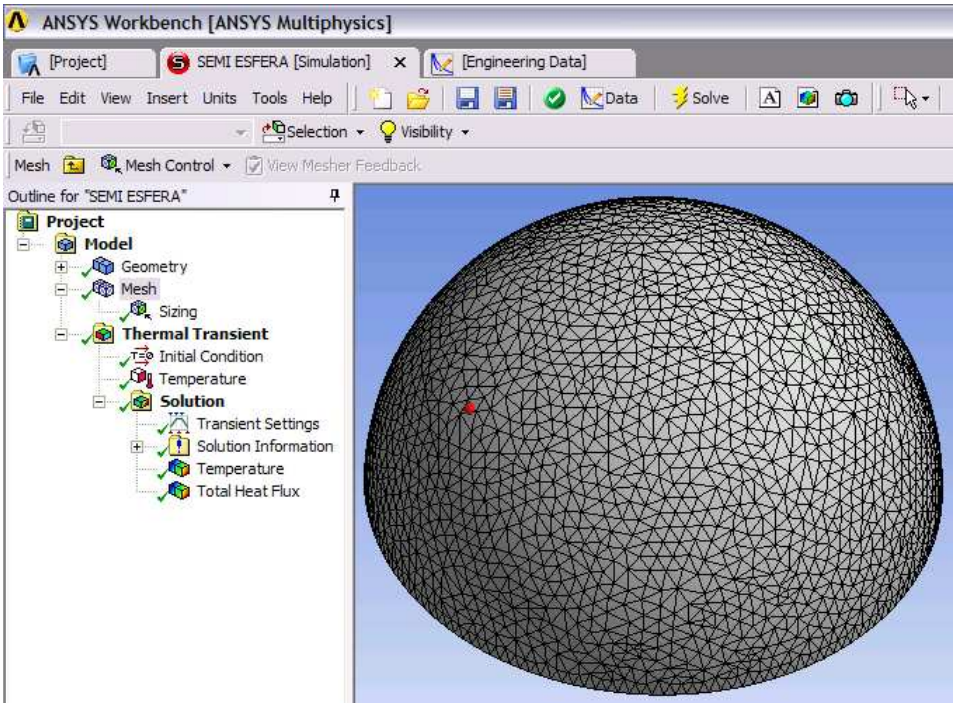


Figura 5. Enmallado de nodos en la semiesfera. Fuente: elaboración propia.

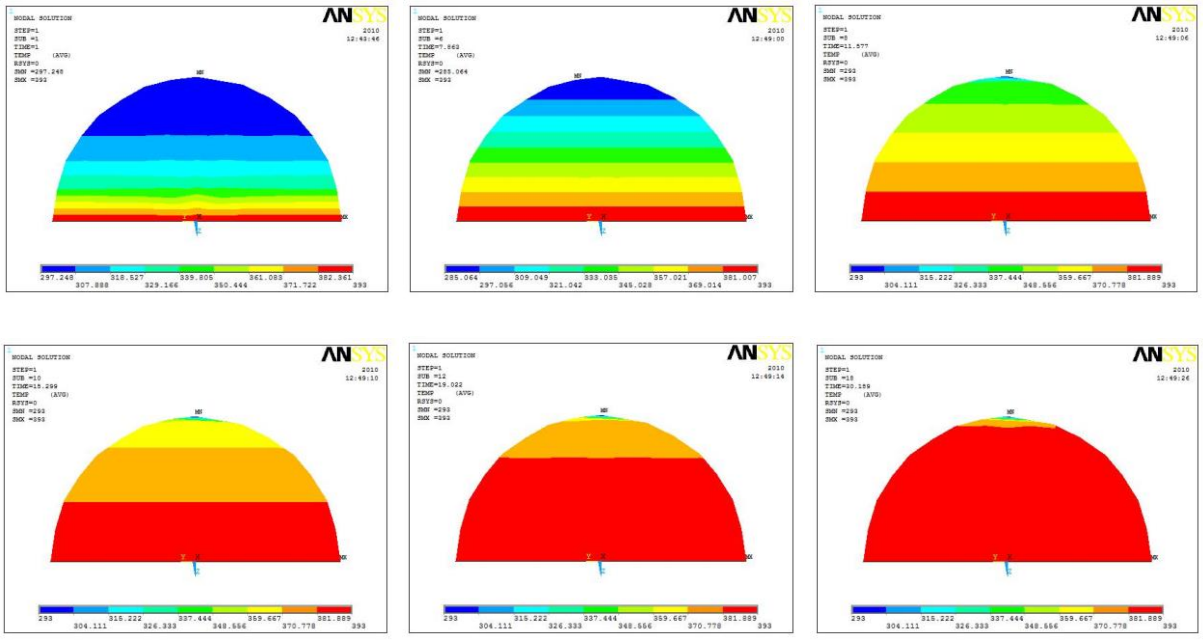


Figura 6. Representación gráfica en ANSYS, del flujo de calor en la semiesfera. Fuente: elaboración propia.

3.2. Software de digitalización

De cada réplica experimental se obtiene un grupo de imágenes como el presentado a manera de ejemplo en la Figura 7. En este grupo se observa el comportamiento de la temperatura durante el tiempo de experimentación, el cual depende de la temperatura última que se tome como referencia para el ensayo. El intervalo de tiempo entre una imagen y la siguiente depende de cada caso específico como se mencionó en el diseño experimental propuesto.

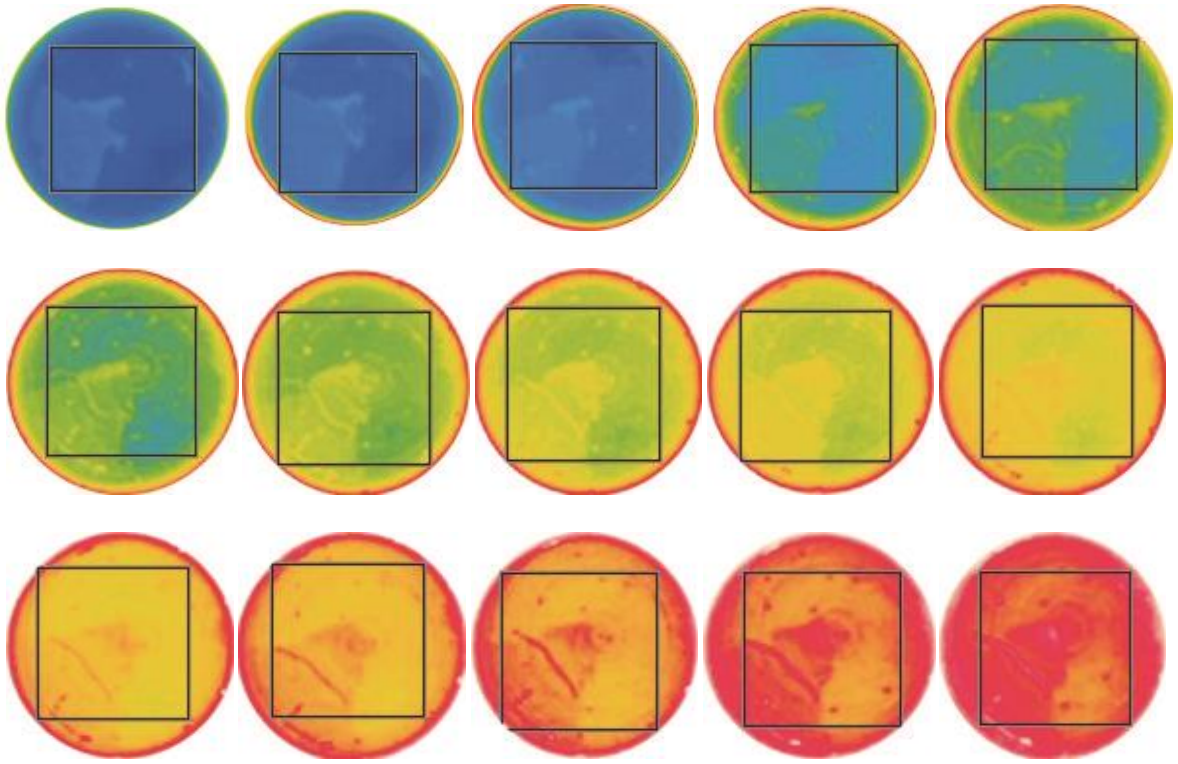


Figura 7. Imágenes termográficas. Semiesfera calentándose desde la base. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de procesar cada una de las imágenes capturadas por la cámara termográfica, se desarrolló un algoritmo en plataforma NI LabVIEW de National Instruments®, capaz de transformar cada una de las imágenes policromáticas en una malla de coordenadas X, Y. La coordenada Z es obtenida en función del tiempo gracias al polinomio obtenido, el cual está incluido dentro del algoritmo, figura 8.

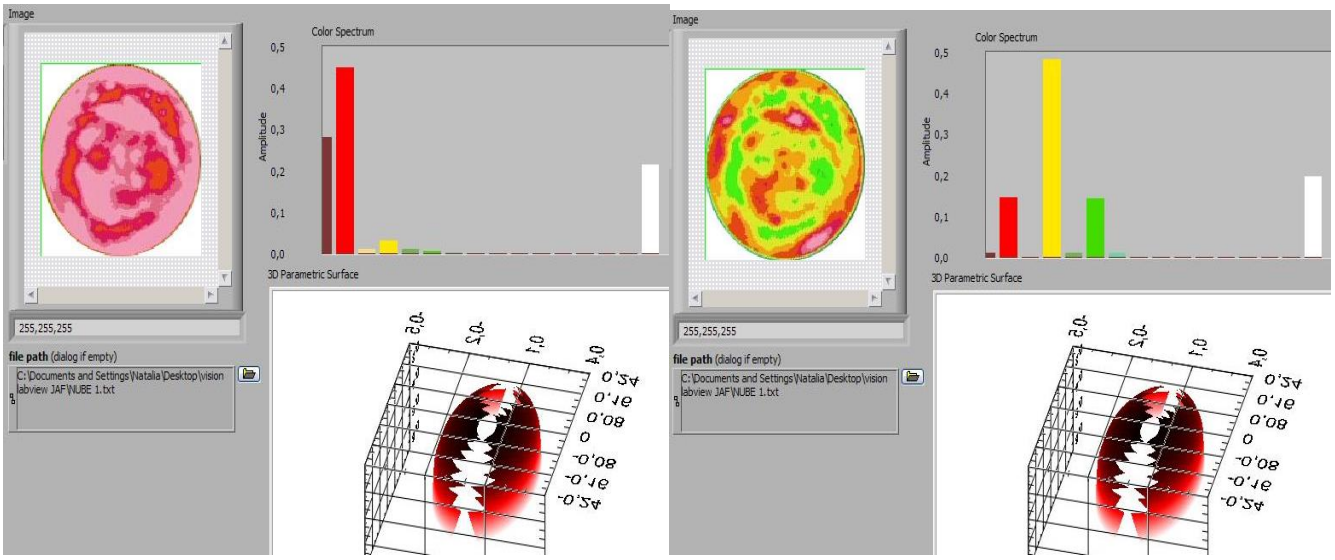


Figura 8. Panel de control del algoritmo de adquisición y procesamiento de imagen. Fuente: elaboración propia.

4. Medición de desgaste en herramientas de corte con visión artificial

El sistema de visión artificial capaz de dar resultados válidos se compone principalmente de un dispositivo de adquisición de imágenes, un sistema de iluminación, estructura, soporte de la herramienta y una adecuada calibración.

4.1. Estado del arte

“Assessment and visualization of machine tool wear using computer visión” es un trabajo publicado en abril de 2006. Presenta técnicas para la medición del desgaste de las

herramientas usando un procesamiento de imágenes digitales. En cuanto al análisis de las imágenes, se utilizó una cámara monocromática de TV CCD (Charge-Coupled Device) o Dispositivo de Carga Acoplada; con la cual se obtuvo una resolución de 768 x 576 píxeles, con el fin de utilizarla para el reconocimiento de texturas. Después de la construcción manual de los histogramas se analiza por medio de una técnica que se conoce como matriz de con-ocurrencia de nivel gris GLCM (gray level co-occurrence matriz), precisan el hecho de que hay 256 valores para la escala de grises y usan una vista periférica del borde de corte principal (VB) en la cual involucra 4 vistas para dar una imagen bidimensional y de esta forma crear una matriz de 256 x 256 para cada una de las dos direcciones de enfoque, de igual forma mencionan la creación de una frecuencia espacial para la refracción de luz en la cámara, la razón a la que se debe su creación es el hecho de que la luz refleja en la superficie del material y altera los datos de medición.

"Machine vision for tool status monitoring in turning Inconel 718 using blob analysis" es un trabajo publicado en el año 2015. Los autores basan su investigación en el proceso de automatización de la manufactura, monitoreando el sistema, con el fin de tener el control del proceso. Este método se basa en la visión de la máquina para determinar el estado de la herramienta con respecto a cada corte, y así determinar el tiempo de vida para luego reemplazarla. Lo que se analiza es el área de desgaste, por medio de tres características, área de desgaste, perímetro y compacidad. Los autores plantean dos formas de reconocimiento del

trabajo de la herramienta, de manera directa e indirecta, donde explican que la primera es por medio de minuciosos análisis y pruebas de laboratorio, los cuales son muy demorados en dar resultados inmediatos, sin embargo, no quiere decir que no sean útiles para poder identificar las zonas de desgaste y la vida de la herramienta. Esta la forma indirecta que indica por medio de otros indicios el desgaste, indicios como el sonido, las vibraciones, las fuerzas de corte y entre otras. Por medio de estos ámbitos y con ayuda de técnicas de visión muestran porque algunas de estas técnicas son las más esperadas para utilizarlas en el trabajo.

4.2. Dispositivo de adquisición de imagen

Este dispositivo permite la toma de imágenes en 2D, Con un sensor 1/4 CMOS de escaneo y una lente de distancia focal variable (2,8 a 8 mm), esta cámara compacta es capaz de capturar imágenes claras y detalladas de los objetos en movimiento. Gracias a la tecnología de compresión H.264, ofrece imágenes nítidas a la vez que reduce el ancho de banda y el espacio de almacenamiento. Las dimensiones de la cámara son 55 x 72 x 168 mm y la conexión se realiza vía Ethernet, tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la cámara Bosch NBC 265 W.

BOSCH NBC 265 W		
	Input voltage	+12 VDC
	Power consumption	4.6 W (max)
	Sensor type	¼-inch CMOS
	Sensor pixels	1280 x 800
	Sensitivity	1.0 lux at F1.2
	Video resolution	720p, 4CIF/D1, VGA, CIF, QVGA
	Video compression	H.264 MP
	Ethernet	10/100 Base-T, auto-sensing, RJ45
	Wireless	LAN IEEE 802.11b/g
	Dimensions with lens (H x W x D)	55 x 72 x 168 mm
	Weight (with lens)	Approx. 255 g (0.56 lb)
	Operating Temperature (Camera)	0 ºC to +45 ºC
	Operating Temperature (Power supply)	0 ºC to +40 ºC

Fuente: elaboración propia.

4.3. Sistema de iluminación

Para la construcción del sistema de iluminación se tuvieron en cuenta diferentes teorías, como la iluminación frontal la cual es muy usada en sistemas de iluminación, consiste en iluminar perpendicularmente la pieza, sin embargo, este método debe utilizar un fondo que disminuya la aparición de brillo, figura 9. Para la medición del desgaste en plaquitas de corte se dispusieron de 8 diodos LEDS a 45° blancos en un anillo de diámetro interno 37 mm y externo 64 mm ubicado, concéntrico al eje del lente de la cámara y creando un campo de luz centrado y constante e incidiendo lo más perpendicular posible al objetivo, lo que permite la facilidad para contrastar los bordes.



Figura 9. Montaje de iluminación. Fuente: elaboración propia.

4.4. Estructura del sistema

El diseño de la estructura se enfocó en permitir los mayores grados de libertad posibles en la sujeción de la cámara, esto permite una amplia posibilidad de posiciones en el instante de adquirir imágenes, se involucraron otros factores como dimensiones de la cámara, peso de la estructura, facilidad de montaje, al igual que debe permitir incorporar el soporte de las plaquitas y el sistema de iluminación, figura 10. Se realizó el diseño y la construcción de la estructura, se fabricó en perfil de aluminio, las dimensiones son 242 mm x 204 mm x 204 mm con un perfil vertical para la variación de posición de la cámara en el eje Z de 450 mm de altura. Dispone de una lámina en acrílico para la ubicación de las plaquitas.

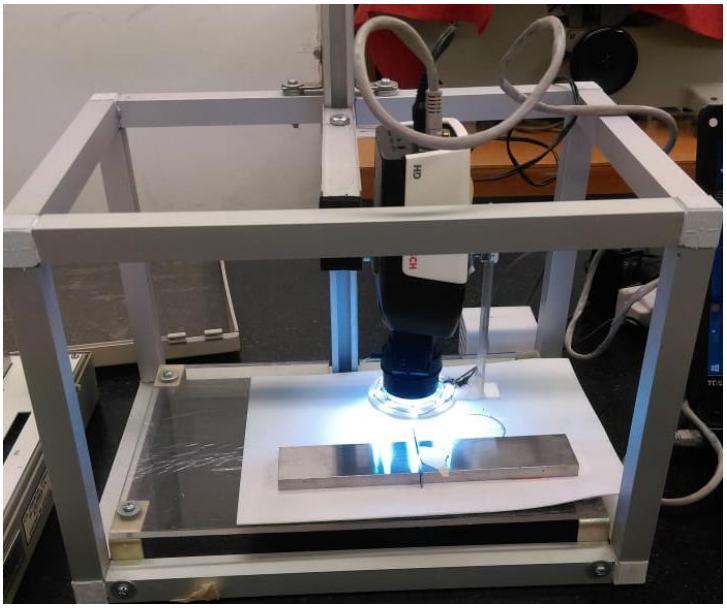


Figura 10. Soporte de la cámara, iluminación y plaquitas. Fuente: elaboración propia.

4.5. Software para la medición de herramientas de corte

El sistema de Visión UD es capaz de medir el desgaste en placas de corte y de objetos en 2D, por medio de un proceso como cualquier sistema de medición. Un proceso debe contar con instrucciones en las que se especifique la forma a proceder, para garantizar la confiabilidad y repetitividad en los resultados. Por ello se construyó un protocolo de instrucciones, explicando los pasos necesarios para realizar medidas confiables en el nuevo sistema de medición. En este se incluyó la instalación previa de controladores, se explica cómo realizar conexiones necesarias para la puesta en marcha del sistema y las instrucciones para medir, figura 11.



Figura 11. Interfaz de usuario con indicador de vida útil color verde. Fuente: elaboración propia.

5. Procesamiento de imagen para el análisis metalográfico cuantitativo

Este desarrollo se divide en tres principales fases: en la primera se creó un Virtual Instrument (VI) exclusivamente para la parte de procesamiento de imagen, luego se desarrolló otro VI que cumple con la etapa de análisis de las fases presentes en cada imagen y así lograr determinar qué tipo de acero es según su contenido de carbono, por último, para cada uno de los aceros clasificados por la norma SAE-AISI se creó un VI con la información representativa tal como: propiedades mecánicas, composición química y equivalencia en otras normas.

5.1. Estado del arte

El procesamiento de imágenes juega un papel importante en el desarrollo de sistemas automatizados en el campo de medicina, biología, ingeniería, arqueología, entre otros. No obstante, en la ciencia de los materiales dichos aplicativos se caracterizan por ser muy limitados y con costosas licencias. Por tal motivo y gracias al avance de la informática y

electrónica, se han desarrollado investigaciones en la creación de software con mayor funcionalidad y de poco costo. En el ámbito internacional el desarrollo de estos sistemas para ciencias de los materiales busca sobre todo la caracterización de fases metalográficas y la determinación del índice del tamaño de grano. En el año 2008, en la Escuela de Información y Ciencia de la Universidad Northeastem de Shenyang (China) los autores (Wenjun, Wu, Zhao, & Shen, 2008), realizaron un estudio detallado sobre los sistemas de reconocimiento y procesamiento de imágenes metalográficas, teniendo en cuenta la caracterización de la microestructura, el área y tamaño de grano, el número de pixeles y la relación de aspecto (Q) que identifica la razón entre la medida de lo largo sobre lo ancho de un grano particular. A su vez se hace una comparación de dos herramientas para el reconocimiento de patrones, los algoritmos de coincidencia o las redes neuronales BP (Back Programation) en donde describe las ventajas y desventajas de utilizar cada una de ellas. La conclusión a la que llegaron los autores para futuros estudios en procesamiento de imágenes metalográficas está en profundizar en el desarrollo de todas las herramientas para reconocimiento de patrones, asimismo, construir una inteligencia híbrida (entre los algoritmos de coincidencia y las redes neuronales BP (Back Programation)) para poder resolver todos los tipos de microestructuras hasta las más complejas en el menor tiempo posible. En la segunda conferencia internacional de procesamiento de imágenes digitales, para el año 2010 en India, los autores (Pattan, Mytri, & Hiremath, 2010) presentaron un programa desarrollado con el fin de clasificar, en base a la

morfología del grano de grafito, los aceros fundidos por medio de redes neuronales. Como base utilizaron dos herramientas diferentes para describir la forma del grano, la primera es los descriptores de forma simple (SSD, siglas en inglés) y la segunda los momentos invariantes (MI).

5.2. Virtual Instrument para la imagen

La interfaz para el usuario en este módulo de procesamiento de imagen está compuesta de dos displays, uno para la imagen cargada y el otro para la imagen con los filtros ya aplicados. También, los controladores (cuadro rojo remarcado en la figura 12) para elegir el tipo de umbralización y el filtro morfológico al igual que el botón para ver los resultados el cual realizará una pregunta de confirmación inicialmente y cerrará el módulo de imagen para dar paso a la fase de resultados. De la misma manera en la figura 12 se observa la interfaz del usuario para el módulo de procesamiento de imagen.

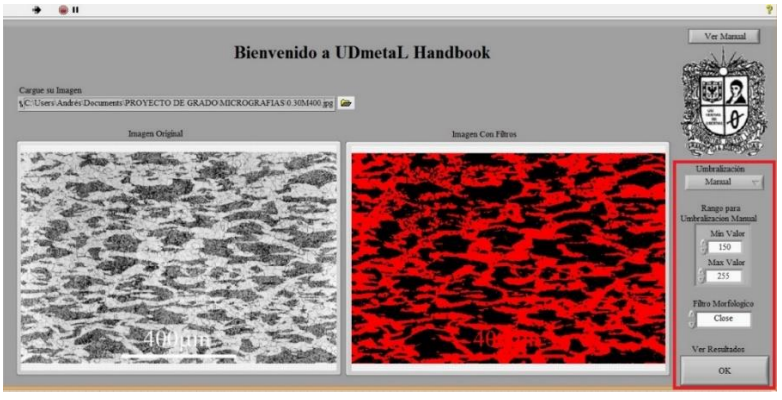


Figura 12. Interfaz usuario módulo de procesamiento de imagen. Fuente: elaboración propia.

5.3. Interfaz de usuario para análisis de resultados

La interfaz disponible para el usuario cuenta con tres indicadores (%Perlita, %Ferrita y %Carbono) con los resultados de la metalografía analizada como se muestra en la figura 13. También, se encuentra disponible los botones habilitados según los diferentes aceros que hayan clasificado entre sus rangos de contenido de carbono, lo cual hace posible que varios botones aparezcan en la pantalla como se evidencia en la figura 13. El botón “salir” permite cerrar la ventana de resultados para iniciar el análisis de otra nueva imagen.

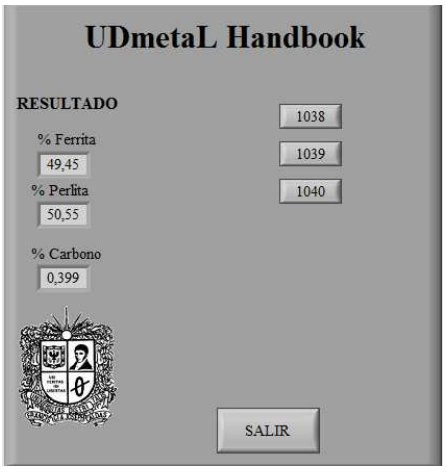


Figura 13. Interfaz usuario análisis de resultados. Fuente: elaboración propia.

5.4. Virtual Instruments aceros hipoeutectoides

Esta es la última fase del aplicativo la cual consiste en crear un VI con la información representativa del material para cada uno de los 36 diferentes aceros hipoeutectoides establecidos en la norma SAE-AISI, específicamente la serie 10xx que designa a los aceros al carbón de grano plano con contenidos de manganeso máximos al 1% (ASM International,

2001). La información brindada al usuario por cada acero se logra ver en la figura 14, en ella se encuentran las principales propiedades mecánicas tales como: el módulo de elasticidad, módulo de compresibilidad, módulo de tensión, resistencia a la tensión, relación de Poisson, entre otras. Estas propiedades son para aceros estirados en frio y los valores se encuentran en los dos tipos de sistemas de unidades, el Sistema Internacional de Unidades y el Sistema Inglés de Unidades.

ACERO

SAE-AISI 1020

PROPIEDADES MECÁNICAS

PROPIEDADES MECÁNICAS	SISTEMA INTERNACIONAL	SISTEMA INGLÉS
Módulo de elasticidad	186 GPa	27000 ksi
Módulo de compresibilidad	148 GPa	21500 ksi
Relación de Poisson	0,29	0,29
Módulo de corte	72 GPa	10400 ksi
Esfuerzo último a la tensión	420 MPa	60900 psi
Esfuerzo de fluencia	350 MPa	50800 psi
Dureza, Vickers	126	126
Dureza, Rockwell B	68	68

COMPOSICIÓN QUÍMICA

% C	% Mn	% P max	% S max
0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050

EQUIVALENCIAS OTRAS NORMAS

ESTADOS UNIDOS (SAE)	1020
ALEMANIA (DIN)	1.0402, C22
JAPÓN (JIS)	S20C
REINO UNIDO (BS)	970 040A20
FRANCIA (AFNOR)	A35-551 XC18
ITALIA (UNI)	5598 1CD20
SUECIA (SS)	1450

Figura 14. Interfaz propiedades del acero seleccionado. Fuente: elaboración propia.

6. Conclusiones

Como resultado de este trabajo de investigación se tiene la identificación de las variables más significativas dentro del proceso de digitalización tridimensional basado en termografía (rango de temperatura y número de imágenes capturadas), y su respectivo rango de trabajo para cada una de ellas. Tanto la temperatura límite de calentamiento como el número de imágenes necesario para reproducir un modelo en 3D, son variables manejables al reproducir el

experimento. Fue desarrollado un software, para la adquisición, procesamiento y posprocesamiento de imágenes termográficas; tendiente a la reconstrucción tridimensional de modelos geométricos en 3D.

El sistema de medición de herramientas de corte por visión artificial puesto en marcha es capaz de medir el desgaste en plaquitas de corte, bajo los criterios de la norma ISO 3685 e ISO 8688 para plaquitas estandarizadas de torneado y fresado respectivamente. La medición se logra mediante un método directo en un tiempo alrededor de los 200 ms, sin afectar la pieza a medir, esto es provechoso en la academia e industria, ya que, optimiza los procesos de mecanizo además no es necesario desmontar la plaquita del portaherramientas.

Se automatizó el procesamiento y análisis de imágenes metalográficas para aceros hipoeutectoides mediante la creación del aplicativo UDmetaL Handbook brindando menor tiempo de análisis de las micrografías. El aplicativo desarrollado es capaz de determinar los tipos de acero SAE-AISI aun cuando las micrografías del mismo tipo de material provengan de diferentes tipos de captura de imagen (p.e.: variación en aumentos oculares, intensidades en policromía, entre otras).

Referencias

[1] Ng, Y.-M. H. Diagnosis of sheet metal stamping processes base on 3-D thermal energy distribution. IEEE Transactions on automation science and engineering. Pp, 22-30. Jan. 2007.

[2] Prakash Surya. 3D mapping of surface temperature using thermal stereo. 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. ICARCV 2006. Pp, 1- 4. 5-8 Dec. 2006.

[3] Fan, Y., X. Li, et al. (2009). "3D numerical simulation on temperature field and flow field in the tuyere of blast furnace (BF) based on the fluent software." Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys 29(4): 324-326.

[4] Cornacchia, T. P. M., E. B. Las Casas, et al. (2010). "3D finite element analysis on esthetic indirect dental restorations under thermal and mechanical loading." Medical and Biological Engineering and Computing: 1-7.

[5] Chethan, Y. D., Ravindra, H. V., gowda, Y. T., & Bharath Kumar, S. (2015). Machine Vision for Tool Status Monitoring in Turning Inconel 718 using Blob Analysis. In Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.124.

[6] Siddhpura, A., & Paurobally, R. (2013). A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65(1–4), 371–393. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4177-1.

[7] Azimi, S. M., Britz, D., Engstler, M., & Fritz, M. (2018). Advanced Steel Microstructure Classification by Deep Learning Methods. Scientifics Reports, 8, 1–14.

[8] Kesireddy, A., & Mccaslin, S. (2015). Using Mathematica to Accurately Approximate the Percent Area of Grains and Phases in Digital Metallographic Images. Lecture Notes in Electrical Engineering, 313. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06773-5.

[9] Kesireddy, A., & McCaslin, S. (2015). Application of Image Processing Techniques to the Identification of Phases in Steel Metallographich Specimens. Lecture Notes in Electrical Engineering, 312. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06764-3.

[10] E. J. Guerra Monterroza, “Reconocimiento de primitivas 3D, usando autocorrelación y ANFIS", Visión Electrónica, vol. 1, no. 1, pp. 56-61, 2008. https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/251

[11] Forero C., J., Bohórquez, C., & Ruiz, V. H. (2013). Medición automatizada de piezas torneadas usando visión artificial. Visión electrónica, 7(2), 36-44. https://doi.org/10.14483/22484728.5507

[12] Forero C., J., Gaitán, D., & Martínez, H. (2018). Recolector autónomo de bolas de tenis mediante vision artificial. Visión electrónica, 7(2), 36-44. https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

RESULTS GENERATED BY BEAMS OF PHOTONS ON A SIMULATED MANNEQUIN IN GEANT4

Resultados Generados Por Haces De Fotones En Un Maniquí Simulado En Geant4

David Leonardo Cañas Varón .[1], Juan David Avilán B.[2], José Manuel Flórez Pérez.[3]

Resumen*:* El presente trabajo valida el software Geant4 en aplicaciones de radioterapia, generando un maniquí con las densidades aproximadas a las del modelo CIRS 002LFC IMRT Thorax Phantom fabricado por la empresa CIRS en USA, el cual es utilizado en controles de haces de rayos X (RX) en aceleradores lineales (LINAC); en este se hace incidir haces de fotones de RX de 6 MeV generados a una distancia de 100 cm de un detector configurado en el software Geant4 el cual se encuentra ubicado en el isocentro del maniquí. El detector mide la dosis absorbida a lo largo de cien cortes en el eje Z. Con los datos obtenidos se logra construir una gráfica en la cual es posible identificar el pico de dosis máxima absorbida en

[1]Licenciado en física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Especialista en Bioingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Máster en Física Médica, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. dlcanasv@correo.udistrital.edu.co.
[2]Estudiante de Licenciatura en física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. jdavilab@correo.udistrital.edu.co.
[3] Físico Universidad Estatal de Kishiniev, Magister Física de Semiconductores Universidad Nacional de Colombia, Magister Propiedades eléctricas y estructurales de película Universidad Nacional de Colombia, Doctor Física de Semiconductores Universidad Nacional de Colombia. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

la figura. Siguiendo las recomendaciones de los reportes técnicos No. 398 de ICRU [1] se genera un detector de agua de forma cubica con dimensiones de 150 cm^3 el cual posee 150 divisiones a lo largo del eje Y, capaz de medir la cantidad de energía depositada adecuado para caracterizar el haz incidente con una cantidad de eventos del orden de 10^6. Demostrando así la viabilidad del código para generar los datos necesarios en simulaciones más robustas para estudios posteriores.

Palabras clave: Geant4, RX, Maniquí, Energía depositada, Dosis.

Abstract: This paper aims to validate the software Geant4 radiotherapy applications, generating a phantom with densities approximated to those of the CIRS 002LFC IMRT Thorax Phantom model, which is used in the characterization and calibration of X-ray beams (RX) in linear accelerators (LINAC), this is incident photon you beam RX 6 MeV generated at a distance of 100 cm from the detector set to Geant4 which is located at the isocenter of the manikin. The detector captures the energy deposited at the indicated depth as well as the dose. As a result, it is possible to build the PDD for a simulated tank and the dose in the isocenter is calculated with a number of events of the order of 10^6, thus demonstrating the viability of the code to generate the necessary data for more robust simulations.

Key Words: Geant4, RX, Phantom, Deposited energy, Dose.

1. Introducción

Según la Sociedad Española de Oncología Médica, el cáncer es una alteración biológica y genética de las células que componen los tejidos de nuestros órganos. El crecimiento descontrolado de estas células crea tumores, los cuales se pueden clasificar en dos tipos; enigno o maligno, se denomina tumores benignos aquellos que no destruyen órganos vecinos. Sí dichas células además mutan, se produce una carcinogénesis; es decir, las células adquieren la capacidad de invadir tejidos y vasos sanguíneos o el sistema linfático y poder desarrollarse en otras partes del organismo a lo que se le denomina metástasis, catalogado como un tumor maligno y llamado cáncer, [2].

En Colombia, tanto en mujeres como en hombres el cáncer se encuentra dentro de las 10 primeras causas de muerte, siendo el de estómago y de tráquea, bronquios o pulmón los más agresivos con una tasa cruda de mortalidad igual o superior al 8,77 por cada 100.000 personas Según el primer informe de la Organización Nacional De Salud, [3].

La simulación con el programa Geant4 el cual tiene como base el método de Monte Carlo permite recrear diferentes geometrías, materiales, tipos de partículas, tipos de haces y detectores, con la física necesaria para poder generar diferentes tipos de experimentos; utilizando las diversas características del software se pueden obtener resultados muy precisos los cuales son una muy buena alternativa a los cálculos analíticos. Existen diversos estudios que estudian el área clínica con radiaciones ionizantes simulando programas en Geant4 debido a la riqueza de sus librerías tanto en la matemática como en la física, [4].

Es importante poder simular los instrumentos de controles de calidad de los centros de trabajo reales en ambientes virtuales con el fin de minimizar peligros por exposición a la radiación y también los gastos tanto de maquina como de dinero que estas prácticas suponen, es por esto que tener el modelo CIRS 002LFC que tiene forma elíptica y representa adecuadamente un torso humano promedio en proporción, densidad y estructura bidimensional en un ambiente virtual para realizar múltiples pruebas es útil. Este Mide 30 cm de largo x 30 cm de ancho x 20 cm de grosor y es avalado por la asociación de físicos médicos americana (AAPM por sus siglas en ingles), figura 1. El maniquí está fabricado con materiales patentados que imitan fielmente el agua, los huesos y los pulmones. Los insertos cilíndricos intercambiables equivalentes a tejido en estos permiten introducir las cámaras de ionización que permiten mediciones de dosis puntuales en múltiples planos dentro del maniquí, [5].

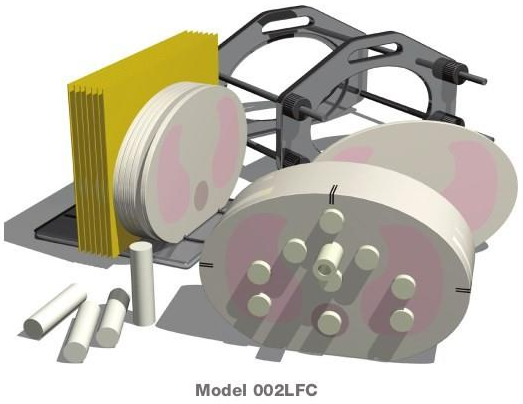


Figura 1: Modelo tórax CIRS 002LFC, imagen adaptada del manual CIRS 2017. Fuente: elaboración propia.

Los diferentes fenómenos físicos inmersos en la simulación son gobernados por las

interacciones de la radiación materia. Entre ellos, los más comunes son: el efecto fotoeléctrico, dispersión coherente o Rayleigh, dispersión incoherente o Compton y creación de pares - estos, para la interacción entre fotones-materia-. En el caso del efecto fotoeléctrico, un fotón es absorbido por un electrón de las capas más cercanas al núcleo de un átomo superficial, la fotoabsorción sólo será posible si la energía del fotón es superior a la energía de ionización de la capa donde yace el electrón, cumpliéndose estas condiciones el electrón es liberado del átomo generando así un flujo de corriente denominada fotocorriente, [6].

Según Attix [7], la dispersión Compton es uno de los fenómenos más importantes en la física de radiaciones aplicadas a las radiaciones ionizantes, esto se debe a que una gran parte de la región energética utilizada en la física médica está dominada por este efecto. Un fotón interacciona con un electrón débilmente ligado. El electrón es dispersado mientras que el fotón incidente desaparece. La energía que es absorbida es remitida en forma de un segundo fotón de diferente longitud de onda que es dispersado a un ángulo de salida.

En tanto, la dispersión coherente o Rayleigh es el proceso por el cual un fotón es dispersado elásticamente por los electrones ligados al átomo, es decir, sin que el átomo sea excitado. En consecuencia, las energías de los fotones incidentes y dispersados son iguales, [6].

Y, la producción de pares es un fenómeno característico de las altas energías donde los fotones interactúan con el núcleo del átomo y generan un par electrón-positrón, sólo si este tiene la energía umbral suficiente, el cual es equivalente a la masa en reposo de dos electrones. Una vez ha perdido su energía, el positrón se aniquila con un electrón produciendo dos fotones, [6].

La configuración de la simulación necesaria para la disposición del tanque se obtuvo del TRS 398 [1] donde se optó por una distancia fuente superficie de 100 cm e ir midiendo la dosis depositada en profundidad manteniendo el tanque estático con respecto a la fuente. En el caso de medir la dosis en el isocentro del CIRS se siguen las recomendaciones de la AAPM descritas en el TG-1151.

2. Materiales y Métodos

b. Sistema operativo

Se usa el sistema operativo Ubuntu 17.04 en un computador portátil Asus, con un procesador Core i7 de octava generación a 1,8GHz, con tarjeta de video incorporada Nvidia de 4GB, disco duro de 1TB y 4 GB de memoria RAM. Los softwares usados fueron; Geant4 10.05, junto con un lenguaje de programación de C++ 7.5.0 y Root 6.18 el cual permite la visualización de grandes cantidades de datos.

c. La simulación

La simulación en Geant4 fue elaborada con una librería de física G4EmPenelopePhysics, la cual permite tener resultados mucho más precisos a la hora de la simulación; ya que esta, facilita el trabajo con electrones, positrones y fotones a diferentes energías. La creación de la simulación fue generada a partir de las tres bases principales del programa sin incluir el manager, estas son; UserDetectorConstruction, UserPhysicsList, UserPrimaryGeneratorAction, en cada uno se define los parámetros necesarios para la simulación; el UserDetectorConstruction nos permite la creación

de volúmenes y geometrías en el mundo o campo de experimento, dentro del cual, se generan tres diferentes volúmenes: el sólido; define forma y tamaño, volumen lógico; definen materiales y campos electromagnéticos y el físico: define la posición de la geometría. En UserPhysicsList podemos indicar la física necesaria definiendo partículas e interacciones deseadas para la simulación y en el UserPrimaryGeneratorAction generamos las fuentes y tipos de haces, [4].



Figura 2: Simulación en Geant4. Fuente: elaboración propia.

El montaje se realizó con la creación de un maniquí con densidades similares a las de tejido adiposo y de pulmón que por defecto Geant4 las toma del NIST, en el centro del mundo, donde se generó un detector de forma cilíndrica con medidas 0.5 cm de R y 2.5 cm de Z, teniendo 100 cortes a lo largo de Z. Ubicado a 100 cm del centro se localiza una fuente de RX capaz de generar haces de 6 MeV de efecto Bremsstrahlung, lo que nos garantiza que los haces sean polienergeticos y se parezcan más a lo real.

Situado debajo de la fuente está el colimador cónico el cual dispone de un orificio de 1 cm de en su punta superior y de 0,25 cm en la parte inferior, creado así para poder tener un campo uniforme de 10X10. El cono, en su parte superior comienza con un radio de 1,5 cm y termina con un radio igual a 2,5 m con 45 cm en h como se muestra en la figura 2.

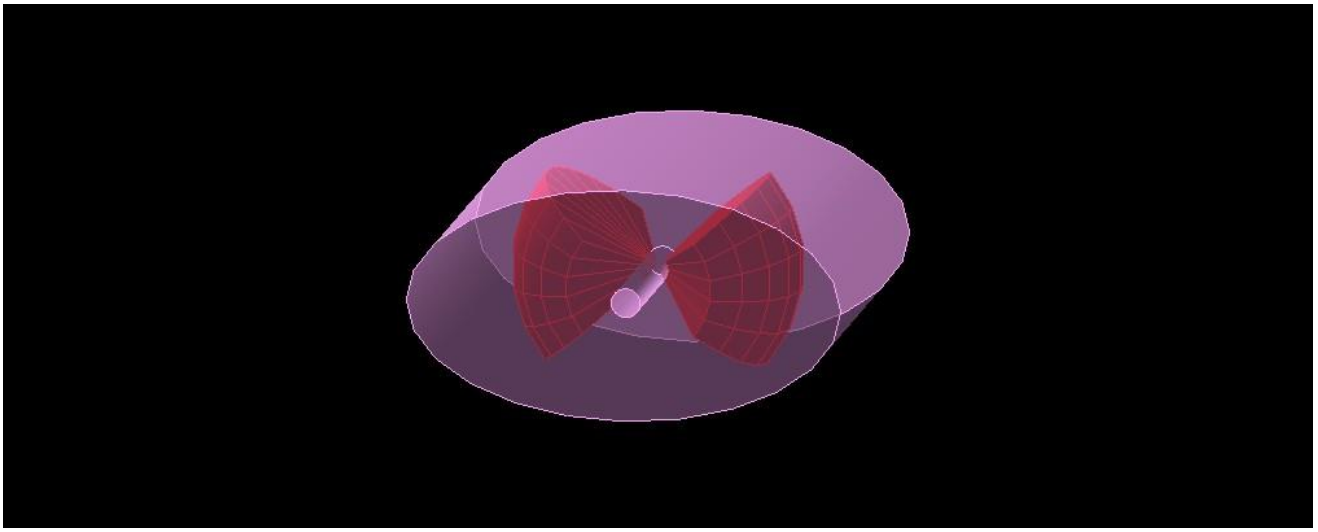


Figura 3: Simulación maniquí con inserto en el isocentro. Fuente: elaboración propia.

La geometría del maniquí está diseñada con las medidas de CIRS 002LFC con inserto en el isocentro, cuyo interior cuenta con dos segmentos de esferas de 20 cm de radio, a las cuales se le retiraron las puntas, para que la geometría sea más fiel a la de los pulmones y cuenta con una densidad aproximada a la de los mismos, la densidad electrónica asociada al resto del maniquí es la de tejido blando ambas tomadas del NIST, figura 3.

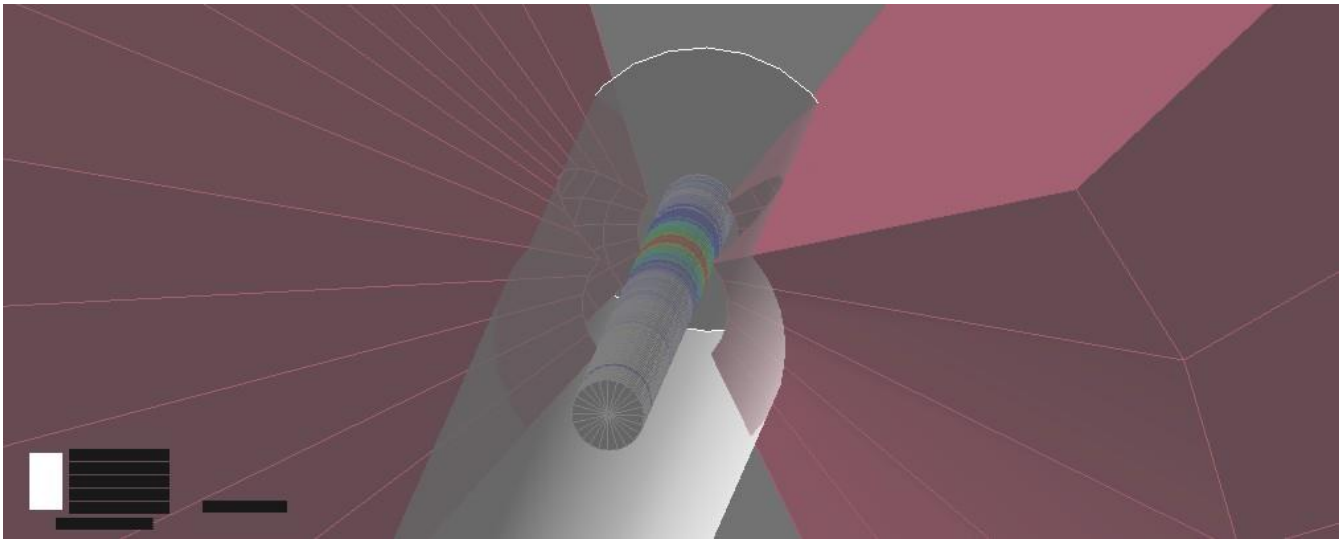


Figura 4: Detector ubicado en el isocentro del maniquí. Fuente: elaboración propia.

El detector está ubicado en el centro geométrico del maniquí y cuenta con una gama de colores que indica la cantidad de interacciones en ese punto de corte, partiendo de gris, azul, verde y rojo siendo rojo el indicador del mayor número de interacciones captadas en ese segmento como se muestra en la figura 4. Además, el detector posee la capacidad de medir la cantidad de dosis y energía depositada en las divisiones y enviar esta información a un archivo de texto (.txt) para su posterior análisis.

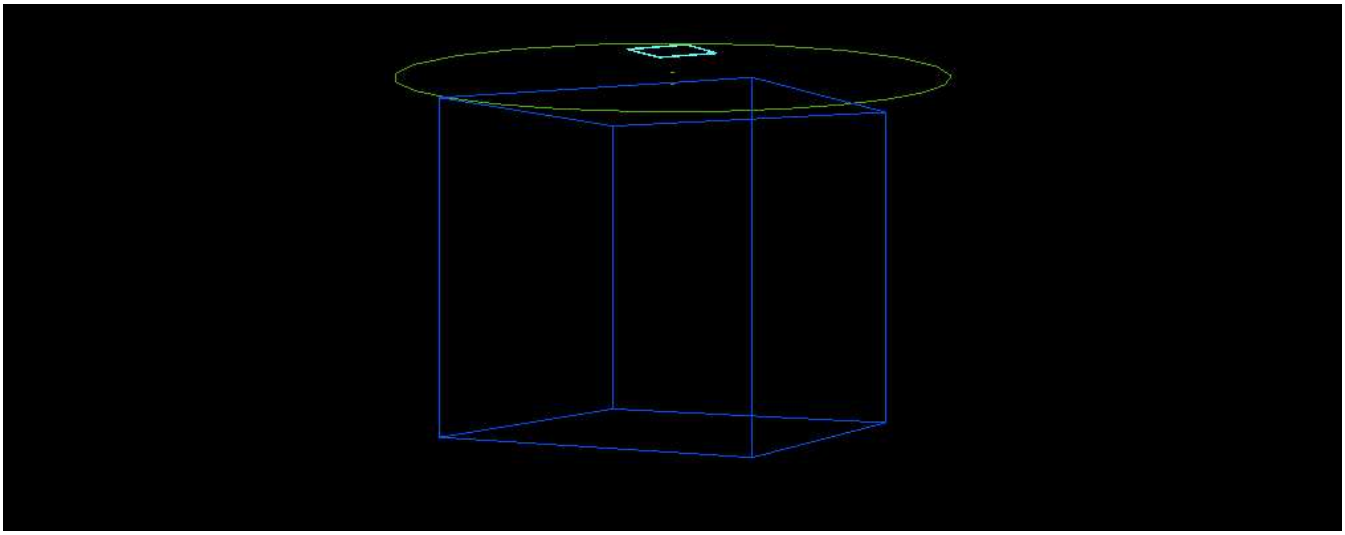


Figura 5: Simulación de un cubo de agua de 150 cm³. Fuente: elaboración propia.

La simulación del cubo de agua se realiza para poder caracterizar el haz mediante una PDD (Porcentaje de Dosis en Profundidad por sus siglas en inglés), siendo todo el cubo el detector con 150 divisiones en el mismo, esto quiere decir, una división por cada cm de profundidad. La geometría es de configuración SSD (distancia fuente superficie por sus siglas en inglés) de 100cm y se mide la dosis conforme aumenta la profundidad en el tanque figura 5.

3. Resultados

Una vez se logró correr la simulación sin problemas, se obtuvieron diferentes gráficas que corroboran el funcionamiento del código a través de la librería G4EmPenelopePhysics, La primera gráfica muestra la dosis que lee el detector en el isocentro, con un valor de 0,05cGy

en su pico más alto, tiene una forma gaussiana debido a la configuración del detector como se mencionó antes. En la figura 4. Se observa la intensidad es mayor en el centro y va disminuyendo conforme avanza a los laterales, coincide con la lectura registrada en la gráfica de la figura 6.

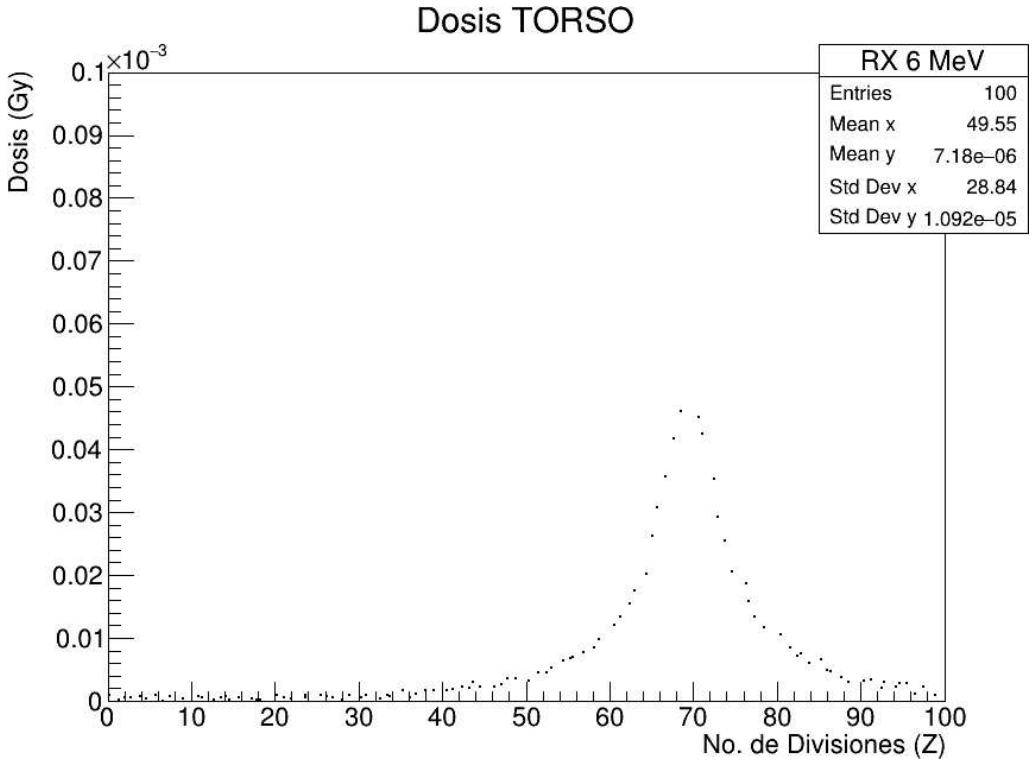


Figura 6: Gráfica correspondiente a la dosis depositada en el isocentro. Fuente: elaboración propia.

La gráfica que corresponde al PDD (Porcentaje de Dosis en Profundidad por sus siglas en inglés) es la figura 7, donde se evidencia las regiones de Buildup, siendo la dosis máxima en 2cm. y con una dosis mínima de 4.4% a los 146 cm de profundidad. como dosis de entrada se

obtiene un 98% en la superficie teniendo en cuenta que está a SSD 100cm.

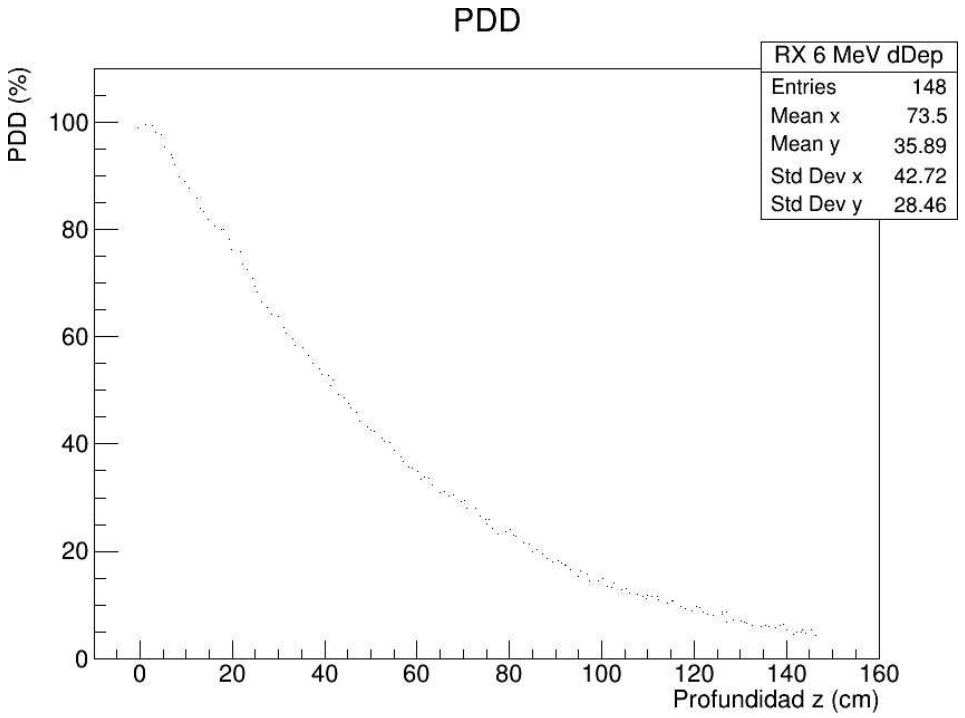


Figura 7: PDD del cubo de agua simulado. Fuente: elaboración propia.

Con lo anterior se demuestra que el código es consistente y puede generar datos más robustos (con más eventos por simulación) dependiendo de la cantidad de eventos que se le asignen al programa, las dosis acá descritas son apreciativas y aún no están listas para compararlas con dosis experimentales de un acelerador, sin embargo se propone para trabajos futuros que se asignen 10^{19} eventos y poder comparar las dosis y PDDs con trabajos de campo en los centros hospitalarios donde se realizan habitualmente controles de calidad. En este trabajo se usaron

menos eventos ya que se pretendía verificar el funcionamiento del código y hacer los ajustes necesarios para que arrojara los datos necesarios para lograr construir las gráficas anteriormente descritas.

4. Conclusiones.

El trabajo demuestra que el código utilizado en la creación de haces de fotones de 6 MeV son viables y permiten conseguir mayor información dependiendo de la configuración empleada en la simulación, para el caso, una distancia fuente-maniquí de 100 cm con un campo irradiado promedio de 10X10, este montaje da como resultado una gráfica en la cual la dosis máxima es de $〚0{,}05X10〛$^(−3) Gy lo cual está un poco alejadas de lo experimental; pero cabe aclarar que la disposición de eventos fue baja al ser comparada con la realidad ya que esta conlleva a un mayor uso de máquina por ende tiempo de procesamiento.

Se deja para trabajos futuros probar el límite de este código y su alcance en el manejo creaciones de eventos para obtener un mayor acercamiento a lo real.

La obtención de gráficas PDD consistentes con los experimentos de control de calidad realizados en aceleradores lineales demuestra que el código es viable y permite adquirir información más robusta para un posterior análisis de un posible tratamiento.

Referencias

[1] S. Andreo, «Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water,» Iaea Trs, Austria, 2000.

[2] Sociedad Española de Oncología Médica SEOM, 2020. [En línea]. Available: https://seom.org/. [Último acceso: 03 2020].

[3] Instituto Nacional de Salud, Observatorio Nacional de Salud, «Primer Informe ONS, aspectos relacionados con la frecuencia de uso de los servicios de salud, mortalidad y discapacidad en Colombia,» Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2011.

[4] F. SALVAT, J. M. FERNÁNDEZ-VAREA y J. SEMPAU, PENELOPE-2006: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport, Barcelona: OECD, 2006.

[5] Computerized Imaging Reference Systems CIRS, *Manual Tissue Simulation & Phantom Technology,* Norfolk, Virginia, 2017.

[6] A. Brosed, Fundamentos de física médica, vol. 1, Madrid: ADI, 2011.

[7] H. Andreo, Fundamentals of ionizing radiation dosimetry, 2017.

[8] Agostinelli, «Simulation toolkit, Nuclear instruments and methods in physics,» *sciencedirect,* vol. 506, nº 3, pp. 250- 303, 2003.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

PRELIMINARY RESULTS SIMULATION OF CONE BEAM XVI WITH GEANT4

Resultados preliminares simulación de haz cónico XVI con GEANT4.

José Manuel Flórez Pérez.[1], David Leonardo Cañas Varón[2], Carlos Daniel López Velosa[3], Johan Sebastian Uscátegui Rodríguez [4]

Abstract

In radiodiagnosis, it is important to know how many doses patients receive in an average irradiation since according to the Quality Control Protocol in General Radiography Units by which the country is governed, it recommends a reference dose for chest imaging of 0.4 mGy in postero-anterior projections and 1.5 mGy for lateral projections, in order to obtain this dose information there are different mechanisms for obtaining it either by means of a set of instruments properly configured in the X-ray system or by means of detailed simulations. In the case of this study, a simulation of a lung phantom is performed in Geant4 software version 10.05, where an approximation of the dose is reached with different points of the phantom distributed from its isocenter. Due to the radiation emitted in the diagnostic imaging of a cone

[1] Físico, Universidad Estatal de Kishiniev; Magister en Física de Semiconductores, Universidad Nacional de Colombia; Magister en Propiedades eléctricas y estructurales de película, Universidad Nacional de Colombia; Doctor en Física de Semiconductores Universidad Nacional de Colombia. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

[2] Licenciado en física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Especialista en BioIngeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Máster en Física Médica, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Current position: University / Organization / Company, Country. E-mail: dlcanasv@correo.udistrital.edu.co

[3] Estudiante de Licenciatura en física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. cdlopezv@correo.udistrital.edu.co

[4] Estudiante de Licenciatura en física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. jsuscategui@correo.udistrital.edu.co

beam tomograph (CBCT), it is necessary to know the accumulated dose in patients when they are frequently exposed to them. The way of obtaining preliminary data is carried out with a representation with 4 radial sources, these emit X-rays with an energy of 120 keV and as a target a geometry of the CIRS thorax phantom 002LFC manikin manufactured by (Tissue Simulation & Phantom Technology is simulated). The number of events emitted by the X-ray source in this work is of the order 106, which is executed with the G4EmPenelopePhysics library. As a result of the above, doses of 25.0 × $10^{-}6$ Gy are obtained at the isocenter. The use of these images for diagnosis of the thorax is limited, however, the contribution of average dose of these is low compared to doses of conventional CTs, which is why it is important to raise awareness of using these imaging techniques more.

Keywords: Cone beam tomography (CBCT), Geant4, Penelope, medium dose.

Resumen

En radiodiagnóstico es importante saber cuánta dosis reciben los pacientes en una irradiación promedio ya que según el Protocolo de Control de Calidad en Unidades de Radiografía General por el cual se rige el país recomienda dosis de referencia para toma de imágenes en el tórax de 0,4 mGy en proyecciones postero-anteriores y 1,5 mGy para proyecciones laterales [1], con el fin de obtener esta información de dosis existen diferentes mecanismos de obtención, bien sean por medio de un conjunto de instrumentos configurados adecuadamente en el sistema de rayos X o por medio de simulaciones detalladas. En el caso de este estudio se realiza una

simulación de un maniquí de pulmón en el software Geant4 versión 10.05 donde se llega a una aproximación de la dosis con diferentes puntos del maniquí distribuidas a partir de su isocentro. Debido a la radiación emitida en la toma de imágenes diagnósticas de un tomógrafo de haz cónico (CBCT), es necesario conocer la dosis acumulada en pacientes cuando se exponen frecuentemente a estas. La forma de obtención de datos preliminares se lleva a cabo con una representación con 4 fuentes radiales, estas emiten rayos X con una energía de 120 keV y como blanco se simula una geometría del maniquí CIRS tórax phantom 002LFC fabricado por (Tissue Simulation & Phantom Technology), La cantidad de eventos emitidos por la fuente de rayos X en este trabajo es del orden 10^6 la cual se ejecuta con la librería G4EmPenelopePhysics. Resultado de lo anterior se obtienen dosis de $25.0 \times 10^{-}6$ Gy en el isocentro. El uso de estas imágenes para diagnóstico de tórax es limitado, sin embargo, el aporte de dosis media de estas es bajo comparado con dosis de CTs convencionales, es por esto que es importante generar conciencia de usar más estas técnicas de adquisición de imágenes por lo que se ha optado por buscar otros métodos como la simulación, en donde se pueda evidenciar la magnitud del daño de dosis excesivas producto de toma de imágenes de Rx.

Palabras clave: tomografía de haz cónico (CBCT), Geant4, Penélope, dosis media.

1. Introducción

Con la aparición del nuevo coronavirus y la enfermedad SARS-CoV-19 se han tenido que desarrollar métodos de detección de pacientes positivos de esta enfermedad y reducir su

propagación. Uno de estos métodos se realiza por medio de la adquisición de imágenes de tórax que sin ser un diagnóstico de primera línea puede ser útil en los pacientes con sospecha clínica de neumonía por SARS-CoV-2/COVID-19 en cuyo caso es recomendable que se realice una radiografía portátil de tórax dado que si se evidencian opacidades parenquimatosas puede sugerir una neumonía por este virus, [2].

En el territorio nacional, además de la aparición de la enfermedad anteriormente mencionada se presenta un alto porcentaje de problemas de salud directamente relacionados con la actividad pulmonar esto se basa en el estudio realizado de la Prevalencia de la Epoc (enfermedad pulmonar obstructiva crónica) en Colombia según PREPOCOL en el 2005 llevado a cabo por la Fundación Neumológica Colombiana, determinó que a nivel nacional 9 de cada 100 personas mayores de 40 años tenían EPOC. Además de ello el cáncer de pulmón, el cual, en estudios realizados durante el período comprendido entre el año 2007 y 2013 ocupaba el segundo lugar en la tasa de mortalidad debida al cáncer para ambos sexos, con un 11,8 % [3] , y una proyección a futuro de un aumento significativo en dicha estadística debido al alto nivel de consumo de tabaco en el país; por ello, hoy en día es considerado como un problema de salud pública, demostrándose así la necesidad de ahondar en el estudio, investigación y tratamiento de patologías pulmonares.

Debido a la exposición a distintos factores tales como la elevada contaminación del aire, el alto consumo de tabaco y la presencia de arsénico y radón en los sistemas de agua potable, aceleran cada vez más las estadísticas anteriormente mencionadas; todos estos factores

acarrean consecuencias negativas para el organismo en general, pero más específicamente para el sistema respiratorio, ocasionando a largo plazo daños irreparables en los pulmones, como el cáncer [4] para las detección de las enfermedades anteriormente mencionadas por la exposición de diferentes factores ambientales e industriales además de la acumulación de dosis de radiación ya sea por radiodiagnóstico o radioterapia que contribuyen a daños colaterales por una mal uso de estas técnicas radiológicas, [5]. Estas afectaciones provocadas por las enfermedades ya mencionadas son detectadas mediante diferentes métodos de radiodiagnóstico, como lo son la radiografía convencional plana y la tomografía computarizada o cómo se conoce por sus siglas en inglés CT (Computerized Tomography), siendo este último el más efectivo [6]. Según estudios realizados para la calibración de estos equipos en el último año, se encontró que la dosis mínima debe ser aproximadamente de 6,8 mGy en giro completo usando este equipo, [7].

Las instituciones médicas en Colombia cuentan en la actualidad con equipos para la radioterapia los cuales se equipan con unidades para adquisición de imágenes y de esta manera mejorar el posicionamiento de los pacientes, uno de ellos es de la casa ELECKTA el modelo Sinergy [8], este contiene un CBCT y un acelerador lineal de megavoltaje. El primero de ellos (CBCT), en el cual está basado este estudio, de forma que se pueden detectar órganos afectados por células cancerígenas u otras patologías, mientras que el segundo (acelerador lineal de megavoltaje) ayuda directamente con el proceso de radioterapia.

Con base a lo anteriormente expuesto se hará una estimación de que tan viable es simular

este tipo de radiación en una geometría común para el equipo Synergy.

2. Materiales y métodos

d. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es el resultado de la interacción de un fotón con un electrón que está en las capas internas del átomo, ubicado en la superficie de un material, al efectuarse esta interacción (fotón-electrón), se tiene como resultado un electrón expulsado por el átomo dejando una vacante, a este electrón se le denomina fotoelectrón, éste puede ser expulsado solo con una energía específica debido a la ligadura de los átomos en la superficie del material a irradiar, [9].

Desde el punto de vista de la formación de la imagen radiológica, el efecto fotoeléctrico produce imágenes de excelente calidad por dos razones: en primer lugar, porque no origina radiación dispersa y en segundo lugar porque aumenta el contraste natural entre los distintos tejidos. El contraste en la imagen se debe a que algunos tejidos absorben mayor número de fotones que otros y, por tanto, aumenta cuando las diferencias de absorción en los tejidos adyacentes son grandes. Este efecto contribuye a toda la absorción de dosis en el paciente ya que toda la energía del fotón es absorbida, [9].

Efecto Compton

En el efecto Compton, el fotón interactúa con un electrón de las capas externas del átomo de

forma elástica débilmente ligado que se puede considerar como libre [10]. Esta interacción da como resultado la ionización del átomo, un fotón secundario (dispersado) adquiere una parte de la energía del fotón y un electrón de menor energía liberado toma la energía restante del fotón, como consecuencia de ello el electrón Compton pierde energía produciendo ionizaciones y/o excitaciones.

La dispersión Compton proporciona, por tanto, menos contraste entre tejidos con distinto número atómico promedio que el efecto fotoeléctrico, excepto a altas energías para las que el fotoeléctrico es más improbable, [11]. Además, los fotones dispersados en este proceso pueden ser emitidos en cualquier dirección, dando lugar a un velo uniforme sobre la imagen que deteriora su contraste, [9].

En resumen, las interacciones por efecto fotoeléctrico son deseables desde el punto de vista de la calidad de la imagen porque proporcionan un alto contraste sin producción de radiación dispersa, pero desafortunadamente la dosis impartida al paciente es más alta que cuando se produce la interacción Compton. En consecuencia, la elección del kV adecuado para la obtención de una imagen radiológica ha de ser un compromiso entre los requerimientos de baja dosis y alto contraste, [10].

Con el software Geant4 versión 10.05 se simuló un maniquí de pulmón en el cual se inciden haces de 120 kV como los que produce un equipo CBCT, este maniquí cuenta con una geometría similar al del maniquí CIRS tórax phantom 002LFC**,** los datos obtenidos de esta irradiación se comparan con resultados encontrados a partir de medidas en un LINAC Elekta

que cuenta con un sistema XVI y es de tipo CBCT.

e. CIRS tórax phantom 002LFC

Este maniquí está diseñado para abordar planes de tratamiento que simula el tórax, conteniendo una resina epoxi semejante a los tejidos del cuerpo humano. El CIRS tórax phantom 002LFC, cuenta con una forma elíptica y una estructura bidimensional similar a la de un torso promedio en proporción y densidad como lo establece NIST y sus parámetros técnicos incluyéndose el código de relleno de este con tejidos catalogados, como se muestra en la figura 1, sus medidas son de 30 cm de ancho, 30 cm de largo y 20cm de espesor. Según lo establecido por el por el NIST el maniquí puede ser irradiado en un rango de energía entre los 50 keV a 25 MeV gracias a los materiales que está diseñado. Además, permite la inserción de cámaras de ionización con las cuales se pueden adquirir medidas de dosis en múltiples planos dentro del maniquí.

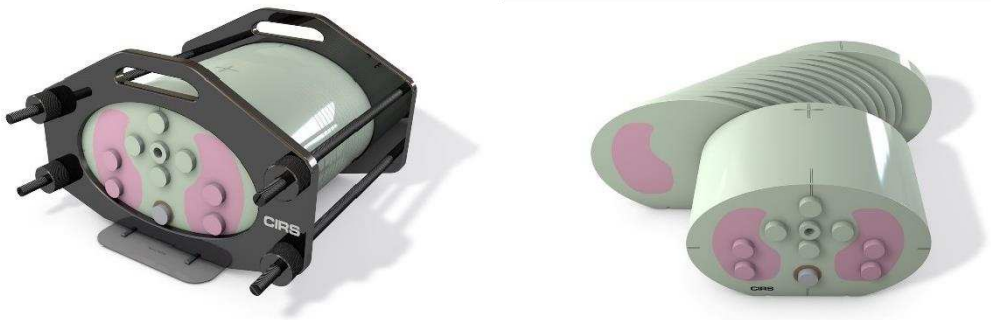


Figura 1. Diseño del maniquí CIRS 002LFC, [12].

f. XVI ELEKTA

El XVI Elekta es un equipo para la obtención de imagen digital y su uso garantiza el correcto posicionamiento del paciente en radioterapia. Contiene un panel de imagen en kV, este consta de un tubo de rayos X y un panel detector de imagen por radiación construido de silicio amorfo. Se instala perpendicular al cabezal de tratamiento. Dispone de un colimador multilaminar (MLCi) de 80 láminas de 1 cm de anchura en el isocentro optimizado para su uso en IMRT y colimadores primarios superiores para la minimización de la dosis entre láminas, [13]. El tubo generador de rayos X proyecta imágenes planares en el detector al otro lado de la mesa de tratamiento, esto hace que el XVI adquiera imágenes bajo el control del programa adecuado y a partir de ellas reconstruye las imágenes volumétricas que serán comparadas con el CT de simulación, [14]. Existen tres modos de adquisición de imágenes los cuales son Planar View este consiste en la obtención de una una sola imagen estática promediando una serie de registros, Motion View el cual adquiere una serie de imágenes bien con el brazo estático o en rotación. Esta película muestra el movimiento de los órganos y para finalizar el Volume View consiste en adquirir un conjunto de imágenes mientras el brazo rota (mín 187.5°, máx 360°). Una adquisición de 360° recoge unas 650 imágenes. XVI analiza las imágenes y reconstruye los volúmenes en 3D para ser comparados con el CT de la simulación, figura 2.

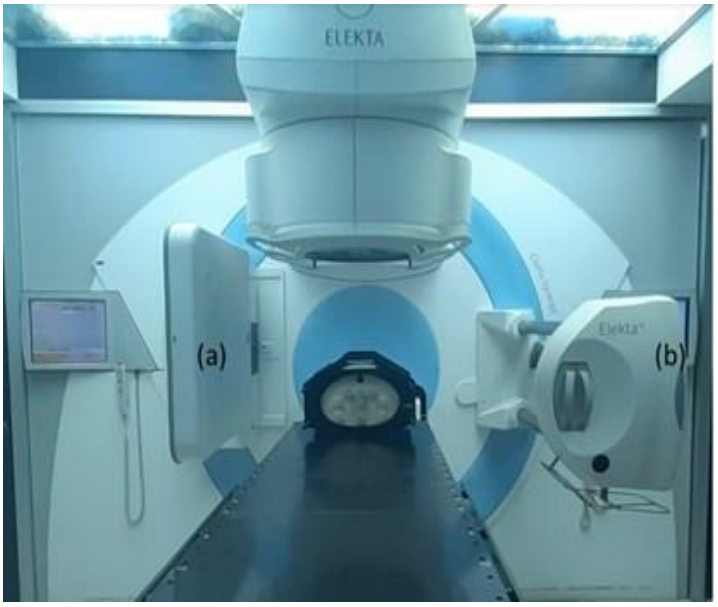


Figura 2. Acelerador Synergy con sistema XVI Imagen. (a)Panel plano, (b) Tubo RX, colimadores y filtro, [15].

g. Geant4

Este software fue creado para trabajar en altas energías y simular experimentos probados en el CERN, con el desarrollo de este se han encontrado aplicaciones en otras áreas como la física médica, que a pesar de que en esta área se trabaja con bajas energías [16], usando la librería de G4EmPenelopePhysics en las simulaciones se optimizan los datos para tener un acercamiento de dosis comparables con los equipos de CT, [17].

Para simulación trabajada del phantom Geant4 utiliza una estructura que exigen en su programación cinco procesos para su compilación y desarrollo llevando el siguiente orden:

i. Construcción: en esta parte que es donde se establece la geometría, en donde Geant4 permite al usuario describir los volúmenes en una configuración o detector, incluyen formas completas

simples, cajas, tubos completos (cilindros), esferas y conos; otros usan una herramienta llamada Geometría de sólidos construidas (CSG) y un conjunto de sólidos "específicos" [18], a partir de estas herramientas que cuenta el software se trató de hacer un maniquí lo más parecido posible al CIRS 002LFC, figura 3.

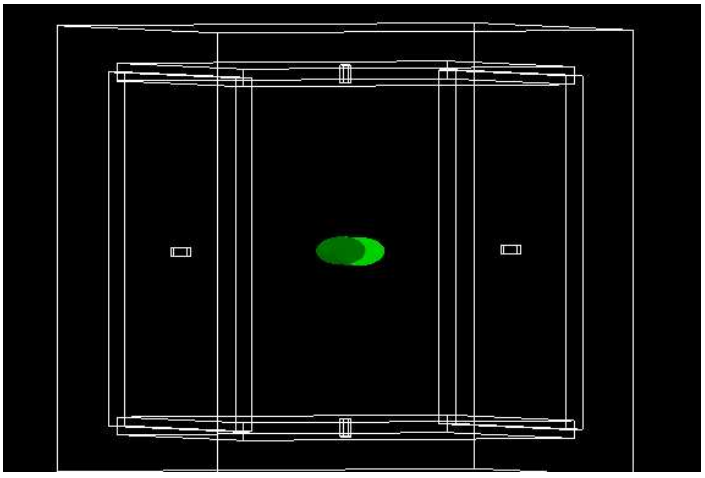


Figura 3. Diseño del maniquí CIRS 002LFC desarrollado en el software Geant4. Fuente: elaboración propia.

ii. WorldVolume: es en donde se contienen todos los volúmenes específicos que se deben tener en cuenta para la construcción de la simulación, en donde se divide en 3 partes.

- Volumen sólido: se define forma y tamaño.
- Volumen lógico. Se definen materiales y campos electromagnéticos.
- Volumen físico: define la posición.

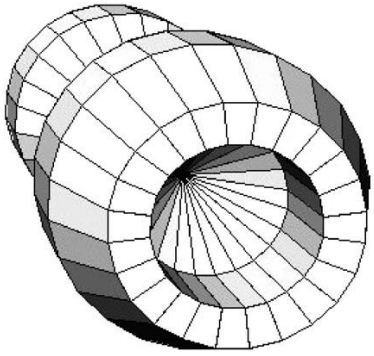


Figura 4. Ejemplo de un sólido realizado en Geant4 llamado policone, tiene secciones cilíndricas y cónicas que comparten un eje común, [18].

iii. Lista física: donde se define la lista física, que incluye las partículas y fenómenos físicos que ocurren producto de las interacciones en la simulación (Allison, 2006,). El seguimiento de todas las partículas en Geant4 se realiza mediante una clase G4SteppingManager, figura 4. Cada tipo de partícula (electrón, gamma, positrón, protón, pion +, ion) tiene su propio administrador de procesos que contiene la lista de procesos que representan la interacción física o acciones alternativas, como el encuentro de límites geométricos (transporte), [18].

iv. Acción: Esta clase, la tercera y última de obligatoria implementación por parte del usuario, debe derivar de UserPrimaryGeneratorAction y es la que se encarga de generar las partículas primarias en la simulación. Aquí se deben definir las partículas se crearán como primarias, establecer las distribuciones de energía, posición y momento e invocar el generador adecuado para lanzarlas en la simulación, [19].

3. Resultados y análisis

La máquina que se utilizó para esta simulación y la obtención de datos cuenta con un procesador de 4 núcleos AMD A8-7410 AP con una tarjeta gráfica AMD Radeon R5 y una memoria RAM de 8 Gb. Basándose en las dimensiones del maniquí se construyó un volumen en la simulación con Geant4, ubicándolo en el volumen lógico como se muestra en la imagen donde está a un metro de distancia el isocentro del maniquí a las fuentes,

De esta simulación se logró ajustar las fuentes de acuerdo con lo planteado, donde cada una de ellas está definida según la geometría del CBCT, los eventos necesarios para obtener los resultados fueron de $2 * 10^6$ que son suficientes para obtener las gráficas de dosis en cada uno de los lugares especificados, a continuación, se muestran los resultados de la simulación.

El isocentro de la simulación se ubicó dentro del centro geométrico del maniquí CIRS, las fuentes se alojaron a 100 cm de distancia del isocentro y se dejaron en 0°, 90°, 180° y 270° como se muestra en la figura 6, la configuración de los haces se dejó cónica con el fin de simular el haz cónico. En la constricción del maniquí se hizo bajo materiales proporcionados por NIST con densidades similares a las de un tejido adiposo, figura 5.

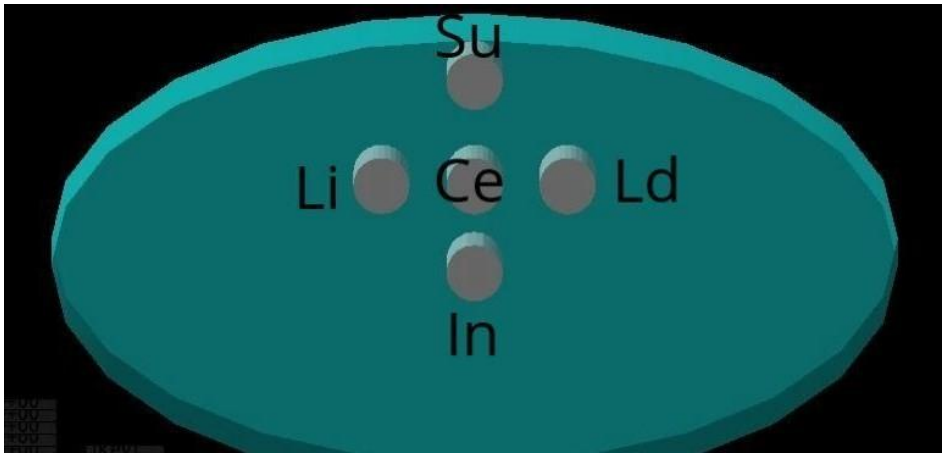


Figura 5. Simulación del CIRS tórax phantom 002LFC con su respectiva cámara de ionización ubicada en sus respectivas ubicaciones (inserto superior (Su), inserto inferior (In), inserto lateral izquierdo (Li), inserto lateral derecho (Ld), inserto céntrico (Ce)). Fuente: elaboración propia.

Las mesh son divisiones hechas dentro del volumen sólido para medir la energía y la dosis acumulada punto a punto dependiendo de las iteraciones generadas por Geant4 pueden o no leer información de dosis o energía depositada, [20].

Cada inserto cuenta con unas divisiones en las tres coordenadas cilíndricas de 10x10x10 debido a las especificaciones del software, en donde se tomaron solo las divisiones radiales para la acumulación de dosis a profundidad de los insertos. Cada división acumula la información recibida a punto de las interacciones producidas punto a punto, se define de forma radial cada 1mm la mesh que es nuestro detector para la adquisición de esta en función de la profundidad, figura 6.

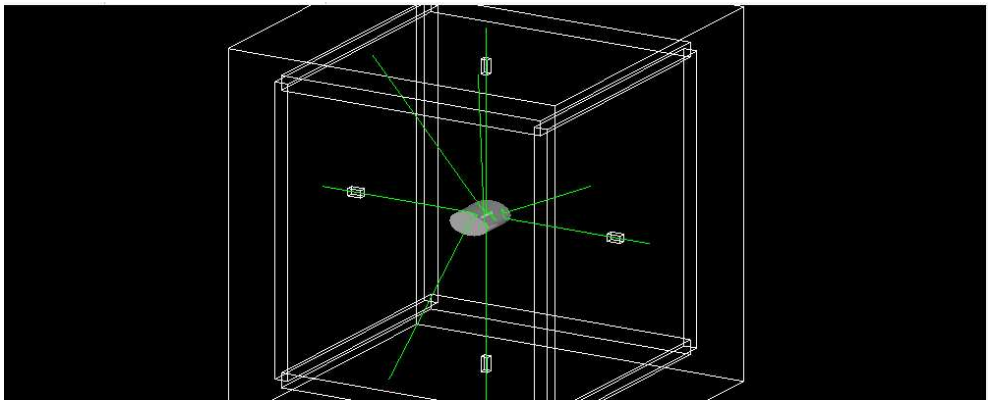


Figura 6. Geometría en el mundo de Geant4, con las cuatro fuentes realizando cada una un evento. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de probar la eficiencia de la geometría se realizaron simulaciones con 4 eventos y poder obtener un comportamiento de la simulación en las condiciones anteriormente descritas. de esta manera se obtuvo unas desviaciones de los rayos-x como se muestra en la figura 7, producto de las interacciones radiación materia que ofrece la librería de Penélope para este tipo de simulaciones.

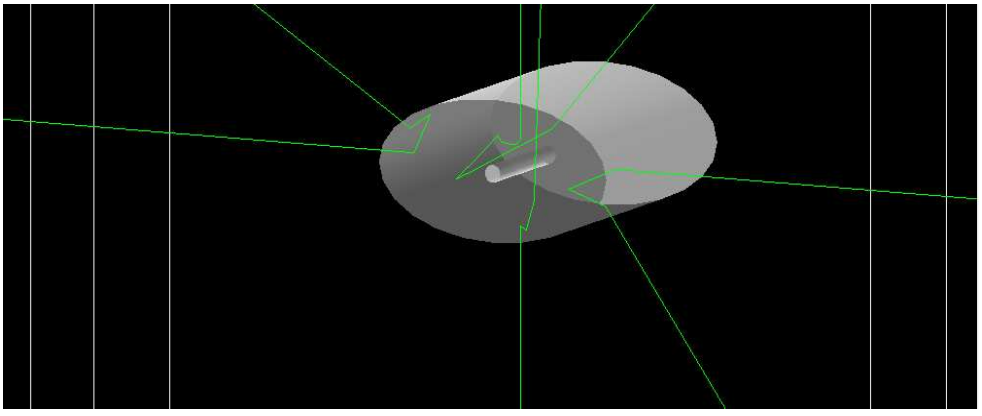


Figura 7: Simulación del maniquí CIRS con 4 eventos. Fuente: elaboración propia.

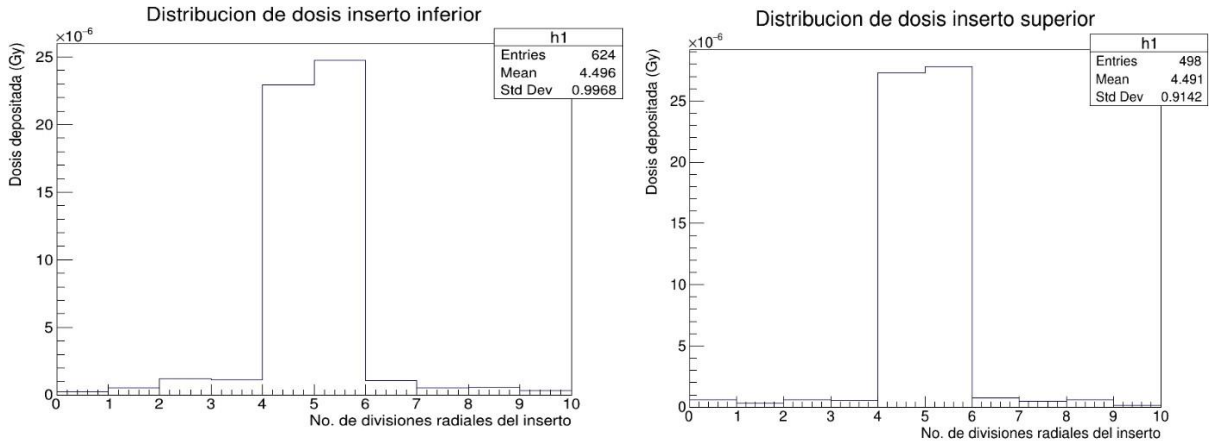


Figura 8. Gráfica Número de divisiones del inserto. Vs. Distribución de dosis en el inserto inferior e inserto superior. Fuente: elaboración propia.

En la figura 8 se muestra la distribución de dosis en el inserto superior e inferior de maniquí, en el inserto inferior hay menor distribución con respecto a la superior.

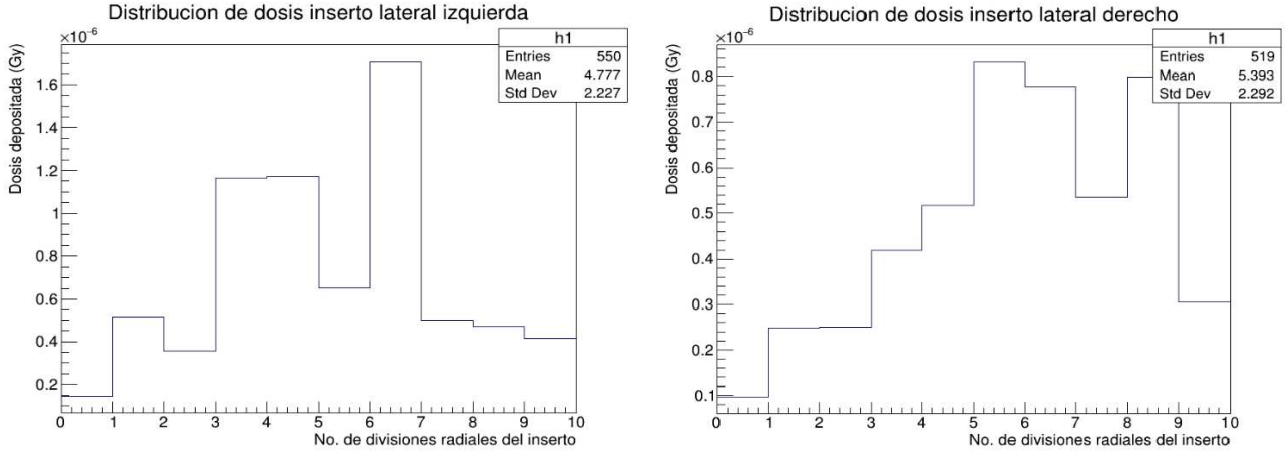


Figura 9. Gráfica Número de divisiones del inserto. Vs. Distribución de dosis en los insertos laterales. Fuente: elaboración propia.

La dosis promedio acumulada en el inserto derecho es aproximadamente 28% mayor que en el derecho esto debido a las mil divisiones de Mesh la distribución de estas no es igual, lo cual permite una variación en la dosis, esta diferencia puede ser menor si se aumenta el número de eventos en 4 órdenes de magnitud, figura 9.

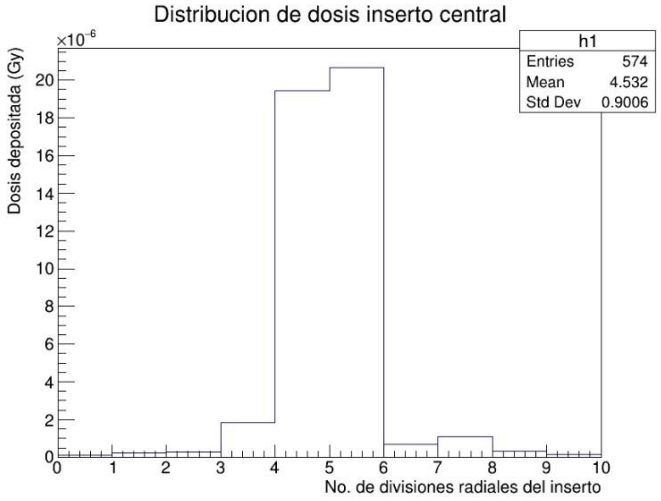


Figura 10. Gráfica Número de divisiones del inserto. Vs. Distribución de dosis en el inserto central. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica de la figura 10, se evidencia la mayor dosis acumulada de los 5 insertos del maniquí en estudio.

Con información recopilada en los histogramas se puede evidenciar que la dosis es mayor en el inserto central, esto debido a que las fuentes están distribuidas cada 90° y este inserto está justo en el isocentro del maniquí en donde todas las fuentes contribuyen a la acumulación de

dosis en él. Las fuentes laterales que están a una separación igual del centro presentan una diferencia de dosis promedio acumulada es del 28% debido a las iteraciones del software para llenar la Mech.

En el inserto superior e inferior la dosis promedio acumulada es mayor 28% en el inserto superior, ya que la distancia al borde es de 1,4 cm mientras que en el inserto inferior la distancia es de 6,7 cm del borde lo cual supone una distancia mayor de interacción para los fotones de Rx y una disminución en su aporte a la dosis.

4. Conclusiones.

Se observa que son viables las simulaciones de haz cónico con Geant4 ya que permiten ajustar la geometría de posicionamiento del maniquí con la real, en dónde gracias al análisis de las gráficas de los datos obtenidos la dosis solo está un orden de magnitud esperado donde se espera llegar a un orden de $\times 10^{-3}$en estudios posteriores.

Con respecto a la ubicación de los insertos, se pudo evidenciar que los que se encuentran sobre el eje del isocentro tuvieron una acumulación de dosis mayor con respecto a los laterales ya que las fuentes fueron ubicadas sobre este eje, en los insertos laterales obtuvo una diferencia de dosis entre los dos del 28% siendo mayor en el izquierdo que en el derecho, diferencia que se espera reducir considerablemente generando un número mayor de eventos ya que los dos tiene una diferencia igual de distancia con respecto al isocentro y esto también contribuye a llegar al orden de magnitud esperado en la dosis.

En cuanto a los resultados para obtener una dosis cercana a las que se obtienen en un equipo de obtención de imágenes diagnósticas se debe aumentar la cantidad de eventos generados en un orden de magnitud de $\times 10^4$ para un total de $\times 10^{10}$ eventos generados, con esto también se puede reducir la diferencia de dosis acumulada en los insertos laterales que fue de aproximadamente un 28%.

Referencias

[1] Ministerio de Salud y Protección Social, «https://www.minsalud.gov.co,» 25 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.minsalud.gov.co/salud/publica/PET/Documents/Circular%2019.pdf.pdf. [Último acceso: 8 11 2020].

[2] Asociación Colombiana de Infectologia, «Consenso colombiano de atención, diagnóstico y manejo de la infección,» *Revista de la Asociación Colombiana de Infectologia,* vol. 24, nº 3, pp. 20-21, 2020.

[3] L. Gamboa O, «Atlas de mortalidad por cancer en Colombia,» *Instituto Nacional de Cancerologia,* vol. 1, nº 4, 2017.

[4] G. de Fernicola, «Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública,» *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas,* vol. 39, nº 4, pp. 365-372, 2003.

[5] J. C. Ramirez, «Tomografía computarizada por rayos X: fundamentos y actualidad,» *Revista Ingeniería Biomédica,* vol. 2, nº 4, 2008.

[6] I.R.Raudales Díaz, «IMÁGENES DIAGNÓSTICAS: CONCEPTOS Y GENERALIDADES,» *Revista Facultad Ciencias Médicas,* vol. 1, nº 1, pp. 35-43, 2014.

[7] A. P. Montenegro, «Repositorio Pontificia Universidad Javeriana,» 19 07 2019. [En línea]. Available: https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/44080. [Último acceso: 14 11 2020].

[8] A. Amer, T. Marchant, J. Sykes, J. Czajka y C. Moore,, «Imaging doses from the Elekta Synergy X-ray cone beam CT system,» *The British Journal of Radiology,* vol. 80, nº 954, p. 476–482, 2007.

[9] CSN, «Interaccion de la radiación con la materia,» 2013. [En línea]. Available: http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/133100241_2411200913036.pdf.

[10] A. Brosed, Fundamentos De Fisica Medica, vol. 2, ADI, 2012.

[11] E. B. Podgorsak, Radiaton Physics for Medical Physicists, 2 ed., Springer, 2010.

[12] CIRS, «IMRT Thorax Phantom,» [En línea]. Available: www.cirsinc.com. [Último acceso: 22 02 2020].

[13] A. Castillo, «Caracteristicas del sistema de IGRT de ELEKTA,» Grupo CROASA, Granada.

[14] Elekta AB, «Elekta Synergy Digital accelerator for advanced IGRT,» 2017. [En línea]. Available: https://www.elekta.com/radiotherapy/treatment-delivery-systems/elekta-synergy/. [Último acceso: 14 11 2020].

[15] C. David, «Estudio de la viabilidad de las imágenes de CBCT para planeación de tratamientos,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2020.

[16] J. Allison, «Geant4 Developments and Applications,» *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE,* vol. 53, 2006.

[17] J DeMarco, «A Monte Carlo based method to estimate radiation dose from multidetector CT (MDCT): cylindrical and anthropomorphic phantoms,» *PHYSICS IN MEDICINE AND BIOLOGY,* nº 50, p. 3989–4004, 2005.

[18] O. Apostolakis, «The Geant4 Simulation Toolkit and Applications For the Geant4 Collaboration,» *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics,* 2008.

[19] C. Giraldo, «Desarrollo y aplicaciones de GEANT4 para radioterapia y microdosimetria en detectores y circuitos integrados,» 04 2011. [En línea]. Available: https://idus.us.es/handle/11441/15762. [Último acceso: 14 11 2020].

[20] Geant4 Collaboration, Book For Application Developers, Geant4 Collaboration, 2017.

[21] P. Montenegro, «Repositorio Pontificia Universidad Javeriana,» 19 07 2019. [En línea]. Available: https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/44080. [Último acceso: 14 10 2020].

[22] M. Mostazo Caro, «Interacción Radiación-Materia Conceptos B ásico,» de *Técnicas Experimentales Avanzadas*, 2013, pp. 4-6.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

1D NEURAL NETWORK DESIGN TO DETECT CARDIAC ARRHYTHMIAS

Diseño de red neuronal 1D para detectar arritmias cardiacas

Juan Camilo Sandoval Cabrera[1], Nohora Camila Sarmiento Palma[2], Rubén Darío Hernández Beleño[3]

Abstract

This article shows the design of a neuronal network for deep learning focused on the recognition and classification of five types of cardiac signals (Sinus, Ventricular Tachycardia, Ventricular Fibrillation, Atrial Flutter, and Atrial Fibrillation). The final objective is to obtain an architecture that can be implemented in an embedded system as a pre-diagnostic device that can be linked to a holter monitoring system. The network was designed using the Keras API programmed in Python, where it is possible to obtain a comparison of different types of networks that vary the presence of a residual block, with the result that the network with said block obtains the best response (100% success rate) and a model loss of approximately 0.15%. On the other hand, a validation by means of confusion matrices was carried out to verify the existence of false

[1] Estudiante pregrado Ingeniería Biomédica, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Posición actual: Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. E-mail: u5600056@unimilitar.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0660-0720

[2] Estudiante pregrado Ingeniería Biomédica, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Posición actual: Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. E-mail: u5600057@unimilitar.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8813-1977

[3] Profesor departamento de Ingeniería Biomédica, Universidad Militar Nueva Granada. Doctor en Ingeniería Mecánica-Mecatrónica y Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad Estadual de Campinas - Brasil, Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada - Colombia. Email: ruben.hernandez@unimilitar.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8152-2633

positives in the results given by the network and additionally to evidence what type of arrhythmia can be presented according to the network output against an input signal through the console.

Keywords: Database, Neural Network, Convolution, Cardiac Arrhythmias, Residual Block, Keras.

Resumen

El presente artículo muestra el diseño de una red neuronal para aprendizaje profundo enfocado al reconocimiento y clasificación de cinco tipos de señales cardiacas (Sinusal, taquicardia ventricular, fibrilación ventricular, flutter atrial y fibrilación atrial). El objetivo es obtener una arquitectura que pueda ser implementada en un sistema embebido como un dispositivo de prediagnóstico que se pueda vincular a un sistema de monitorización de un holter. La red fue diseñada por medio de la API de Keras programada en Python, en donde se logra obtener una comparación de diferentes tipos de redes que varían la presencia de un bloque residual, teniendo como resultado que la red con dicho bloque obtiene la mejor respuesta (porcentaje de aciertos de 100%) y una pérdida del modelo aproximadamente del 0.15%. Por otro lado, se realizó una validación mediante matrices de confusión para verificar la existencia de falsos positivos en los resultados otorgados por la red y adicionalmente evidenciar que tipo de arritmia se puede presentar conforme la salida de la red frente a una señal de entrada por medio de la consola.

Palabras clave: Database, Neural Network, Convolution, Cardiac Arrhythmias, Residual Block. Keras.

1. Introducción

La señal electrocardiográfica (ECG) es una representación gráfica en el dominio del tiempo, que por métodos matemáticos se puede representar en el dominio de la frecuencia [1] del estímulo eléctrico que se produce en el corazón por medio de las excitaciones en los músculos cardíacos [2], se puede dividir en características fundamentales como Ondas P, complejo QRS, onda T, onda U, intervalo PR, intervalo ST e Intervalo RR, [3]. La función principal de esta señal es detectar anomalías o patologías cardíacas como infartos, arritmias, fibrilaciones, entre otras, por medio de su lectura al identificar ciertas características como la amplitud del complejo QRS, a duración de ciertos intervalos o morfologías de diferentes tipos de ondas, [1]. Los ritmos que se tendrán en cuenta para la presente investigación son:

Ritmo sinusal: “El ritmo sinusal se caracteriza por una tasa de entre 60 y 100 latidos por minuto. Cada complejo QRS debe durar entre 80 y 100 ms y está precedido por una onda P y cada onda P debe estar seguida por un QRS”, [3].

Taquicardia ventricular: Se define como una arritmia, al igual que la fibrilación ventricular y presenta un trazado ECG, del cual se puede diagnosticar por su misma frecuencia cardiaca y complejos QRS anchos (mayor a 120 latidos/minuto), [3].

Fibrilación ventricular: Es una arritmia en la cual las contracciones de las fibras ventriculares son asincrónicas, lo cual produce que las fibras musculares ubicadas en los ventrículos, tiemblen en lugar de hacer una contracción coordinada, [3].

Fibrilación auricular: Se caracteriza por presentar intervalos R-R completamente irregulares al no seguir ningún patrón. Además, al existir una estimulación auricular caótica no existen ondas P, [3].

Flutter auricular: El flutter auricular es una arritmia supraventricular, la cual genera ondas similares a las ondas P a lo largo de los intervalos entre los picos R-R, dichos patrones son conocidos como ondas de sierra, un flutter puede desencadenar una fibrilación auricular.

Para la detección de los ritmos cardiacos mencionados anteriormente, se debe implementar un método de caracterización y reconocimiento de forma automática de los mismos, para esto se emplean diferentes técnicas, algunas son algoritmos de detección y otras utilizan el concepto de deep learning o machine learning -[4]- para ejecutar dicha clasificación, un ejemplo de esto es el uso de redes neuronales convolucionales, que son es un algoritmo de computación, que intenta imitar el funcionamiento del cerebro humano para tareas específicas, en donde, por medio de capas que contienen neuronas artificiales se logran realizar tareas como por ejemplo: clasificación multiclase, clasificación binaria, reconstrucción de imágenes entre otras funciones. Las redes convolucionales son un ejemplo de una arquitectura de red neuronal especializada, que emplea el conocimiento sobre la invariancia de formas bidimensionales utilizando patrones de conexión local entre otros parámetros, también presentan una arquitectura multicapa, lo cual indica que cada capa está compuesta por cierto número de convoluciones con funciones matemáticas no lineales. Se caracterizan por determinar una representación matemática para cada neurona al asignar una operación

convolucional [5] (la convolución de señales se basa en un proceso matemático que se basa en *fusionar* dos señales para transformarlas en una nueva señal, la cual puede extraer características de la misma [6]), con el objetivo de generar un algoritmo de inteligencia artificial, el cual requiere un buen procesamiento de la señal, en donde se busca extraer características de la misma, como por ejemplo la respuesta en frecuencia, la transformada wavelet, entre otras [7-8]. Sin embargo, en algunos casos se han diseñado redes de patrones multicanal (MART) que permiten más de una entrada de la señal procesada, [9].

Algunos estudios buscan clasificar ritmos que tengan un patrón casi definido con funciones de simetría para extraer patrones [10] o características de la señal ECG como duración, amplitud, gradientes, entre otros [11], también se busca la clasificación de arritmias sinusales o arritmias ventriculares a partir de un análisis individual [12-13], sin embargo, otras redes buscan establecer una diferencia significativa entre una onda en específico en comparación a ondas normales (ritmos sinusales), como por ejemplo detectar de manera eficiente un bloqueo o episodios isquémicos [14-15] y apariciones prematuras ventriculares y auriculares [16] Adicionalmente, algunas redes buscan identificar y notificar diferentes ritmos frecuentes en población con problemas cardíacos; el ritmo más común es la fibrilación auricular y por ello se considera importante establecer algoritmos de clasificación y predicción para el mismo [17] como lo hicieron Artis, Mark y Moody, al emplear el modelo de Markov para la implementación de una red neuronal basada en el algoritmo Back-Propagation y entrenada con señales obtenidas de la base de datos MIT-BIH, presente en Physionet®, [18-19].

Por otra parte, es importante destacar la eficiencia de diferentes tipos de redes, como se indicó anteriormente se puede probar el porcentaje de acierto que puede brindar una red neuronal sencilla frente a una red neuronal por aproximación (KNN), con el fin de obtener una relación entre complejidad de red/eficiencia de la red, [20]. También se han empleado redes basadas en el método “feedforward backpropagation” y el método de selección de variables de regresión logística con el objetivo de reducir una variable de latido de la señal ECG al mejorar la clasificación proporcionando más rapidez y evitando situaciones de sobreajuste, [19]. También se han empleado redes neuronales de tres capas con una topología BPN-4-3-2 optimizada, que trabajan con cuatro parámetros de entrada para la capa principal, característicos de la señal como la amplitud del complejo QRS, el intervalo RR, la amplitud del segmento ST, entre otras, teniendo como resultado tras su implementación, datos que concuerdan con el diagnóstico clínico de la enfermedad analizada, [21].

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se plantea diseñar una red neuronal convolucional que se pueda conectar a un dispositivo para toma de ECG que cuente con la derivación DII, en donde se desea construir un modelo que permita clasificar las ondas: Taquicardia ventricular, fibrilacion auricular, fibrilacion ventricular, ritmo sinusal y flutter auricular. El fin es proponer una red embebida que pueda ser utilizada en un holter portátil y que este pueda realizar clasificaciones en tiempo real de dichas ondas, con el objetivo a largo plazo de incorporar un sistema de alarma cuando se presenten dichas ondas (a excepción del ritmo

sinusal) y ampliar la base de datos de las ondas que se están clasificando, dicho proyecto será diseñado en python con ayuda de la API de keras.

2. Materiales y Metodología

Para exponer la parte metodológica se realizó un diagrama de bloques con los principales componentes empleados en la investigación (Ver figura 1).

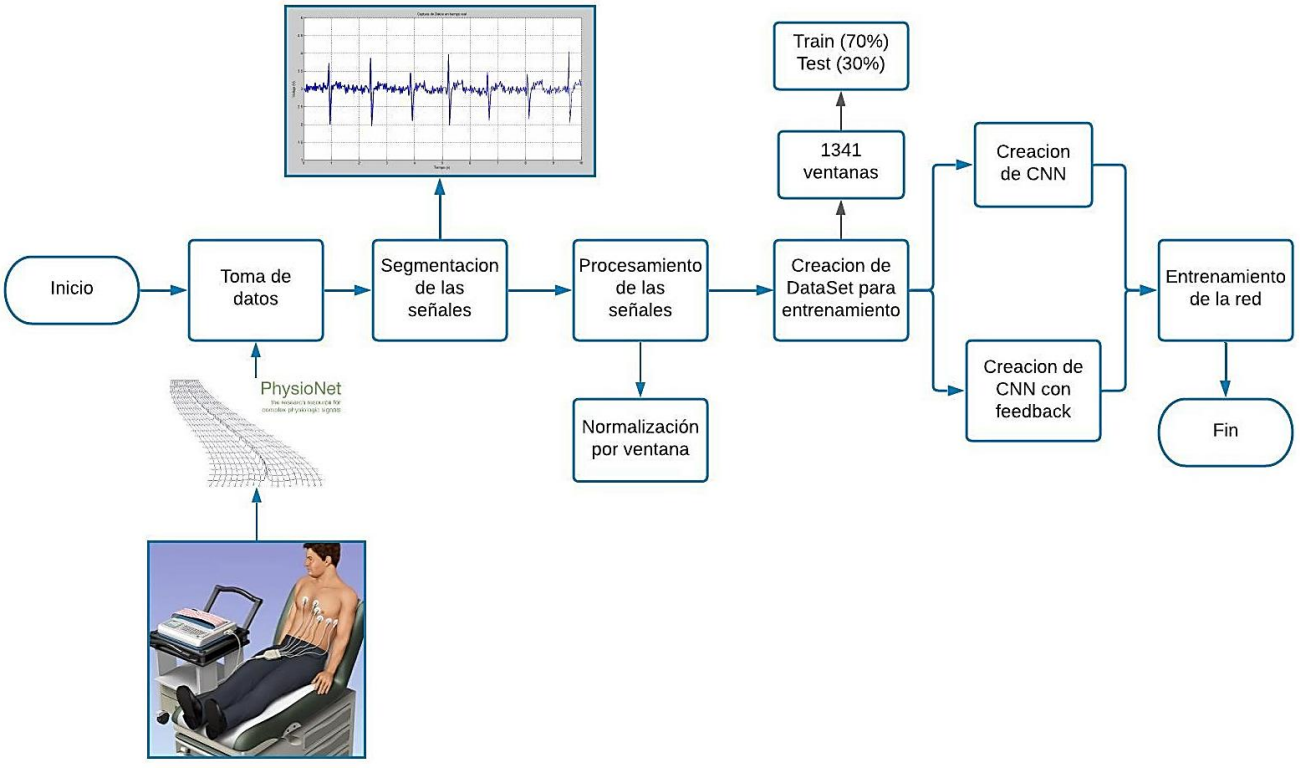


Figura 1. Diagrama de bloques proceso metodológico. Fuente: elaboración propia.

2.1. Toma y segmentación de datos

La toma de muestras se realizó mediante la recolección de datos por medio de la base de datos Physionet®, los cuales se buscaron específicamente en Physionet® arrhythmia data base V1.0 y Malignant Ventricular tachycardia [22] y se extrajeron por medio de las librerías wdfd proporcionadas por la base de datos en MatLab, sin embargo, en ese punto se tuvieron en cuenta las señales cuyas anotaciones contarán con registros de las señales cardiacas que se han mencionado anteriormente y adicionalmente se omitieron las señales que no pertenecían a las derivadas DI o DII, ya que se quiere construir una red neuronal monocanal. Una vez se conocieron los datos necesarios para la investigación, se realizó la separación de las señales en archivos. mat, correspondientes a cada clasificación, es decir, un archivo por señal. Por otro lado, se tuvo en cuenta las frecuencias de muestreo se obtuvieron las longitudes de las señales en escala de tiempo total como se observa en la tabla 1.

Tabla 1.Duración de señales cardiacas.

Señal	Tiempo (minutos)	Label
Ritmo Sinusal (RS)	20	0
Fibrilación Auricular (FA)	30	1
Flutter Auricular (AF)	17	2
Taquicardia Ventricular (TV)	23	3
Fibrilacion Ventricular (FV)	26	4

Fuente: elaboración propia.

2.2. Procesamiento de señales y creación de DataSet

En algunas señales de las bases de datos las frecuencias de muestreo eran diferentes entre sí, es decir, una porción de los datos estaba muestreada a 360 Hz mientras la otra estaba a 250 Hz, por lo cual era necesario eliminar datos de las señales con mayor frecuencia, esto se realizó por medio de la función *resample* incorporada en MatLab®. Ya conociendo una frecuencia de muestreo idéntica para todos los datos, se realiza un *reshape*, teniendo en cuenta un tiempo de ventana fijo, es decir siguiendo la ecuación 1, se puede conocer el número de ventanas totales por señal (1.250), sin embargo, en algunos casos la división puede ser racional, por lo cual se implementa el algoritmo de la figura 2 para evitar dicho problema.

$$Fs * Tiempo_{Ventana} = Cantidad\ de\ datos \quad (1)$$

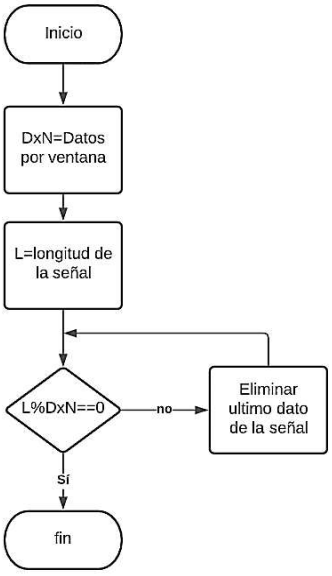


Figura 2. Algoritmo para reducir la longitud de las ventanas. Fuente: elaboración propia.

Para finalizar el procesamiento, se realiza la normalización de señales por cada una de las ventanas, puesto que hay puntos que son extremadamente positivos en una señal, y afectan las amplitudes de señales que manejan voltajes bajos en algunos puntos; como, por ejemplo, la fibrilación ventricular; la normalización por ventana se realiza con la ecuación 2.

$$Data = \frac{Data - min(Data)}{max(Data - min(Data))} \quad (2)$$

Por otro lado, para crear el DataSet se unifican todas las señales en una sola, es decir, se realiza una concatenación, y a medida que se conectan los datos, también lo hace su respectiva clasificación, en donde se deciden las magnitudes de entrenamiento en un 70% de los datos recolectados y un 30% de datos de validación del modelo teniendo así un total de 939 datos de entrenamiento y 402 datos de validación.

2.3. Desarrollo del algoritmo de aprendizaje profundo

Para realizar una comparación entre dos redes neuronales convolucionales en 1D, se empleó un modelo que cuenta con un bloque residual y uno que no (Ver tabla 2).

Tabla 2. Red Neuronal con bloque residual

Modelo	Capa	Tamaño de salida	#parámetros
Red sin bloque residual	Capa de entrada	1250 x 1	0
	Capa de convolución 1	1245 x 16	112
	Capa de Max Pooling 1	1244 x 16	0
	Capa de convolución 2	1233 x 32	6176
	Capa de convolución 3	1222 x 32	12320
	Capa de convolución 4	1199 x 32	24608
	Capa de Max Pooling 2	11998 x 32	0
	Capa Flatten	38336	0
	Capa densa 1	64	2453568
	Capa densa 2	16	1040

Modelo	Capa	Tamaño de salida	#parámetros
	Capa densa 3 (salida)	5	85
Red con bloque residual	Capa de entrada	1250 x 1	0
	Capa de convolución 1	1245 x 16	112
	Capa de convolución 2	1245 x 16	1552
	Capa de activación 1 (Relu)	1245 x 16	0
	Capa de convolución 3	1245 x 16	1552
	Capa de convolución 4	1245 x 16	112
	Bloque Residual	1245 x 16	0
	Capa de activación 2 (Relu)	1245 x 16	0
	Capa de convolución 5	1240 x 16	1552
	Capa de Max Pooling 1	1239 x 16	0
	Capa de convolución 6	1228 x 32	6176
	Capa de convolución 7	1217 x 32	12320
	Capa de convolución 8	1194 x 32	24608
	Capa de Max Pooling 2	1193 x 32	0
	Capa Flatten	38176	0
	Capa densa 1	64	244332
	Capa densa 2	16	1040
	Capa densa 3	5	85

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Como resultados se presentan las curvas obtenidas de los entrenamientos respectivos de cada una de las redes neuronales, en donde se ilustrará el valor de pérdidas de modelo de los datos de entrenamiento (figura 3-a), pérdidas en los datos de validación (figura 3-b), aciertos del modelo con datos de entrenamiento (figura 3-c), y por último aciertos con los datos de validación (figura 3-d). En todas las figuras se observa una respuesta más rápida por parte de la red convolucional sin bloque residual, puesto que llega a un periodo de estabilidad en menos épocas en comparación a la red neuronal con bloque residual; así mismo, ambas redes logran

llegar al mismo porcentaje de precisión, pero con un porcentaje de pérdidas diferente (Ver tabla 3).

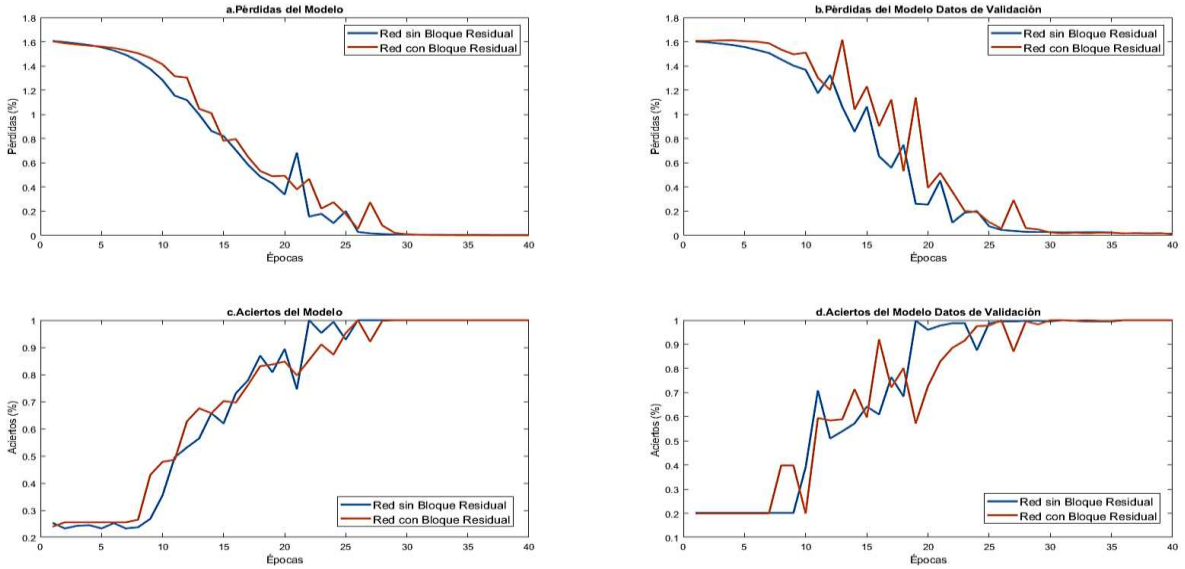


Figura 3. Resultados del entrenamiento. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados obtenidos al implementar las redes neuronales.

Modelo	Época de estabilización	Precisión [%]	Pérdidas [%]
Red neuronal con bloque residual	28	100	0.15
Red neuronal sin bloque residual	26	100	0.27

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, con el fin de validar el modelo, se realizó una matriz de confusión con todo el conjunto de DataSet (Ver figura 4-a y 4-b), que demostró que no se presentan errores en la

clasificación (falsos positivos). Adicionalmente en la figura 5 se puede evidenciar la respuesta por consola de la red neuronal, demostrando que el resultado de la predicción del modelo es correcto al tomar como entrada un ritmo cardiaco aleatorio en el data set. Al conocer el label de cada señal según la tabla 1 se puede generar una impresión por consola indicando la presencia del ritmo que se presenta en la señal de entrada.

a.) Red neuronal sin bloque residual ***b.) Red neuronal con bloque residual.***

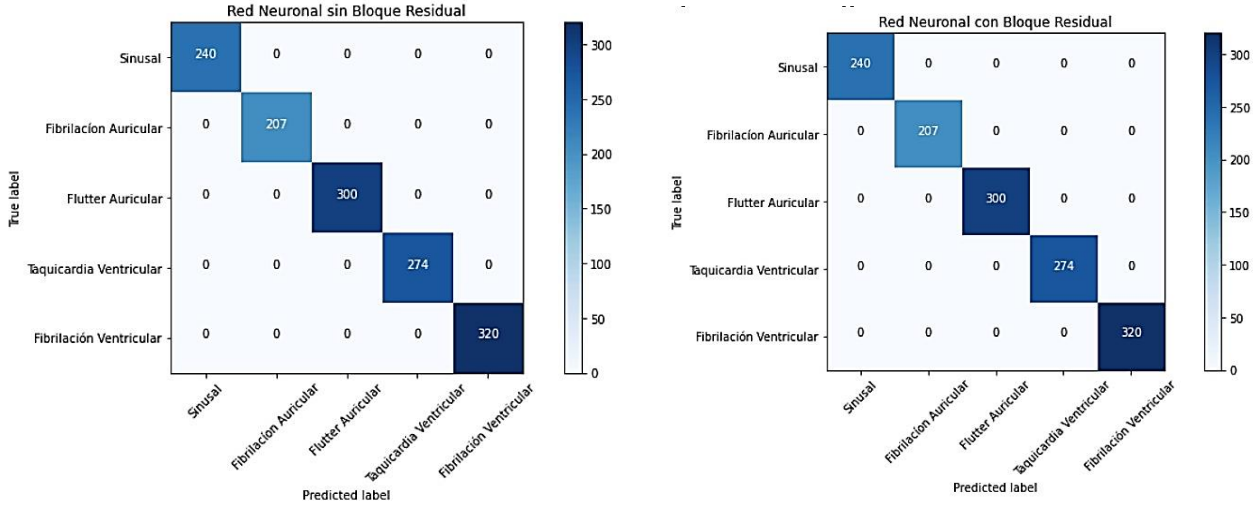


Figura 4. Matrices de confusión. Fuente: elaboración propia.

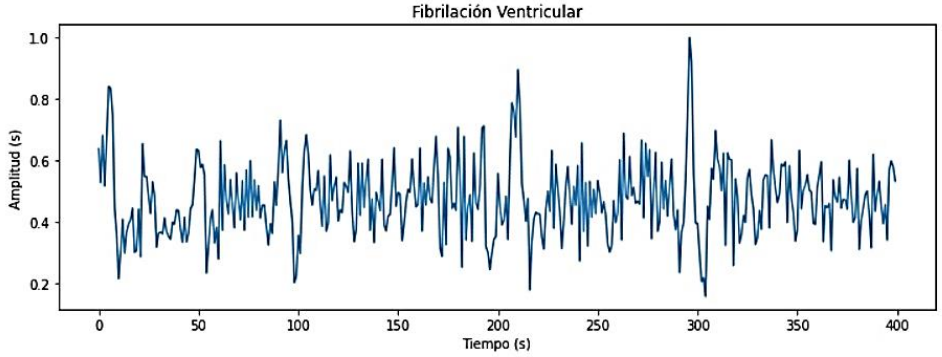


Figura 5. Salida de la red neuronal por consola. Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

Al observar las curvas obtenidas en las figuras expuestas en la sección anterior, se puede inferir que hay una mejor respuesta por parte de la red neuronal que no cuenta con un bloque residual, puesto que de acuerdo con la tabla 2, se deben entrenar más parámetros y por ende se identifica una diferencia en el periodo de estabilización, dado que la red sin bloque residual llega al 100% de aciertos en un menor número de épocas, sin embargo, los modelos realizados indican que la red convolucional con capa residual tiene un menor porcentaje de pérdidas (0.15%), frente a la red neuronal convolucional sencilla (0.27%), la causa de este fenómeno puede deberse al back-propagation de la red por el mismo fenómeno de la cantidad de parámetros entrenables.

Por otro lado, cabe resaltar que el entrenamiento se realizó con un batch size de 128, es decir, se presentaron 128 datos en la iteración de cada ciclo (época) y no se utilizaron capas de

dropout, lo que indica que no se desactivaron neuronas de manera aleatoria para el entrenamiento, ya que, al implementar dichas capas en el proceso de comparación, este comienza a depender de la aleatoriedad que se presente en la desactivación, afectando los resultados de las curvas obtenidas.

Para finalizar, al momento de entrenar la red se probó el bloque residual con diferentes kernel size en las capas convolutivas que lo integran, el cual dio efectos positivos en el proceso, ya que la red era capaz de extraer características más relevantes en un grupo de datos, determinando que a mayor kernel size las características por onda aumentan (en el desarrollo se estableció un kernel size de 6), debido a que en señales como por ejemplo la fibrilación ventricular, fibrilación auricular y flutter auricular en donde no se puede visualizar una línea isoeléctrica perfecta, en los intervalos R-R, se puede seguir rescatando información relevante en las capas de la convolución, por ende se determina que en el resultado obtenido se observa la capacidad de la red para generar una clasificación sin pérdidas significativas del modelo.

5. Conclusiones

Se logró crear un-DataSet basado en bases de datos pertenecientes al dominio de Physionet®, en donde se realizó su correspondiente procesamiento y adecuación con el fin de introducirlas a una red neuronal convolucional con una presión del 100% en cada red.

Se implementaron dos redes neuronales convolucionales con presencia/ausencia de un bloque residual, el cual se encarga de generar un “feedback” a la red para obtener mayor número de

características al multiplicar las convoluciones obtenidas por la capa inicial evidenciando que las dos redes tienen pérdidas que se aproximan al 0%.

Se logró realizar la comparación entre una red neuronal con bloqueo residual frente y que no cuenta con este, y se encontraron las posibles variables que aportan a la causa de dicho fenómeno, estas son: el kernel size, la falta de capas dropout y la cantidad de parámetros que existen en la red.

Reconocimientos

El reconocimiento va dirigido al semillero de investigación “InMED” del programa de ingeniería biomédica de la Universidad Militar Nueva Granada por apoyar, motivar y orientar el proyecto en el proceso de investigación.

Referencias

[1] C. Vidal Silva and L. Pavesi Farriol, “Desarrollo De Un Sistema De Adquisición Y Tratamiento De Señales Electrocardiográficas,” Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá, vol. 13, no. 1, pp. 39–46, 2005, doi: 10.4067/s0718-13372005000100005.

[2] C. Correa Flórez, R. Bolaños Ocampo, and A. Escobar, “Análisis de esquemas de filtrado análogo para señales ecg.,” Sci. Tech., vol. 5, no. 37, pp. 103–108, 2007.

[3] Tortora, Gerald. Derrickson, Bryan. 2006. Principios de Anatomía y Fisiología. 11ª. Edición. Editorial Médica Panamericana. México DF. México. Cap 20.

[4] M. A. Ferrag, L. Maglaras, S. Moschoyiannis, and H. Janicke, “Deep learning for cyber security intrusion detection: Approaches, datasets, and comparative study,” J. Inf. Secur. Appl., vol. 50, p. 102419, 2020, doi: 10.1016/j.jisa.2019.102419.

[5] G. Zeng, Y. He, Z. Yu, X. Yang, R. Yang, and L. Zhang, “Preparation of novel high copper ions removal membranes by embedding organosilane-functionalized multi-walled carbon nanotube,” J. Chem. Technol. Biotechnol., vol. 91, no. 8, pp. 2322–2330, 2016, doi: 10.1002/jctb.4820.

[6] T. Park, Introduction to digital signal processing. Singapore: World Scientific, 2010.

[7] M. O. Alzate, “Clasificación de Arritmias Cardíacas usando Transformada Waveleth - tesis pregrado.pdf,” 2003.

[8] A. D. E. Maquina and C. O. N. Interfaz, “Mediante Aprendizaje De Máquina Con Interfaz a Usuario Model of Dynamic Classification of Arrhythmias Cardiac By,” Leonardo, vol. 16, pp. 86–95, 2006.

[9] A. Behrad and K. Faez, “New method for QRS-wave recognition in ECG using MART neural network,” ANZIIS 2001 - Proc. 7th Aust. New Zeal. Intell. Inf. Syst. Conf., no. November, pp. 291–296, 2001, doi: 10.1109/ANZIIS.2001.974093.

[10] M. Mitrokhin, A. Kuzmin, N. Mitrokhina, S. Zakharov, and M. Rovnyagin, “Deep learning approach for QRS wave detection in ECG monitoring,” 11th IEEE Int. Conf. Appl. Inf. Commun. Technol. AICT 2017 - Proc., pp. 1–3, 2019, doi: 10.1109/ICAICT.2017.8687235.

[11] I. A. Tarmizi, S. S. N. A. S. Hassan, U. K. Ngah, and W. P. W. Ibrahim, “A journal of real peak recognition of electrocardiogram (ECG) signals using neural network,” 2012 2nd Int. Conf. Digit. Inf. Commun. Technol. its Appl. DICTAP 2012, pp. 504–510, 2012, doi: 10.1109/DICTAP.2012.6215429.

[12] M. Llamedo and J. P. Martínez, “Clasificación de ECG basada en Características de Escala , Dirección y Ritmo,” Caseib 2009, pp. 2–5, 2009.

[13] E. D. A. Botter, C. L. Nascimento, and T. Yoneyama, “A neural network with asymmetric basis functions for feature extraction of ECG P waves,” IEEE Trans. Neural Networks, vol. 12, no. 5, pp. 1252–1255, 2001, doi: 10.1109/72.950154.

[14] S. H. El-Khafif and M. A. El-Brawany, “Artificial Neural Network-Based Automated ECG Signal Classifier,” ISRN Biomed. Eng., vol. 2013, pp. 1–6, 2013, doi: 10.1155/2013/261917

[15] N. Maglaveras, T. Stamkopoulos, K. Diamantaras, C. Pappas, and M. Strintzis, “ECG pattern recognition and classification using non-linear transformations and neural networks: A review,” Int. J. Med. Inform., vol. 52, no. 1–3, pp. 191–208, 1998, doi: 10.1016/S1386-5056(98)00138-5.

[16] C. Rose-Gómez and M. Serna-Encinas, “Procesamiento del Electrocardiograma para la Detección de Cardiopatías,” Researchgate.Net, no. May, pp. 3–6, 2015, [Online]. Available: http://enc2014.cicese.mx/Memorias/paper_19.pdf%5Cnhttps://www.researchgate.net/profile/Cesar_Rose/publication/277324231_Procesamiento_del_Electrocardiograma_para_la_Deteccion_de_Cardiopatias/links/5567b77d08aeab77721eac2b.pdf

[17] S. Jiménez Serrano, “Clasificación automática de registros ECG para la detección de Fibrilación Auricular y otros ritmos cardíacos,” 2018, [Online]. Available: https://riunet.upv.es:443/handle/10251/111113.

[18] S. G. Artis, R. G. Mark, and G. B. Moody, “Detection of atrial fibrillation using artificial neural networks,” Comput. Cardiol., pp. 173–176, 1992, doi: 10.1109/cic.1991.169073.

[19] J. Wang and W. Lu, “A method of electrocardiogram classification based on neural network,” Chinese J. Biomed. Eng., vol. 14, no. 4, pp. 306–311, 1995.

[20] M. Hammad, A. Maher, K. Wang, F. Jiang, and M. Amrani, “Detection of abnormal heart conditions based on characteristics of ECG signals,” Meas. J. Int. Meas. Confed., vol. 125, pp. 634–644, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.033.

[21] T. H. Chen, Z. Yu, L. Q. Han, P. Y. Guo, and X. Y. He, “The sorting method of ECG signals based on neural network,” 2nd Int. Conf. Bioinforma. Biomed. Eng. iCBBE 2008, pp. 543–546, 2008, doi: 10.1109/ICBBE.2008.132.

[22] Taylor GJ. 150 Practice ECGs: Interpretation and Review. Blackwell Science, 2002. ISBN 0-632-04623-6.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

BIOMEDICAL ENGINEERING: EXPERIENCES IN THE RESEARCH FORMATION WITH MOODLE

Ingeniería Biomédica: experiencias en la formación investigativa con MOODLE

Angel Regueiro Gómez[1], Carmen Brígida Busoch Morlán[2], Carmenchu Regueiro Busoch[3], René Joaquín Díaz Martínez [4]

Abstract

The work shows the didactic experiences reached in the research formation of biomedical engineers in the Technological University of Havana (CUJAE), during the development of courses (Project of Research I and II) in the Biomedical Engineering program, that contribute to the scientific and methodological development of the Work of Diploma like act of culmination of the university studies, with the integrated employment of the resources of a Learning Management System: MOODLE (Forum, Dynamic Presentations, Videos, WIKI,

[1] Electronic Engineer, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE), CUBA. PhD in Electronic, UPC, Barcelona, Spain. Professor: Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE) / Departament of Bioengineering (CEBIO) / Havana, CUBA. E-mail: regueiro@automatica.CUJAE.edu.cu ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2239-1324

[2] Automatic Engineer & Master in Automatic, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE), CUBA. Professor: Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE) / Departament of Automatic & Computation, Havana, CUBA. E-mail: cbusoch@automatica.CUJAE.edu.cu ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1290-669X

[3] Automatic Engineer & Master in Automatic, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), CUBA. Professor: Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE) / Departament of Automatic & Computation, Havana, CUBA. E-mail: carmenchurb@nauta.cu ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5101-4050

[4] Electronic Engineer, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE), CUBA. MSc. & PhD in Electronic, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE), CUBA. Professor: Instituto Tecnológico de Monterrey, Monterrey, Mexico. E-mail: renejdm@tec.mx ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7440-0045

Tasks, Surveys, Questionnaires, etc.) and the Teaching Based in Problems (EBP), to achieve the appropriate motivation and research formation in the students from the curriculum.

Keywords: Biomedical Engineering, Research education, undergraduate program, LMS.

Resumen

El trabajo muestra las experiencias didácticas alcanzadas en la formación investigativa de ingenieros biomédicos en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), durante el desarrollo de la impartición semipresencial de cursos de pregrado (Proyecto de Investigación I y II), que contribuyen al desarrollo científico y metodológico del Trabajo de Diploma como acto de culminación de los estudios universitarios, con el empleo integrado de los recursosde un Sistema de Gestión del Aprendizaje: Plataforma MOODLE (Foro, Presentaciones Dinámicas, Videos, WIKI, Tareas, Encuestas, Cuestionarios, etc.) y la Enseñanza Basada en Problemas (EBP), para lograr la adecuada motivación y formación investigativa en los estudiantes desde lo curricular.

Palabras clave: Ingeniería Biomédica, Formación investigativa, Pregrado, Sistema de Gestión del Aprendizaje.

1. Introduction

Nowadays, the professional education in Engineering [1] is limited by different factors such as the mobility toward the universities, the readiness of time and the costs in the education related

with the development of curricula, with a bigger essence of contents to reach certain objectives, competitions and abilities in the students, and a smaller number of present hours to achieve the professional appropriate formation, [2-3].

A possible solution to this complex situation can be developed with the integrated employment of the resources of a Learning Management System (LMS), that which allows to guarantee the transmission of knowledge, [4]. This alternative in occasions is limited by the technical characteristics of the computer services in the university institutions (bandwidth and computation capacity) and the level of pedagogic preparation of the teachers and their experiences in the didactic appropriate employment of the means and available resources.

In particular, in the undergraduate program, the flexible transmission of the knowledge constitutes one from the most complex problems to solve by teachers and students, the first with the responsibility of being better directors in the development of study methods including the formation of human values, and the seconds, as main actors of the teaching-learning process in search of better education [5-6] that includes the self-preparation.

As part of the educational services development by Department of Bioengineering (CEBIO) in the School of Automatic and Biomedical Engineering at Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), the educational community proceeded to introduce the combined employment of a LMS (MOODLE), the ICT (Information and Communications Technologies) and the techniques of LBP (Learning Based in Problems) for the development of several courses of the Integrative Discipline: Bioengineering (Table 1), which drives the investigative education of the students

from their first Research Training Practice in the middle of the curricula until the obtention of the corresponding degree as result of public sustentation of a thesis (exercise of culmination of the university studies), [7].

In these courses, numerous materials were included and diverse resources were used for the development of the participants, such as: dynamic presentations, scientific articles and patents, books, professional videos, surveys, questionnaires, forums, tasks and others (Table 2), that allowed the transmission and the exchange of experiences with more flexibility: *Any Time Any Where* [8-9], obtaining the best results in the research work and in the professional formation of the students, [10-11].

Table 1. Relationship of subjects in the discipline of Bioengineering (Program of Biomedical Engineering in CUJAE).

Subjects	Year	Main objective	Comments
Biomedical Engineering I	1	To characterize of the Program of Study and the university services	Annual subject developed by biweekly encounters that it includes visits to centers and institutions related with the profession and the design of biomedical technologies.
Biomedical Engineering II	2	To characterize the main devices (electric, optoelectronics and others) used in the design of biomedical technologies.	

Subjects	Year	Main objective	Comments
Research Training Practice I	2	To carry out an instrumental rising in the assigned center (it includes a project for the use of energy payees) and to detect a scientific problem of the specialty.	Concentrated activity at the end of the second semester during 21 days, that it allows the association of the student with a scientific problem related with the speciality (Bioengineering)
Project of Research I	3	To carry out the bid of a research topic applying a scientific method (Waterfalls method).	The student begins with the elaboration of a contract for planning the research process and analysis the feasibility of the research project proposal.
Research Training Practice II	3	To carry out the experimental phase of the research project	Concentrated activity at the end of second semester during 21 days, that it allows the student and their tutor to develop the design of scientific experiments for the confirmation of the departure hypothesis
		To carry out the analysis of the research results (it includes economic analysis);	The student prepares a POSTER for a scientific event, showing their research results

Subjects	Year	Main objective	Comments
Project of Research II	4	as well as the divulgation of these in a scientific event.	(the best works can be sent to a scientific journal).
Thesis of Diploma Work	4	To prepare and to sustain the investigation results for the obtaining of the degree.	Development of public defense of the Thesis for the analysis of student's professional education.

Source: own.

In a Learning Management System exists other more specialized resources that facilitate the learning "On line", for example: Open-meetings: resource for the development of teleconferences, virtual encounters and/or development of individual or group evaluation (Ex.: defense of research projects). This type of resources is not always available due to limitations of bandwidth, cost and security of the computer services offered by the university institutions.

Table 2. Resources of MOODLE used in the investigative formation of Biomedical engineering in CUJAE.

Resources	**Equivalence in the classic teaching**	**Comments**
Dynamic expositions	Present activities with oral expositions (Ex.: conferences, seminaries and others).	Used tools: Power Point and Video editor (Ex.: Camtasia Studio).
Database	Control book (assistance and evaluation).	It is used for the control of students' data and tutors (internal or external to the university).

BLOG	Present activities for the professional argument (Ex.: Seminars, Practical classes and others).	It is used by the participants for the presentation of reports in engineering format (IEEE) and dynamic expositions.
CHAT	Activities related with the explanation of doubts on imparted topics.	It permits the explanation (personalized or team) without barriers of time or place.
WIKI	Present activities for the professional argument (Ex.: Seminars, workshop and others).	It allows the development of group during the elaboration of specific topics, beginning from a text written by the professor.
Questionnaires, Surveys and Consultations	Activities of systematic evaluation (Questions, works of partial control and others).	It facilitates the control of the individual performance of the students so that the teacher can exercise a personalized attention.
Labels	Methodological orientation for the development of educational activities.	It facilitates the orientation of the activities to carry out for the students during the phases of their investigative preparation.
Tasks	Activities of partial evaluation (Ex.: Reports of research, seminars, workshops and others).	It facilitates the control of the individual performance of the students.

Source: own

2. Materials and methods

The tool basic employee was MOODLE (V3.2) mounted in a server developed with a cluster of two computers with good benefits and the PROMOX system that allowed to establish weekly copy, saving all contents of MOODLE and to work with complementary different virtual services: CEBIO WEB and repository (ftp site) of thesis, digital books, patents and articles of journals and congress related with the profession, avoiding the loss of information during the development of subjects.

In the preparation of different materials the basic tools of Office (WORD, EXCEL and Power Point) and a video editor (Camtasia Studio) were used, it allowed the elaboration of dynamic expositions (multimedia) in a format for their easy reproduction in the available means of the students (Table 3), such as: portable computers or of desk (personal or prepared in the calculations centers of the department and university), Tablets and the intelligent telephones of wide use in the university population. The participants were connected from any network point with national or international access to the MOODLE platform.

Table 3. Characteristic of the student sample in the group of Biomedical Engineering.

Total	Men	%	Women	%	Comments
63	33	52,3	30	47,6	The participants belong to 4 and 5 years of Biomedical Engineering (Course 2019-2020).

Source: own.

3. Implementation, results and discussion

The figure 1 shows the presentation of different courses in LMS: MOODLE-CEBIO, where the objectives and the content are declared; also, it shows the basic and complementary bibliography, and a group of methodological orientations for the students.

The following figures show the integrated employment of diverse resources and activities of LMS for the development of the courses, where it combines labels (Figure 2), presentations of contents in diverse formats (Power Point and videos) and research tasks (Figures 3 and 4) that increase their complexity when the learning is based on problems related with the profession.

In the work is included a database (Figure 5) and another information for use of teachers and the students (Ex.: Partial reports of evaluation, announcements with the bank of scientific problems of external institutions, and others).

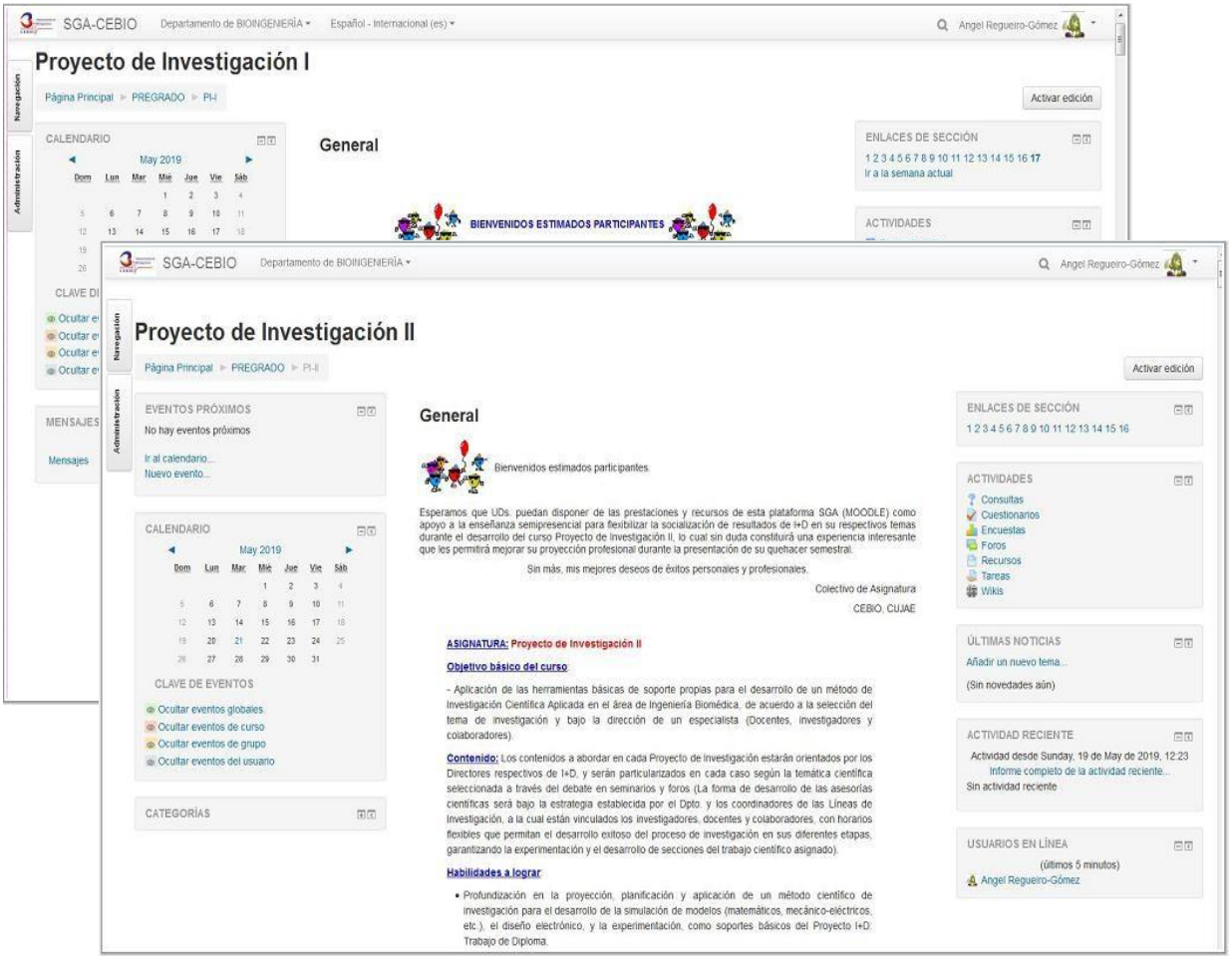


Figure 1. Windows of initial presentation of courses related with the research formation of the students in Biomedical engineering (CUJAE). Source: own.

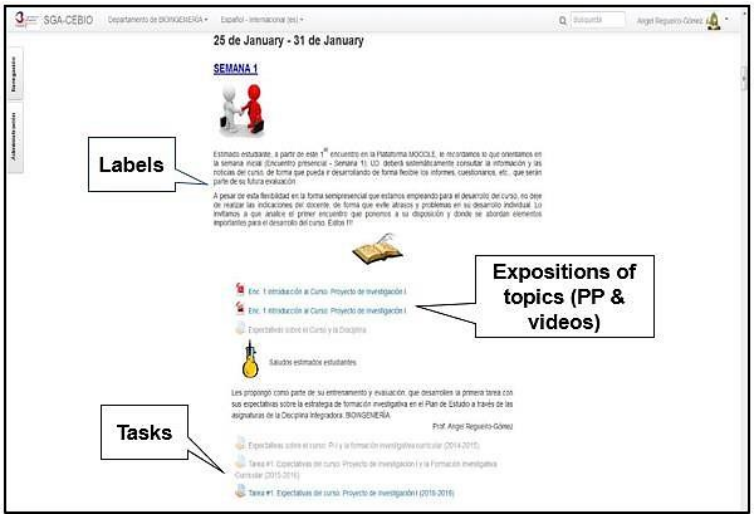


Figure 2. Example of resources integration for the development of the topics of the course: Research Project I in Biomedical engineering (CUJAE). Source: own.

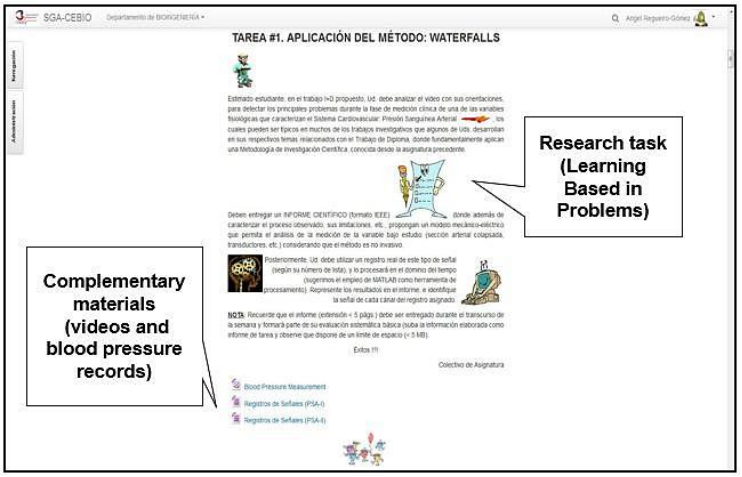


Figure 3. Orientation of research task (Measurement of Arterial Blood Pressure) in the course: Investigation Project II (Biomedical engineering, CUJAE). Source: own.

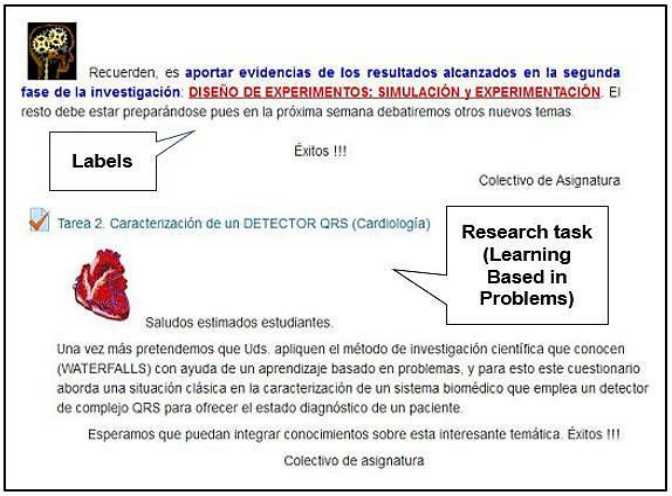


Figure 4. Orientation of research task (Characterization of QRS Detecting) in the course: Project of Research II (Biomedical engineering, CUJAE). Source: own.

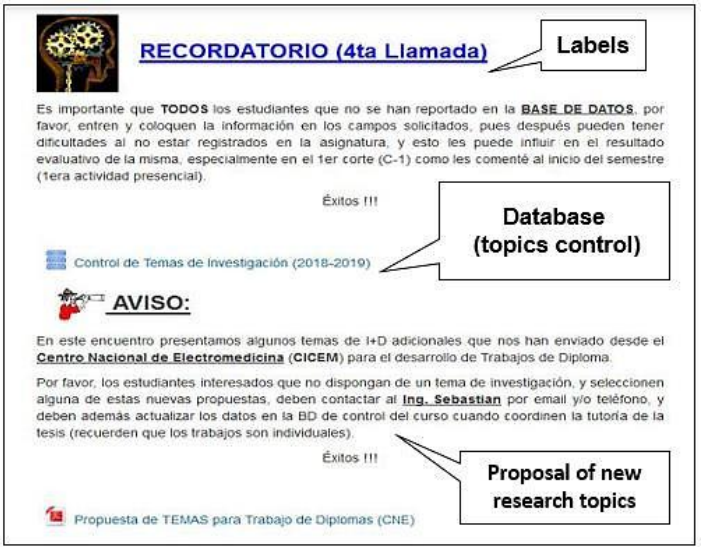


Figure 5. Employment of database for the control of the participants in the development of research topics associated to the course: Project of Research I (CUJAE). Source: own.

In the final phase of the research formation general, some topics of professional interest are proposed, such as the protection of scientific results (Ex.: patents and registrations of products) (Figure 6 Sect. Higher Left), and the development of technical records and costs of biomedical systems (Figure 6 Sect. Higher Rigth); besides using other resources like the socialization of previous research topics (Figure 6 Sec. Low Left) or the analysis of technical validation of biomedical technologies (Figure 6 Sec. Low. Right: topics are showed in English to reinforce the learning of that language in the biomedical program).



Figure 6. Examples of topics and activities developed in the courses of research formation in Biomedical engineering (CUJAE). Source: own.

The BLOG was the space used in the virtual teaching for the debate and socialization of advances and results achieved by the participants in their topics throughout the courses. This space of exchange scientific-technician showed the honesty of the participants, the responsibility in the handling of scientific information, the solidarity and creativity in the development of the assigned tasks; as well as the sense toward the institution and other ethical and juridical aspects related with the activities of the course.

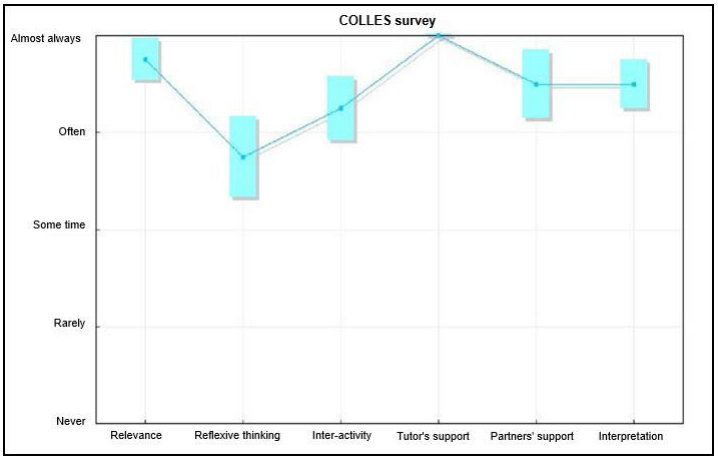


Figure 7. Results obtained of a COLLES survey applied in the LMS (MOODLE) to the participants. Source: own.

The figure 7 shows the approaches received in the application of a COLLES survey. This survey was used as instrument to measure the acceptance of the employment of the virtual teaching through the resources of LMS during research formation, showing very good results in the variables evaluated by the participants.

The survey applied shows that the process of the students' reflection was the lowest indicator,

due to the new form of focus of the proposed problems related with the profession. However, in general the participants showed good satisfaction (> 93 %) in the teaching shape and the general results of the courses.

4. Conclusions

The didactic strategies used for the virtual learning in the development of the research formation in the courses, with the combined employment of LMS's resources, the ICT and the techniques of Learning Based in Problems, has allowed a bigger flexibility in the educational process, with a bigger incidence personalized in the habits, abilities and methods of the participants, improving their academic and professional performance.

Acknowledgments

The authors appreciate the support offered by the project MORPHYs (PR-0435) development by Division of Instrumentation & Bioengineering at Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE) for the development of this research.

References

[1] Committee on Engineering Education, "Educating the Engineer of 2020: Adapting Engineering Education to New the Century", *NAE*, pp. 1-209, 2010. Available at: http://www.nap.edu/catalog/11338.html

[2] World Health Organization, “World health statistics overview 2019: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals”, Geneva: World Health Organization; pp. 1-28, 2019 (WHO/DAD/2019.1). License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

[3] World Health Organization, “Human resources for medical devices, the role of biomedical engineers”. Geneva: World Health Organization; pp.: 1-240, 2017. License: CC BY-NC- SA 3.0 IGO.

[4] J. Sappey and S. Relf, “Digital Technology Education and its Impact on Traditional Academic Lists and Practice”. *J. Univ. Teach. & Lear. Pract. 7(1), 7*(3), 2007.

[5] J. Candle-Valdés, “*The challenges of the Cuban new university”.* Paper presented at the Pedagogy 2007, Havana, Cuba, pp. 1-14, feb. 2007.

[6] K. M. Galotti, et al., “To New Way of Assessing Ways of Knowing: The Attitudes Towards Thinking and Learning Survey (ATTLS)”. *Sex Lists, 40*(9/10), 745-766, 1999.

[7] Ministerio de Educación Superior, Documento Ejecutivo Plan de Estudio: Ingeniería Biomédica, MES, La Habana, Cuba, págs. 1-10, 15 julio, 2017.

[8] T. T. Bekele, “Motivation and Satisfaction in Internet-Supported Learning Environments: To Review”. *Educ. Tech. & Soc., 13*(2), 116-127, 2009.

[9] S. N. Karagiannis, “The Conflicts Between Science Research and Teaching in Higher Education: An Academic's Perspective”. *J. Teach. and Lear. Higher Educ., 21*(1), 75-83, 2010.

[10] R. Garrote and T. Pettersson. “The use of learning management systems: A Longitudinal Case Study”. *Eleed, 8*. 2011.

[11] R. Hernández-Sampieri y otros, “*Metodología de la Investigación*. 6ta Ed., Ed. McGraw-Hill Education. México D. F., págs. 1- 634, 2014.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

3D ORGAN RECONSTRUCTION FROM COMPUTED TOMOGRAPHY (CT) IMAGES USING MATLAB

Reconstrucción 3D de órgano a partir de imágenes de Tomografía Axial Computarizada (TC) usando MatLab

Sara Daniela Galeano Galeano[1], Miguel Esteban Mora González[2], Ricardo Alonso Espinosa Medina[3]

Abstract

The three-dimensional processing and reconstruction of anatomical regions from medical images allows the application of a set of segmentation and filtering techniques to subsequently perform volumetric reconstructions and thus generate 3D computer representations of human anatomy, which is useful in the field of medicine to facilitate the analysis of human body structures. In this paper, a 3D reconstruction was performed from the segmentation, based on the differentiation by area, of the organ (kidney) and bone structures from a series of images from an abdominal CT. Also, we implemented an interactive interface for the visualization of the planes (frontal, sagittal and transversal). The interface that shows the different planes and

[1] BSc. (c) in Biomedical Engineering, Universidad ECCI, Colombia. Member of the Research Seedbed in Biomedical Applications-EMB-IEEE. E-mail: sarad.galeanog@ecci.edu.co ORCID:: https://orcid.org/0000-0002-2261-9109
[2] BSc. (c) in Biomedical Engineering, Universidad ECCI, Colombia. Member of the Research Seedbed in Biomedical Applications-EMB-IEEE. E-mail:miguele.morag@ecci.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3042-1530
[3] BSc. In Biomedical engineering, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. Specialist in Bioengineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. MSc. In Biomedical engineering, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. Current position: Universidad ECCI, Colombia. E-mail: respinosam@ecci.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7941-01382

also loads the 3D reconstruction that was generated in a separate process, gives the user the option to select any CT study that he has stored in his computer. This procedure, depending on the field of application, complements the interaction and analysis of anatomical structures to the physician, allowing the planning of a timely treatment that will help the preoperative analysis of complex pathologies and the formulation of surgical strategies.

Keywords: Processing, segmentation, reconstruction, medical images, interfaz, bone structure, kidney.

Resumen

El procesamiento tridimensional y la reconstrucción de las regiones anatómicas a partir de imágenes médicas permiten aplicar un conjunto de técnicas de segmentación y filtrado para para realizar posteriormente reconstrucciones volumétricas y así generar representaciones computacionales en 3D de la anatomía humana, que es útil en el campo de la medicina para facilitar análisis de las estructuras del cuerpo humano. En este artículo, se realizó una reconstrucción 3D a partir de la segmentación, basada en la diferenciación por área, del órgano(riñón) y estructuras óseas de una serie de imágenes de un TAC abdominal. También, implementamos una interfaz interactiva para la visualización de los planos (frontal, sagital y transversal). La interfaz que muestra los diferentes planos y también carga la reconstrucción 3D que se generó en un proceso aparte, da la opción al usuario de seleccionar cualquier estudio TAC que tenga almacenado en su ordenador. Este procedimiento, según el campo de

aplicación, complementa la interacción y análisis de estructuras anatómicas al médico, permite planificar un tratamiento oportuno que ayudará al análisis preoperatorio de patologías complejas y la formulación de estrategias quirúrgicas.

Palabras clave: Procesamiento, segmentación, reconstrucción, imágenes médicas, interfaz, estructura ósea, riñón.

1. Introduction

Currently, medical imaging has become one of the main resources for the diagnosis and, consequently, treatment of diseases in their early stages, due to medical images make it possible to recognize structures and organ function inside the body, [1] [2].

The medical technologies available to obtain images of the body are varied, both in their principle of operation, as well as in complexity and forms of use. However, many of these technologies (Computed Axial Tomography (TC), Magnetic Resonance Imaging (MRI), Mammography, Positron Emission Tomography (PET), etc.) have standardized the format in which medical images are presented for further study, [3].

Most medical images are presented in the standard DICOM format, which establishes the mechanism for codify, storage, and transmit medical image that contain a large amount of information not only graphic, but also personal and clinical information of the patient, as well as the characteristics of the test and the biomedical technology used to generate the image [4] [5].

In the field of medical image processing, there are numerous techniques that make it possible

to manipulate the characteristics of the image, in terms of its format, dimensions, color intensities, types of values, pixels, among others, [6].

An image, in general terms, is an array of x rows by y columns, each coordinate (*x, y*) refers to a pixel, which contain different values, usually a gray scale. The shapes present in the image are those interpreted by the specialist to confirm or discard pathologies in patients. These images can be the representation of the body's organs in any of the frontal, sagittal or transversal planes. Technologies such as CT or MRI, take a number of transverse images of the body, called slices. The set of tomographic slices adds the depth coordinate (*z*), determined by the thickness of the slice. Then, the cubic unit of three-dimensional elements, associated with the spatial coordinates (*x, y, z*), is the main unit called the voxel. The set of volumetric units allows the representation of anatomical structures, processing the images, in a two-dimensional way in any plane (sagittal, frontal or transversal) [7]. Figure 1 shows the representation of a set of axial slice images obtained by CT.

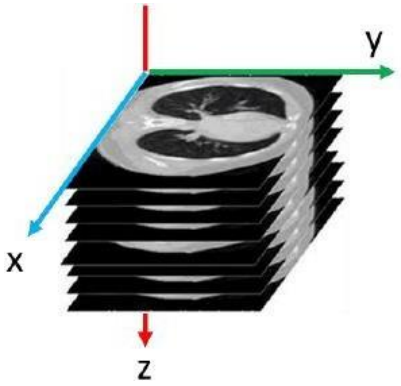


Figure 1. TC images of axial sections. Modified from [8].

The image configuration shown in Fig. 1 is the first notion of volume in 3 dimensions. Because you can reconstruct an image (arrays rows (*x*) by columns (*y*)) of any plane, considering the sequence of images (slices (*z*)). A representation of this is shown in Figure 2, where the images in the transverse plane are an *x*-by-*y* array, the images in the sagittal plane are a *z*-by-*x* array, and the images in the frontal plane are a *z*-by-*y* array.

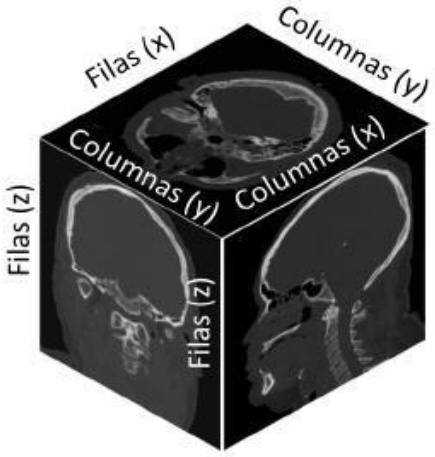


Figure 2. CT images of axial sections. Source: own.

Medical image processing techniques currently allow for 3D reconstructions of human body structures. This has made it possible to improve diagnostic analysis in the clinical field, facilitate visualization and interaction for detailed planning of medical-surgical treatment. Innovative techniques and tools in the field of neurology make it possible to segment white matter, gray matter and cerebrospinal fluid automatically from volumetric acquisitions and reconstructions [7] [9].

The extraction of the morphological characteristics of the anatomical structures to be

reconstructed in 3D, requires first a process of segmentation, in which the area of interest is delimited. For this, algorithms are developed based on characteristics such as the discontinuity or similarity in the uniformity of certain areas of the image, to isolate them from the rest of the elements that make up the image, [10]. In this way, the segmentation techniques allow to select the data that will be included or not in the 3D reconstruction, [11].

The reconstruction of three-dimensional images corresponds to a process in which objects or delimited regions of the medical images are reproduced in the computer memory to represent and maintain characteristics in terms of shape, dimensions and volume, [12]. Figure 3 shows the result of 3D reconstruction techniques, which incorporate meshing methods to carry out the connection of a set of points that are representative of the structure of interest. This has involved the development of innovative tools in the field of medical imaging.

This study proposes a methodology for processing medical images, to extract characteristics of selected organs from DICOM images, allowing their individualization and subsequent three-dimensional reconstruction. It also shows the implementation of an interactive interface in MatLab's GUI for the visualization of CT studies in their different planes and 3D reconstruction performed in parallel. With the purpose of providing an alternative that allows the development of technologies that facilitate the diagnosis of diseases and the planning of more timely treatments.

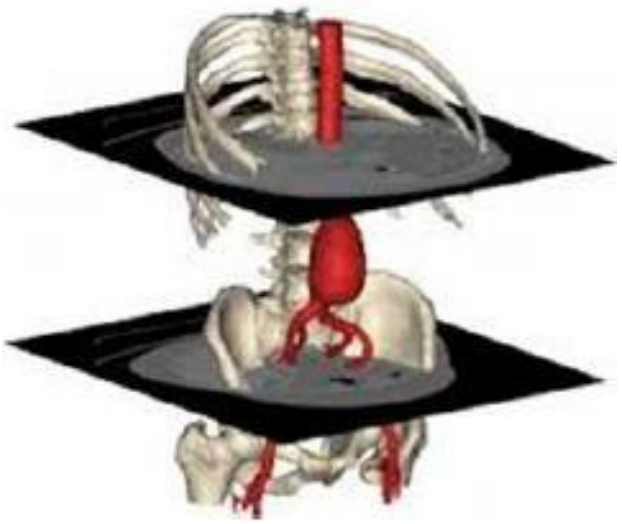


Figure 3. CT images of axial sections. Extracted from [8].

2. Methodology

h. Description of DICOM images

The DICOM images used in this study were extracted from the DICOM Library web portal, a repository of free online medical images, for educational or scientific purposes. The processed images belong to an abdominal CT, with the following characteristics: 361 DICOM images, resolution of 2^{16} (grayscale), dimensions of 512 x 512, [13].

i. 3D Reconstruction

The 3D reconstruction process implemented is described by the following flow diagram Figure 4.

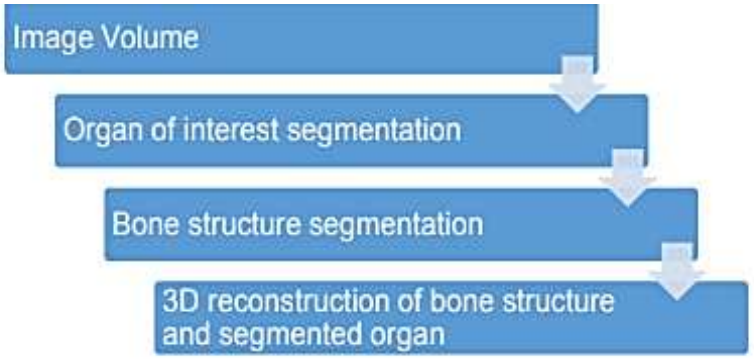


Figure 4. 3D Reconstruction flow diagram. Source: own

i. Image Volume

We use functions intended for processing images in '.dcm' format, belonging to the Matlab software, such as “[D,spatial,dim]= dicomreadVolume(details)”; that reads a series of images and creates a volume of images 'V' defined by the coordinates V(*x,y,z*), being; X and Y the dimensions of each image, Z the number of images that compose the volume.

ii. Organ of interest segmentation

In the human body, in most cases, the organs occupy a fixed place that facilitates their identification. Therefore, for the process of segmentation, we define and take only areas of interest according to the organ for the images of the study used. Then, from the previously created volume of 'V' images, we delimited different sections or groups of images in which the

area did not have significant variations, with the purpose of maintaining the shape of the organ in the elimination of elements that are not part of it.

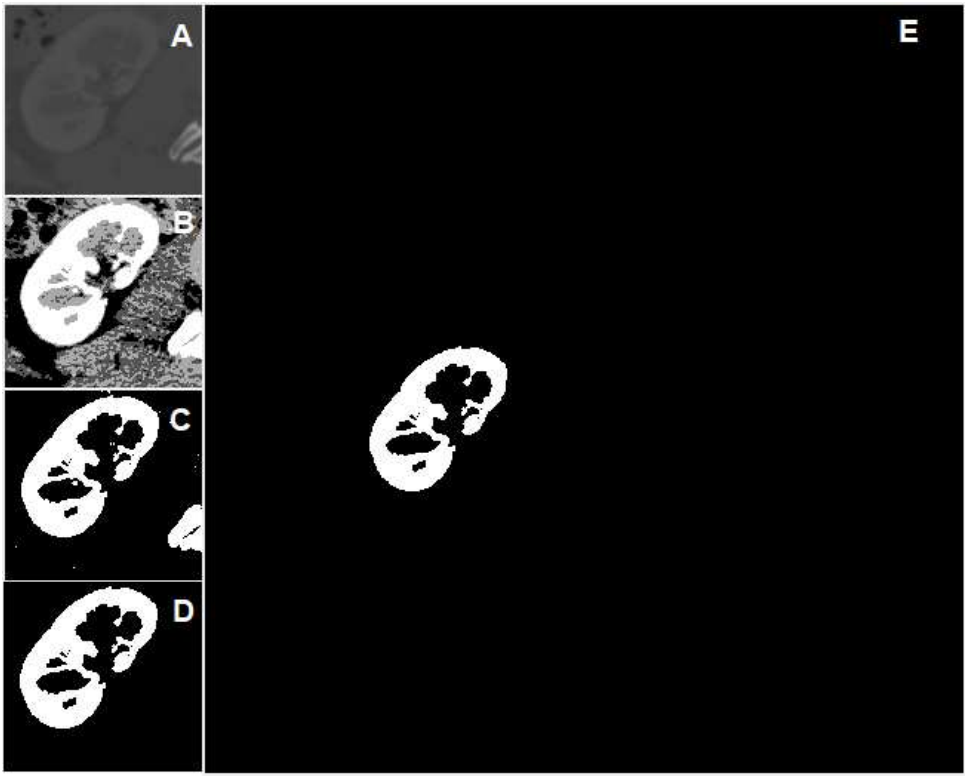


Figure 5. Segmentation process. Source own.

Having the image delimited (A) in Figure 5, the variation of the contrast allowed a clear differentiation of the organ of interest, which now has the highest level of gray, (B). With this it is possible a binarization that will eliminate areas that are not part of the organ (C). However, elements with the same level of gray that are not part of the organ are maintained, and this is eliminated by area discrimination (D).

To preserve the location of the segmented organ in the original image, was created a zero-array, and the segmentation (E) is placed on the same coordinates from which the organ was taken in gray. This process was performed for all the images of each defined section. With these, a volume of images was created that is complemented with images in zero, to maintain the same dimensions of the original volume 'V'.

iii.Segmentation of bone structures

Due to their higher density, the bone structures, in the CT images, are shown in light gray (high values). For this reason, a traditional binarization was used, comparing the values of each pixel with a high value threshold to reach the greys that represent the bone structures. Pixel values above or equal to the threshold will be replaced by white (maximum value). Pixel values below the threshold will be replaced by black (minimum value). Most organs have much lower gray values, which results in individualization of the bone structure and elimination of all other shapes. This technique works well for the whole set of images. With the images of the bone structures a volume of images was created, in the same way as the previous step.

iv.3D reconstruction of bone structure and segmented organ

Several 3D reconstruction methods can be used, in this case 3D triangulation was used with Matlab's "patch" function, which uses the so-called "Faces" and "Vertices" given by the "isosurface" function from the contours of the generated volumes. The patch function also allows to give color to each structure, among other characteristics.

j. Interactive application

In Matlab's GUIDE, we created an interactive interface that allows: loading different CT image studies selected by the user; displaying views of the transverse, frontal and sagittal planes, and showing a visualization of a 3D reconstruction in a different window.

i. Structure and function

In addition to the DICOM image processing functions mentioned above, functions were used to select files of interest. This allows the user to select the location of the files and create the volume of images to be studied.

For the visualization of the sagittal and frontal planes, the created volume was rewritten taking into account changes in the axes (rows, columns and slices) as appropriate, in general the CT scan is taken transversely. In the interface each plane is shown separately in a window. The structure of the interface is shown in the Figure 6.

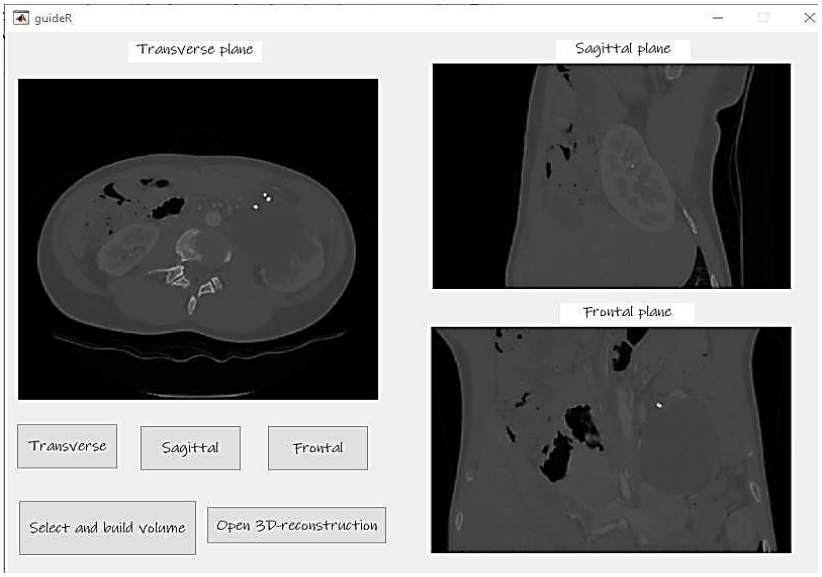


Figure 6. Interface structure and function. Source own.

6. Results

In this section, the results obtained in the reconstruction of the selected organ (kidney) and the bone structures, integrated in the same figure, are shown. The scale in Figure 7 and 8 shows, on the vertical axis (*z)*, a range of values from 1 to 361, which corresponds to the number of slices in the DICOM image set. In 3D reconstruction, the *z*-axis corresponds to the height of the structure and depends on the number of slices in the study image set. The scales at the base of the Figure 7 and 8, the *x* and *y* axes correspond to the depth and width of the bone structure respectively.

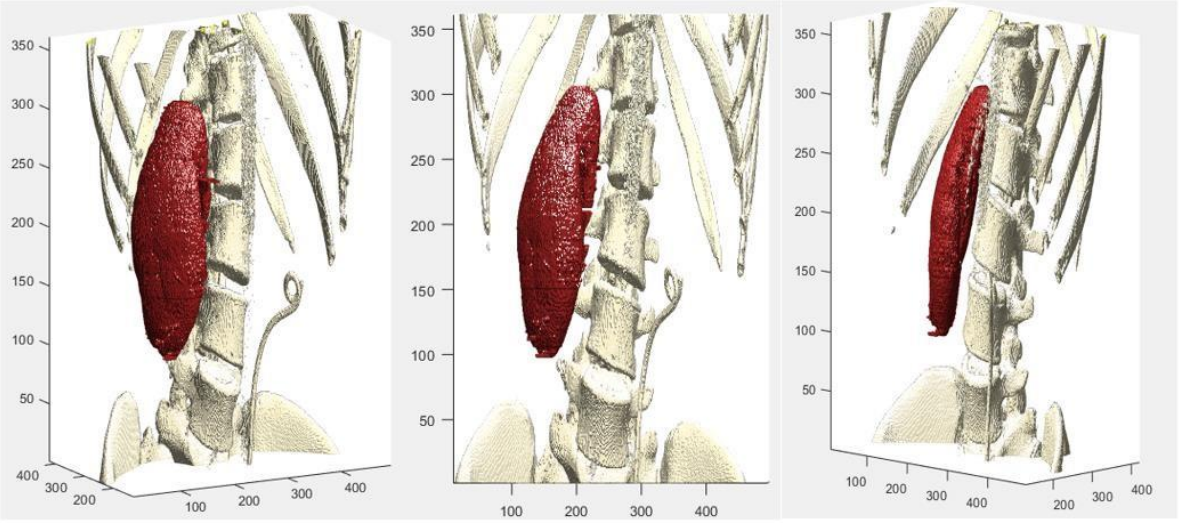


Figure 7. Left, front and right isometric view of 3D reconstruction of right kidney and bone structure. Source: own.

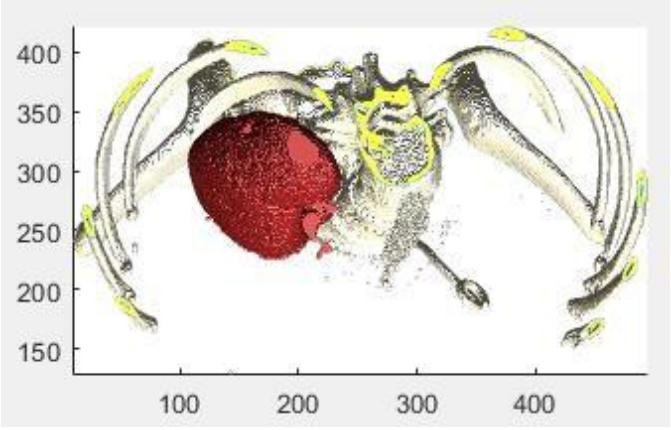


Figure 8. Top view of 3D reconstruction of right kidney and bone structure. Source own.

The interactive interface, shown in Figure 9, allowed the visualization of DICOM images in the different planes (sagittal, transversal, frontal) and the 3D reconstruction. The interface is intuitive and easy to understand. It is composed of 4 buttons: three for the different planes and

the fourth button to show the 3D reconstruction.

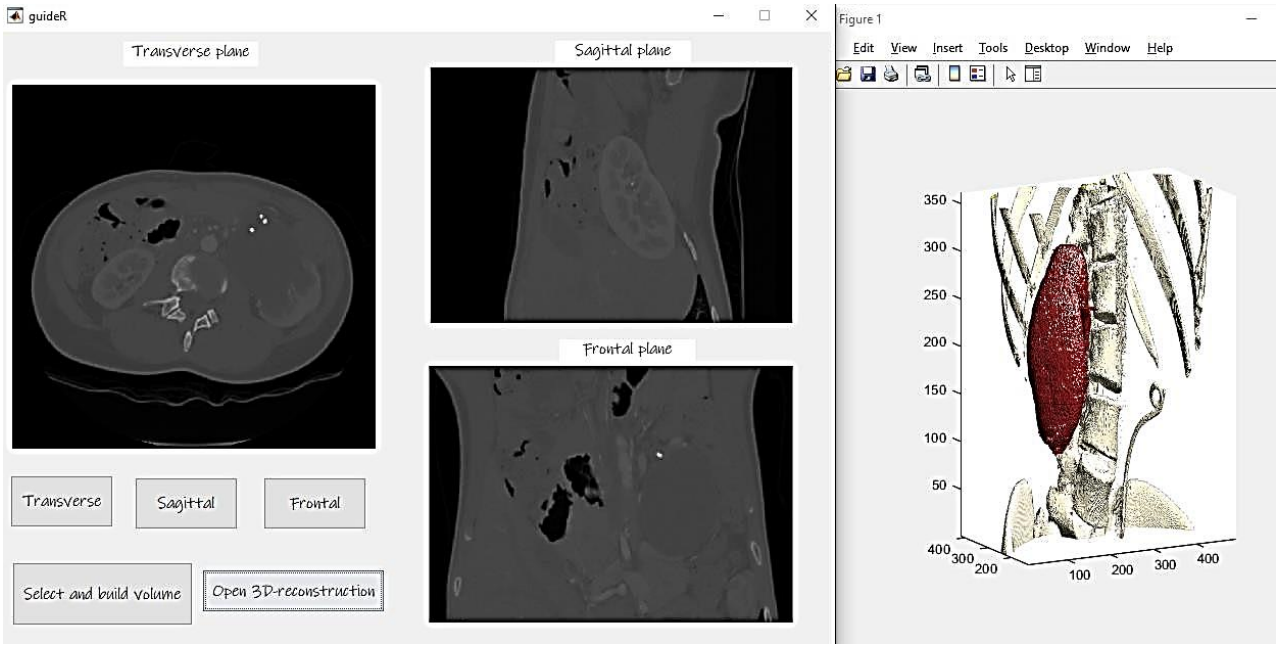


Figure 9. Interface interactive. Source: own.

7. Conclusions

In this work we present a 3D reconstruction from images of a CT study. We use a segmented method based mainly on differentiation: by the area of organ of interest, in this case the kidney, and grey intensities for the case of bone structures. We also created an interactive interface for the visualization of different planes, selected by the user in order to show more details of the studied organs as parallel information to the visualization of the structure in 3D. This double visual information can be of great interest to the specialist. The 3D images give the possibility of a better location of structures in the real three-dimensional space, gives a greater degree of

spatial manipulation, details in the set of structures.

This type of procedure can have several utilities, depending on the field of application, it complements the interaction and analysis of anatomical structures to the physician or user, to plan a treatment or establish a timely diagnosis that helps the preoperative analysis of complex diseases and the formulation of surgical strategies. The 3D processing and visualization platforms also have a potential use as an educational tool that complements the learning process for students in the health area by complementing theoretical concepts and adding interactivity with 3D models of real cases.

This work is part of a research project in which we seek, from the results obtained, lead to an augmented reality software or virtual. The augmented reality allows to integrate reconstructed structures to a real environment while the virtual reality gives the possibility to interact in the virtual reconstruction space. This will give the possibility of studying or analyzing in more detail pathologies of interest, for example, the identification of tumors, adding the advantages provided by virtual reality or augmented.

References

[1] R. N. Strickland, Image-Processing Techniques for Tumor Detection, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2002.

[2] J. Thirumaran y S. Shylaja, «Medical Image Processing – An Introduction,» *International Journal of Science and Research (IJSR),* vol. 4, nº 11, pp. 1197-1199., 2015.

[3] F. Ballester y J. M. Udías, «Física Nuclear y Medicina,» *Rev Esp Fís,* vol. 22, nº 1, pp. 29-36, 2008.

[4] P. Mildenberger, M. Eichelberg y E. Martin, «Introduction to the DICOM standard,» *European Radiology,* vol. 12, p. 920–927, 2002.

[5] C. E. J. Kahn, J. A. Carrino, M. J. Flynn, D. J. Peck y S. C. Horii, «DICOM and Radiology: Past, Present, and Future,» *TECHNOLOGY TALK,* vol. 4, nº 9, pp. 652-657, 2007.

[6] A. P. Bhagat y M. Atique, «Medical images: Formats, compression techniques and DICOM image retrieval a survey,» *2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS),* pp. 172-176, 2012.

[7] D. P. Hanson y R. A. Robb, «Chapter 45 - Three-Dimensional Visualization in Medicine and Biology,» de *Handbook of Medical Image Processing and Analysis (Second Edition)*, 2009, pp. 755-784.

[8] El Hospital, *Reconstrucción 3D de la anatomía humana a partir de imágenes médicas obtenidas por ayuda diagnóstica,* 2016.

[9] J. M. Selman R., «Aplicaciones clínicas del procesamiento digital,» *Revista Médica Clínica Las Condes,* vol. 15, nº 2, 2004.

[10] M. Solaiyappan, «Chapter 44 - Visualization Pathways in Biomedicine,» de *Handbook of Medical Image Processing and Analysis (Second Edition)*, 2009, pp. 729-753.

[11] J. Rogowska, «Chapter 5 - Overview and Fundamentals of Medical Image Segmentation,» de *Handbook of Medical Image Processing and Analysis (Second Edition)*, 2009, pp. 73-90.

[12] A. Escobar Díaz y L. A. Calderón, «Modelo tridimensional de extremidad inferior basado en imágenes de resonancia magnética,» *Visión electrónica,* vol. 3, nº 1, pp. 4-15, 2009.

[13] DICOM Library & medDream, «Dicom Library (Modality CT),» 2011. [En línea]. Available: https://www.dicomlibrary.com/.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

SIMULATOR OF SURFACE ELECTROMYOGRAPHY

Simulador de electromiografía de superficie

Juan Camilo Gallo Padilla[1], Ricardo Alonso Espinosa Medina[2], Jairo Lenin Ramón Valencia[3]

Abstract

The study of electromyographic signals at the time of a global pandemic has been reduced, since the possibility of attending a bio signal laboratory has been null for some people, in this article a surface electromyography simulator (EMGs) is proposed with pedagogical application, this is carried out to characterize a real EMG signal, obtaining characteristics characteristic of it, in the domains of time, such as amplitude and frequency, as the harmonics are signal, noise and randomness, so that in this way, its behavior can be emulated through 21 harmonics (11 for the state of contraction and 10 for the relaxation), using different circuits composed in principle by operational amplifiers, an EMGs signal with behavior similar to a real one is

[1] BSc. (c) in Biomedical Engineering, Universidad ECCI, Colombia. Member of the Research Seedbed in Biomedical Applications-EMB-IEEE. E-mail: juanc.gallop@ecci.edu.co. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2697-6223

[2] BSc. in Biomedical Engineering, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. Specialist in Bioengineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. MSc. in Biomedical engineering, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. Leader of the Research Seedbed in Biomedical Applications-EMB-IEEE. Current position: Universidad ECCI, Colombia. E-mail: respinosam@ecci.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7941-0138

[3] BSc. in Biomedical Engineering, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. PhD. Engineering Tecnológicas Industriales from the Polytechnic University of Cartagena, Spain. Group Investigation "Rangel Rehabilitación" de la IPS Rangel Rehabilitación, Bogotá, Cundinamarca, E-mail: investigacion@rangelrehabilitacion.com.co. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0055-126X

obtained that can be used in signal processing or observing behavior without attending a laboratory.

Keywords: frequency domain, harmonic, operational amplifier, simulate, surface electromyography, time domain

Resumen

El estudio de señales electromiográficas en tiempo de una pandemia mundial ha sido reducido, puesto que la posibilidad de asistir a un laboratorio de bioseñal ha sido nula para algunas personas, en el presente artículo se propone un simulador de electromiografía de superficie (EMGs) con aplicación pedagógica. Para esto se caracterizó una señal de EMGs real, obteniendo características de amplitud y frecuencia para los eventos relajación y contracción voluntaria de un musculo. Las señales características de relajación y contracción se simularon mediante señales periódicas, así como los ruidos más frecuentes que contaminan la señal (artefactos por movimiento, 60Hz de la línea eléctrica y transmisiones de radio). Las señales constan de 21 armónicos (11 para el estado de contracción y 10 para el de relajación), sumadas y acondicionada con amplificadores operacionales. Las señales de EMGs obtenidas, presentan características similares a las señales reales. Esta simulación de EMG puede ser utilizada en el desarrollo de dispositivos que necesiten de la captura de señales EMG.

Palabras clave: Simulador, EMGs, señales, características reales, circuito electrónico.

1. Introducción

La rehabilitación física tiene sus inicios en el imperio chino, donde se utilizaba como terapia basada en movimientos del Cong Fu, el médico griego Herodicus desarrolló una serie de ejercicios basados en gimnasia para la prevención y/o tratamiento de enfermedades en el siglo quinto, el médico Romano Galen describió intervenciones para rehabilitar lesiones militares en el segundo siglo después de Cristo. Durante la edad media, el filósofo y médico Maimonides destacó los principios Talmúdicos de hábitos de ejercicios sanos, así como la dieta, métodos de medicina preventiva. En 1569, el filósofo-médico Mercurialis promovió la gimnasia como un método tanto preventivo como de rehabilitación, llamándolo “El arte de la gimnasia”. En el siglo 18 Niels Stenson exploró las biomecánicas del movimiento humano y Joseph Clement en 1780 promovió el valor del movimiento como una alternativa al reposo después de una cirugía [1].

Una de las ciencias que se ha desarrollado conjuntamente con la rehabilitación es la electromiografía (EMG), consiste en la detección y análisis del potencial eléctrico producido durante la contracción muscular, la electromiografía de superficie (EMGs) pretende analizar la misma señal que la EMG convencional, con la diferencia de no utilizar electrodos implantables con agujas, haciendo el procedimiento de EMGs no invasivo, [2].

El uso de las tecnologías durante las últimas décadas ha sido desarrollado ampliamente y está siendo aplicado a la diversidad de escenarios de la medicina, estas han permitido generar múltiples metodologías y técnicas empleadas para la rehabilitación física, principalmente con

el fin de mejorar significativamente la calidad de vida de pacientes, mejorando su nivel óptimo de desempeño físico, sensorial, intelectual psicológico y social, [3].

Actualmente la tecnología médica cuenta con equipos robustos, resultado de un proceso de refinamiento en el diseño, desarrollo, fabricación y pruebas de funcionamiento. Sin embargo, en el campo de la rehabilitación los equipos capaces de diagnosticar y evaluar automáticamente el progreso físico de un paciente en rehabilitación aun no son muy populares, [5]. Para evaluar cada el daño de los pacientes, es importante verificar el estado electrofisiológico, a través de la EMG, este es un examen diagnóstico que permite identificar el estado neuro-muscular de acuerdo a valores estándar predeterminados saludables, [4].

Durante el 2020 la pandemia por COVID-19 impactó a la sociedad en general. Las universidades tuvieron que restringir el acceso a los laboratorios y las clases se fueron mediante telepresencialidad. Los programas como Ingeniería Biomédica realizan laboratorios para adquirir bioseñales, acondicionarlas y procesarlas. Ante la imposibilidad de poder utilizar laboratorios y estar en contacto con otras personas, el presente estudio propone un simulador de señales EMGs con características similares a señales EMGs reales, como alternativa en el proceso de formación de profesionales que desean a futuro diseñar dispositivos médicos centrados en la línea de rehabilitación física.

De otro lado, la electromiografía es un estudio encargado de sensar las señales eléctricas de los músculos en dos distintos eventos, reposo y activo, dicha técnica puede ser realizada de 2 maneras, directa o indirectamente, siendo la primera la electromiografía invasiva, utilizando

electrodos de aguja introducidos directamente en el músculo a analizar, la segunda de ellas es la electromiografía de superficie, se realiza a partir de electrodos puesto sobre la superficie de la piel, los cuales canalizan y suman temporal y espacialmente la activación de las unidades motoras al momento de contraer el músculo a analizar, [10].

2. Materiales y Métodos

Se diseña un emulador de señales de EMGs partiendo desde la generación de la señal con sus características reales (amplitud, frecuencia, ruido, entre otros). En esta sección se describen todas las etapas de generación (señales en mV), amplificación, filtrado y acondicionamiento, para lograr el control de una **señal** EMGs en un rango de 5Vpp.

2.1. Simulación de EMGs

Basados en una señal real adquirida en condiciones controladas. De esta señal se extraen 21 armónicos (11 para contracción y 10 para relajación), se tienen en cuenta factores reales, como lo son diferentes tipos de ruidos: artefactos, redes eléctricas y ambientales de 1 Hz, 60 Hz y 2 kHz, respectivamente. A la simulación de EMGs le sigue 2 etapas: preamplificación con una ganancia de 10820 veces y un filtrado que consta de 2 partes, la primera de ellas es un pasabanda de 10 – 500 Hz y un rechaza banda de 60 Hz, por último, se tienen 2 circuitos de control, el primero de ellos es un control de nivel offset y el último es un control de amplitud de la señal.

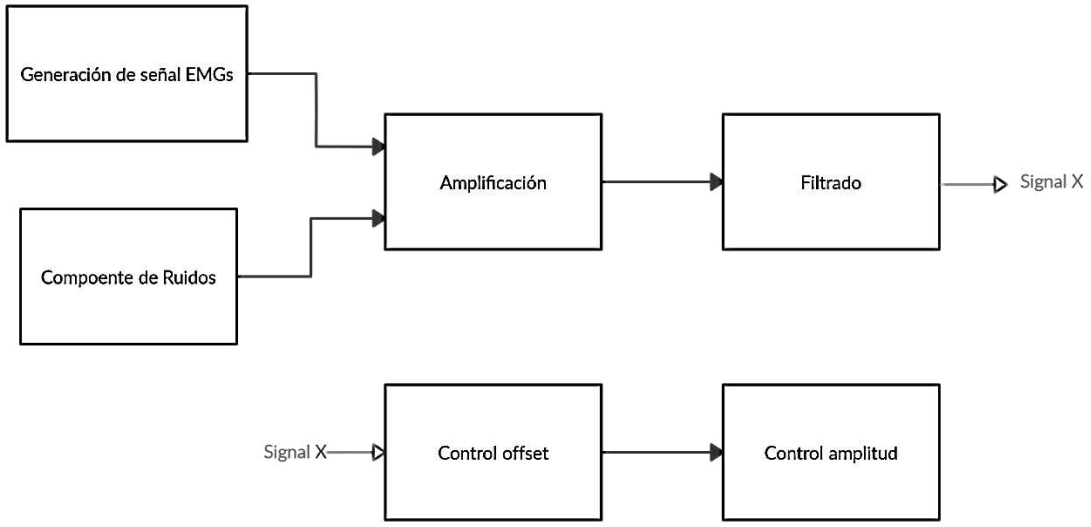


Figura 1. Diagrama de bloques del simulador EMGs. Fuente: elaboración propia.

b. **Señal EMGs**

La electromiografía de superficie (EMGs) es la medición de la sumatoria de los potenciales de acción producidos por unidades motoras (MUAPs, por sus siglas en inglés) en una contracción muscular [8], estas diferencias de potencial son sensados por electrodos puestos en la piel [6]. La EMGs mide la señal con una amplitud de su actividad en microvoltios, mientras que la EMG puede llegar a tener una amplitud en el orden de los milivoltios, [2,7].

En este estudio se utilizó una señal adquirida con una frecuencia de muestreo de 2000 Hz, se procesó mediante el software Matlab. En la Figura 2 se muestran la EMGs durante la relajación y contracción del musculo flexor de la muñeca.

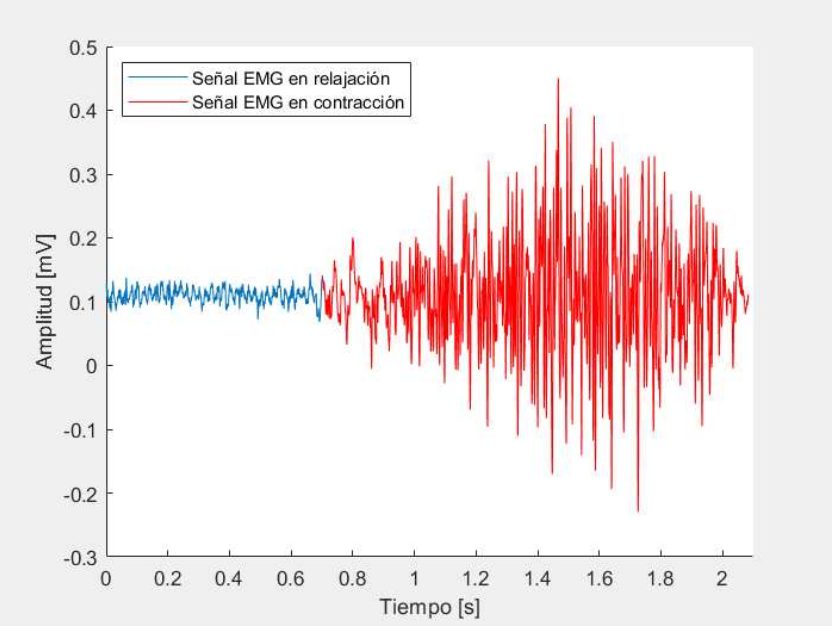


Figura 2. Gráfica de la señal original de EMGs a partir de la data. Fuente: elaboración propia.

Cada estado en la activación muscular tiene características propias, para el caso de la relajación presenta amplitudes promedio de 0.109 mV, máxima de 0.144 mV y mínima de 0.068 mV, un espectro de frecuencias en un rango de 10 – 100 Hz (Figura 3); la amplitud promedio de la contracción es 0.118mV, amplitud máxima 0.450 Vm y amplitud mínima -0.229 Vm. Se utiliza la función `pwelch` de MatLab® para graficar la densidad espectral potencia (valores normalizados) de la señal EMGs original (Figura 3.).

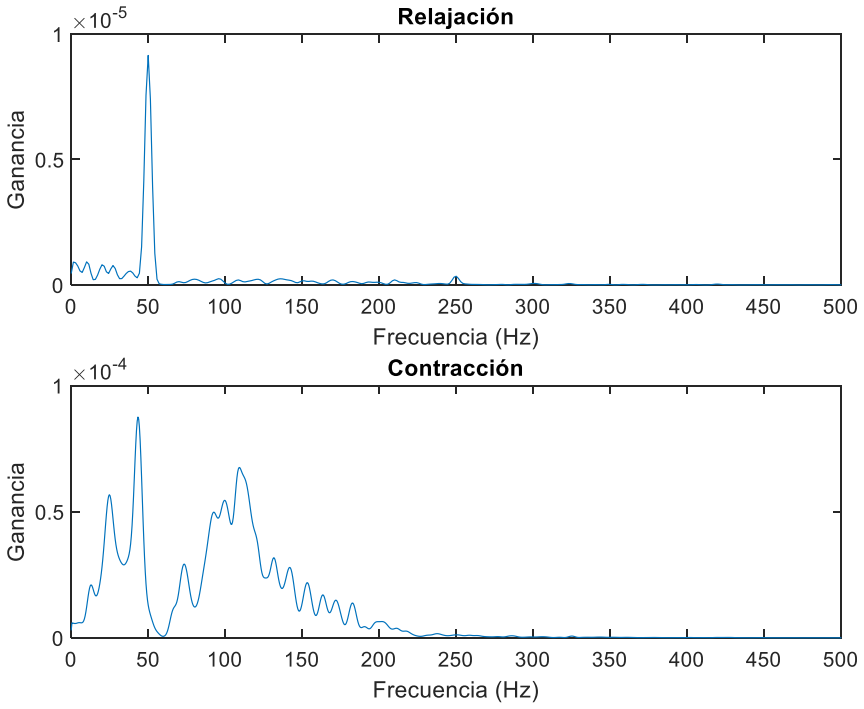


Figura 3. Gráfica de los espectros de la señal original en los 2 eventos. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 1 se muestran los armónicos que se extrajeron basados en el espectro de la señal real. Estos armónicos serán sumados con un amplificador operacional en configuración sumador inversor, acotando que cada uno de ellos tiene un desfase aleatorio entre $0° - 180°$, esto para representar aleatoriedad en las componentes de la señal original. Se incorporó un switch, lo que genera la posibilidad de intercambiar entre el estado de relajación y contracción, simulando una contracción voluntaria en un estudio de electromiografía

Tabla 1. Data de las señales utilizadas en el simulador EMGs para contracción y relajación.

Contracción			**Relajación**		
Señales	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]	**Señales**	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]
1	10	0,066	**12**	10	0,022
2	20	0,133	**13**	20	0,044
3	40	0,183	**14**	30	0,061
4	60	0,216	**15**	40	0,072
5	80	0,233	**16**	50	0,077
6	100	0,226	**17**	60	0,075
7	120	0,19	**18**	70	0,063
8	140	0,113	**19**	80	0,037
9	160	0,066	**20**	90	0,022
10	180	0,04	**21**	100	0,013
11	200	0,023			

Fuente: elaboración propia.

c. **Sistema de procesamiento de la señal**

i. **Preamplificación**

La etapa de preamplificación se lleva a cabo a través de un amplificador instrumental, puesto que la segunda etapa de éste es diferencial, haciendo que parte del ruido se elimine sin pasar por los filtros; partiendo de la ecuación general de ganancia de voltaje para este circuito:

$$A_V = \left(1 + \frac{2R_f}{R_o}\right)\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (1)$$

Donde R_f es 270 kΩ, R_o, R_1 1 kΩ y R_2 200 kΩ

Se procede a hallar un factor de amplificación de 10.820 veces aproximadamente

$$A_V = \left(1 + \frac{2(270\ k\Omega)}{2\ k\Omega}\right)\left(\frac{200\ k\Omega}{2\ k\Omega}\right) = 10820 \quad (2)$$

ii. **Filtro Pasabanda**

Se utilizan 2 amplificadores en configuración de no filtros Butterworth activos de 2^{do} orden para cada una de las partes que conforman al filtro (filtros pasa altos y pasa bajos), se calculan las frecuencias de corte a partir de las ecuaciones características para cada uno de los casos:

1. Filtro Pasa Altos, debe tener una frecuencia de corte en 10 Hz.

$$F_l = \frac{1{,}414}{2\pi\ R_l C_l} \quad (3)$$

Donde R_l es 10 kΩ y C_l es 2,2 µF.

$$F_l = \frac{1{,}414}{2\pi * 10\ k\Omega * 2{,}2\ \mu F} = 10{,}22\ Hz$$

2. Filtro Pasa Bajos, su frecuencia de corte debe ser de 500 Hz.

$$F_h = \frac{0{,}707}{2\pi\ R_h C_h} \tag{4}$$

Donde R_h es 2,2 kΩ y C_h es 0,1 µF.

$$F_h = \frac{0{,}707}{2\pi * 2{,}2\ k\Omega * 0{,}1\ \mu F} = 511{,}46\ Hz$$

d. Filtro Rechaza Banda

Se implementa un filtro notch en puente T de segundo orden activo para eliminar el componente de 60 Hz del espectro de frecuencias, puesto que este armónico es la frecuencia de la red eléctrica colombiana.

$$A_V = \frac{1}{2\pi\ RC} \tag{5}$$

Donde R es 5.6 kΩ, C es 0.47 µF, RR es 2.7 kΩ y CC es 1 µF

$$A_V = \frac{1}{2\pi * 5{,}6\ k\Omega * 0{,}47\ \mu F} = 60{,}46\ Hz$$

e. Control Offset

Se utiliza un amplificador operacional en configuración sumador no inversor, para realizar sumas algebraicas del nivel DC de la señal procesada en las etapas anteriores, con el fin establecerlo en un rango entre 0 y 5 V (Vcc) para una posterior conversión análoga digital.

Donde R son resistencias de 300 kΩ todas y cada una, y el potenciómetro de 10 kΩ.

f. Control amplitud de señal

Se utiliza un amplificado operacional en configuración de amplificador no inversora, con un potenciómetro de 20 kΩ y una R se 10 kΩ con el propósito de ser la última etapa de procesamiento análogo de la señal, antes de pasar a un proceso de conversión análoga digital, teniendo como ecuación de ganancia

$$A_V = 1 + \frac{P}{R} \tag{5}$$

Siendo P el potenciómetro y R la resistencia

g. **Componentes de Ruido**

Se añaden 3 componentes fundamentales de ruido a la señal original, esos armónicos son:

i. **Ruido de $1\ Hz$**

Esta componente se añade para emular el artefacto (ruido que se produce por movimiento corporal).

ii. **Ruido de $60\ Hz$**

El armónico de $60\ Hz$ se agrega porque es la frecuencia a la que trabaja la red eléctrica colombiana.

iii. **Ruido de $2\ kHz$**

Esta componente refleja el ruido de las condiciones ambientales, tales como el habla de las personas cerca del dispositivo, sonidos externos, trasmisiones de radio, entre otros.

3. Resultados

Se extraen componentes de amplitud y frecuencia, vistas en las Tabla 1, para emular el comportamiento de la EMGs, a partir de ello se desarrolla un simulador de electromiografía de superficie con características reales, tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, partiendo de armónicos tomados de una señal real, con la posibilidad de intercambiar entre los estados de relajación y contracción, emulando el comportamiento de contracción muscular voluntaria. En la Figura 4 se muestra el circuito completo desarrollado y se etiquetan las etapas principales del circuito.

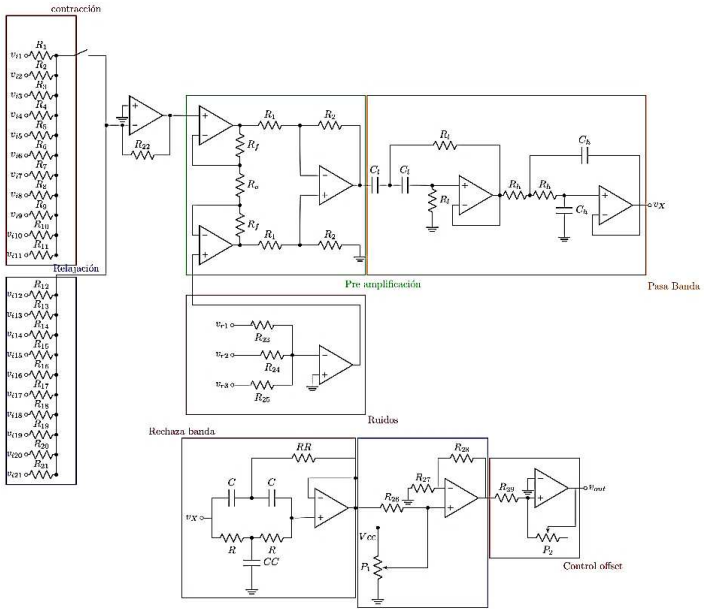


Figura 4. Circuito de simulador EMGs. Fuente: elaboración propia.

A partir del circuito de la figura 4, se puede generar un análisis entre la señal real y la señal simulada en los dominios del tiempo y la frecuencia, figura 5; donde se puede evidenciar una correlación entre ambas en armónicos representativos de cada una de ellas en los dos eventos de una señal electromiográfica, para que de esta manera se pueda comprobar el uso con un fin pedagógico en personas necesitadas de una señal electromiográfica a partir de una señal simulada.

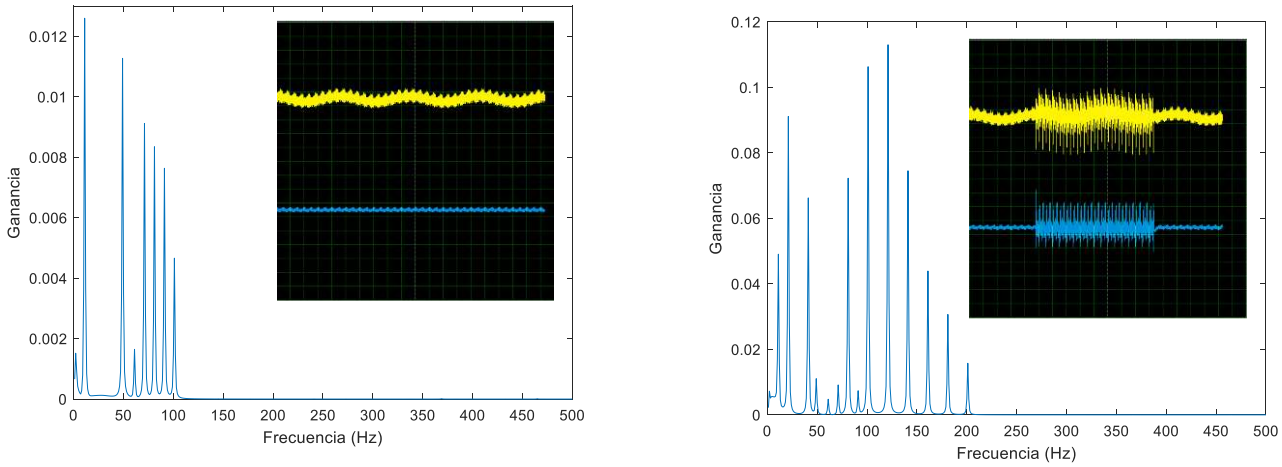


Figura 5. Señales resultantes en los dominios del tiempo y la frecuencia. Fuente: elaboración propia.

2. Conclusiones

El circuito obtenido permite que el interesado en el desarrollo de dispositivos médicos, en la línea de rehabilitación, puedan continuar sus diseños circuitales, sin la limitante de tener un sujeto para realizar pruebas, o desplazarse a tiendas de electrónica para adquirir electrodos, o un tener un simulador comercial que son de alto costo. Esta propuesta permite generar señales EMGs sintéticas en simuladores de electrónica de manera fácil y comprensible. Estas señales EMGs simuladas considera la contracción voluntaria por medio de un interruptor, de esta manera puede considerarse etapas posteriores de rectificación y envolvente, procesos comunes en los dispositivos que capturan y procesan señales de EMG reales. Durante el tiempo de confinamiento y mediante esta propuesta es posible continuar con los temas propios

de asignaturas como bioinstrumentación, sensores electrónica digital y análoga aplicada a instrumentos de medida biomédicos entre otros.

Los estudiantes de carreras relacionadas en el campo biomédico tienen un recurso que puede ser mejorado, puede ser utilizado para obtener señales de electromiografía de superficie sin necesidad de tener un sujeto de prueba dada la contingencia del momento, que no deba ir a un laboratorio a capturar dicha señal con un paciente, sino que puede continuar sus diseños a partir de dicha señal simulada; para crear filtros, u otros tipos de etapas de acondicionamiento que ayuden al diseño de dispositivos.

Los diseños de los dispositivos no pueden ser frenados por la pandemia del COVID-19, se tiene que seguir con la dinámica tanto de aprendizaje como de diseño debido a que hay pocos equipos relacionados en el campo tanto de rehabilitación física como de captura de electromiografía, aunque comercialmente existen, este evento que está pasando en la sociedad no puede convertirse en un retroceso para la creación de nuevas tecnologías orientadas en el campo de la rehabilitación y de la biomédica o cualquier campo afín.

Referencias

[1] L. Atanelov, S. A. Stiens, and M. A. Young, “History of physical medicine and rehabilitation and its ethical dimensions”, AMA journal of ethics, vol. 17, no. 6, pp. 568–574, 2015. DOI: 10.1001/journalofethics.2015.17.6.mhst1-1506 URL: https://journalofethics.ama-

assn.org/article/history-physical-medicine-and-rehabilitation-and-its-ethical-dimensions/2015-06

[2] M. C. Garcia and T. Vieira, “Surface electromyography: Why, when and how to use it”, Revista andaluza de medicina del deporte, vol. 4, no. 1, pp.17–28, 2011. URL: https://www.elsevier.es/es-revista-revista-andaluza-medicina-del-deporte-284-articulo-surface-electromyography-why-when-how-X1888754611201253

[3] J. C. Guerrero Pupo, I. Amell Muñoz, and R. Cañedo Andalia, “Tecnología, tecnología médica y tecnología de la salud: algunas consideraciones básicas”, Acimed, vol. 12, no. 4, pp. 1–1, 2004. URL: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352004000400007

[4] J. A. A. Londoño, E. C. Bravo, and J. F. C. García, “Aplicación de tecnologías de rehabilitación robótica en niños con lesión del miembro superior”, Revista Salud UIS, vol. 49, no. 1, pp. 103–114, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.18273/revsal.v49n1-2017010 URL: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121080720170001001 03&script=sci_abstract&tlng=es

[5] F. Salvuci and R. Kohanoff, Tecnologías de rehabilitación. Wiley-Interscience, 2016.

[6] A. Merlo and I. Campanini, “Technical aspects of surface electromyography for clinicians”, The open rehabilitation journal, vol. 3, no. 1, 2010. DOI: 10.2174/1874943701003010098 URL: https://benthamopen.com/ABSTRACT/TOREHJ-3-98

[7] F. J. Juan, “Utilidad de la electromiografía de superficie en rehabilitación” URL: https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Juan-Garcia/publication/316588275_UTILIDAD_DE_LA_ELECTROMIOGRAFIA_DE_SUPERFICIE_EN_REHABILITACION/links/5905b86c4585152d2e957860/UTILIDAD-DE-LA-ELECTROMIOGRAFIA-DE-SUPERFICIE-EN-REHABILITACION.pdf

[8] J. W. Meklenburg, S. K. Patrick, and S. D. Jung, “Surface electromyogram simulator for myoelectric prosthesis testing,” 2010. URL: https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/1402/

[9] Merletti Roberto, and Dario Farina. *Surface electromyography: physiology, engineering, and applications.* Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016, online. ISBN: 9781119082934, DOI: 10.1002/9781119082934

[10] E. Guzmán, G. Méndez, “Electromiografía en las Ciencias de la Rehabilitación”, Salud Uninorte, Vol 3, no. 3, pp 753-765, 2018



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

ENERGIAS

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

PARAMETERIZATION OF A PHOTOVOLTAIC MOTOR

Parametrización De Un Motor Fotovoltaico

Yaqueline Garzón Rodríguez[1], Fernando Martínez Santa[2], Luis Hernando Laguna Garzón[3], Diego Fernando Niño Rodríguez[4]

Abstract

Solar radiation, as a free energy source, becomes a candidate to be used in energy transformation processes that provides an energy solution for non-interconnected areas, either through distributed or isolated generation. This leads to the development and construction of a photovoltaic motor prototype that takes advantage of the principles of electricity and electromagnetism. To obtain it, it starts with the construction of a prototype that identifies aspects such as operating temperature, lighting conditions, among other aspects; in an artificial environment through experimental tests carried out on its components. At the same time,

[1] Electrical Enginner, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. MSc. In information and comunications Sciences, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Professor: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: ygarzonr@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4265-1971

[2] Electronic Control and Instrumentation Engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. MSc. In Engineering, Universidad de los Andes, Colombia. Professor: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: fmartinezs@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2895-3084

[3] Electrical Enginner, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Current position: Information Analysis Technologist, Incremental management leader WSP Colombia, Colombia. E-mail: dfniñor@correo.udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1752-839X

[4] Electrical Enginner, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Current position: Maintenance Assistant Technologist, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, ESP, Colombia. E-mail: lhlagunag@correo.udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9127-0473

simulations are developed in the COMSOL Multiphysics® software that allow to improve the functioning of its physics.

In the same way, to optimize the behavior of the motor, it is parameterized with the use of sensors located both inside and outside. As an application, a water pumping system is implemented, coupling a turbine to increase the flow at its outlet for filling a tank. This being one of the first applications documented in the academic field for this type of engine.

Keywords: artificial, lighting, electromagnetism, engine photovoltaic, flow, Mendocino motor, photoelectric effect, pseudo-levitation.

Resumen

La radiación solar, por ser una fuente de energía libre, se convierte en una candidata para ser utilizada en procesos de transformación de energía que brinde una solución energética para zonas no interconectadas, ya sea mediante generación distribuida o aislada. Esto conlleva al desarrollo y construcción de prototipos de motores fotovoltaicos que aprovechen principios de electricidad y electromagnetismo. Para su obtención, se parte de la construcción de un prototipo que permita identificar aspectos como la temperatura de funcionamiento, condiciones de iluminación, entre otros aspectos, en un entorno artificial mediante pruebas experimentales realizadas a sus componentes. A su vez se desarrollan simulaciones en el software COMSOL Multiphysics® que permiten mejorar el funcionamiento de su física.

De igual forma, para optimizar el comportamiento del motor, éste se parametriza con el uso de sensores ubicados tanto en su interior como en el exterior. A manera de aplicación se

implementa un sistema de bombeo de agua, acoplando una turbina para el aumento del caudal en su salida para el llenado de un tanque, destacando que esta es una de las primeras aplicaciones documentadas, en el ámbito académico, para este tipo de motor.

Palabras clave: caudal, efecto fotoeléctrico, electromagnetismo, iluminación artificial, motor mendocino, pseudo-levitación, turbo-maquinaria.

1. Introducción

El concepto de motor fotovoltaico o motor de energía solar es descrito por primera vez en 1959 por W. A. Marrison [1] y patentado de otras maneras [2 - 7]. En 1994, Spring L. introdujo un sistema de rodamiento magnético que permite la pseudo-levitación del rotor respecto al estátor en una disposición horizontal nombrada "Larry Spring's Magnetic Levitation Mendocino Brushless Solar Motor", comúnmente denominado "Motor Mendocino". Sin embargo, este tipo de motor se ha investigado poco en su funcionamiento por el ámbito académico [9-12], con implementación de mejoras sobre el rodamiento magnético [13-14] y una patente en aplicación de generación eléctrica, [15].

El prototipo de motor fotovoltaico construido es similar en su estructura a un motor de corriente continua, con diferencia en que el rotor se encuentra en pseudo-levitación sobre un rodamiento magnético pasivo y con celdas solares sobre su superficie, que proveen de corriente eléctrica a las bobinas de la armadura. Los campos electromagnéticos producidos interactúan con imanes fijos, que hacen las veces de estator, provocando su rotación y con ella un proceso de auto-conmutación en la alimentación de las bobinas que mantiene el movimiento constante

frente a la presencia de una fuente de luz, convirtiendo así, la energía lumínica en mecánica sin el uso de escobillas, baterías ni electrónica de potencia adicional.

Para un mayor aprovechamiento de los sistemas de solares, es indispensable un adecuado dimensionamiento de cada uno de los componentes que los conforman [19]. Por lo cual, en la primera parte del documento presenta la estructura y principio de funcionamiento del motor fotovoltaico en el que se basa el desarrollo del prototipo. Asimismo, está dedicada al proceso de experimentación para la caracterización de celdas solares, selección de materiales, diseño de la estructura del rotor, diseño de bobinas, selección de eje e imanes para el estátor y rodamiento, así como el diseño y construcción de su estructura. Para concluir se hace referencia a las mediciones en funcionamiento del primer prototipo.

La segunda sección consta de la simulación en estado estacionario del campo magnético y electromagnético por secciones del motor en COMSOL Multiphysics® y parametrización del motor en funcionamiento para identificar puntos de optimización. Por último, la tercera sección presenta la implementación del motor en una aplicación de turbo-maquinaria para el aumento de caudal de agua en un sistema de llenado de tanque en un entorno de iluminación artificial.

Como uno de los aportes principales del trabajo realizado, se destaca el aprovechamiento de la energía mecánica rotacional producida por el motor en un sistema hidráulico de bombeo de agua. Lo anterior lo convierte en un referente para el desarrollo de nuevos prototipos y procesos de optimización de motores tipo mendocino y su aplicación en procesos industriales o de generación eléctrica.

2. Estructura y diseño del motor

2.1. Estructura

En la Figura 1 se muestran los elementos constitutivos del motor, entre ellos: un imán que genera un campo magnético constante, (ubicado en la base del motor y hace las veces de estátor), un rotor con estructura en forma de prisma (en su interior bobinas alimentadas por las celdas solares rectangulares ubicadas sobre la superficie), un rodamiento magnético pasivo compuesto por un eje circular diamagnético e imanes en forma de disco (en la base) y anillo (en el soporte) en configuración triangular que mantienen al rotor en pseudo-levitación.

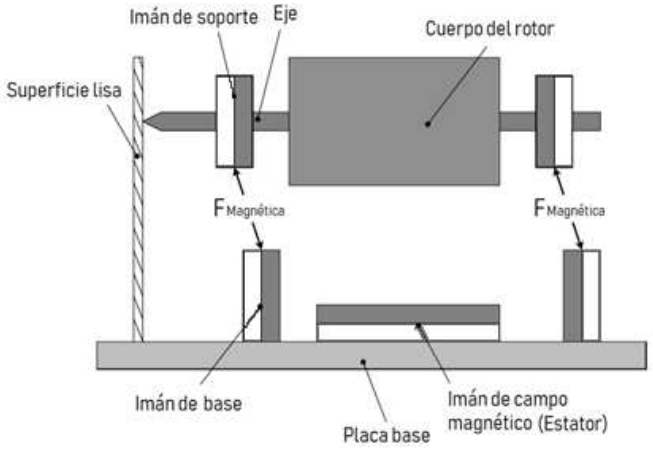


Figura 1. Estructura de motor mendocino, [9].

En uno de sus extremos se ubica una superficie lisa que sirve de pared para evitar que la fuerza de empuje producida por la rotación desestabilice el rotor.

2.2. Principio de funcionamiento

Un conductor de longitud $\boldsymbol{l}$ por el que circula una corriente I, en un campo magnético constante y uniforme $\boldsymbol{B}$, experimenta sobre él una fuerza magnética $\boldsymbol{F}$ descrita por la ecuación 1, conocida como Ley de Laplace.

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \tag{1}$$

La Figura 2 muestra los vectores $\overrightarrow{F_1}$ y $\overrightarrow{F_2}$ de la fuerza resultante en cada bobina durante un giro, que es máxima sobre los conductores cuando los vectores de fuerza y campo magnético son perpendiculares entre sí, provocando que el rotor gire manteniendo la dirección de la fuerza y conmutando la posición de las celdas.

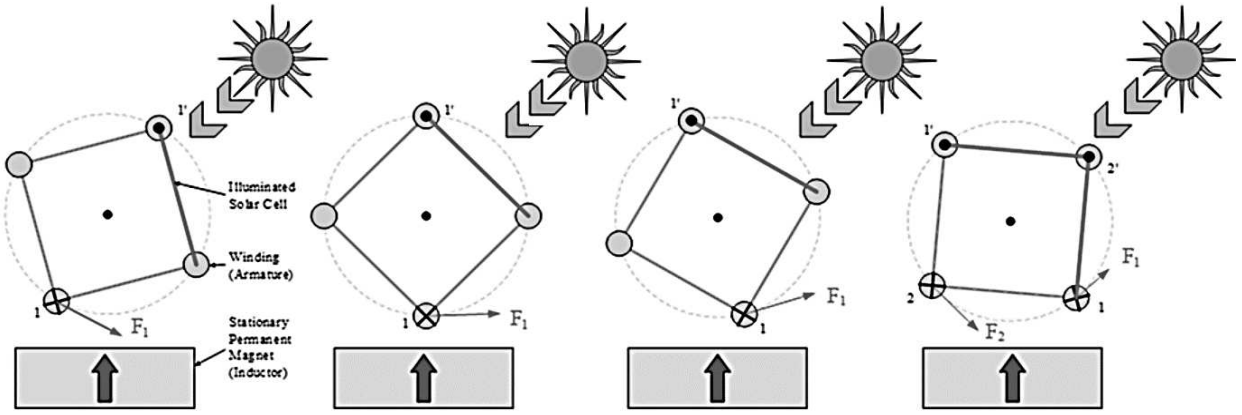


Figura 2. Vectores de fuerza en una bobina en un giro completo, [14].

El proceso de auto-conmutación se realiza como lo muestra la Figura 3, conectando en antiparalelo a una bobina dos paneles I y II, ubicados en posición opuesta sobre la estructura del rotor.

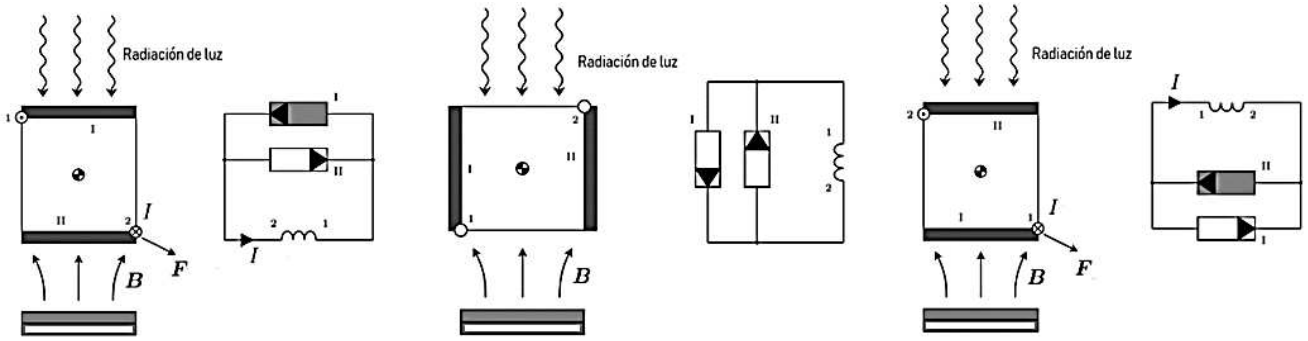


Figura 3. Proceso de conmutación de corriente en una bobina en un giro completo, [9].

2.3. Caracterización de celdas solares

El prototipo del motor se desarrolla en un ambiente de iluminación artificial controlado a causa de las condiciones atmosféricas variables cuando se realizan mediciones con radiación solar.

2.3.1. Selección de celdas

El procedimiento de selección se realiza considerando un área menor a 100 cm^2 y de silicio monocristalino, esto con el fin de facilitar la construcción del rotor y su disponibilidad en el mercado. Las características entregadas por los fabricantes para cada tipo de celda se relacionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las celdas solares.

Nombre	Dimensiones (mm x mm x mm)	Área (cm^2)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
Celda 1	80 x 45 x 2	36	6	80	480

Celda 2	50.9 x 100.7 x 2	51,12	4,5	100	450
Celda 3	90 x 85 x 2	83,3	12	50	600
Celda 4	100 x 60 x 2	60	9	70	630

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Fuentes de iluminación

El entorno de iluminación artificial tiene como finalidad simular en su medida la radiación solar para poder desarrollar pruebas de una manera controlada. Para ello, se seleccionan bombillas de tecnología: incandescente, fluorescente, halógena y LED. Las características entregadas por los fabricantes para cada tipo de fuente se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características eléctricas de fuentes de iluminación artificial.

	Tecnología			
Característica	**Incandescente**	**Fluorescente**	**Halógena**	**LED**
Fabricante	Everlighting	ROJO	ILUMAX	ASTRO Bright
Potencia (W)	100	22	53	3,5
Voltaje (V_{AC})	120	110 - 130	120	90 – 135
Potencia lumínica (lm)	1070	1080	830	210
Temperatura del color (K)	-	6500	3000	6400

Fuente: elaboración propia.

2.3.3. Proceso de caracterización

La operación de una celda solar conectada a una carga se determina por medio de la curva característica I vs V y curva característica PMP. Para determinar las curvas se realizan mediciones de voltaje y corriente en una carga variable en un entorno artificial construido para permitir el cambio de celda, bombilla y la variación de la distancia de separación de la fuente y celda entre 9, 6 y 4 cm. La Figura 4 muestra las curvas características obtenidas para la celda tipo 1, donde I, H, F y L corresponden al tipo de fuente mientras 4, 6 y 9 corresponde a la distancia de separación.

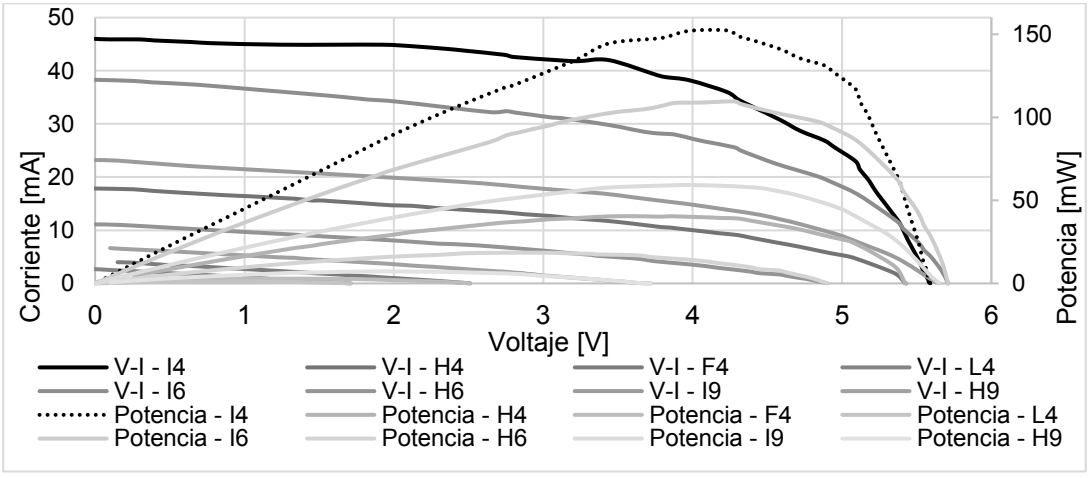


Figura 4. Curvas características de la celda tipo 1 para los tipos de fuente de iluminación y distancia de separación. Fuente: elaboración propia.

2.4. Rotor

El diseño del rotor es condicionado por el tamaño de la celda seleccionadas anteriormente. Se establece la forma de prisma dodecagonal, mostrada en la Figura 5, puesto que su forma

cilíndrica proporciona mejor estabilidad durante la rotación y un mayor aprovechamiento de la luz; además, en su interior cuenta con una estructura de soporte sobre la cual se instalan baterías y sensores. El material seleccionado fue acrílico de 4 mm dada su disponibilidad en mercado, facilidad para el corte láser, mantenimiento y operación a la intemperie.

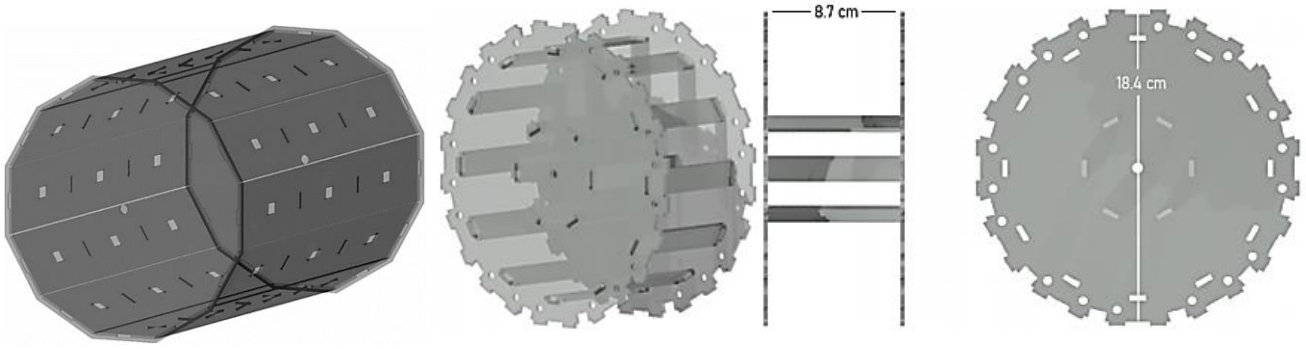


Figura 5. Diseño de la estructura del rotor. Fuente: elaboración propia.

2.5. Imanes de rodamiento magnético y estátor

Los imanes permiten la pseudo-levitación y proveen el campo magnético que interactúa con la corriente de las bobinas produciendo la rotación del motor. El material seleccionado es de neodimio (NdFeB) dada su alta remanencia y coercitividad respecto a los imanes de ferrita del mismo tamaño. Para su selección se toman cuatro muestras por tipo con base en las características del fabricante [16–18], se simula su comportamiento en COMSOL Multiphysics®. La Tabla 3 presenta los imanes seleccionados.

Tabla 3. Dimensiones y grado de imanes seleccionados.

Forma y dimensiones	**Medición**	**Forma y dimensiones**	**Medición**	**Forma y dimensiones**	**Medición**
Imán en forma de anillo		**Imán en forma de disco**		**Imán en forma de bloque**	
Diámetro exterior (mm)	25	Diámetro (mm)	25	Largo (mm)	47
Diámetro interior (mm)	9	Alto (mm)	10	Ancho (mm)	21
Alto (mm)	4	Grado	N35	Altura (mm)	10
Grado	N35			Grado	N45

Fuente: elaboración propia.

2.6. Bobinas

Definida la fuente de iluminación del entorno artificial, el tipo de celda y la forma de rotor se realiza la caracterización descrita la sección 2.3.3 para cada panel - compuesto por tres celdas conectadas en paralelo - en un entorno artificial con sistema de ventilación. La Tabla 4 presenta los valores obtenidos. Para el diseño de las bobinas se observa que la resistencia promedio de la carga de los paneles es de 26,2 Ω y la longitud por vuelta de la bobina, definida por la estructura interna del rotor es de 0,54 m. Asimismo, para la selección del calibre del conductor de cobre, se evaluan aspectos como la capacidad de corriente, el número de vueltas y la masa total de las bobinas. La

Tabla 5 presenta las características promedio por bobina.

Tabla 4. Parámetros característicos por panel para un entorno artificial con ventilación.

Panel	Voltaje de circuito abierto [V]	Corriente de corto circuito [mA]	Voltaje máximo [V]	Corriente máxima [mA]	Resistencia de carga [Ω]	Factor de forma	Potencia máxima [mW]
1	5,81	199,80	4,32	162,10	26,65	0,60	700,27
2	5,65	179,70	4,20	146,97	28,58	0,61	617,29
3	5,73	192,80	4,28	170,60	25,09	0,66	730,17
4	5,41	182,40	4,00	159,50	25,08	0,65	638,00
5	5,44	188,00	4,10	163,00	25,15	0,65	668,30
6	5,54	192,20	4,00	163,80	24,42	0,62	655,20
7	5,66	205,30	4,31	160,20	26,90	0,59	690,46
8	5,62	189,10	4,34	152,30	28,50	0,62	660,98
9	5,80	191,10	4,52	170,20	26,56	0,69	769,30
10	5,83	192,20	4,30	163,00	26,38	0,63	700,90
11	5,76	195,80	4,37	158,30	27,61	0,61	691,77
12	5,80	192,20	4,30	176,60	24,35	0,68	759,38

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Características de bobina promedio del rotor.

Calibre [AWG]	Diámetro [mm]	Capacidad de corriente [A]	Número de vueltas	Longitud total [m]	Masa de bobinas [kg]
26	0,4049	0,50	366	198,44	1,38

Fuente: elaboración propia.

2.7. Construcción del prototipo

El ensamble del rotor se efectúa sin el uso de elementos de fijación de material ferromagnético, en su lugar el diseño de su estructura con pestañas, perforaciones y corte láser permite un

ensamble de las piezas a presión. La estructura que soporta el rodamiento es de material MDF (fibropanel de densidad media). La Figura 6 presenta el ensamble del prototipo del motor en pseudo-levitación.

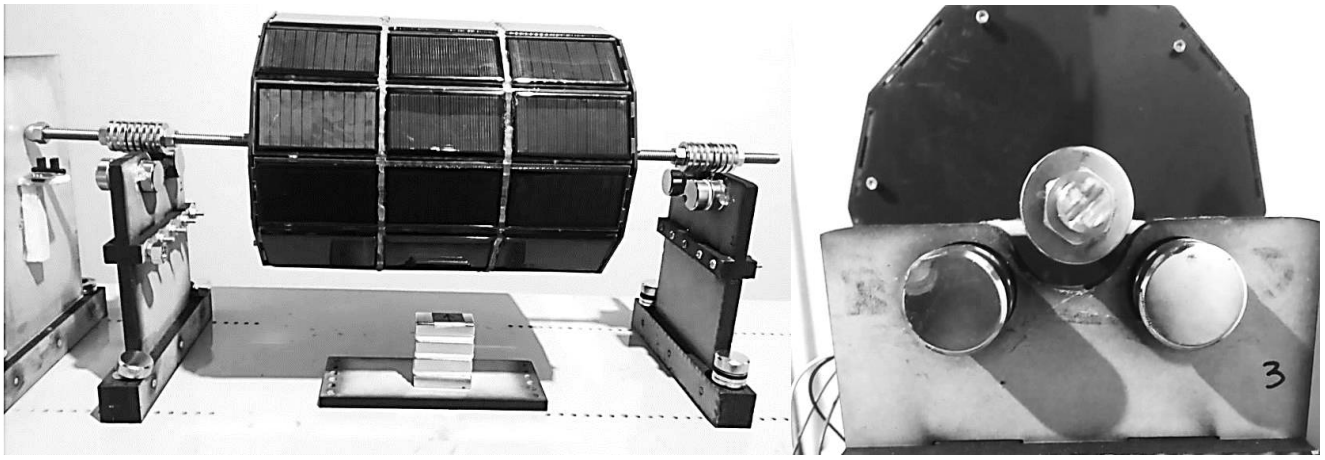


Figura 6. Ensamble de prototipo de motor fotovoltaico sobre rodamiento magnético pasivo. Fuente: elaboración propia.

2.8. Parametrización

Una vez puesto en funcionamiento se procede a parametrizar el motor realizando las mediciones posibles de variables eléctricas y mecánicas. La Tabla 6 presenta las características del prototipo base del motor, así como del sistema de iluminación artificial y ventilación.

Tabla 6. Características del motor fotovoltaico y sistema de iluminación.

Característica	Descripción
Masa del rotor	2.83 (kg)
Temperatura máxima sobre superficie de celdas	50,9 (°C)

Eje	Varilla roscada de acero inoxidable 500 X 9,52 (mm)
Velocidad de rotación	116 (RPM)
Corriente promedio máxima por bobina	167,02 (mA)
Voltaje promedio máximo por panel	4,34 (V)
Rodamiento magnético	16 imanes tipo anillo 25 X 9 X 4 (mm) grado N35 16 imanes tipo disco 25 X 10 (mm) grado N35 Distancia de separación 45 (mm) de centro a centro de los imanes base del rodamiento
Estátor	4 imanes tipo bloque 47 X 21 X 10 (mm) grado N45
Desplazamiento horizontal máximo del eje	3 mm
Desplazamiento vertical máximo del eje	0 mm
Fuente de iluminación artificial	3 bombillas Everlighting 100 (W), 120 (V)
Iluminancia promedio	15619,28 (lx)
Sistema de ventilación	6 ventiladores 120 x 25 (mm), 12 (V), 0.15 (A)

Fuente: elaboración propia.

3. Simulaciones

Para analizar el comportamiento tridimensional de los fenómenos electromagnéticos presentes en el motor se requiere el uso del software COMSOL Multiphysics®, sin embargo, se encuentra un limitante en el proceso de simulación, pues las múltiples físicas que interactúan durante el funcionamiento, no pueden ser estudiadas de manera simultánea. Adicionalmente se encuentra que el prototipo construido no es un modelo convencional de motor eléctrico. Por lo anteriormente descrito se hace necesario realizar un análisis individual para el comportamiento del rodamiento magnético, para el rotor y para estator.

3.1. Campo magnético de rodamiento

Para llevar a cabo la simulación se requiere conocer parámetros como: densidad de flujo remante (B_r), permeabilidad (μ) y susceptibilidad magnética (x_m) del material de los imanes, unos de estos parámetros son entregados por el fabricante [16-17], otros se deben calcular, como por ejemplo la permeabilidad (μ) y susceptibilidad magnética (x_m) que se obtiene mediante (2) y (3) respectivamente.

$$\mu = 4\pi \text{ x } 10^{-7}\left(^{H}/_{m}\right) \cdot 7000 = 0.008796459 \left(^{H}/_{m}\right) \quad (2)$$

$$x_m = 7000 - 1 = 6999 \quad (3)$$

La Tabla 7 presenta los valores con el intervalo de densidad de flujo e intensidad de campo magnético de los imanes implementados en el rodamiento.

3.2. Campo magnético del estátor

Al igual que se hace para obtener la simulación del rodamiento para el estátor se deben contemplar las características magnéticas entregadas por el fabricante [18], y el rodamiento y su geometría descritos en la Tabla 3. El intervalo de densidad de flujo e intensidad de campo magnético del estátor se relacionan en la Tabla 7.

Tabla 7. Características magnéticas simuladas del rodamiento magnético y estátor.

Característica	Imanes tipo anillo	Imanes tipo disco	Imanes tipo bloque
Densidad de flujo magnético	0,036 – 1,03 (mT)	0,038 – 1,34 (mT)	0,034 – 2.18 (mT)
Intensidad de campo magnético	136,29 – 136,44 (A/m)	136,34 - 136.43 (A/m)	154.41 – 154,61 (A/m)

Fuente: elaboración propia.

3.3. Campo magnético en el rotor

La simulación de la densidad de flujo e intensidad del campo magnético del rotor requiere la importación de la geometría tridimensional de la estructura interna del rotor con su bobinado y el uso de la física “Campos electromagnéticos”. La Figura 7 muestra la simulación de la densidad de campo magnético sobre la superficie de los conductores que al relacionarse con el campo magnético provocan una fuerza resultante que produce la rotación del motor.

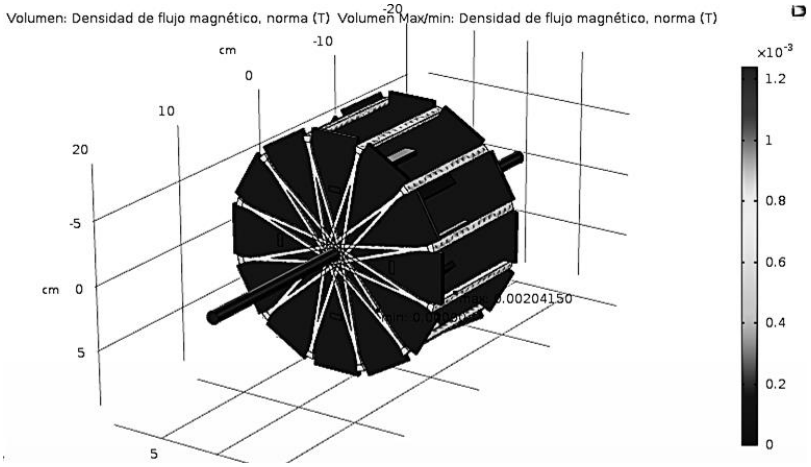


Figura 7. Simulación de densidad campo magnético en el rotor. Fuente: elaboración propia.

La magnitud de la densidad magnética simulada por bobina es de 2.04 (mT) mientras que la intensidad de campo magnético $\boldsymbol{H}$ se determina mediante (4).

$$|\boldsymbol{H}| = \frac{B}{\mu_0} = \frac{2.041\ (\mathrm{m}T)}{4\pi \times 10^{-7}\ \left({}^{H}/_{m}\right)}$$

$$= 1.624{,}57\ \left({}^{A}/_{m}\right) \qquad (4)$$

4. Implementación

El acople de un motor fotovoltaico a una maquina hidráulica permite utilizar la radiación de la fuente de iluminación añadiendo energía a un fluido, dando como resultado un incremento de presión de éste. Este principio también representa una aplicación para este tipo de motor experimental.

4.1. Bomba

Debido a que se desconoce el momento de fuerza o torque del motor y las características de pseudo-levitación del eje, al igual que la baja velocidad rotacional comparada con motores eléctricos de baja potencia tampoco es posible acoplar una bomba convencional por las características nominales de revoluciones y torque que requieren para su correcto funcionamiento. Por lo anterior se diseña un prototipo sencillo de bomba centrifuga mostrada en la Figura 8, impresa en 3D en material ABS con un eje roscado de acero inoxidable de 3/8” de 2,5 (cm) de longitud, un diámetro de 12,7 (mm) tanto en la entrada como en la descarga para la tubería y un impulsor de siete álabes inclinados hacia atrás con un ancho igual a lo largo de su curvatura.

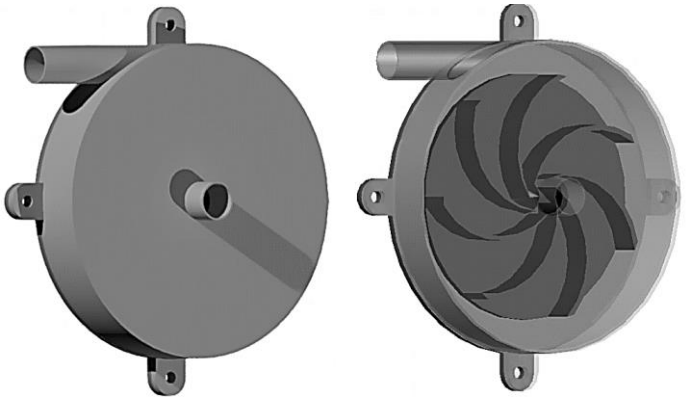


Figura 8. Diseño de bomba e impulsor. Fuente: elaboración propia.

4.2. Acople

El mecanismo de acople entre el motor fotovoltaico y la bomba se realiza por medio de un par de piezas diseñadas e impresas en 3D que en sus extremos se fijan los ejes del motor y la bomba como se aprecia en la Figura 99. Para su acople es necesario nivelar de forma precisa el eje de la bomba a la altura de pseudo-levitación del eje del motor y fijar un rodamiento mecánico a la carcasa de la bomba para ayudar a la rotación del impulsor. Para minimizar la presencia de fugas de agua en las uniones de la bomba se recubre su superficie con una capa de silicona líquida. Adicionalmente la bomba se encuentra fija a una estructura de MDF que permite el ajuste de nivel de los ejes.

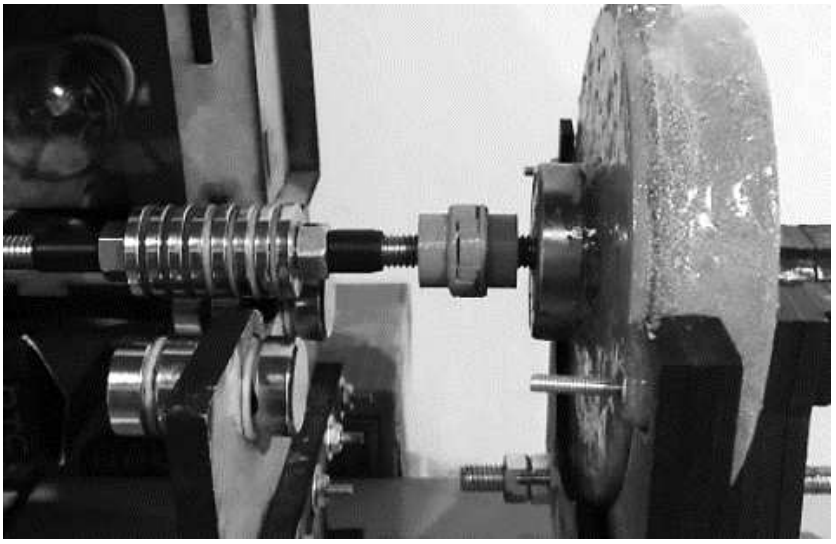


Figura 9. Acople mecánico entre el motor fotovoltaico y la bomba. Fuente: elaboración propia.

4.3. Sistema de tubería

El sistema de tubería implementado es el mostrado en la Figura 10. Realiza la descarga de agua desde un tanque ubicado a 15 (cm) sobre el nivel de referencia de entrada de la bomba hacia un tanque con una altura de llenado de 15 (cm) por debajo del nivel de referencia. El agua es conducida a través tubería, válvulas y accesorios de diámetro 1/2” en material PVC. El caudal máximo medido sin el funcionamiento de la bomba fue de 4,88 litros/minuto (L/min).

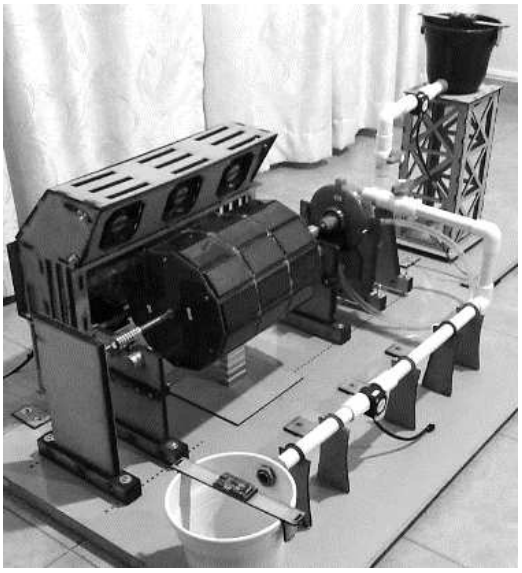


Figura 10. Sistema de tubería hidráulico. Fuente: elaboración propia.

4.4. Turbo-maquinaria

El proceso de funcionamiento de la motobomba con el prototipo inicial de motor fotovoltaico (ver Figura 6) no presenta un aumento significativo de caudal en salida de la bomba debido a que el flujo de agua por la bomba reduce la velocidad de rotación del motor hasta 80 (RPM). Para mejorar el rendimiento del motor se modifica la configuración del estator, adicionando dos imanes al estator ubicado en la parte inferior e incluyendo un arco donde se soporta un nuevo bloque de estator, ubicado en la parte superior del rotor como lo muestra la Figura 11. Esta modificación permite aumentar la velocidad y torque de motor puesto que en comparación con la representación de la Figura 2 se aumenta a dos las zonas por giro donde se genera la fuerza magnética que produce la rotación.

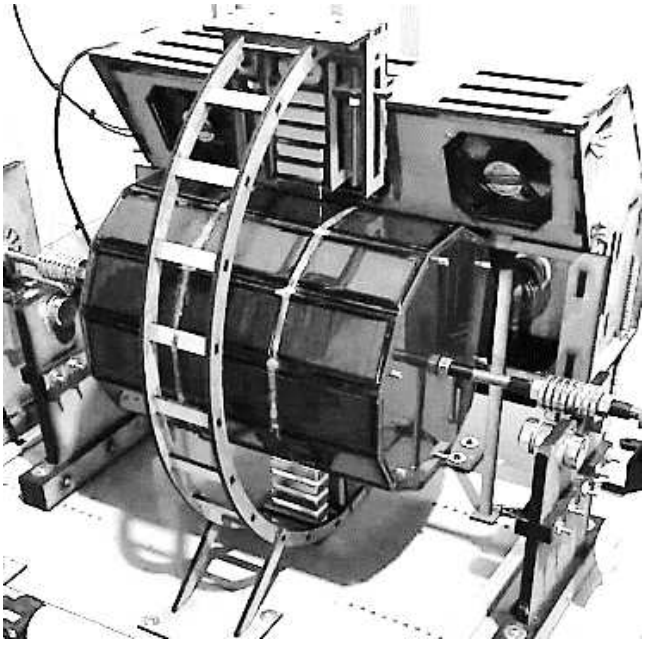


Figura 11. Modificación estructural del estátor del motor fotovoltaico. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 8 presenta las características del sistema de turbo-maquinaria en un ambiente de iluminación artificial y ventilación.

Tabla 8. Características del sistema de bombeo en un entorno de iluminación artificial.

Característica	Descripción
Velocidad de rotación	120 (RPM)
Tiempo de aceleración hasta velocidad nominal	1’5’’
Estátor	12 imanes tipo bloque 47 X 21 X 10 (mm) grado N45
Caudal máximo sin turbo-maquinaria	4,88 (L/min)
Caudal máximo con turbo-maquinaria	5,69 (L/min)

Fuente: elaboración propia.

4.5. Sensores

La visualización en tiempo real de variables presentes durante el funcionamiento de bombeo es fundamental para entender su comportamiento es por ello que el sistema cuenta con diferentes tipos de sensores compatibles con la plataforma de desarrollo Arduino: sensor de voltaje FZ0430, sensor ultrasónico HC-SR04, sensor de flujo YF-S201, sensor de velocidad HC-020K, sensor de temperatura LM35 y sensor de iluminancia BH1750. La adquisición de todas las variables se realiza a través de tarjetas Arduino Mega 2560 y Arduino nano, y su visualización es a través de pantallas LCD.

5. Conclusiones

El desarrollo de pruebas del funcionamiento del motor sin carga y como aplicación de turbo-maquinaria no se efectuó en un ambiente de iluminación natural dado que el diseño de las bobinas, configuración del rodamiento magnético y estator, se realiza para un entorno de iluminación artificial.

La simulación en COMSOL Multiphysics® del motor fotovoltaico implica el uso simultáneo de “campos magnéticos, sin corriente” para los imanes permanentes y “campo magnético” para las bobinas, generando conflictos en su solución, adicional a que el tipo de motor implementado no corresponde en su construcción con modelos de motores convencionales.

La implementación del motor fotovoltaico en pseudo-levitación es posible en procesos de bombeo de líquidos no viscosos o en sistemas de generación eléctrica u otro proceso aplicado que requiera un bajo torque en el eje del motor.

6. Recomendaciones

Para futuros desarrollos del motor fotovoltaico es recomendable hacer medición del campo magnético en las bobinas con y sin el sistema de ventilación, como también en los imanes de neodimio, con un sensor de efecto hall junto con una tarjeta de adquisición de datos, así como se lo presenta el artículo “Detección de posición a partir de la medición de un campo magnético” [20].

Referencias

[1] W. A. Marrison, “Apparatus for converting radiant energy to electromechanical energy”, U.S., Patent 2919358, Dec. 29, 1959. [En línea]. Disponible en: https://patentimages.storage.googleapis.com/e7/ce/c2/f8074398301da9/US2919358.pdf

[2] D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson, “Solar energy converting apparatus”, U.S., Patent US2780765, Feb. 5, 1957. [En línea]. Disponible en: https://patentimages.storage.googleapis.com/36/ee/af/d21dacd3884160/US2780765.pdf

[3] H. E. Hall, “Solar motor”, U.S., Patent US3296469, Ene. 3, 1967. [En línea]. Disponible en: https://patentimages.storage.googleapis.com/7e/58/b3/09cf657161e51f/US3296469.pdf

[4] B. Sepp, “Rotating advertising device”, U.S., Patent US3325930, Ene. 20, 1967. [En línea]. Disponible en: https://patentimages.storage.googleapis.com/2e/14/de/57d7f191d20af2/US3325930.pdf

[5] Y. Nakamats, “Apparatus for converting radiant energy such as light or heat directly into turning force”, Japón, Patent US4634343, Ene. 6, 1987. [En línea]. Disponible en: https://patentimages.storage.googleapis.com/78/4e/a0/414270d9bad0e0/US4634343.pdf

[6] H. Izawa, “Solar Energy Motor”, Japan. Patent 4751413, Jun. 14, 1988. [En línea]. Disponible en: https://patentimages.storage.googleapis.com/3f/8b/a3/9e59494a100d1e/US4751413.pdf

[7] G. J. Shea, “Solar energy magnetic resonance motor”, U.S., Patent US5408167, Abr. 18, 1995. [En línea]. Disponible en:

https://patentimages.storage.googleapis.com/77/c4/f7/c12b523e12bfdc/US5408167.pdf

[8] A. Coty, “Automatically switched photovoltaic motor”, Francia, Patent WO2010082007A3, Jul. 22, 2010. [En línea]. Disponible en:

https://patentimages.storage.googleapis.com/36/8f/25/4c5399bdb634a4/WO2010082007A3.pdf

[9] W. Amrhein, H. Mitterhofer, E. Marth, G. Bramerdorfer, “Aufbau eines Mendocino-Motors”, Ene 2018 [En línea]. Disponible en: http://www.bis0uhr.de/projekte/magnet/projektseminar.pdf

[10] T. Kornher, M. Noebels, J. Roeller, S. Schwieger, F. Weller, “Mendocino-Motor”, Feb 2018 [En línea]. Disponible en:

https://ap.physik.uni-konstanz.de/projektpraktikum/PP2011/Bericht_Mendocinomotor.pdf

[11] Z. Novák, M. Hofreiter. "Mendocino motor and a different approaches to its control", Proceedings of 15th International Conference MECHATRONIKA, Prague, pp. 1-6, 2012. [En línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/6415075

[12] C.M. Estupiñán, J.P. Puerto-Reyes, M. A. Beltrán, "Desarrollo de un motor mendocino como herramienta de enseñanza en la aplicación de energías renovables y generación de alternativas energéticas", Revista Loggin, vol. 1, no. 1, pp. 78-89, 2017.

[13] K. Berger, et al, "Solar Electric Motor on Superconducting Bearings: Design and Tests in Liquid Nitrogen" en IEEE sobre aplicaciones de superconductividad, vol. 27, no. 4, pp. 1-5, Jun. 2017, https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2642140

[14] Fawzi Boufatah. "Réalisation d'un moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs", 2016, hal-01824246. [En línea]. Disponible en:

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01824246/document

[15] W. K. Lane, "Light emitting unit for continuous light production", U.S., Patent US20130141900A1, Jun. 6, 2013. [En línea]. Disponible en:

https://patentimages.storage.googleapis.com/f6/89/60/242f9861427fb1/US20130141900A1.pdf

[16] Supermagnete, "Anillo imán", Nov, 2019. [En línea]. Disponible en:

https://www.supermagnete.de/eng/ring-magnets-neodymium/ring-magnet-25mm-4.2mm-5mm_R-25-04-05-N

[17] Supermagnete, "Disco magnético autoadhesivo" noviembre de 2019. [En línea]. Disponible en:

https://www.supermagnete.de/eng/adhesive-magnets-neodymium/disc-magnet-self-adhesive-25mm-2mm_S-25-02-FOAM?group=discs

[18] Supermagnete, “Bloque imán” diciembre de 2019. [En línea]. Disponible en:

https://www.supermagnete.de/eng/block-magnets-neodymium/block-magnet-40mm-20mm-10mm_Q-40-20-10-N

[19] H. Polo, A. Valencia, J. Roldan, J.Diaz, “Evaluación de la seguridad estructural de un sistema de seguimiento solar en Colombia”, Colombia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Oct. 06, 2013. [En línea]. Disponible en: https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/5522

[20] D. Gomez, J. Leal, H. Montaña, A. Sanchez, “Detección de posición a partir de la medición de un campo magnético”, Colombia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ene. 01, 2013. [En línea]. Disponible en: https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/4397

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

AXIAL GENERATOR FOR A LOW POWER WIND GENERATOR, SELECTION, DESIGN AND SIMULATION IN COMSOL® MULTIPHYSIC

Generador axial para un generador eólico de baja potencia, selección, diseño y simulación en COMSOL® multiphysic

Sindy Tatiana Piracoca Peralta[1], Edwin Rivas Trujillo[2], Henry Montana Quintero[3]

Abstract

Axial flux generators are machines used in wind generation systems, so it is required to look for new configurations to address the increase in energy needs worldwide. This document proposes the design and simulation of three topologies of a dual-rotor permanent axial flux magnet generator for low-speed, low-power applications, which are modeled and compared through the 2D finite element method in COMSOL® software, taking as a performance indicator the output power generated under loads of 10, 40,100, 150 and 260 ohms, to contribute to the Research Project Low Power Wind Generator Topologies. The results show that purely coreless and slotted stator topologies have better behavior in both no load and under load when implementing a Halbach-type array on permanent rotor magnets. In addition, with the use of the finite element method it is possible to optimize the design for this type of generators,

[1] Engineering Electrical Student: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: stpiracocap@correo.udistrital.edu.co
[2] Tenured Professor: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: erivas@udistrital.edu.co
[3] Engineering Doctorate Student: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: hmontanaq@correo.udistrital.edu.co

allowing to observe the flux density in the teeth and air gap, generated voltage, output power and behavior of the proposed topology under different loads.

Keywords: Double Rotor, Low Power, Generator Topology, Finite Elements, Flux Density.

Resumen

Los generadores de flujo axial son máquinas utilizadas en sistemas de generación eólica, por lo que se requiere buscar nuevas configuraciones que permitan enfrentar el aumento de las necesidades energéticas a nivel mundial. En este documento se propone el diseño y simulación de tres topologías de un generador de imanes permanentes de flujo axial de doble rotor para aplicaciones de baja velocidad y potencia, las cuales se modelan y comparan a través del método de elementos finitos 2D en el software COMSOL®, tomando como indicador de desempeño la potencia de salida generada bajo cargas de 10, 40,100, 150 y 260 ohmios, como aporte al proyecto de investigación Topologías de Generador Eólico de Baja Potencia. Los resultados obtenidos muestran que las topologías puramente sin núcleo y estator ranurado tienen mejor comportamiento tanto en vacío como bajo carga al implementar una matriz tipo Halbach en los imanes permanentes del rotor. Además, con el uso del método de elementos finitos se logra optimizar el diseño para este tipo de generadores, permitiendo observar la densidad de flujo en los dientes y entrehierro, voltaje generado, potencia de salida y comportamiento de la topología propuesta bajo diferentes cargas.

Palabras clave: Doble Rotor, Baja Potencia, Topología de generador, Elementos Finitos, Densidad de Flujo.

1. Introducción

En la actualidad el aumento de las necesidades energéticas requiere buscar nuevas soluciones para que los generadores de imanes permanentes puedan suministrar energía fácilmente, al acoplarse con turbinas eólicas de pequeña escala sin sufrir acumulación de voltaje y sin correr riesgos de pérdidas de excitación, es decir, que un generador de imanes permanentes es una máquina que puede convertir la energía cinética del viento en energía Eléctrica, [1]. Una alternativa para ello es el generador de flujo axial de imanes permanentes, gracias a su alto número de polos y aplicación para baja velocidad, [2].

El generador de imanes permanentes de flujo axial, es una máquina de discos de rotor y estator montados sobre un mismo eje que pasa por su centro [3], en la cual la excitación magnética es sustituida por imanes permanentes ubicados en el rotor con magnetización axial para producir un campo magnético paralelo al eje de giro, a partir de esto surge el termino flujo axial, [4-6].

Este generador presenta varias ventajas como: estructura compacta y liviana, debido a una menor longitud axial, mejor enfriamiento y capacidad de entregar energía eléctrica a bajas revoluciones, con una eficiencia aceptable [7, 8], por lo cual, este trabajo busca eliminar del disco del rotor y reducir el peso de la máquina, para ello se utiliza una matriz de magnetización tipo HALBACH para los imanes permanentes del rotor, con la finalidad de realizar el diseño, simulación y comparación de las tres topologías propuestas para doble rotor.

La creciente investigación sobre el diseño y la construcción de los generadores de imanes permanentes de flujo axial ha atraído un creciente interés científico en los últimos años, sin embargo, existen muy pocos estudios sobre generadores de baja velocidad y baja potencia, por lo cual, este documento tiene como objetivo diseñar y simular tres topologías propuestas para un generador de flujo axial de imán permanente de doble rotor para baja velocidad y baja potencia, para ello, es aconsejable utilizar programas de elementos finitos para refinar el diseño de la máquina, evitando problemas de reconstrucción de la misma.

2. Topologías de generador de flujo axial de imanes permanentes

Las topologías de un generador de imanes permanentes de flujo axial surgen a partir de la disposición y cantidad de discos de rotor y estator, como lo son, un solo lado o una cara, dos lados o dos caras (dos rotores y un estator o dos estatores y un rotor) y múltiples lados [8-11]. Estas configuraciones se observan en la figura 1.

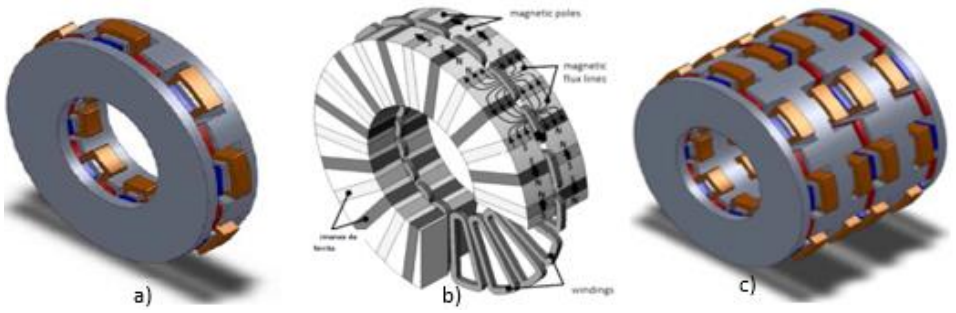


Figura 1. Topologías a) Un solo lado [12], b) Dos lados [9], c) Multi disco [12].

En la tabla 1, se exponen y comparan las topologías para este generador.

Tabla 1. Comparación de las topologías de un generador de imanes permanentes de flujo axial.

Topología	un solo lado	Dos lados	Múltiples lados
Características	Está compuesto por un disco de estator y un disco de rotor, donde se ubican las bobinas e imanes respectivamente, esta configuración solo puede tener una disposición de imanes con polarización Norte-Sur-Norte-Sur [6, 8, 13].	Esta topología está compuesta por tres discos, de los cuales dos pueden ser discos de estator y un rotor, o dos discos de rotor y un estator [6, 13, 14].	Esta topología incluye dos o más discos de estator y rotor, los cuales surgen a partir de acoplar magnéticamente la topología de doble rotor, o doble estator [3, 8].
Ventajas	Las configuraciones de balance de estator o rotor tienen los valores más bajos de densidad de torque [10, 15].	Las fuerzas mecánicas entre rotor y estator se cancelan durante la operación de la máquina debido a la presencia de espacios de aire mecánicos dobles en dichas topologías [8]. La configuración de doble rotor tiene la mayor densidad de torque y eficiencia [10, 15].	Presenta alta densidad de potencia sin aumentar el diámetro de la máquina y buena eficiencia [16]. Puede conectar o desconectar módulos dependiendo de requerimientos temporales que puedan llegar a existir [6].

Topología	un solo lado	Dos lados	Múltiples lados
Desventajas	Hay grandes fuerzas atractivas no compensadas que se producen entre el estator y el rotor, lo que implica el requisito de cojinetes para equilibrarlo o un disco de balance adicional [8]. Es la menos eficiente debido a un menor número de polos [3, 17].	Presenta gran fuerza de atracción magnética entre los imanes permanentes del rotor, ya sea, que es ubicados dentro del rotor o en la superficie [16, 19].	Las fuerzas de atracción magnéticas axiales entre los estatores y rotores pueden causar problemas en la construcción, debido a los múltiples entrehierros entre cada rotor y estator [7]. Presenta gran fuerza de atracción magnética entre todos los discos del rotor [16].

Fuente: elaboración propia.

3. Configuración del estator

Los generados de imanes permanentes de flujo axial, también pueden ser clasificados de acuerdo con la configuración del estator y la topología del devanado, como se muestra en la figura 2. Por lo tanto, el estator puede construirse con material ferromagnético (tipo núcleo) o con materiales no magnéticos (sin núcleo), y un estator tipo núcleo puede ser ranurado o sin ranura [7, 11, 13].

Sin núcleo	*Núcleo ranurado*
Configuración con mayor densidad de potencia en sistemas de generación [20]. Elimina el par dentado [20]. No presenta perdidas en el estator [21]. Mayor reducción del peso de la máquina [20, 21]. No presenta atracción directa entre el rotor y estator [14, 22]. Los devanados del estator no estarán influenciados por el calentamiento del núcleo, además, el devanado al estar en contacto con el aire, se podrá eliminar más rápidamente el calor de la superficie [20]. Tiene mayor facilidad de construcción [2]. Tiene una alta relación potencia /tamaño [14, 22, 23].	Presenta ondulación de flujo, alto par de engranaje y altas perdidas en los dientes del estator [1]. Es la topología más económica de todas [8]. Reducción del espacio de aire de la máquina, como resultado se reduce la cantidad de imanes requerida y, por ende, el precio del generador [8]. Mejor disipación de calor gracias a las ranuras, causado por la fricción entre el estator y el imán [24]. Elimina el par dentado, pero presenta mayores pérdidas por corrientes parásitas [24]. El calor causado por la fricción entre estator con un imán se acumula en el estator [24]. Elimina el par de ranura, por lo cual, no presenta vibraciones causadas por ranuras [25]. El valor del entrehierro determina la efectividad de un diseño de generador sin ranura [26].
	Núcleo sin ranura

Figura 2. Características generales para cualquier topología según la configuración del núcleo del estator. Fuente: elaboración propia.

4. Topologías propuestas

Tomando como referencia la información de la tabla 1 y la figura 2, se proponen 3 configuraciones para un generador de doble rotor, por sus características en aplicaciones de baja velocidad y baja potencia. Es importante resaltar que las 3 topologías se diseñan con una matriz tipo HALBACH para la disposición de los imanes permanentes de neodimio en los discos de rotor:

La primera topología propuesta, es una configuración puramente sin núcleo, es decir, ambos rotores sin hierro. Además, el estator sin núcleo elimina las pérdidas de núcleo, el par dentado y el par de engranaje, lo que permite reducir el peso total de máquina, y una mayor eficiencia en aplicaciones de generadores eólicos de baja potencia. Los devanados son de tipo trapezoidal concentrado para lograr un mayor enlace de flujo. Esta configuración se muestra en la figura 3:

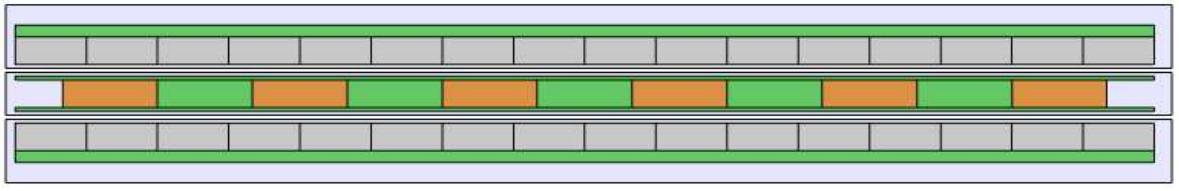


Figura 3. Primera topología propuesta vista 2D. Fuente: elaboración propia.

La segunda topología, presenta una configuración TORUS sin ranura mostrada en la figura 4, lo que garantiza buena ventilación para la máquina. El estator sin ranura permite reducir el peso del generador pese a requerir mayor espacio al utilizar un devanado de forma toroidal.

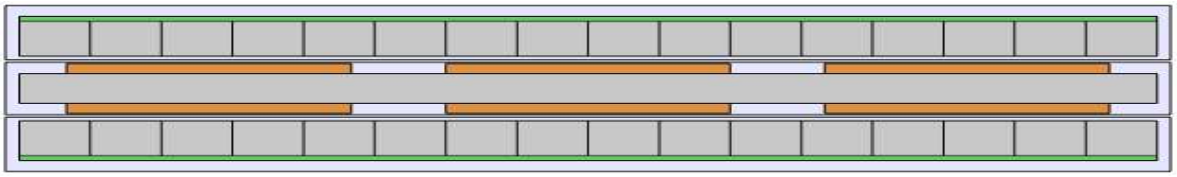


Figura 4. Segunda topología propuesta vista 2D. Fuente: elaboración propia.

La tercera topología consta de un estator ranurado, con dientes de extremo de corto, por lo cual se utiliza devanados de polo concentrado, como se muestra en la figura 5, esto permite reducir el peso de la máquina y un posible aumento de la densidad de potencia en el estator del generador.

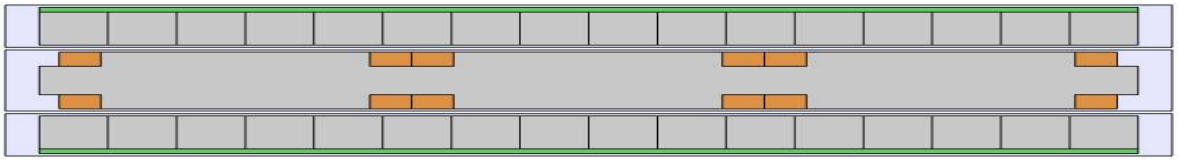


Figura 5. Tercera topología propuesta vista 2D. Fuente: elaboración propia.

5. Diseño de las topologías

Los principales parámetros para el dimensionamiento de un generador de doble cara son: el diámetro exterior e interior del rotor, número de polos, número de bobinas, número de vueltas por fase, número de vueltas por bobina, número de revoluciones, potencia de salida, densidad de flujo magnético y voltaje de salida [2, 9]. Dentro del diseño, es importante tener en cuenta la relación existente entre polos y bobinas para una elección adecuada de los mismos en aplicación para baja potencia y baja velocidad [10], además, del valor del entrehierro, ya que,

este puede determinar la efectividad del generador en especial en topologías con estator sin ranuras, [2].

Las topologías propuestas presentan los siguientes criterios de diseño, una potencia de salida máxima de 10 watios, una velocidad de viento mínima de 1,8 m/s, y un diámetro exterior de rotor máximo de 300mm. en la tabla 2, se muestran los pasos a seguir para el diseño:

Tabla 29. Pasos de diseño.

Paso	Variable	Fórmula	Donde
1	Se escoge un valor de diámetro exterior ≤ 300mm. Con el valor del diámetro exterior se determina el diámetro interior [27, 28]:	$\lambda = \frac{D_{int}}{D_{ext}} \simeq \frac{1}{\sqrt{3}}$	λ: factor de relación D_{int}: diámetro interior D_{ext}: diámetro interior
2	Se escoge un número de polos para el diseño de la máquina el cual debe ser un número par.	p	p: # polos
3	Se determina la cantidad de bobinas (N_B) para el estator [9, 29, 30]:	$N_B = \frac{3}{4}(p)$	N_B: número total de bobinas
4	Se determina la cantidad de bobinas por fase, y se toma	$N_{BF} = \frac{N_B}{m}$ (3)	N_{BF}: bobinas por fase, m=3; por ser 3 fases
5	Con el número de polos se calcula el paso polar	$Pp = \frac{360°}{p}$	Pp: paso polar

6	Dado que el rotor tiene un diámetro exterior y un diámetro interior el paso polar, este se calcula tanto para el diámetro interno como externo.	$P_{protor} = P_p * \frac{\pi}{180°} * \frac{D_{rotor}}{2}$	P_{rotor}: paso polar según el diámetro interno o externo
7	Se determina la frecuencia de trabajo para el generador [27, 30, 31].	$f = \frac{N_s * \#pp}{60}$	f: frecuencia N_S: velocidad sincrónica #pp: pares de polos
8	Se calcula el flujo máximo $\emptyset_{máx}$ en los polos magnéticos.	$\emptyset_{máx} = B_{mg} * A_m$	B_{mg}: densidad de flujo magnético $A_{m:}$área
9	Para determinar el número de vueltas por bobinas por fase se utiliza la ecuación. El factor de devanado k_w es igual a 1, debido al tipo de bobinado y estator utilizado para la topología propuesta	$N_{CP} = \frac{E_p}{4{,}44 * f * k_w * \emptyset_{máx}}$	N_{CP}: número de vueltas por fase E_p: voltaje de fase inducido k_w:factor de devanado
10	Se determina el número de vueltas por bobina	$N_{tc} = \frac{N_{CP}}{3}$	N_{tc}: número de vueltas por bobina

Fuente: elaboración propia.

En el caso de estator ranurado además de la tabla 2, se debe implementar lo expuesto en la tabla 3, teniendo en cuenta que el cable seleccionado es el 22 AWG, con un área transversal de 0,326mm^2.

Tabla 3. Pasos de diseño estator ranurado.

Paso	Variable	Fórmula	Donde

11	Se determina el número de ranuras por fase y polo	$q = \frac{s}{p * m}$	s: # total de ranuras
			m=3

12	Se calcula el área de ocupación de la bobina.	$A = N_{tc} * 0{,}326mm^2$	A: área de ocupación de la bobina
13	Tomando un factor de llenado de 0,7, se escoge un área mayor a la calculada para acomodación del devanado en el estator. Con este valor se escoge el ancho y alto de la ranura.	A_a= 1,31*A	A_a: área de ocupación final de la bobina
14	Se calcula el espacio total de ranuras en estator.	$g = s_{ancho} * n$	g=espacio total de aire s_{ancho}: ancho de la ranura n: rotal de ranuras
15	Se determina el ancho del diente	d_{ancho}: $\frac{P_{estator} - Er}{nn}$	d_{ancho}: ancho del diente $P_{estator}$: perímetro del estator nn: total de dientes

Fuente: elaboración propia.

Para la topología puramente sin núcleo, teniendo en cuenta la acomodación final del devanado trapezoidal concentrado se escoge un diámetro de rotor exterior de 250mm, se eligen 12 polos, y el voltaje inducido esperado para esta topología es 10 voltios. En relación a la topología

TORUS sin ranura y a la configuración de estator ranurado, se escoge un diámetro externo de rotor de 250mm, por lo tanto, el estator es de 240mm, teniendo en cuenta que se utilizará un devanado toroidal y un devanado de polo concentrado respectivamente, se eligen 12 polos para el diseño de ambas configuraciones, y el voltaje inducido es de 18 voltios y de 63 voltios respectivamente. En la tabla 4 se muestran las dimensiones obtenidas para las 3 topologías propuestas:

Tabla 4. Dimensiones obtenidas para las topologías propuestas.

Parámetro		Dimensiones Topología 1	Dimensiones Topología 2	Dimensiones Topología 3
Diámetro exterior	D_{ext}	250 mm	250 mm	250 mm
Diámetro interior	D_{int}	140 mm	140 mm	140 mm
Número de polos	# polos	12	12	12
Número de bobinas	N_B	9	9	9
Bobinas por fase	F	3	3	3
Entrehierro	g	3 mm	3 mm	3 mm
Paso polar exterior	Pp_{ext}	65,45 mm	65,45 mm	65,45 mm
Paso polar interior	Pp_{int}	36,65 mm	36,65 mm	36,65 mm
Velocidad sincrónica	N_s	137,51 rpm	137,51 rpm	137,51 rpm
Frecuencia	f	13,75 Hz	13,75 Hz	13,75 Hz
Número de vueltas	N_{CP}	270	525	420
IP largo	IP_{largo}	55 mm	55 mm	55 mm
IP ancho exterior	$IP_{anchoext}$	16,36 mm	16,36 mm	16,36 mm
IP alto	IP_{alto}	7 mm	13 mm	13 mm
IP ancho interior	$IP_{anchoint}$	9,16 mm	9,16 mm	9,16 mm
Estator alto	$Estator_{alto}$	7 mm	12 mm	12 mm
Diámetro exterior estator	$D_{estatorext}$	-	240 mm	240 mm
Diámetro interior estator	$D_{estatorint}$	-	150 mm	150 mm
Altura bobina	$Bobina_{alto}$	-	4 mm	6 mm
Ancho ranura	s_{ancho}	-	-	20 mm
Alto ranura	s_{alto}	-	-	6 mm

Fuente: elaboración propia.

6. Resultados

La densidad de flujo obtenida para las tres topologías se muestra en las figuras 6 a 8. La topología 1 (figura 6), es la topología que mayor flujo disperso presenta.

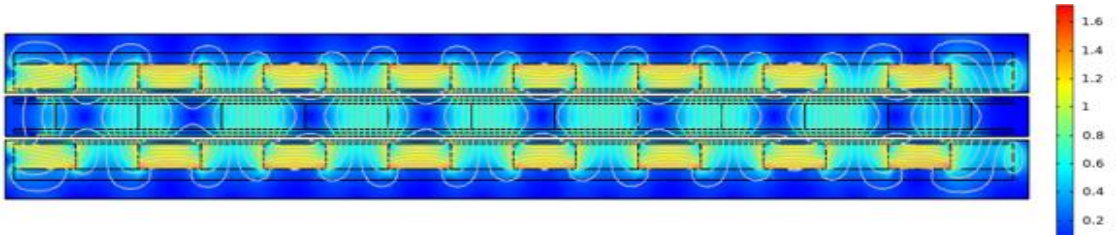


Figura 6. Densidad de flujo topología 1. Fuente: elaboración propia.

La topología 2 (figura 7), presenta una disminución del flujo disperso debido a la presencia de núcleo en el estator, además en comparación con la topología anterior, tienen un valor muy cercano de densidad de flujo entre ellas.

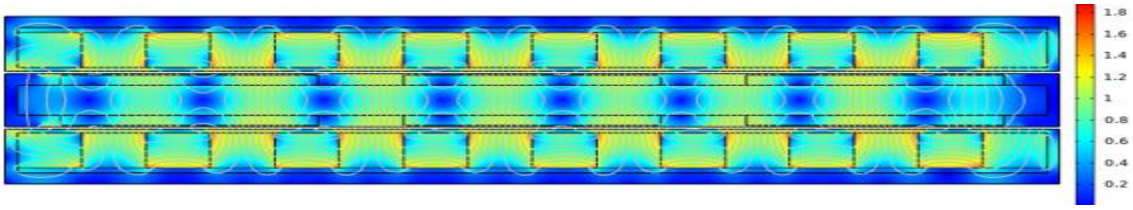


Figura 7. Densidad de flujo topología 2. Fuente: elaboración propia.

Como se esperaba la topología 3 (figura 8), presenta un aumento en la densidad comparada con las otras dos.

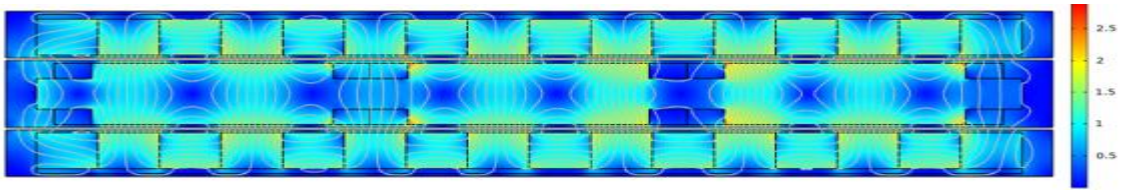


Figura 8. Densidad de flujo topología 3. Fuente: elaboración propia.

El modelado de las tres topologías para los generadores propuestos se realizó primero en vacío y luego bajo carga teniendo como referencia una carga de diseño de 10 ohmio, 40 ohmios, y 260 ohmios para las configuraciones 1,2 y 3, respectivamente. La figura 9 muestra los resultados para la topología 1, la figura 10 para la topología 2 y la figura 11 para la topología 3.

De las gráficas se obtiene que las tres topologías presentan un valor de voltaje en vacío muy cercano al calculado, las mejores formas de onda se muestran en la topología 3 y 1, además, al presentar una carga disminuye el valor del voltaje de salida en las tres configuraciones, sin embargo, bajo carga la topología 3 presenta un mejor comportamiento.

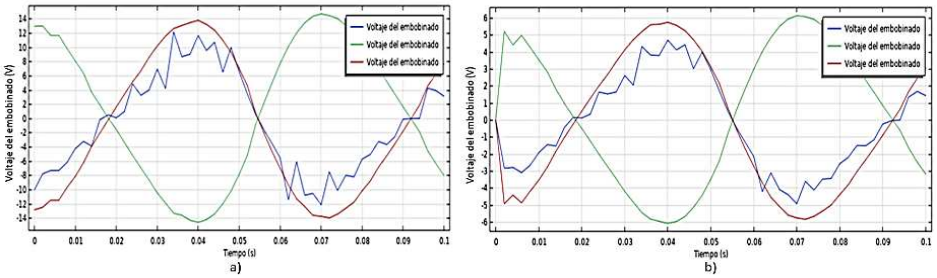


Figura 912. Topología 1: a) Voltaje en vacío; b) Voltaje bajo carga de diseño. Fuente: elaboración propia

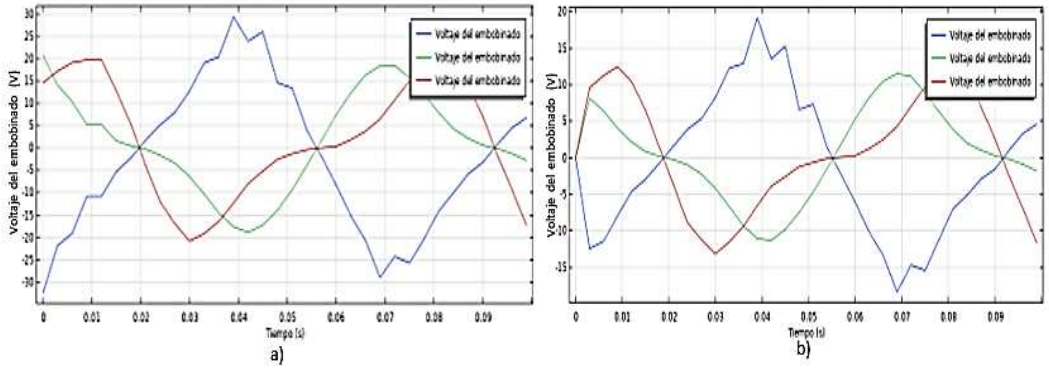


Figura 10. Topología 2: a) Voltaje en vacío; b) Voltaje bajo carga de diseño. Elaboración: propia.

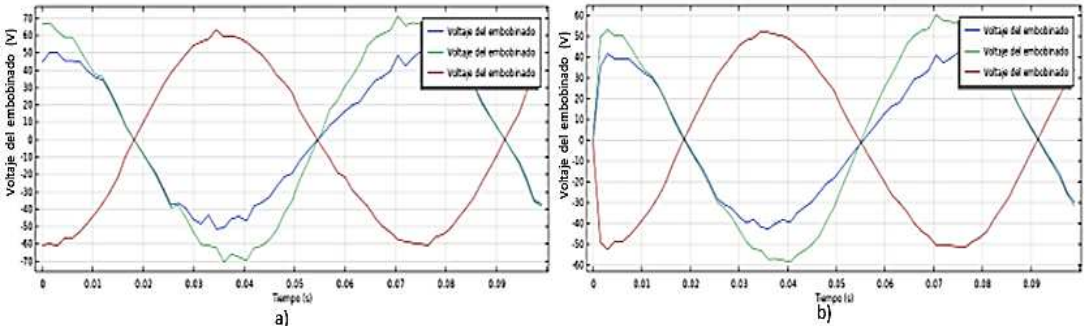


Figura 11. Topología 3: a) Voltaje en vacío; b) Voltaje bajo carga de diseño. Elaboración: propia.

Con la finalidad de comparar la potencia de salida de las tres topologías, se exponen las configuraciones a las cargas de diseño propuestas para las 3 topologías, el resultado obtenido se muestra en la figura 12.

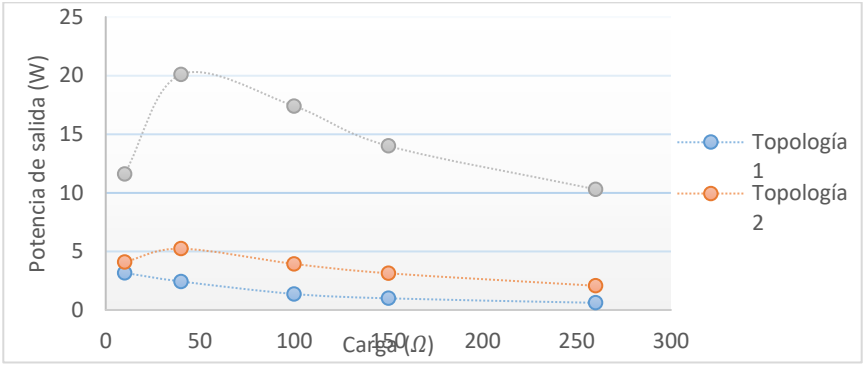


Figura 12. Comparación de potencias a diferentes cargas. Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones

La literatura propone la topología TORUS como la más adecuada para aplicaciones de baja potencia, sin embargo, al implementar como nuevo aspecto una matriz de magnetización HALBACH, se presenta la mayor perturbación y deformación de onda comparada con otras topologías de doble rotor, además, al no tener dientes en el estator, el espacio de aire se ve reducido, lo que significa un aumento en la densidad total del generador, pero no evidencia al mismo tiempo un aumento en el voltaje de salida, como se observa en la topología de estator ranurado de dientes de extremo corto para el mismo volumen de imanes permanentes.

Un diseño puramente sin núcleo, y de estator ranurado, presenta mejor comportamiento y disminución en la presencia de corrientes indeseables, por el contrario, en un diseño sin ranura, se presenta una exposición de los conductores a las densidades de flujo presentes en el generador, lo que provoca corrientes parasitas en los hilos del conducto, y se obtiene como resultado mayores perdida de cobre y del núcleo.

Implementar una configuración HALBACH en los discos de rotor, provoca un aumento de la densidad de flujo para las tres topologías, lo que permite un mayor voltaje de salida y una reducción del peso total de la máquina al eliminar el disco de ambos rotores.

Reconocimientos

Al Grupo de investigación en Compatibilidad Electromagnética GCEM de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Referencias

[1] A. Nataraj and B. Ramasamy, "Modeling and FEA analysis of axial flux PMG for low speed wind turbine applications," 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), pp. 1-5, Kollam, 2017. doi: 10.1109/TAPENERGY.2017.8397290

[2] M. Carrillo, C. Claudio y A. Mayorga, “Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica,” *Revista de Ciencia y Tecnología,* INGENIUS, N°19, pp. 19-28, 2018. https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.02

[3] S. S. Laxminarayan, M. Singh, A. H. Saifee and A. Mital, “Design, Modeling and Simulation of Variable Speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator”, *ELSEVIER*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, India, 2017. https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.004

[4] G. Ahmad and U. Amin, “Design, Construction and Study of Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine based on a Magnetically Levitated Axial Flux Permanent Magnet Generator”, *ELSEVIER,* Renewable Energy, 2016. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.027

[5] M. Castillo García, “Diseño Electromagnético de un Generador Eléctrico para Turbina Eólica de 100 kW”, trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2017. http://oa.upm.es/49261/1/TFG_MONTANA_CASTILLO_GARCIA.pdf

[6] C. F. González Velázquez, “Optimización de Banco de Pruebas y Sistema de Monitoreo de Aerogenerador de Baja Potencia”, trabajo de fin de tecnólogo, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Santiago de Querétaro, 2017. http://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/269

[7] J. Kappatou, G. Zalokostas and D. Spytatos, “3-D FEM Analysis, Prototyping and Tests of an Axial Flux Permanent-Magnet Wind Generator,” *Energies*, Greece, 2017. https://doi.org/10.3390/en10091269

[8] R. D. Chavan and V. N. Bapat, "The study of different topologies of Axial Flux Permanent Magnet generator," IEEE, 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), pp. 202-206, Pune, 2016. doi: 10.1109/ICACDOT.2016.7877579

[9] T. Asefi, J. Faiz and M. A. Khan, “Design of Dual Rotor Axial Flux Permanent Magnet Generators with Ferrite and Rare-Earth Magnets”, IEEE, 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest, 2018. doi: 10.1109/EPEPEMC.2018.8522004

[10] Yicheng Chen, Pragasen Pillay and A. Khan, "PM wind generator comparison of different topologies," IEEE; Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting., pp. 1405-1412 vol.3, Seattle, WA, USA, 2004. doi: 10.1109/IAS.2004.1348606

[11] R. Rusmana, A. A. Melkias, N. Nurrohman and I. M. W. Kastawan, “Voltage Generation Characteristics of an Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Generator”, IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering, ICIEVE, Indonesia, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/830/4/042019

[12] S. S. Laxminarayan, M. Singh, A. H. Saifee and A. Mital, "Design, Modeling and Simulation of Variable Speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator", *ELSEVIER*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, India, 2017. https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.004

[13] I. M. W. Kastawan and Rusmana, "Voltage Generation of Three-Phase Double Sided Internal Stator Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Generator", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1st Annual Applied Science and Engineering Conference, Indonesia, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/180/1/012105

[14] H. Gör and E. Kurt, "Preliminary Studies of a New Permanent Magnet Generator (PMG) with the Axial and Radial Flux Morphology", *ELSEVIER, ScienceDirect*, Turkey, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.195

[15] H. Gor and E. Kurt, "Waveform Characteristics and Losses of a New Double Sided Axial and Radial Flux Generator", *ELSEVIER, ScienceDirect,* Turkey, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.172

[16] A. Habib, H. Che, N. Rahim, M. Tousizadeh and E. Sulaiman, "A fully coreless Multi-Stator Multi-Rotor (MSMR) AFPM generator with combination of conventional and Halbach magnet arrays," *Alexandria Engineering Journal*, vol n. 59, Issue 2, pp 589-600, April 2020. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.039

[17] N. Georgiev, "Study of Three-Phase Axial Flux Generators", IEEE, 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, 2018. doi: 10.1109/SIELA.2018.8447093

[18] A. Habib, H. Che, N. Rahim, M. Tousizadeh and E. Sulaiman, "A fully coreless Multi-Stator Multi-Rotor (MSMR) AFPM generator with combination of conventional and Halbach magnet arrays," *Alexandria Engineering Journal*, vol n. 59, Issue 2, pp 589-600, April 2020. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.039

[19] E. Celik, H. Gör, N. Öztürk and E. Kurt, "Application of Artificial Neural Network to Estimate Power Generation and Efficiency of a New Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator", *ELSEVIER, ScienceDirect*, Turkey, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.168

[20] M. R. Minaz and M. Celebi, "Design and Analysis of a New Axial Flux Coreless PMSG with Three Rotors and Double Stators", *ELSEVIER, Results in Physics*, Turkey, 2016. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.10.026

[21] M. Dranca, M. Chirca and S. Breban, "Comparative Design Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Direct-Drive Wind Generators", IEEE, The 11st International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2019. doi: 10.1109/ATEE.2019.8724928.

[22] N. E. Lastra, "Diseño y Construcción de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes de Bajo Costo para Aplicaciones Eólicas", ResearchGate, 2019, https://www.researchgate.net/publication/336071436_Diseno_y_Construccion_de_un_Generador_de_Flujo_Axial_con_Imanes_Permanentes_de_Bajo_Costo_para_Aplicaciones_Eolicas

[23] A. Rasekh, P. Sergeant and L. Vierendeels, "Fully Predictive Heat Transfer Coefficient Modeling of an Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine with Geometrical Parameters of the Magnets", *ELSEVIER,* Applied Thermal Engineering, Ghent University, Belgium, 2016. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.019

[24] M. Irfan, R. F. Ariyanto, L. Syafaah, A. Faruq and N. Subeki, “Stator Slotted Design of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Low-Speed Turbine”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ICEAT, Indonesia, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/821/1/012027

[25] H. Polinder, “2 - Principles of electrical design of permanent magnet generators for direct drive renewable energy systems,” Woodhead Publishing Limited, Delft University of Technology, pp. 30-50, The Netherlands, 2013. doi: 10.1533/9780857097491.1.30

[26] V. N. Antipov, A. D. Grozov and A. V. Ivanova, “Design and Analysis of a New Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Electric Power Conference, Russia, 2019. doi: 10.1016/j.rinp.2016.10.026

[27] M.M. Radulescu, S. Breban and M. Chirca, “Novel topologies of low-speed axial-flux permanent- magnet micro-wind generator,” The 18 th National Conference on Electrical Drives, CNAE 2016, Acta Electrotechnica, vol. 57, n° 3-4, Special Issue, 2016. doi: 10.4283/JMAG.2014.19.3.273

[28] B. J. Chalmers and E. Spooner, "An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 2, pp. 251-257, June 1999. doi: 10.1109/60.766991

[29] A. R. Dehghanzadeh, V. Behjat and M. R. Banaei, “Dynamic Modeling of Wind Turbine Based Axial Flux Permanent Magnetic Synchronous Generator Connected to the Grid with Switch Reduced Converter”, *ELSEVIER*, Ain Shams Engineering Journal, Azarbaijan Shahid Madani University, Iran, 2015. https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.002

[30] N. Radwan-Praglowska, D. Borkowski and T. Wegiel, "Model of coreless axial flux permanent magnet generator," 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME), pp. 1-6, Naleczow, 2017. doi: 10.1109/ISEM.2017.7993568

[31] S. Khan, S. Amin and S. S. Hussain Bukhari, “Design and Comparative Performance Analysis of Inner Rotor and Inner Stator Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Turbine Applications”, IEEE, International Conference on Computing-iCoMET, Sukkur IBA University, Pakistan, 2019. doi: 10.1109/ICOMET.2019.8673537

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

LINEAR GENERATOR FOR A LOW POWER WIND GENERATOR, SELECTION, DESIGN AND SIMULATION IN COMSOL MULTIPHYSIC

Generador lineal para un generador eolico de baja potencia, selección, diseño y simulación en COMSOL MULTIPHYSIC

José German Mora Santos[1], Edwin Rivas Trujillo[2], Henry Montana Quintero[3]

Abstract

This document presents a comparative study of three proposed linear generator topologies, based on the compilation of studies reported in the scientific literature, they are modeled by means of 2D simulations in COMSOL and the results obtained are analyzed taking output power and behavior under load as a performance indicator, as a contribution to the research project TOPOLOGIES OF LOW POWER WIND GENERATOR. The results obtained are satisfactory, highlighting the first of the proposed topologies, which presents the best behavior under load and an adequate output power value for low power applications. Thanks to the use of computational tools, the construction of several prototypes is avoided, which gives the possibility of generating a virtual test bench for future developments in this area and achieving a breakthrough in the research of these devices in Colombia.

[1] Engineering Electrical Student: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: jgmoras@correo.udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1400-1496
[2] Tenured Professor: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: erivas@udistrital.edu.co
[3] Engineering Doctorate Student: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: hmontanaq@correo.udistrital.edu.co

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

Keywords: Finite elements, Linear generator, Magnetic flux, Permanent Magnets, Simulation.

Resumen

En el presente documento se expone un estudio comparativo de tres topologías propuestas de generador lineal, a partir de la recopilación de los estudios consignados en la literatura científica, son modeladas por medio de simulaciones en 2D en COMSOL y se analizan los resultados obtenidos tomando como indicador de desempeño la potencia de salida y el comportamiento bajo carga, como contribución al proyecto de investigación TOPOLOGÍAS DE GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA. Los resultados obtenidos son satisfactorios resaltando la primera de las topologías propuestas, que presenta el mejor comportamiento bajo carga y un valor adecuado de potencia de salida para aplicaciones de baja potencia. Gracias al empleo de herramientas computacionales se evita la construcción de varios prototipos, lo que da la posibilidad de generar un banco virtual de pruebas para futuros desarrollos en esta área y lograr un avance en la investigación de estos dispositivos en Colombia.

Palabras clave: Elementos Finitos, Flujo Magnético, Generador Lineal, Imanes Permanentes, Simulación.

1. Introducción

Las máquinas eléctricas de inducción son dispositivos capaces de convertir energía mecánica en energía eléctrica cuando su funcionamiento es el de un generador, o viceversa si funcionan como motor, basándose en la ley de inducción de Faraday al utilizar el campo electromagnético como soporte para dicha conversión, [1].

Estas máquinas aprovechan el movimiento rotatorio o lineal, existiendo una serie de características que diferencian a las máquinas lineales de las máquinas rotativas, y que las hacen muy interesantes en determinadas aplicaciones y contextos, como por ejemplo, un mejor comportamiento a bajas velocidades y el no necesitar acoples mecánicos intermedios para la conversión de energía, [2, 3].

Cualquier tipo de máquina rotativa se puede adaptar y construir desde una perspectiva lineal, ver figura 1, por lo que han sido empleadas ampliamente en la industria debido a su estructura simple y de bajo costo de construcción [2, 4, 5-7].

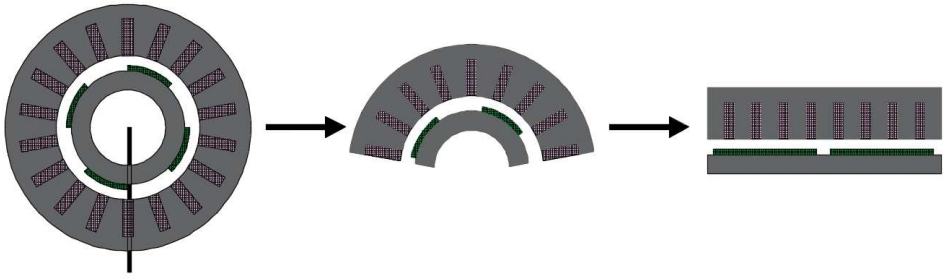


Figura 1. Adaptación de una máquina rotativa a lineal. Fuente: elaboración propia

Las aplicaciones más conocidas de los generadores lineales están relacionadas con el área del transporte, dado que en el proceso de inducción estos dispositivos además de entregar propulsión pueden generar levitación, lo que los hace comunes en aplicaciones de transporte de trenes de alta velocidad, ya que además ofrecen una ventaja adicional al no existir rozamiento durante su operación [2, 5, 8, 9].

Gracias a que los generadores lineales ofrecen la posibilidad de convertir directamente energía mecánica en energía eléctrica, sin pasos intermedios entre la interfaz primaria y la máquina eléctrica, es común que también sean usados en el campo de la energía undimotriz acoplados a boyas [10-14].

Por su estructura (figura 2), convierten la energía por medio de un movimiento oscilante sobre un solo eje coordenado de manera periódica, a velocidad reducida. El voltaje generado, la energía eléctrica y, por lo tanto, la corriente de armadura es directamente proporcionales a la velocidad del traslator, [15-17].

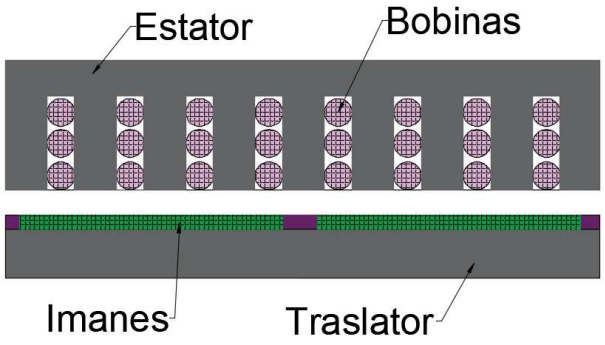


Figura 2. Estructura de un generador lineal de imanes permanentes. Fuente: elaboración propia

El análisis de este tipo de generadores puede realizarse partiendo del realizado a los generadores rotativos, si se tiene en cuenta dos aspectos: que las dimensiones y desplazamientos angulares deben reemplazarse por dimensiones y desplazamientos lineales; y que se debe remplazar los pares por fuerzas. La parametrización del generador lineal como

la estructura de los resultados se obtienen de manera similar [5, 18]. En la Tabla 1 se presenta las ventajas y desventajas comparativas de generadores lineales y rotativos.

Tabla 10. Ventajas y desventajas comparativas de generadores lineales y rotativos [2, 3, 5, 15, 19-21].

Ventajas	Desventajas
• Alta eficiencia • Menor tamaño y peso • Diseño compacto • Sistema mecánico más ligero y simple • Alta densidad de potencia • Mayor velocidad • Mayor aceleración cuando es necesario reducir el tiempo de mecanizado • Niveles bajos de ruido • Reducción de vibraciones • Menores pérdidas por fricción, lo que conlleva a una disminución en los costos del mantenimiento	• Necesidad de disipar calor por medio de sistemas de refrigeración • Reducción de los niveles de precisión, cuando no hay un incremento controlado de la temperatura • Aumento del costo de las soluciones cuando su diseño es complejo • No posee elementos de trasmisión para amortiguar cualquier perturbación mecánica • Para cambios de carga es necesario utilizar un controlador electrónico extremadamente rápido para mantener la estabilidad • Uso habitual de técnicas de filtrado para mitigar resonancia mecánica en condiciones exigentes

Hasta el momento se han desarrollado diferentes configuraciones de generadores lineales de imanes permanentes, cada topología empleada o característica constructiva modificada, está pensada en mejorar ciertos aspectos de la máquina y/o solucionar problemas que se presentan en esta, por lo que es posible clasificarlas como se propone en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las topologías de acuerdo a su enfoque.

Clasificación	Subdivisión	Aspecto que mejora	Aspecto a tener en cuenta
Pensadas en la geometría	• Plano • Tubular • Multilateral	Flujos de dispersión y eficiencia	Tiempo y costos de construcción
Pensadas en la ubicación de imanes y bobinas	• De bobina móvil • De imanes móviles	Tiempo de respuesta y eficiencia.	Refrigeración efectiva y masa en movimiento.
Pensadas en el entrehierro	• De imanes grandes • De imanes pequeños	Densidad de flujo magnético en el entrehierro	Fuerza de atracción entre imanes
Pensadas en el efecto cogging	• De armadura ranurada • De armadura sin ranurar	Armónicos, par frenado, eficiencia y efecto cogging	Cantidad de densidad de flujo

Pensadas en la relación Estator-Traslator	• Estator corto movible • Estator corto fijo • Traslator corto movible • Bilateral con traslator externo • Bilateral con traslator interno	Superficie activa de la interacción estator-traslator y densidad de potencia	Costo de construcción, pérdidas Joule y Efecto fin
Pensadas en la disposición de los imanes	• De disposición apilada • De disposición superficial	Eficiencia, potencia y ángulo de carga de la máquina	Masa total de los imanes, transitorios y cortocircuitos
Pensadas en los patrones de magnetización	• Radial • Axial • Halbach • Cuasi-Halbach	Densidad de flujo, distorsión armónica y potencia de salida	Distancia entre los puntos finales de cada imán (flujos de fuga)
Pensadas en la concatenación del flujo magnético	• De flujo longitudinal • De flujo transversal	Flujos de dispersión y potencia nominal	Construcción simple, magnitud de la reactancia sincrónica,

	• De núcleo de aire	por área de espacio de aire	fluctuaciones de empuje y necesidad de compensación

Fuente: elaboración propia

Con el objeto de proponer las topologías a comparar es necesario considerar algunos aspectos que aseguren que el diseño del generador otorgue resultados satisfactorios, reuniendo ciertas características que se adecuen a las posibles aplicaciones del generador lineal en bajas potencias, [22].

Las dimensiones óptimas para el generador se obtienen del análisis de la densidad de corriente máxima permitida y el número mínimo permitido de polos, teniendo en cuenta las combinaciones más comunes de ranuras y polos que se exponen en la tabla 3, por lo tanto, estas dimensiones se pueden obtener minimizando el imán o la masa de cobre [2, 3]. El diseño de cada una de las topologías tiene en cuenta las ecuaciones consignadas en la tabla 4 obtenidas de la teoría electromagnética.

Tabla 3. Combinaciones de polos magnéticos y ranuras [23].

Ranuras	3	6	12	21	36	48
Polos	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4
		8	8	8	6	8
		10	10	14	8	10
			16	16	10	14
			…	…	…	…

Tabla 4. Fórmulas de diseño.

Variable	Fórmula	Donde
Área transversal mínima el conductor	$A_{C_minimum} = \frac{I}{Jc}$	I = Corriente máxima permitida Jc = Densidad de corriente
Número de vueltas por bobina	$N_{coil} = \frac{F_{ll} * h * W}{Ac}$	F_{ll} = Factor de llenado h = Altura de la ranura W = Ancho de la ranura Ac = Área transversal del conductor seleccionado
Número de vueltas por fase	$N_{phase} = C_{phase} * N_{coil}$ $N_{phase} = q * pu * N_{coil}$	N_{coil} = Número de vueltas por bobina C_{phase} = Bobinas por fase Pu = pares de polos útiles q = Ranuras por polo y fase
Carga lineal	$L_{linear} = \frac{N_{coil} * I}{\tau}$	N_{coil} = Número de vueltas por bobina I = corriente máxima permitida τ = paso de ranura
Longitud del conductor	$L_c = (2 * W + 2 * P) * N_{phase}$	W = Ancho de la ranura P = Profundidad de la ranura

Variable	Fórmula	Donde
		N_{phase} = Número de vueltas por fase
Resistencia por fase	$R_{phase} = L_c * R_c$	L_c = Longitud del conductor R_c = Resistencia del conductor
FEM generada	$FEM = 2 * k_{ff} * k_d * N_{phase} * V_{maximum} * L_{stator} * B$	k_{ff} = Factor de forma k_d = Factor de distribución $V_{maximum}$ = Velocidad máxima L_{stator} = Longitud del estator B = Densidad de flujo magnético en el entrehierro
Resistencia de carga de diseño	$R_{10w} = \frac{(FEM)^2}{P_{design}} - R_{phase}$	FEM = Fuerza electromotriz generada P_{design} = Potencia de diseño R_{phase} = Resistencia por fase

Fuente: elaboración propia.

Para el material de los imanes se realiza una comparativa entre imanes de neodimio e imanes de ferrita con base en la literatura científica, encontrando mejores características y resultados con imanes de neodimio, como resultado se determina las principales ventajas y desventajas de estos imanes como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los imanes de neodimio [6, 24].

Ventajas	Desventajas
● Capacidad de permitir nuevos diseños ● Altos valores de coercitividad y remanencia ● Propiedades por encima de las tradicionales ● Menor masa con respecto a los imanes de ferrita	● Su utilización está condicionada por la temperatura ● Sensibilidad al calor, no puede trabajar a temperaturas por encima de los 80 °C ● Manipulación cuidadosa dada su fragilidad

Una vez diseñadas las topologías, para lograr una comparativa entre ellas se emplea el método de elementos finitos, dado que, por lo general, este análisis es uno de los enfoques más poderosos para diseño y modelado precisos de máquinas eléctricas, [2].

La principal ventaja del método es su capacidad para tratar cualquier tipo de geometría y material no homogéneo sin necesidad de alterar la formulación o el código de ordenador. Es decir, se proporciona una fidelidad geométrica y un tratamiento al material sin restricciones. Esto hace que sea uno de los métodos numéricos más utilizado en todas las ramas de la ingeniería, [6, 22].

2. Topologías propuestas

Para la primera de las topologías, se propone un generador plano monolateral de núcleo ranurado de hierro con imanes móviles, y una concatenación del flujo magnético de manera

longitudinal para obtener una reactancia sincrónica pequeña. Adicionalmente, se determina una disposición apilada de imanes pequeños para evitar cortocircuitos y esfuerzos mecánicos grandes, y se utiliza un patrón de magnetización Halbach para el traslator de mayor longitud. Con base en el estudio realizado en [25] en donde se afirma que la baja densidad de flujo implica que se necesitan más vueltas para obtener un voltaje específico, se proponen 4 bobinas por fase en el estator para obtener una mejor distribución de vueltas por fase, y se adopta un devanado de tres capas para reducir el material del devanado y por consiguiente las pérdidas en el cobre, la configuración resultante para cuatro bobinas por fase se muestra en la figura 3.

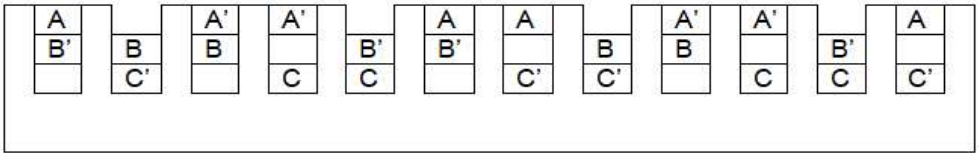


Figura 3. Estator con devanado de tres capas con número par de polos. Fuente: elaboración propia.

La potencia esperada se define en 10 W por fase y la resistencia de carga se estima en 462 ohms para una fem generada de 68.09 V a una velocidad de 1 m/s y un entrehierro de 5 mm, en la figura 4 se observa la estructura resultante.

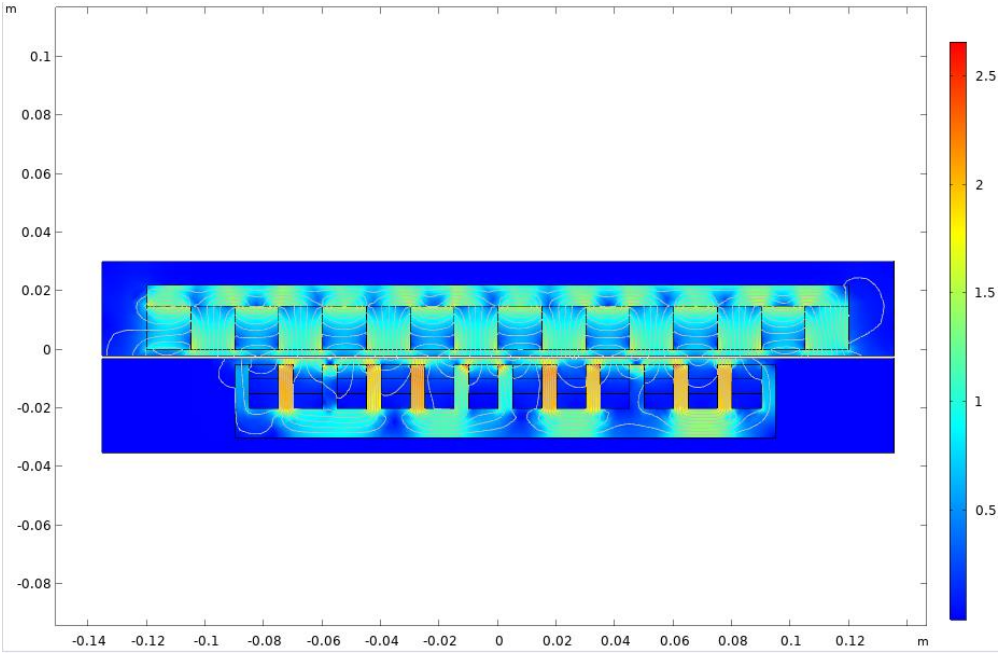


Figura 4. Primera topología propuesta. Fuente: elaboración propia

Para la segunda topología a proponer, se piensa en ahorrar el espacio ocupado por el generador sin comprometer las características de la primera topología propuesta, para esto, se realiza las siguientes modificaciones: se escoge un tamaño de imanes grande para reducir el número de polos del generador y por ende la longitud del mismo, se emplea un patrón de magnetización axial y se determina un generador bilateral.

Hay que tener en cuenta que un generador de doble cara produce más potencia a costa de un pequeño aumento de cogging, lo que permitirá reducir el espacio ocupado por el generador para producir la misma potencia que en la topología uno, [26].

Para reducir el aumento de cogging en el generador, en [27] descubrieron que esta fluctuación de empuje puede reducirse cambiando la forma del diente en ambos extremos del estator, por lo tanto, se adopta una estructura de dientes de extremo corto para que el estator reduzca la fluctuación de empuje y no comprometa las características técnicas del dispositivo como se observa en la figura 5.

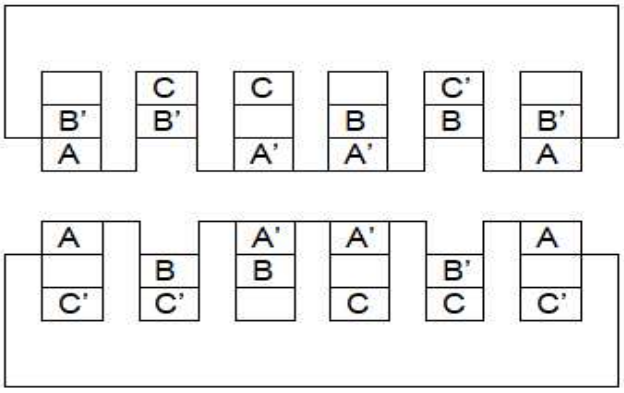


Figura 5. Estator bilateral con devanado de tres capas. Fuente: elaboración propia.

La potencia esperada se define en 10 W por fase y la resistencia de carga se estima en 32 ohms para una fem generada de 17,84 V por estator a una velocidad de 1 m/s y un entrehierro de 5 mm, en la figura 6 se observa la estructura resultante.

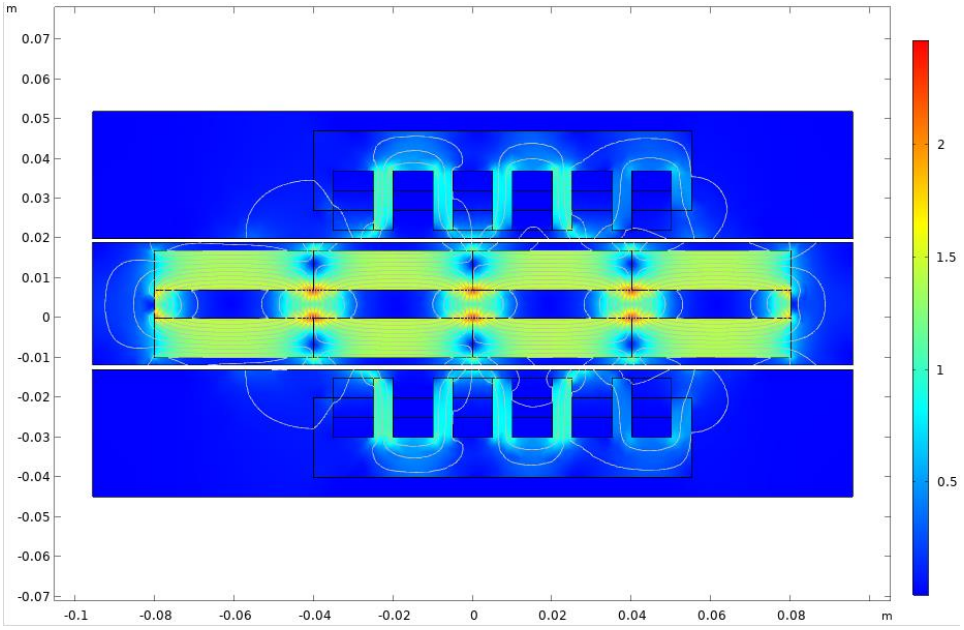


Figura 6. Segunda topología propuesta. Fuente: elaboración propia.

Para la tercera topología a proponer, el interés está centrado en disminuir el material ferromagnético y el alambre de cobre para los devanados en comparación con las demás topologías propuestas, para lo cual, se adopta un estator interno para cada fase con un devanado independiente de una capa, y se escoge dos tamaños de imanes para un patrón de magnetización Halbach en los traslator externos. Dado que el estator se dividirá en tres partes con devanados independientes, la configuración resultante de estos de una capa para dos bobinas por fase se muestra en la figura 7.

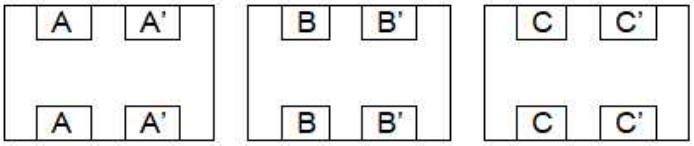


Figura 7. Estator con devanado independiente. Fuente: elaboración propia

La potencia esperada se define en 10 W por fase y la resistencia de carga se estima en 178 ohms para una fem generada de 42,33 V por estator a una velocidad de 1 m/s y un entrehierro de 5 mm, en la figura 8 se observa la estructura resultante.

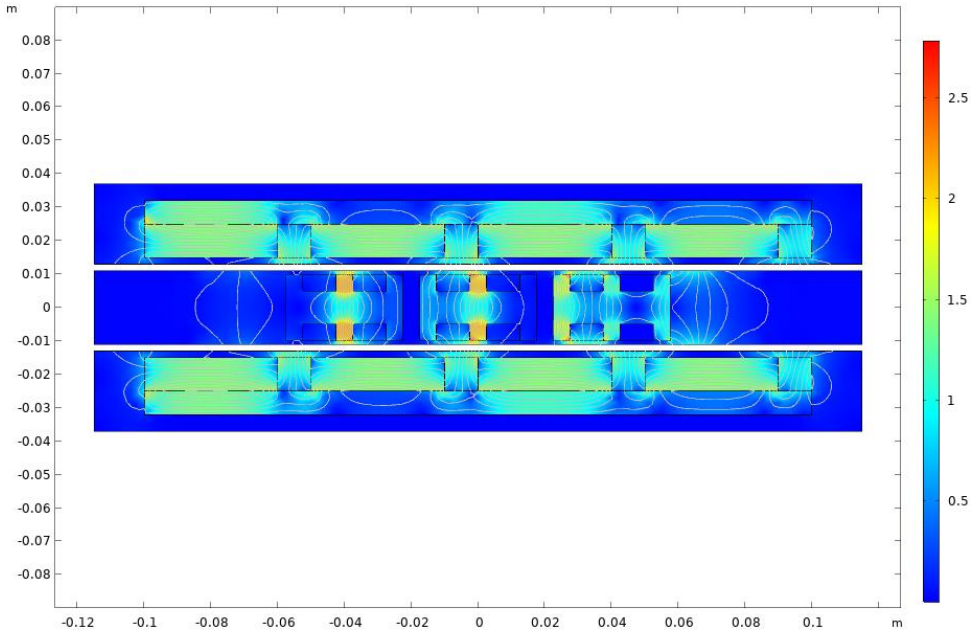


Figura 8. Tercera topología propuesta. Fuente: elaboración propia

Las dimensiones de las tres topologías propuestas se exponen en la tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones de las topologías propuestas.

Topología	Variable	Cantidad	Dimensiones
Primera	Imanes	16	15 x 15 x 40 mm
	Ranuras totales	12	10 x 15 x 40 mm
	Dientes totales	13	5 x 15 x 40 mm
	Estatores	1	185 x 25 x 40 mm
	Traslators	1	240 x 22 x 40 mm
	Vueltas totales Bobinado	368	22 AWG
	Resistencia de carga	462 Ω	----
	Voltaje inducido esperado	68.09 V	----
	Potencia por fase esperada	10 W	----
Segunda	Imanes	8	40 x 10 x 40 mm
	Ranuras totales	12	10 x 15 x 40 mm
	Dientes totales	10 internos 4 extremos	5 x 15 x 40 mm 5 x 10 x 40 mm
	Estatores	2	185 x 25 x 40 mm
	Traslators	1	160 x 27 x 40 mm
	Vueltas totales Bobinado	184	22 AWG
	Resistencia de carga	32 Ω	----
	Voltaje inducido esperado	17.84 V	----
	Potencia por fase esperada	10 W	----
Tercera	Imanes	16	40 x 10 x 40 mm 10 x 10 x 40 mm
	Ranuras totales	12	10 x 5 x 40 mm
	Dientes totales	18	5 x 5 x 40 mm
	Estatores	3	35 x 20 x 40 mm
	Traslators	2	200 x 17 x 40 mm
	Vueltas totales Bobinado	92	22 AWG
	Resistencia de carga	178 Ω	----
	Voltaje inducido esperado	42.33 V	----
	Potencia por fase esperada	10 W	----

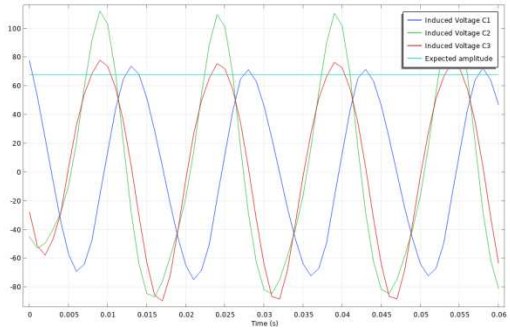
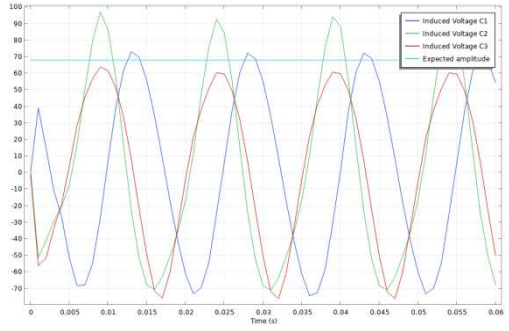
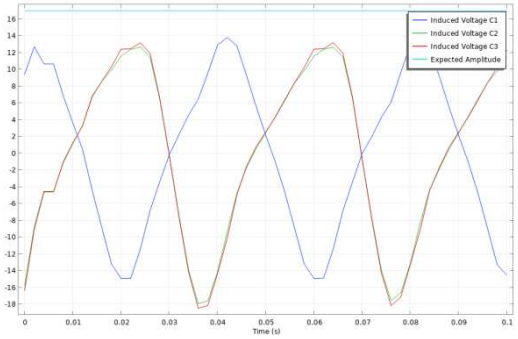
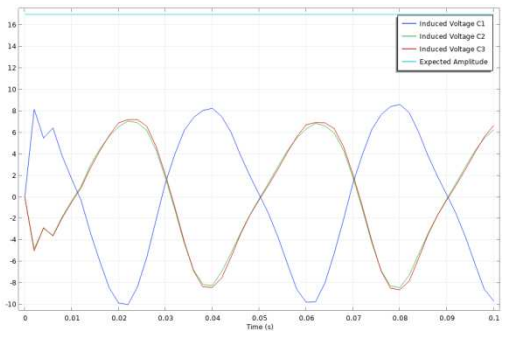
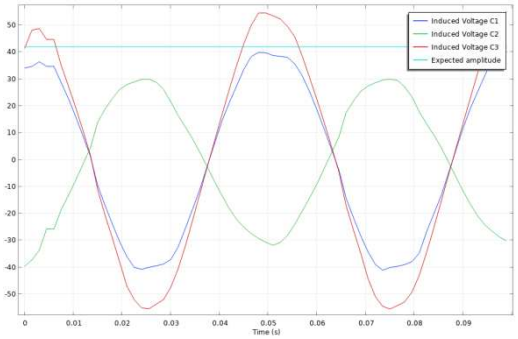
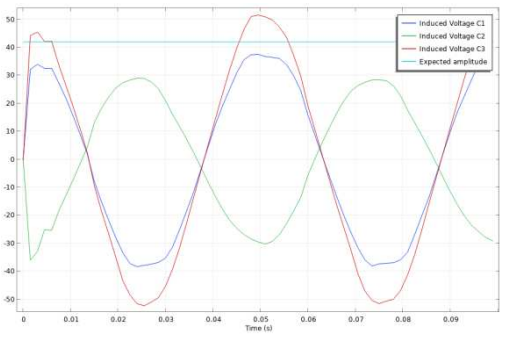
Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Para la obtención de resultados muy cercanos a la realidad y evitar la construcción de prototipos que generen costos adicionales de fabricación, se emplea software computacional capaz de resolver problemas no analíticos a través del uso del método de elementos finitos.

El modelado de cada una de las topologías fue realizado para que los generadores estuviesen en vacío y posteriormente bajo la carga de diseño, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 7. Las magnitudes esperadas se grafican como constantes.

Tabla 7. Resultados del modelado con elementos finitos.

Top	Voltaje en vacío	Voltaje bajo carga de diseño
1		
2		
3		

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de comparar el indicador de desempeño de potencia de cada topología bajo la misma carga, se realizan simulaciones conectando a cada generador la carga de diseño de las otras dos topologías adicionales a la propia, y se consignan los promedios de potencia por fase del generador en la figura 10. Se observa que la salida de potencia para cualquier carga es mayor en la topología uno, siendo esta la de mejor desempeño.

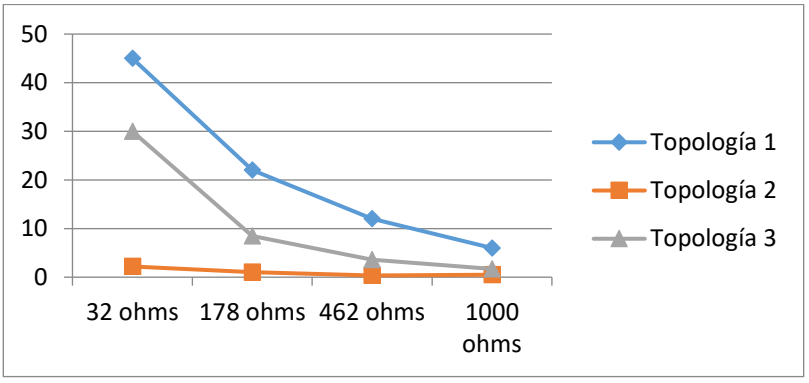


Figura 10. Variación de la potencia a diferentes cargas. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

A pesar de que la segunda topología reduce el espacio ocupado por el generador, presenta perturbaciones de onda y una reducción de la tensión en bornes bajo carga, lo que conlleva a presentar la menor salida de potencia de todas las topologías propuestas, siendo la topología uno la de mejor comportamiento y salida de potencia en condiciones de carga.

Como resultado de la modificación de los dientes extremos en la topología dos se observa una disminución de la densidad de flujo magnético en los dientes extremos, lo que reduce proporcionalmente la fuerza dentada o efecto cogging en el generador, sin embargo, se

presentan pequeños flujos de dispersión ocasionados por el aumento del entrehierro en las partes finales.

Las topologías dos y tres presentan ciertos comportamientos, como lo son perturbaciones en la forma de onda, desfases no deseados y una potencia de salida desbalanceada entre fases, que pueden ser tratados con componentes adicionales en la salida del generador pero que no hacen discutible la aplicabilidad de las mismas para bajas potencias.

Los patrones de magnetización tienen un papel importante en los generadores lineales dado que pueden mejorar el comportamiento de la tensión inducida en bornes del generador, y, por ende, mejorar el rendimiento del mismo. Un arreglo bien configurado y dimensionado resulta en un generador con las mismas características.

Gracias a que el generador se define para bajas potencias los problemas que se presentan cuando se quiere generar grandes bloques de potencia, como, por ejemplo, un tamaño exagerado de la máquina para soportar los esfuerzos dada la baja velocidad de la parte móvil [5], desaparecen hasta el punto de poder ser despreciables e incluso de no presentarse.

Reconocimientos

Al Grupo de investigación en Compatibilidad Electromagnética GCEM de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Referencias

[1] L. Wei, T. Nakamura and K. Imai, "Development and Optimization of Low-Speed and High-Efficiency Permanent Magnet Generator for Micro Hydro-Electrical Generation System", ELSEVIER, Renewable Energy, Kyoto University, Japan, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.049

[2] M. Ardestani, N. Arish and H. Yaghobi, "A New HTS Dual Stator Linear Permanent Magnet Vernier Machine with Halbach Array for Wave Energy Conversion", ELSEVIER, Physyca C: Superconductivity and its Applications, Semman University, Iran, 2019. https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.1353593

[3] P. Khatri and X. Wang, "Comprehensive Review of a Linear electrical Generator for Ocean Wave Energy Conversion", IET Renewable Power Generation, IET, Vol. 14, Lss. 6, pp. 949-958, February, 2020. doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0624

[4] O. S. Muñoz Muñoz, "Dimensionamiento electromagnético de un Generador Lineal para la Conversión de Energía Undimotriz de Acuerdo a las Características del Océano Pacífico Colombiano", trabajo de fin de grado, Universidad del Valle, Colombia, 2020.

[5] C. García Saiz, "Diseño, Dimensionado y Simulación de un Generador Lineal para el Desarrollo de una Boya de Generación de Energía Undimotriz", trabajo de fin de grado, Universidad de Cantabria, España, 2015. https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/7332

[6] A. García Villalmanzo, "Diseño de un Motor Lineal de Reluctancia Autoconmutado con Imanes Permanentes", trabajo de fin de grado, Universidad Rovira I Virgili, Tarragona, 2017. http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/2459pub.pdf

[7] A. Shiri and A. Shoulaie, “End Effect Braking Force Reduction in High-Speed Single-Sided Linear Induction Machine”, ELSEVIER, Energy Conversion and Management, Iran University of Science and Technology, Iran, 2012. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.014

[8] X. Chen, S. Zheng, J. Li, G. T. Ma and F. Yen, “A Linear Induction Motor with a Coated Conductor Superconducting Secondary”, ELSEVIER, Physyca C: Superconductivity and its Applications, Southwest Jiaotong University, China, 2017. https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.04.002

[9] SS. Rathore, S. Mishra, M. K. Paswan and Sanjay, “A Review on Design and Development of Free Piston Linear Generators in Hybrid Vehicles”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ICCEMME, India, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/691/1/012053

[10] Y. Gao, S. Shao, H. Zou, M. Tang, H. Xu and C. Tian, “A Fully Floating System for Wave Energy Converter with Direct-Driven Linear Generator”, ELSEVIER, Energy, Beijing, China, 2015. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.072

[11] J. F. Fortes, L. M. Ferraz and I. E. Chabu, “Optimized Double Sided Linear Generator for Wave Energy in Sao Paulo’s Coast”, 7th International Conference on Ocean Energy (ICOE), Polytechnic School of University of Sao Paulo, France, 2018. https://www.icoe-conference.com/publication/optimized-double-sided-linear-generator-for-wave-energy-in-sao-paulo-s-coast/

[12] V. Boscaino, G. Cipriani, V. Di Dio, V. Franzitta and M. Trapanense, “Experimental Test and Simulations on a Linear Generator-Based Prototype of a Wave Energy Conversion System Designed with a Reliability-Oriented Approach”, MDPI, Sustainability, University or Palermo, 2017. doi: 10.3390/su9010098

[13] O. Farrok, M. R. Islam, Y. G. Guo and J. G. Zhu, "Design and Analysis of a Novel Lightweight Translator Permanent Magnet Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion", IEEE, 2015. doi: 10.1109/TMAG.2017.2713770

[14] K. Cruz, F. Dator, J. Ong, N. Bumanlag and M. C. Pacis, "Harnessing of Wave Energy using Axially Magnetized Linear Generator with Data Logger using Gizduino Microcontroller", IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series, CEEPE, Mapua University, Philippines, 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1304/1/012013

[15] A. Tapia-Hernández, M. Ponce-Silva, N. Mondragón-Escamilla y L. Hernández-González, "Impacto de la Geometría en el Efecto Fin de Generadores Lineales", Información Tecnológica, Vol.27, No. 4, pp. 133-138, México, Agosto, 2016. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000400014

[16] P. Naderi, M. Heidary and M. Vahedi, "Performance Analysis of Ladder-Secondary-Linear Induction Motor with Two Different Secondary Types using Magnetic Equivalent Circuit", ELSEVIER, ISA Transactions, Shahid Beheshti University, Iran, 2020. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.03.013

[17] Y. Xu, X. Xue, Y. Wang and M. Ai, "Performance Characteristics of Compressed Air-Driven-Free-Piston Linear Generator (FPLG) System – A Simulation Study", ELSEVIER, Applied Thermal Engineering, 2019. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114013

[18] J. Xi, Z. Dong, P. Liu and H. Ding, "Modeling and Identification of Iron-less PMLSM End Effects for Reducing Ultra-Low-Velocity Fluctuations of Ultra-precision Air Bearing Linear Motion Stage", ELSEVIER, Precision Engineering, Shanghai Jiaotong University, China, 2017. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.016

[19] X. Luo, C. Zhang, S. Wang, E. Zio and X. Wang, "Modeling and Analysis of Mover Gaps in Tubular Moving-Magnet Linear Oscillating Motors", ELSEVIER, Chinese Journal of Aeronautics,

Chinese Society of Aeronautics ans Astronautics & Beihang University, China, 2017. https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.11.008

[20] K. S. Rama Rao, T. Sunderan and M. Ref'at Adiris, "Performance and Design Optimization of Two Model Based Wave Energy Permanent Magnet Linear Generators", ELSEVIER, Renewable Energy, 2016. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.019

[21] M. F. M Naafi, T. Ibrahim, N. M. Nor and M. A. Firdaus bin M. Hamim, "Design and Modelling of a Portable Pico Linear Generator for Wave Energy Conversion System", Applied Mechanics and Materials, Vol. 785, pp. 300-304, Malaysia, 2015. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.785.300

[22] W. Rentería Palacios, "Diseño y Evaluación Electromagnética de un Motor Síncrono Lineal de Imanes Permanentes en Disposición Halbach", trabajo de fin de máster, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, 2018. http://hdl.handle.net/10614/10454

[23] J. Kim, J. Y. Kim and J. B. Park, "Design and Optimization of a 8kW Linear Generator for a Direct-Drive Point Absorber", IEEE, Yonsei University, Seoul, Korea, 2013. doi: 10.23919/OCEANS.2013.6741125

[24] W. Li, T.W. Ching and K.T. Chau, "Design and Analysis of a New Parallel-Hybrid-Excited Linear Vernier Machine for Oceanic Wave Power Generation", ELSEVIER, Applied Energy, China, 2017. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.061

[25] L. Huang, J. Liu, H. Yu, R. Qu, H. Chen and H. Fang, "Winding Configuration and Performance Investigation of a Tubular Superconducting Flux-Switching Linear Generator", IEEE, Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3, 2015. doi: 10.1109/TASC.2014.2382877

[26] X. Liu, H. Yu, Z. Shi, T. Xia and M. Hu, "Electromagnetic-Fluid-Thermal Field Calculation and Analysis of a Permanent Magnet Linear Motor", ELSEVIER, Applied Thermal engineering, Southeast University, China, 2017. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.066

[27] X. Chen, S. Zheng, J. Li, G. T. Ma and F. Yen, "A Linear Induction Motor with a Coated Conductor Superconducting Secondary", ELSEVIER, Physyca C: Superconductivity and its Applications, Southwest Jiaotong University, China, 2017. https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.04.002

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF AN ELECTRIC BIOGAS GENERATOR FOR THE USE OF ORGANIC SOLID WASTE FROM VEGETABLE SOURCES

Metodología para la selección de un generador eléctrico de biogás para el aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos de fuente vegetal

Cruz Ruiz Lisseth Milena [1], Cáceres Castellanos Alejandro [2], Arias Henao Camilo Andrés [3]

Abstract

Through this document, it is intended to provide a guide for the acquisition of a 10kW electric power generator with biogas, using a series of steps that are proposed in this article for the adequate obtaining of the generator that comply the specific demand of this case and will be installed in the Market Square of Fusagasugá (Colombia), the main collection center of the municipality and that constitutes this case of study. The methodology consists in the compilation of the options for their acquisition according to market availability, electrical and mechanics specifications, accessories, nationalization and internal transport procedures.

[1]Mechanical Technologist, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Current position: Researcher Student, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: limcruz24@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000- 0002-2351-7665

[2]Mechanical Technologist, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Current position: Researcher Student, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: acaceresc@correo.udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1788-4204

[3] Mechanical Engineer, Universidad de los Andes, Colombia. Magister in Mechanical Engineer and Doctor in Energy Engineer, Universidad de Sevilla, Spain. Current position: Professor and researcher,Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: carias@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8846-2984

Keywords: biogas, electrical generator, organic solid waste from plant sources.

Resumen

Por medio de este documento, se pretende brindar una guía para la adquisición de un generador de energía eléctrica de 10kW a partir de biogás, utilizando una serie de pasos que se plantean en este artículo para la adecuada obtención del generador que cumpla la demanda específica de este caso y sea instalado en la Plaza de Mercado de Fusagasugá (Colombia), principal centro de acopio del municipio y que constituye este caso de estudio.

La metodología consiste en la recopilación de las opciones para su adquisición según disponibilidad en el mercado, especificaciones eléctricas y mecánicas, accesorios y los respectivos trámitesde importación, nacionalización y transporte interno.

Palabras clave: biogás, generador, residuos sólidos orgánicos de fuente vegetal.

1. Introducción

La Comisión de Regulación de Energía y Gas, en el documento CREG-056 del 22 de mayo de 2009, define que: *El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de aire (ambiente anaeróbico). (…) Este biogás es una mezcla constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno ($H_2S)_2$,* [1].

Por otra parte, el uso de generadores de energía eléctrica por biogás permite darles un nuevo uso a los residuos, aprovechando su potencial energético *los cálculos indican que de 11,3 millones de toneladas de residuos que se producen al año en Colombia, al menos 9,6 millones se podrían aprovechar*, [2]. Este proyecto se enfoca en el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos de fuente vegetal por medio de generadores eléctricos, especialmente de combustión interna, buscando promover la implementación de esta tecnología en Colombia y así reducir su impacto ambiental como medida de obtención de servicios. La generación eléctrica a partir de biogás es un proceso de implementación de fuentes de energía no convencionales, siendo relevante debido a que *la generación de biogás y la obtención de energía eléctrica para abastecer […] resulta ser altamente atractiva en cuanto al ahorro que puede obtener,* [3].

Por lo anterior, hoy en día diversos emplazamientos buscan promover planes de aprovechamiento de recursos, y la generación de energía a partir de residuos orgánicos es uno de los métodos de ahorro. Ejemplo de esto está en Michoacán, México donde se aprovechan residuos de excretas de ganado para alimentar generadores, *representando un ahorro de energía eléctrica de 4.23% que corresponde para 2013 a un monto de $18,300,000 pesos aproximadamente,* [3]. Los generadores, usados de forma correcta, pueden llegar a lograr ahorros por una cantidad de tiempo satisfactoria con respecto a la inversión, contando con el recurso para su activación *considerando 50% en volumen de CH_4 y una vida útil del proyecto a 21 años,* [3].

De otro lado, actualmente se encuentra en vigencia la *Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS de Fusagasugá 2016 – 2027* [4], cuyo objetivo es garantizar el mejoramiento continuo del manejo de residuos y la prestación del servicio de aseo en el municipio de Fusagasugá en Colombia, permitiendo, entre otras cosas, el aprovechamiento de los residuos: *desde hace una década la Gobernación de Cundinamarca viene advirtiendo sobre el grave problema que vive el departamento con sus residuos: sus rellenos sanitarios sólo tienen una vida útil de 30 años,* [5]. Dentro del documento se mencionan las iniciativas que se tienen para el aprovechamiento de los residuos, tanto del vertedero de Mondoñedo como los generados dentro de la plaza de mercado: transformación de material orgánico a compostaje, reutilización, reciclaje y recuperación de energía.

En al anterior sentido, en el mercado existen diversas tecnologías para dicho proceso de recuperación y/o transformación de energía. En el handbook *Landfill gas energy technologies* [6] del Oil and gas institute, National Research Institute – Polonia, se realiza una recopilación de la maquinaria utilizada comúnmente en el aprovechamiento del biogás de vertedero (LFG), el cual presenta una calidad más alta que el biogás de RSO debido a su composición. Este documento contiene una descripción detallada del funcionamiento de los motores reciprocantes o de combustión interna y cada una de sus etapas, además de un compendio de generadores disponibles en la industria; también contiene generalidades de las turbinas de ciclo Bryton, microturbinas y motores Stirling.

Así mismo, Bove y Lunghi en el documento *Electric power generation from landfill gas using*

traditional and innovative technologies [7] exponen las condiciones de aprovechamiento de los residuos sólidos en Italia, diferenciando entre compostaje, incineración y arroje en vertederos, siendo este último el más usado (alrededor del 70%). En el artículo se incluye una tabla de la composición más común de los residuos arrojados en vertederos usando los datos de tres de ellos, uno en Estados Unidos, teniendo el metano entre el 45% y el 60% de la composición total; también se mencionan otros componentes como dióxido de carbono y oxígeno. Incluye también ventajas y desventajas de las tecnologías más usadas y menciona algunas otras tecnologías para el aprovechamiento del biogás, como sistemas de turbinas a partir de Ciclo Rankine Orgánico, celdas de combustible de carbonato fluido y pilas de combustible de óxido sólido.

De otro lado, en el documento *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: un análisis teórico práctico* del Banco Interamericano de Desarrollo [8], se realiza una descripción de las tecnologías disponibles para la generación de electricidad a partir de biogás de rellenos sanitarios (GRS), considerando ventajas y desventajas de cada una y se analizan las fuentes de reducción de gases del efecto invernadero (GEI), centrándose en el potencial de algunas ciudades argentinas. Aquí resumen algunos tratamientos y usos del biogás, tecnologías de producción eléctrica con biogás, y socializan un breve estudio ambiental de las afectaciones actuales y la mejora de las condiciones ambientales con esta clase de iniciativas.

Como referencia regional, se puede citar al proyecto *Biogás Doña Juana: Ciclo de producción*

de energía a partir del biogás del relleno sanitario. Aquí se incluyen datos como la expectativa de reducir alrededor de 820.000 toneladas por año de gases de efecto invernadero, la composición del gas del relleno y una descripción del ciclo de producción de energía eléctrica con biogás. Cuentan con 3 plantas, la primera puesta en marcha en el 2016; actualmente alcanzan casi los 23MW de generación eléctrica usando motores de combustión interna con uso de cilindros reciprocantes, similares a la planta de generación aquí propuesta.

Este modo de producción de energía se puede lograr a través de la implementación de equipos para la generación como lo son: motores de combustión interna (figura 2), turbinas de gas (figura 1), sistemas de turbinas de gas por ciclo orgánico de Rankine (figura 3), entre otros.



Figura 1. Generador de turbina de gas. Caterpillar. Disponible en: https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/electric-power/gas- generator-sets.html



Figura 2. Generador de motor de combustion interna CaterPillar. CaterPillar. Disponible en: https://gecolsa.com/equipos/plantas-electricas/plantas-electricas-bio-gas/



Figura 3. Planta de energía del ciclo orgánico Rankine. Kaishan USA. Disponible en: https://kaishanusa.com/products/plantas-de-energia-del-ciclo-organico-de- rankine-orc/?lang=es.

El ciclo orgánico de Rankine se basa en el ciclo tradicional usando en vez de propano se utiliza el agua; la desventaja es su baja eficiencia por su cambio de combustible. El motor de ciclo Stirling es muy poco usado debido a su combustión externa, su alta impureza y al ser de gran tamaño es muy baja su utilización en proyectos de este tipo; sucede algo similar con las celdas

de combustible de óxido sólido “que son de gran ayuda para el ambiente y generación de monóxido de carbono como combustible” [7] pero su eficiencia para generación energía es muy baja.

Como se aprecia en la Tabla 1, los motores reciprocantes de combustión interna son los más usados para realizar el proceso de conversión de gas a energía eléctrica por la facilidad y la considerable eficiencia que demuestra el proceso, también *representan la tecnología más empleada para la energía eléctrica […] esta razón se debe principalmente a la compatibilidad de la potencia con la viabilidad económica,* [7]. Además, poseen una robustez que permite el aumento de la durabilidad de la máquina y un incremento de la vida útil si se maneja sin sobreesfuerzo alguno, llegando a tener una eficiencia de hasta el 33%, [7].

Tabla 1. Eficiencia energética de las máquinas de generación.

Máquinas	**Eficiencia eléctrica**	**Consumo de combustible (kJ / kWh)**	**Emisiones (µg/kJ)**	
			NOx	CO
Celdas de combustible	50%	7.174	NA	1.4
Ciclo Stirling	38%	9.390	3,11	15
Motor CIA	33%	10.972	56,6	56,6
Turbina de gas	28%	12.872	15	19
Ciclo Rankine	18%	19.202	16	18,9

Fuente: Alternative forms of electricity generation from the biogas: An approach to the cost of generation of energy, [5].

Los motores de combustión interna para generadores de potencia son los más usados y

estudiados en la industria, no solo para electricidad sino para la obtención de energía generadora de movimiento con un buen desempeño ante las fluctuaciones de carga y un mantenimiento rápido [8], aumentando su confiabilidad. Esta guía se desarrolló con base en la aplicación de la misma para la adquisición de un generador con motor de combustión interna.

En acuerdo con lo expuesto, la generación eléctrica con biogás es una fuente de energía alternativa que permite el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos (RSO), cuyo destino final usualmente son los vertederos municipales. En este contexto, se pretende aprovechar los RSO provenientes de la plaza de mercado municipal, para la generación de biogás que alimentará una planta eléctrica.

Por lo anterior, el artículo describe la investigación orientada a la ejecución del proyecto *Prototipo de Sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá*, vinculado a la convocatoria de MinCiencias 829-2018 *Convocatoria proyectos de I+D para el desarrollo tecnológico base biológica-Cundinamarca.* Los autores de este documento son integrantes del semillero SEA, adjunto al grupo de investigación GIEAUD.

El artículo se estructura de la siguiente manera: inicialmente se realiza una contextualización para comprender la importancia de este proyecto en el escenario municipal, los antecedentes y las acciones que se han llevado a cabo por parte del gobierno del municipio de Fusagasugá (Colombia). Luego se realiza una recopilación de las tecnologías disponibles en esta área, observando las características de los motores de combustión interna para estos generadores,

entre otros dispositivos posibles. Posteriormente, se describe el procedimiento seguido para la adquisición de la máquina: qué variables serán tenidas en cuenta, el orden de las operaciones, y la información necesaria para la implementación de un generador eléctrico que cumpla con las condiciones del proyecto. Se concluye con una síntesis de la metodología seguida para la implementación del generador y su posterior y posible instalación.

2. Materiales y métodos

Inicialmente, se establece una guía para la implementación (búsqueda, caracterización, compra e importación) de un generador eléctrico a partir de biogás funcional para la obtención de potencia, esto como estrategia para la promoción del uso de energías no convencionales y específicamente el aprovechamiento de los RSO en diversos emplazamientos.

Dicha máquina podría, dependiendo de la necesidad, ser un motor de combustión interna, alguna turbina, entre otros generadores. Además, se recomienda el uso de filtros (tanques de desulfuración y deshidratación) para el tratamiento y la mejora de la calidad del biogás.

Teniendo en cuenta lo anterior, se deben determinar las características específicas de la máquina que se piensa utilizar para la generación; esta, además de cumplir la demanda debe cumplir con la debida instalación en su sitio de trabajo común, por ende, es necesario conocer los accesorios que podrían llegar a ser necesarios, como podrían ser aislamientos, conexiones a la red local y solicitudes o diligencias adicionales dentro del proceso de compra e importación.

2.1. Estudio de la oferta en el mercado

En este apartado se establecen cotizaciones realizadas en Colombia, Argentina y China. La búsqueda a nivel Colombia ofrece información de pocos proveedores, los cuales se relacionan principalmente con generadores a gas completamente tratado, es decir, trabajan solo con gas de línea o 100% metano. Como referencia se tiene la empresa NOVATIO, quien incluye dentro de sus recomendaciones adquirir, además de la planta eléctrica, equipos de tratamiento del biogás (un filtro de H2S – filtro de sulfuro de hidrógeno del que se hablará más adelante), un secador y un soplador para darle presión al biogás y enviarlo al generador.

Los resultados arrojados durante la búsqueda en Argentina exponen elevados costos que, consideramos, no podrían ser cubiertos por los pequeños empresarios de la agroindustria quienes serían también potenciales clientes de este sector. Entre los proveedores disponibles consultados está Mercados Renovables SLR, una empresa argentina que importa generadores de la empresa AQUALIMPIA, diseñados en Alemania y ensamblados en China. Dentro del mismo equipo se incluye el filtro, bien sea de aire o de aceite, entre otros accesorios para el control y supervisión de las operaciones. También está el concesionario en Colombia GECOLSA CATERPILLAR con oferta de generadores de biogás entre 76 y 3370 kW; las especificaciones adicionales incluyen cabina de insonorización, transferencia automática a la red, instalación y puesta en marcha, altura de trabajo del equipo sobre el nivel del mar, entre otros; los costos ascienden hasta los USD20.000 para el grupo electrógeno de más baja potencia, tabla 2.

BIOGAS

MODELO	POTENCIA ELÉCTRICA (Kw)	RPM
G3306	76	1,800
G3406	137	1,800
G3412	194	1,800
CG132-8	400	1,800
CG132-12	600	1,800
CG132-16	800	1,800
G3516A	824	1,200
G3516A+	1,015	1,200
CG170-12	1,200	1,500
CG170-16	1,550	1,500
G3520C	1,622	1,200
G3520C	1,936	1,500
CG170-20	2,000	1,500
CG260-16	3,370	900

Tabla 2. Catálogo de generadores de biogás CAT. Fuente información GECOLSA CATERPILLAR

Por último, se realizó la búsqueda en China, optando por el uso de aplicaciones online para la adquisición de maquinaria pesada o industrial. La más efectiva para llevar a cabo esta consulta fue *Alibaba*, plataforma de comercio online del consorcio privado chino *Alibaba Group*. Aquí se pueden encontrar multitud de empresas chinas con oferta de generadores de cualquier tipo y con una amplia gama de potencias. Una vez solicitadas las cotizaciones, cada proveedor ofrece su catálogo tanto de generadores como de accesorios disponibles para el correcto funcionamiento de los grupos electrógenos.

De modo general, los costos más bajos se obtuvieron de las empresas chinas en *Alibaba*, además de que ofrecen diversos accesorios para complementar la planta eléctrica. Las

cotizaciones usualmente son dadas en dólares, por lo que es importante tener en consideración las fluctuaciones en el valor de esta moneda.

2.2. Información para la selección

Se deben tener en cuenta diferentes consideraciones para que el generador cumpla con los requerimientos demandados por el proyecto. Se proponen los siguientes criterios de comparación para un segundo análisis de equipos preliminares:

- Los costos de las maquinas (generador y accesorios), teniendo en cuenta las variaciones en su precio por causas externas (principalmente las fluctuaciones del dólar).
- Potencia generada: especificaciones del motor como su potencia nominal, corriente nominal, eficiencia térmica y demás, suficientes para satisfacer la demanda.
- Transporte: Costo de envío (seguro y flete, puesto de destino convenido), parámetros de importación necesarios en el momento de montaje.
- Condiciones de montaje: nivel de ruido, tipo de aislamiento requerido, combinación con la red eléctrica local, dimensiones y peso del equipo, y la claridad frente a su uso y especificaciones.

Tener claros estos filtros permite garantizar que el generador cumpla con las necesidades del proyecto a ejecutar, y también, que este no llegue a generar sobrecostos como lo pueden ser daños a la estructura, fallas o errores en la combinación con el sistema eléctrico o un sobre esfuerzo del generador.

2.3. Cálculo de la capacidad de generación eléctrica

Como modelo general, figura 5, el primer dato que se obtiene de una iniciativa de aprovechamiento de RSO es el peso de los residuos generados al día. Según la normatividad colombiana, luego de conocer el peso, se debe cumplir un esquema de clasificación de residuos sólidos no peligrosos, los cuales son repartidos en tres grandes grupos: aprovechables, no aprovechables y orgánicos biodegradables [10]; dentro de este último se incluyen los residuos de comida, cortes y podas de materiales vegetales y hojarasca, componentes principales de la biomasa productora del biogás aquí utilizado. Estos residuos no deben estar almacenados por más de 48 horas debido a sus propiedades de degradación [11].

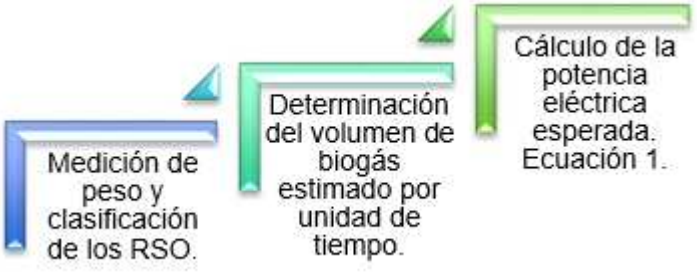


Figura 5. Procedimiento general para el cálculo de la potencia generada. Fuente Elaboración propia

Antes de seleccionar la planta eléctrica, se debe realizar una caracterización físico química de los residuos para conocer su composición, siendo los principales componentes el metano,

dióxido de carbono, nitrógeno, y ácido sulfúrico [12]. Durante una segunda fase, se busca determinar los parámetros óptimos para obtener un alto potencial en el biogás con concentraciones de metano superiores al 50% para un correcto funcionamiento de la máquina. Para calcular el potencial energético del biogás y con ello la potencia eléctrica del generador a utilizar, se debe conocer el volumen del mismo, el tiempo de trabajo continuo y el valor del PCB; luego, se transforman las calorías en kilojulios, esto se divide por el tiempo de trabajo en segundos y se obtienen kW. El PCB es una medida de la cantidad de energía por unidad de volumen que se puede desprender al producirse la combustión del biogás, y tiene un valor de 5000kCal/m^3 para el gas de vertedero según la Agencia Andaluza de energía.

$$\frac{V*PCB}{t} = Pot_{esp} \quad (1)$$

Donde:

V = volumen de biogás disponible PCB = Poder calorífico bajo

t = tiempo

El intervalo de eficiencias de las máquinas más comunes para estas aplicaciones fluctúa entre el 18% y el 33%, por lo que se procede a calcular potencia inferior y superior multiplicando el potencial del biogás por el valor de la eficiencia. La selección definitiva será el promedio de los valores calculados.

2.3.1. Selección de filtros para el biogás

El biogás contiene impurezas y gases contaminantes que dañan los equipos si no se filtra

previamente. Este contiene diferentes contaminantes como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), haluros y otros compuestos de sílice, además de humedad, siloxanos y partículas en suspensión que tienen que reducirse para garantizar una larga vida útil de los equipos. Durante el proceso de combustión, el ácido sulfhídrico y los compuestos halogenados pueden formar ácidos corrosivos como H_2SO_4 (ácido sulfúrico), HCl (ácido clorhídrico), y HF (ácido fluorhídrico) que reaccionan con las partes del motor. El biogás siempre contiene sulfuro de hidrógeno, por lo que es regular la adquisición de un filtro para este compuesto para evitar daños por corrosión en el motor de combustión interna, [13].



Figura 6. Sistemas de filtrado. Fuente Cotizaciones online

Para generadores de baja potencia (menos de 100kW), se recomiendan sistemas de filtrado compuesto por tanques de desulfuración y tanques de deshidratación, de preferencia en acero inoxidable, pues se resaltan las afectaciones que genera el H_2S y la humedad. Es igualmente necesario considerar el medio filtrante: para el ácido sulfhídrico funcionan los lechos filtrantes de Fe_2O_3 (óxido de hierro), también conocidos como esponja de hierro, cuya intención es

provocar la formación de sulfuros de hierro al retirar el H_2S [14]; el medio filtrante más común para eliminar la humedad es un lecho empedrado.

2.3.1.1. Accesorios adicionales

Además de los filtros, cada proveedor ofrecerá un listado de posibles accesorios que complementen adecuadamente la planta eléctrica, estos pueden ser, por ejemplo, recuperadores de calor, bombas de agua, secadores, sopladores para darle presión al gas, sistema de grilla paralela para combinación con la red eléctrica local, entre otros.

Otra característica importante a tener en cuenta es la necesidad de aislamiento para el generador, pues se pueden reducir costos al elegir un sistema de tipo abierto o elevarlos al ser requerido un canopy anti-ruido. Para el tipo abierto, se confirmó a través de las cotizaciones y los proveedores que los niveles de ruido serán menores a los 71dB, los cuales están dentro del rango permitido por la legislación colombiana (máximo 75dB).

2.3.1.2. Costos adicionales de importación

Estos costos hacen referencia al valor que se le agrega a la compra al tener que importar de otro país el equipo. Dependiendo de las características del elemento y su lugar de origen, se deben realizar los debidos trámites aduaneros que permitan la nacionalización del generador y su debido transporte a la zona de instalación.

Según la Dian “Una vez se encuentre la mercancía en Colombia en el Depósito Aduanero, se recomienda solicitar autorización para realizar una pre-inspección con anterioridad a la presentación de la Declaración de Importación y demás documentos si el valor de la

Importación es igual o superior a USD5.000, se debe diligenciar la DECLARACIÓN ANDINA DEL VALOR EN ADUANA y La liquidación de tributos Aduaneros (Gravamen Arancelario e IVA), se hace a través de la DECLARACIÓN DE IMPORTACIÓN".

Según el Estatuto Aduanero (Decreto 2685/99) podrán actuar directamente ante la DIAN "Las personas naturales que realicen importaciones que individualmente no superen el valor de mil dólares americanos (USD1.000), quienes deberán actuar de manera personal y directa, y los viajeros en los despachos de sus equipajes".

Cuando se trate de importaciones mayores a mil dólares americanos (USD1.000), se debe contratar los servicios de una agencia aduanera para que realice este proceso.

Para hacerlo es requerida cierta información para la base de datos de la empresa aduanera, como se adjunta en la siguiente lista de requerimientos:

- Actualización de check list
- Hoja de conocimiento del cliente
- Formato de mandato general a la empresa aduanera
- Acta de visitas a importadores/exportadores

Los archivos de las especificaciones dadas por el proveedor para el generador seleccionado se incluyen en los datos necesarios para realizar la debida cotización, se obtendrán los costos de cada uno de ellos teniendo en cuenta su envío al puerto de descargue más favorable y así obtener un valor aproximado de esta tramitación. Hay que tener en cuenta que por lo general este proceso no incluye los costos de:

- IVA
- Libre de cargue / descargue
- Cualquier otro servicio no especificado
- Gastos a Terceros como: liberaciones, VUCE, Vistos Buenos, Almacenaje, Cargues y/o descargues, etcétera.

Además, es necesario tener la debida documentación por parte de la empresa de generadores que realizará la venta del equipo.

- Registro de fabricantes e importadores de la SIC (IRI), puede hacer directamente en la página web www.sic.gov.co.
- Certificado de conformidad con reglamento técnico (CC. RT). Lo tiene que expedir su proveedor.
- Declaración de Conformidad del proveedor (DCP), expedida por el proveedor.

3. Conclusiones y recomendaciones

La forma en la que se aplicará esta metodología para la implementación de un generador de biogás dependerá de las necesidades de cada proyecto. Hay que tener en cuenta la multiplicidad de opciones que tiene el mercado, los diferentes proveedores, los accesorios que ofrecen y se debe ser muy precavido en el momento de la compra, pues el precio de la moneda base siempre tendrá un impacto considerable. Por ejemplo, en la siguiente tabla se muestran las variaciones en el precio de un generador mes a mes, tomando como moneda de referencia

al dólar y como valor de referencia el precio dado por el proveedor en el mes de marzo del 2020, se realiza la conversión a pesos colombianos.

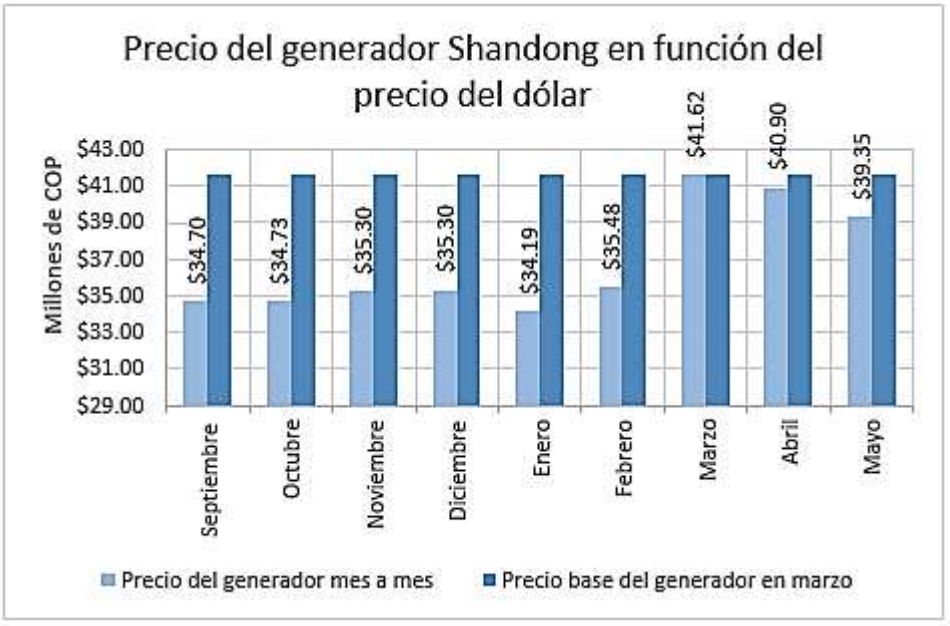


Figura 7. Variación del precio del generador en COP en función de la variación del dólar. Fuente: elaboración propia.

Se recomienda realizar la caracterización físico química del biogás antes de adquirir el generador, pues funciona como guía para determinar correctamente la potencia esperada y la calidad del biogás a utilizar; los proveedores no recomiendan biogás con contenido de metano menor al 50% pues interfiere con la eficiencia y el adecuado funcionamiento de las partes mecánicas del generador, además incrementa la probabilidad de presentar corrosividad.

Es importante consultar los niveles máximos de ruido permitidos según la zona donde se pretenda instalar el generador pues, como se comentó, no implementar el canopy anti-ruido

puede reducir hasta en un 20% el precio del generador. También debe tenerse en cuenta si es necesario o no vincular la generación eléctrica con la red local para la venta de excedentes, pues el sistema de *parallel grid* representa un costo importante si se le compara con el precio base de un generador de baja potencia.

La determinación de los accesorios es imprescindible. No se recomienda evitar el uso de sistemas de filtrado y purificación del biogás; sin embargo, es posible considerar opcionales accesorios como recuperadores de calor, sopladores o secadores. Es recomendable comparar los costos asociados al puerto de descargue escogido, pues puede verse al puerto de Buenaventura como opción de referencia sin tener en cuenta los costos asociados al transporte interno dentro del país.

Finalmente, se detalló todo el procedimiento para la obtención de un generador de energía eléctrica por biogás. Se propuso un modelo para la determinación del potencial del biogás y potencia eléctrica esperada, la consideración de especificaciones adicionales y/o accesorios, la búsqueda y selección de la planta eléctrica definitiva y el asesoramiento aduanero para la importación. Se espera que estas referencias cumplan y subsanen las necesidades asociadas a la implementación de estas plantas eléctricas que representan una opción para la transición energética en el país.

Reconocimientos

Esta investigación se enmarca dentro de la ejecución del proyecto *Prototipo de Sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado*

del municipio de Fusagasugá, vinculado a la convocatoria de MinCiencias 829-2018 *Convocatoria proyectos de I+D para el desarrollo tecnológico base biológica-Cundinamarca.* Los autores de este documento son integrantes del semillero SEA (Semillero en Energías Alternativas de la UD), adjunto al grupo de investigación GIEAUD (Grupo de Investigación de Energías Alternativas de la Universidad Distrital).

Referencias

[1] CREG - Comisión de Regulación de Energía y Gas, «Regulación Aplicable al Biogás,» Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2009.

[2] O. Harker, «Presentación del proyecto - Prototipo de Sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos,» Colciencias, Fusagasugá, 2019.

[3] I. Vera, J. Martínez, M. Estrada y A. Ortiz, «Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino,» *Ingeniería Investigación y Tecnología,* vol. 15, nº 3, pp. 429-436, 2014. Doi: https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70352-X

[4] I. D. B. Sierra, «Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS de Fusagasugá,» Alcaldía de Fusagasugá, Fusagasugá, 2017.

[5] L. D. Romero, «EL ESPECTADOR,» Tratar las basuras, lucha contrarreloj, 18 Junio 2015. [En línea]. Available: https://www.elespectador.com/noticias/bogota/tratar-basuras-lucha-contrarreloj-articulo-567135. [Último acceso: 13 abril 2020].

[6] J. Niemczewska y G. Kolodziejak, «Landfill Gas Energy Technologies,» Instytut Nafty I Gazu, Cracovia, 2010. Disponible: https://www.globalmethane.org/Data/1022_LFG-

Handbook.pdf

[7] R. Bove y P. Lunghi, «Electric power generation from landfill gas using traditional,» *Energy Conversion and Management,* vol. 47, p. 11, 2006. Doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.08.017

[8] G. Blanco, E. Santalla, V. Córdoba y A. Levy, «Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico,» División de Energía: Banco Interamericano de Desarrollo, Buenos Aires, 2017. Disponible: https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Generación-de-electricidad-a-partir-de-biogás-capturado-de-residuos-sólidos-urbanos-Un-análisis-teórico-práctico.pdf

[9] Cogenera Mexico, «COGENERA MEXICO,» 2012. [En línea]. Available: http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=77. [Último acceso: 5 Junio 2020].

[10] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana GTC-24 "Gestión Ambiental. Residuos Sólidos. Guía para la separación en la fuente".,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2009.

[11] Universidad de Cundinamarca, «Anexo 1. Protocolo para el manejo y pretratamiento de los RSO de la Plaza de Mercado del municipio de Fusagasugá.,» Anexos convocatoria Colciencias 829 - 2018 , Fusagasugá , 2020.

[12] A. Andrade, A. Restrepo y J. Tibaquirá, «Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia,» *Entre ciencia e ingeniería,* vol. 12, pp. 40-47, 2018. Doi: http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3701

[13] Aqualimpia Engineering , «Aqualimpia,» [En línea]. Available: https://www.aqualimpia.com/biodigestores/biogas-purificacion/. [Último acceso: 22 05 2020].

[14] W. Lema, «DESOTEC Actived Carbon,» 14 05 2014. [En línea]. Available: https://www.desotec.com/es/carbonologia/casos/eliminaci-n-del-sulfuro-de-hidr-geno-en-el-biog-s-parte-1. [Último acceso: 2020].

[15] COLCIENCIAS, «Presentación del proyecto - Prototipo de Sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos,» Fusagasugá, 2019.



CONGRESO INTERNACIONAL
DE ELECTRÓNICA, CONTROL
Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

SISTEMAS INTELIGENTES

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

ALGORITHM TO DETECT THE LEVEL OF CHLOROPHYLL TYPE A AND B IN THE LEAVES FROM A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Algoritmo detector de nivel de clorofila tipo A y B en las hojas a partir de una red neuronal convolucional

Rafael Núñez Rodríguez[1], Daniel Velazco Capacho [2]

Abstract

In this work, it is presented the development of a detector algorithm of chlorophyll type A and type B levels present in some plants, by means of digital image processing from a convolutional neuronal network. During the development of the algorithm, an image acquisition module of plant material subjected to wavelengths between 430 nm and 650 nm was built. This module allowed the construction of an image bank for pre-processing, training and validation of the performance of the neural network. The results obtained during the validation process of the different architectures of the convolutional neuronal network, show that the R1000A network model presented the highest precision when labeling the samples of parameterized vegetable material, with a value of 98,22% of precision. These results indicate that for the classification of chlorophyll levels that do not require high accuracy, a convolutional neuronal network can

[1] Ingeniero Electrónico, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia. Magíster en Ingeniería Electrónica. E-mail: rrodriguez@correo.uts.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6775-776X
[2] Ingeniero Electrónico, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia. Doctor en Proyectos, E-mail: dvelazco@correo.uts.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3297-6318

perform this task adequately if trained with a number of samples higher than 1.000 images, a batch size of 100 and a learning rate of 0,0001.

Keywords: Convolutional neural network, chlorophyll, digital image processing, plant material.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un algoritmo detector de los niveles de clorofila tipo A y tipo B presente en algunas plantas, mediante el procesamiento digital de imágenes a partir de una red neuronal convolucional. Durante el desarrollo del algoritmo se construyó un módulo de adquisición de imagen de material vegetal sometido a longitudes de onda entre 430 nm y 650 nm. Este módulo permitió la construcción de un banco de imágenes para el preprocesamiento, entrenamiento y validación del desempeño de la red neuronal. Los resultados obtenidos durante el proceso de validación de las diferentes arquitecturas de la red neuronal convolucional muestran que el modelo de red R1000A presentó la mayor precisión a la hora de etiquetar las muestras de material vegetal parametrizado, con un valor del 98,22% de precisión. Estos resultados indican que para la clasificación de niveles de clorofila que no requieran gran exactitud, una red neuronal convolucional puede realizar esta labor de manera adecuada si se entrena con una cantidad de muestras superior a 1000 imágenes, un *batch size* de 100 y una tasa de aprendizaje de 0,0001.

Palabras clave: Red neuronal convolucional, clorofila, procesamiento digital de imágenes, material vegetal.

1. Introducción

Actualmente, el uso de la tecnología se ha extendido a muchos campos de la actividad humana [1]. Uno de estos campos es la agricultura, donde modernos equipos han facilitado en gran manera a la proliferación de cultivos en todo el mundo, y no sólo eso, también han dado paso a la creación de nuevas especies de vegetales con mejores valores alimenticios. Un ejemplo del uso de las nuevas tecnologías en el campo agrícola es la detección de enfermedades en las plantas mediante procesamiento digital de imágenes y redes neuronales convolucionales [2]. Dichas redes neuronales se han convertido en algoritmos muy empleados para el diseño de programas de aprendizaje automático, en el que un sistema aprende a realizar tareas de clasificación directamente a partir de imágenes, vídeos, textos o sonidos [3]. Estas redes son útiles para detectar patrones en imágenes que permitan reconocer objetos, rostros o escenas [4]. Gracias a estas características se elige las redes neuronales convolucionales como una buena opción para el diseño de un algoritmo que sea capaz de detectar enfermedades de forma temprana en las hojas, mediante la detección del nivel de clorofila presente. La clorofila A y B absorbe en gran medida la longitud de onda entre 460 nm y 645 nm [5]. En [6] se evalúa el efecto que causa la emisión de luz por parte de LED en plantaciones de chile serrano. Las semillas se expusieron a luz blanca, azul y roja, siendo controladas por luz fluorescente, con un fotoperiodo de 11 a 13 horas. Se pudo demostrar que la longitud de la hoja y el ancho de tallo se vieron favorecidos por la luz roja, en cambio, la luz led azul aumento la cantidad de follaje. Aquellas plantas irradiadas con luz azul presentaron mayor cantidad de pigmentos

fotosintéticos (Carotenoides= 0,12 mg g-1, Clorofila= 0,84 mg g-1). En este sentido, es válido afirmar que las longitudes de onda azul y roja afectan de manera significativa la producción de clorofila por parte de las plantas. Por tanto, estos resultados se pueden aprovechar para plantear estrategias que permitan determinar con cierto grado de precisión, el estado de salud de una planta y detección temprana de enfermedades en función de la concentración de clorofila con base a la cantidad de luz roja y azul que una hoja puede absorber. Es por ello que se plantea el desarrollo de un algoritmo capaz de clasificar el nivel de clorofila “A” y “B” presente en las hojas en tres niveles posibles: alto, medio y bajo; en donde principalmente, se elabora una base de datos a partir de imágenes tomadas por medio un dispositivo que irradia luz con longitud de onda entre 460 nm y 645 nm. Seguido, estas imágenes son utilizadas para proceso de entrenamiento y validación de la red neuronal convolucional con el fin de elaborar un algoritmo capaz de clasificar la concentración de clorofila.

2. Materiales y Métodos

Para el desarrollo del algoritmo se plantea inicialmente la construcción del módulo de adquisición de imágenes, el cual está compuesto por fuentes de emisión de luz con longitud onda entre 460 nm y 645 nm, circuito driver para gestión de los LED y un dispositivo de captura de imagines con interfaz USB. Este módulo permite generar las imágenes de las muestras del material vegetal con diferentes longitudes de onda para su posterior preprocesamiento. A partir de este banco de imágenes, se construye la arquitectura de la red neuronal convolucional con

sus respectivas etiquetas de salida y demás parámetros de entrenamiento para su posterior entrenamiento y validación.

2.1. Banco de imágenes

Se ensambló un dispositivo de captura a partir de una caja en la cual se aloja fuentes de emisión de luz alineadas en contraposición con una cámara USB, driver de control de fuentes luminosas, esquema de captura y envío de envío de información al host y, soporte de vidrió donde se ajusta el material vegetal. En la Figura 1, se observa la estructura del módulo de captura.

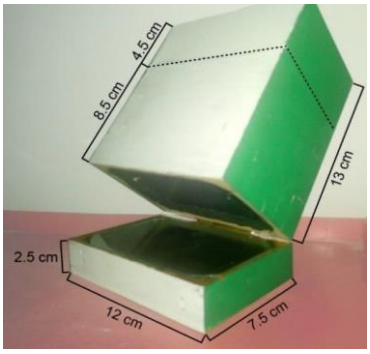


Figura 1. Prototipo del módulo de adquisición de imágenes de muestra de material vegetal. Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que las muestras de material vegetal deben ser irradiadas por luz con longitud onda entre 460 nm y 645 nm a fin de estimar el nivel de la concentración de clorofila (Bajo, Medio, Alto), el sistema de iluminación se diseñó de manera que, cada muestra de material vegetal fuese irradiado por 4 LED de alta intensidad y diámetro de 5 mm. La distribución de las fuentes de emisión de luz se realizó a partir de una conexión en paralelo,

esto para garantizar una máxima intensidad de cada LED y así aprovechar su máxima potencia. El circuito de conexión se presenta en la Figura 2. A fin de modular diferentes longitudes de onda, la potencia aplicada los LED se modula a partir de una señal PWM (Pulse Width Modulation).

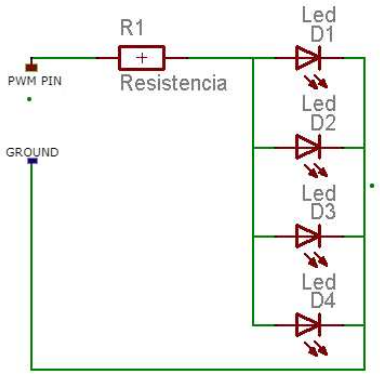


Figura 2. Circuito driver de fuentes de iluminación LED. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con el adecuado funcionamiento del módulo de adquisición, se construye la base de datos referente a las imágenes de material vegetal. Dado que la estrategia se basa en la detección del nivel de clorofila tipo A y tipo B en el material vegetal, se hace necesario establecer al menos tres niveles posibles de concentración de clorofila; para ello, se definen las siguientes etiquetas: material vegetal verde corresponde a un nivel alto, material vegetal amarillo corresponde a nivel medio y material vegetal marrón a nivel bajo de clorofila. En la Figura 3 se observa el aspecto de cada material vegetal y su respectiva etiqueta.

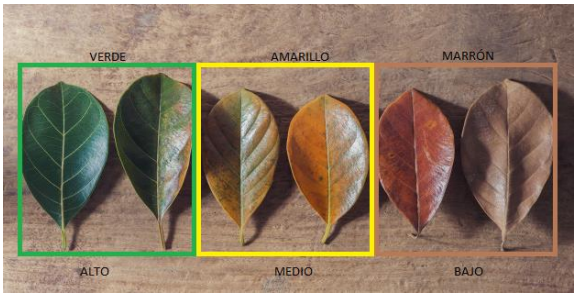
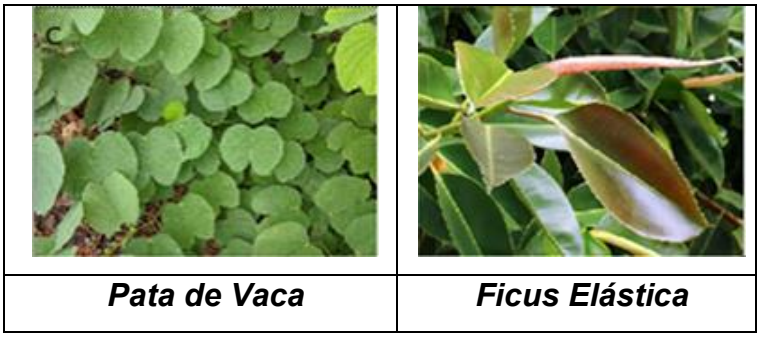


Figura 3. Etiquetas para los niveles de concentración de clorofila. Fuente: elaboración propia.

Para la construcción del banco de imágenes se capturan 250 imágenes de material vegetal por cada nivel de clorofila establecido. Las hojas que se usan para el banco de imágenes pertenecen a una gran cantidad de plantas de diferentes tipos, entre ellas se encuentran: almendrón (Terminalia catappa), acacia amarilla (Cassia siamea), el ficus (Ficus benjamina), caucho común (Ficus elástica), pata de vaca (Bauhinia purpúrea), lluvia de oro (Cassia fistula), pomarrosa brasileña (Syzygium malaccense), las cuales se presentan en la Figura 4, entre otras especies más, [7].

	
Almendrón	***Acacia Amarilla***



Pata de Vaca	Ficus Elástica

Figura 4. Muestra de especies de material vegetal utilizado. Fuente: elaboración propia.

Para cada muestra de material vegetal seleccionado, se captura una imagen al hacer incidir irradiancia cercana a la longitud de onda del color azul y rojo. Cada imagen se le asigna una etiqueta respecto a la intensidad de color verde relacionado con la concentración de clorofila. En la Figura 5 se observan imágenes de muestra de cada etiqueta relacionada con la reflexión de longitudes de onda roja y azul.



Hoja Verde ***Hoja Amarilla*** ***Hoja Seca***

Figura 5. Imágenes de muestra con etiqueta relacionada. Fuente: elaboración propia.

2.2. Entrenamiento Red Neuronal Convolucional

2.2.1. Preprocesamiento banco de imágenes

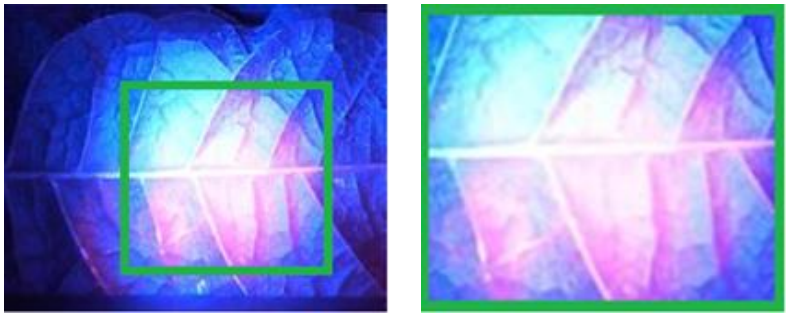
El algoritmo de detección está basado en la red neuronal convolucional AlexNet [8], la cual tiene como entrada una imagen de 227 x 227 pixeles como máximo. Las imágenes obtenidas por la cámara *Genius Facecam* usadas en el módulo captura, tienen una resolución de 640 x 480 pixeles, siendo esta mucho más grande que la máxima soportada por la CNN. Para adaptar las imágenes a la resolución necesaria, se hace uso de la herramienta Matlab®, la cual permite reajustar la resolución original de la imagen de entrada a una de 227 x 227 pixeles, dando como resultado una nueva muestra con el tamaño requerido para la CNN AlexNet. En la Tabla 1 se presenta el pseudocódigo para el reescalado del banco de imágenes.

Tabla 1. Pseudocódigo para el reescalado de banco de imágenes.

# Línea	Acción
1	Inicio Algoritmo para reescalado de imagen
2	Guardar muestras en variable test
3	Inicio ciclo for para reescalado de muestras
4	Incremento de la variable i (muestras)
5	Reescalado de muestras
6	Fin del ciclo For
7	Fin Algoritmo para reescalado de imagen

Fuente: elaboración propia.

Una etapa de preprocesamiento adicional se realiza para seleccionar la región en la imagen donde se presenta mayor densidad de luz roja o azul reflejada de acuerdo a la concentración de clorofila. En la Figura 6 se aprecia el resultado del método implementado.



Muestra Original ***Recuadro Extraído***

Figura 6. Región de 227x227 px con mayor densidad de luz reflejada. Fuente: elaboración propia.

Con un número de 250 imágenes por etiqueta se implementa un algoritmo para rotar y reflejar las muestras con el fin de obtener 4 veces el número de imágenes por nivel y aumentar la capacidad de aprendizaje de la CNN, dando como resultado 1.000 imágenes por cada nivel establecido (Alto, Medio, Bajo).

2.2.2. Entrenamiento de Algoritmo de detección

En esta etapa se procede a entrenar las redes neuronales por medio de la herramienta del software de programación Matlab® llamada *Deep Learning Toolbox*. Esta *Toolbox* trae incorporada un esquema para el entrenamiento de la CNN AlexNet. Con base en esto, se reajusta los parámetros para que se adapten a la problemática del proyecto y se procede a entrenar cada una de las redes. A continuación, en la Tabla 2 se puede evidenciar el pseudocódigo utilizado para el entrenamiento de manera jerárquica. Durante esta etapa, se

procede a entrenar múltiples redes con el fin de encontrar la que mejor precisión ofrezca. A partir de esto se entrenan 10 redes diferentes, cada una de estas, con características únicas, variando entre ellas la cantidad de imágenes que se encuentran en el banco de muestras, el batch size y el tipo de imagen.

Tabla 2. Pseudocódigo para entrenamiento de las CNN.

# Línea	Acción
1	Inicio Algoritmo para entrenamiento de la CNN
2	Leer las carpetas con las imágenes de muestra.
3	Leer las etiquetas de cada nivel de clorofila
4	Separación banco de muestras (Entrenamiento, Validación)
5	Inicio de asignación de ajustes preliminares
6	Declarar tipo de CNN
7	Declarar capas de la CNN a usar.
8	Ingresar número de clases y capas a usar
9	Asignar valor del tamaño del lote
10	Establecer método para corrección de error
11	Asignar número de iteraciones por época
12	Asignar número de épocas
13	Fin de la asignación de ajustes preliminares
12	Iniciar entrenamiento de la CNN
13	Clasificar etiquetas con la red entrenada
14	Evaluar exactitud de la red entrenada
15	Fin Algoritmo para entrenamiento de la CNN

Fuente: elaboración propia.

Cada una de las redes entrenada a partir del algoritmo de la Tabla 2, se comporta de manera diferente durante su entrenamiento. En la Tabla 3 se observa cada uno de los ajustes de entrenamiento de las redes.

Tabla 3. Pseudocódigo para entrenamiento de las CNN.

Modelo de red	Ajustes de Red				
	Batch Size	Épocas	Aprendizaje	Cantidad de imágenes por nivel	Tipo de imagen
R50	10	4	0,0001	50	Reducida
R100	10	4	0,0001	100	Reducida
R150	10	4	0,0001	150	Reducida
R200	10	4	0,0001	200	Reducida
R250	50	4	0,0001	250	Reducida
R500	100	4	0,0001	500	Reducida
R750	100	4	0,0001	750	Reducida
R1000A	10	4	0,0001	1000	Reducida
R1000B	10	4	0,0001	1000	Recortada
R1000C	100	4	0.0001	1000	Reducida

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7, se puede visualizar la gráfica de entrenamiento que arroja la función *Transfer Learning Using AlexNet*. Esta se divide en dos, la primera de ella está formada por tres tipos de línea, siendo la más clara y de color azul el comportamiento de aprendizaje de la red en cada iteración, la línea azul oscuro representa el comportamiento de la red, pero de manera suavizada, prediciendo el posible comportamiento de la red para evitar cambios bruscos. Y por último la línea segmentada negra representa el porcentaje de validación alcanzado por la red durante esa época.

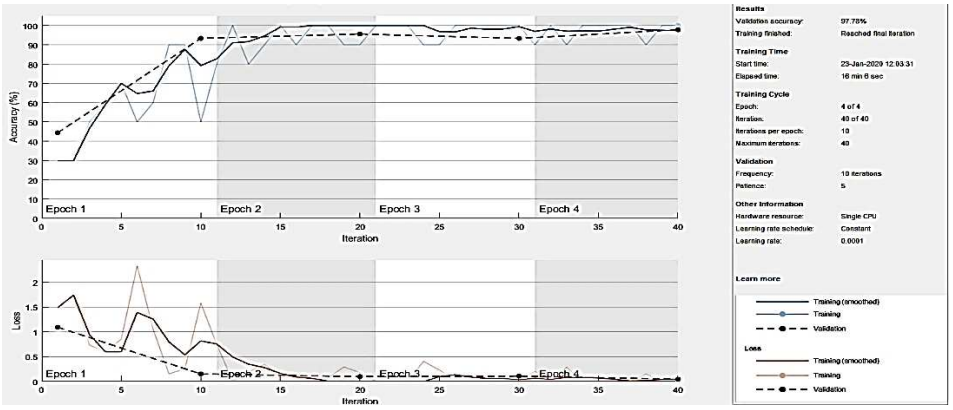


Figura 7. Gráfica de transferencia de aprendizaje para la CNN R50.
Fuente: elaboración propia.

Logrando el uso adecuado del algoritmo, se diseñó una interfaz gráfica, en la cual se puede evaluar de manera directa una muestra de material vegetal capturada por el módulo de adquisición, permitiendo ver la imagen en vivo iluminada por la luz roja y azul, así como también la imagen iluminada por luz blanca. La interfaz le permite al usuario interactuar con ella a través de múltiples pulsadores que van desde la captura de imágenes, hasta el apagado de la cámara. Esta interfaz gráfica se desarrolló a partir de la herramienta GUIDE de Matlab®, la cual ofrece múltiples alternativas y plantillas para el diseño. La apariencia de la interfaz se observa en la Figura 8.

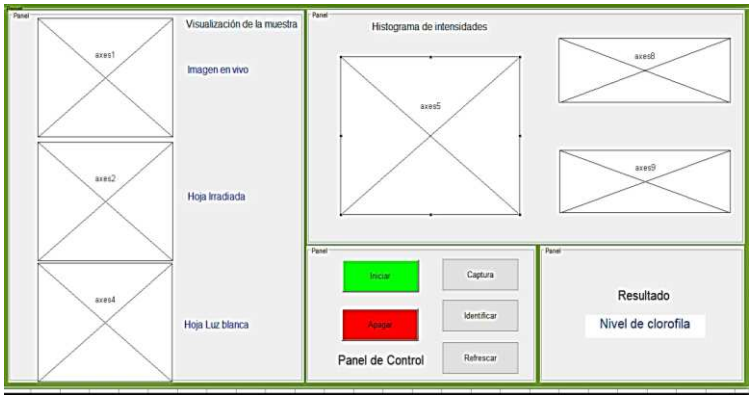


Figura 8. Interfaz gráfica del algoritmo detector de clorofila.

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Validación de algoritmo de detección

De acuerdo con los resultados del proceso de entrenamiento se realiza una etapa de validación, en el cual se ingresan imágenes de material vegetal capturadas por el módulo de adquisición con el fin de comprobar si el nivel de clorofila detectado corresponde al adecuado. Haciendo uso de la interfaz gráfica diseñada anteriormente, el usuario captura la imagen de una muestra aleatoria, de esta manera el algoritmo procede a ajustar la imagen para su próxima clasificación con la CNN y dar como resultado el nivel predicho. En la Figura 9 se observa una muestra procesada en la interfaz.

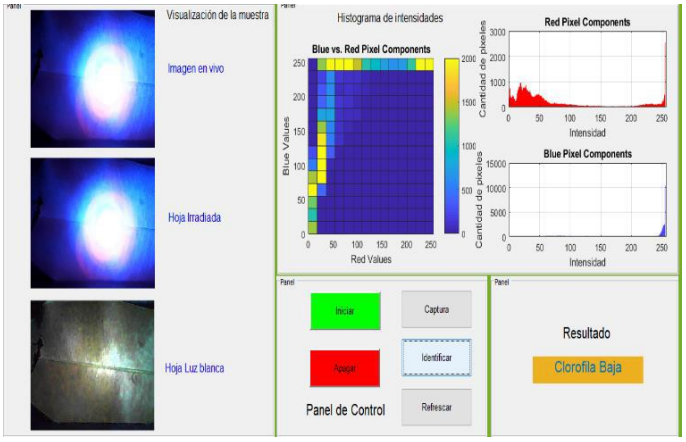


Figura 9. Muestra procesada en la interfaz gráfica. Fuente: elaboración propia.

Como paso final, la interfaz indicará a través de un mensaje el nivel de clorofila estimado; este mensaje se visualizará al terminar de procesar la muestra. Por otra parte, el resultado del algoritmo también entrega como dato de salida un histograma de la imagen y la cantidad de pixeles asociados por nivel de intensidad, tal como se muestra en la Figura 10.

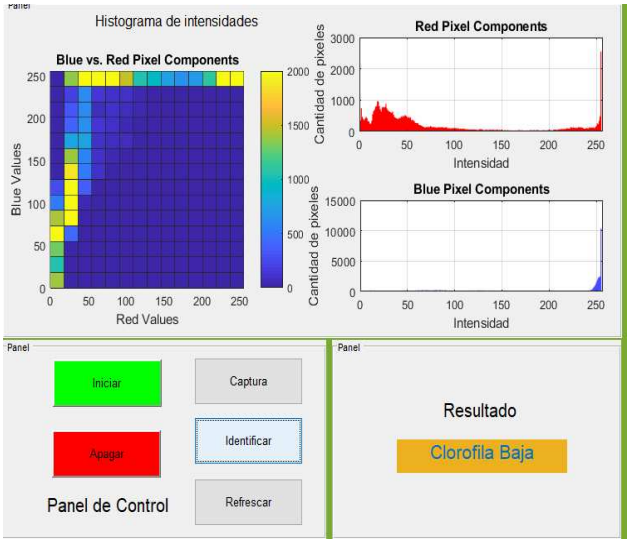


Figura 10. Resultados en la interfaz gráfica. Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Los datos que arrojan cada uno de los clasificadores entrenados muestran el porcentaje de exactitud y perdida, permitiendo así, evaluar de mejor manera, cuál de estas desempeña un mejor comportamiento a la hora de clasificar el nivel de clorofila de las muestras. Estos valores se visualizan de manera más clara en la Tabla 4. Tales datos permiten indicar que a medida que sube el número de muestras, también disminuye la exactitud en la validación final, esto lleva a pensar que entre mayor sea la cantidad de imágenes mayor va a ser la dificultad de la red a la hora de predecir las etiquetas correctas. Teniendo claro lo anterior, se debe evidenciar que la cantidad de imágenes de entrenamiento va aumentando de manera considerable desde la red R500.

Los datos que arroja el entrenamiento se computan a través de la ecuación (1), que permite calcular el valor de exactitud de la red y la ecuación (2), utilizada para calcular el error cuadrático medio.

Tabla 4. Resultados de cada modelo de red.

Modelo de Red	Porcentaje de Exactitud	Porcentaje de Perdida	Cantidad de muestras por nivel	Total de muestras
R50	97,78	0,05	50	150
R100	94,44	0,5	100	300
R150	97,04	0,07	150	450

R200	95	0,1	200	600
R250	93,78	0,2	250	750
R500	93,33	0,18	500	1500
R750	93,04	0,23	750	2250
R1000A	92,89	0,31	1000	3000
R1000B	91,89	0,33	1000	3000
R1000C	91.56	0.33	1000	3000

Fuente: elaboración propia.

$$Precisión = \frac{Predicciones\ Correctas}{Total\ de\ predicciones} \quad (1)$$

$$Perdidas = \frac{\sum_{i=1}^{Total\ de\ muestras} (Predicciones_i - Real_i)^2}{Total\ de\ Muestras} \quad (2)$$

Se puede establecer que entre más muestras tenga una CNN de clasificación, mayor será su robustez y a su vez, la red podrá extraer un número más alto de características que puede usar a la hora de predecir la etiqueta correcta. El número de muestras usado para validar aumenta según la red, siendo para la red R1000A, R1000B Y R1000C un número de imágenes de validación equivalente a 300 muestras por nivel, mucho más grande que las redes anteriores, haciendo más difícil para estas conseguir mayor exactitud a la hora de evaluar. En el diagrama

de barras de la Figura 11 se observa de mejor manera como la cantidad de imágenes es inversamente proporcional a la exactitud de la red.

Al finalizar el entrenamiento de las diferentes CNN se establecen y analizan los valores que provocan variaciones en los distintos resultados arrojados por cada red. La cantidad de iteraciones que realiza la CNN durante su preparación, es afectada por la cantidad de imágenes de entrenamiento, el ancho de talla (*batch size*) y el número de épocas. Con un numero de épocas fijo igual a 4 en todas las redes, las variables que afectan esa cantidad de iteraciones decaen en el número de imágenes de entrenamiento y el ancho de talla. En la ecuación (3) se planeta el cálculo de este valor.

$$Iteracines\ Totales = \frac{Imagenes\ de\ entrenamiento}{Ancho\ de\ talla} \cdot\times\ Numero\ de\ epocas \qquad (3)$$

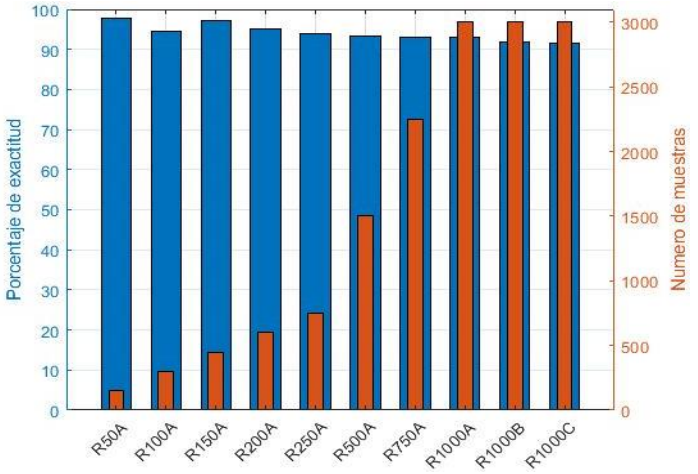


Figura 10. Resultados en la interfaz gráfica. Fuente: elaboración propia.

En el entrenamiento de las distintas redes implementadas, el número de iteraciones totales presenta una fuerte variación. En la Tabla 5 se puede apreciar cómo cambia ese número dependiendo de las variables mencionadas anteriormente.

Tabla 5. Variación en la cantidad de iteraciones.

Modelo de Red	# de muestras	# de Épocas	Batch size	Iteraciones
R50	150	4	10	40
R100	300	4	10	84
R150	450	4	10	124
R200	600	4	10	168
R250	750	4	50	40
R500	1500	4	100	40
R750	2250	4	100	60
R1000A	3000	4	10	840
R1000B	3000	4	10	840
R1000C	3000	4	100	84

Fuente: elaboración propia.

La transferencia de la red con un batch size de 10 oscila de manera más brusca, a comparación de la red con un batch size de 100. Un reajuste de los pesos más frecuente, puede ocasionar que la red no logre estabilizarse durante su entrenamiento, pero esto no quiere decir que la

CNN no alcanzará un valor alto de exactitud, puesto que, en alguno de esos ajustes de pesos, la red puede encontrar un valor que se ajuste de manera eficaz, logrando así alcanzar un valor de exactitud alto y por lo tanto una estabilización final.

A partir de los resultados de entrenamiento se procede a evaluar cada una de las redes con nuevas muestras con el fin de validar su funcionamiento y observar qué porcentaje de exactitud arrojan ante nuevas imágenes. Para esto, se hace uso de un banco de imágenes de prueba, el cual consta de 250 muestras por cada nivel de clorofila, dando como total 750 imágenes de validación. Los resultados que muestran las 10 redes se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Exactitud e las CNN en la asignación de etiquetas.

Modelo de Red	Imágenes de validación	Exactitud en asignación de etiquetas
R50	750	74,44
R100	750	94,84
R150	750	96,00
R200	750	95,56
R250	750	95,21
R500	750	95,11
R750	750	96,89
R1000A	750	98,22
R1000B	750	95,36
R1000C	750	96,52

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los datos de la Tabla 6, la red que mayor porcentaje de exactitud presentó es la R1000A, esto se debe a la cantidad de imágenes y el tipo de ajuste usado para su entrenamiento, dando una mayor certeza a la hora de asignar etiquetas a nuevas muestras. De otra forma, la red R50 presenta un bajo porcentaje de exactitud consecuencia de su bajo número de imágenes de entrenamiento. A partir de esto, se puede decir que la red R1000A es la que más se adecua a la problemática establecida, permitiendo al usuario establecer el nivel de clorofila (Alta, Media, Baja) tipo ‘A’ o ‘B’ que se encuentra en la muestra, con ayuda de la red seleccionada y el uso del dispositivo de adquisición de muestras, se obtiene un grado de exactitud de 98,22 %.

4. Conclusiones

La emisión de luz roja y azul sobre una muestra de material vegetal permite resaltar de mejor manera las características de las plantas que contienen clorofila ‘A’ o ‘B’, debido a la capacidad de este pigmento de absorber o reflejar estas longitudes de onda dependiendo de su nivel de clorofila. El uso de un módulo que aísle la luz exterior e iluminé la muestra con luz roja y azul se ajusta muy bien a la problemática, permitiendo resaltar de mejor manera las características de la muestra, invisibles al ojo humano.

A la hora de entrenar una CNN se obtienen mejores resultados, entre mayor sea el número de imágenes que se usen para su entrenamiento. Esto sucede, debido a que, entre más muestras se ingresen a la red esta podrá extraer más características y volverse de esta manera, más ajustada y exigente a la hora de clasificar una muestra. Es importante no exceder esa tasa de

sobre ajuste, porque, esto puede llevar a que la exactitud final de la red decaiga en gran manera y el tiempo de entrenamiento aumente considerablemente.

Referencias

[1] "El papel de la ciencia y la tecnología en la sociedad de conocimiento," *OCyT*. https://www.ocyt.org.co/el-papel-de-la-ciencia-y-la-tecnologia-en-la-sociedad-de conocimiento/ (accessed Oct. 27, 2020).

[2] A. Kapoor, S. I. Bhat, S. Shidnal, and A. Mehra, "Implementation of IoT (Internet of Things) and Image processing in smart agriculture," in *2016 International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, Bengaluru, India, Oct. 2016, pp. 21–26, doi: 10.1109/CSITSS.2016.7779434.

[3] J. Zhou, D. Xiao, and M. Zhang, "Feature Correlation Loss in Convolutional Neural Networks for Image Classification," in *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chengdu, China, Mar. 2019, pp. 219–223, doi: 10.1109/ITNEC.2019.8729534.

[4] T. Treebupachatsakul and S. Poomrittigul, "Bacteria Classification using Image Processing and Deep learning," in *2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, JeJu, Korea (South), Jun. 2019, pp. 1–3, doi: 10.1109/ITC-CSCC.2019.8793320.

[5] S. Dutta Gupta and A. K. Pattanayak, "Intelligent image analysis (IIA) using artificial neural network (ANN) for non-invasive estimation of chlorophyll content in micropropagated plants of potato," *Vitro Cell. Dev. Biol. - Plant*, vol. 53, no. 6, pp. 520–526, Dec. 2017, doi: 10.1007/s11627-017-9825-6.

[6] A. M. Moreno-Jiménez, S. Loza-Cornejo, and M. Ortiz-Morales, “Efecto de luz LED sobre semillas de Capsicum annuum L. var. serrano,” vol. 17, no. 3, p. 7, 2017.

[7] A. Rojas, “Flora Urbana Del Área Metropolitana De Bucaramanga,” *Innovaciencia Fac. Cienc. Exactas Físicas Nat.*, vol. 5, no. 1 S1, Dec. 2017, doi: 10.15649/2346075X.454.

[8] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, F. Pereira, C. J. C. Burges, L. Bottou, and K. Q. Weinberger, Eds. Curran Associates, Inc., 2012, pp. 1097–1105.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

ARCHITECTURE OF A 2D GAME FOR ANDROID AND IOS USING COCOS2DX

Arquitectura de un juego en 2d para android y ios usando COCOS2DX

Luis Felipe Wanumen Silva[1], Gloria Andrea Cavanzo Nisso[2], Miguel Ricardo Pérez Pereira[3]

Abstract

In this paper, we present the architecture and tools used in the development a 2D game that works on both Android and IOS. To do this we use the Cocos2DX, this tool allows to development 2D game with portability and power required to run on these two mobile environments used. It is important to note that the article also shows how modeled and implemented in Cocos 2DX a game, called 2D Maze, this serves to illustrate how Cocos2DX handles all processing OpenGL graphics and thus no problems when running submitted in various mobile devices. And finally we show the game operation using the proposed architecture and tools.

Keywords: Cocos2DX, 2D games, mobile games

[1] Ingeniero de Sistemas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Colombia, Magister en Sistemas y Computación, Universidad, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Docente de Planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e-mail: lwanumen@udistrital.edu.co, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8877-5681

[2] Matemática Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Magister en Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Docente de Planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e-mail gacavanzon@udistrital.edu.co, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8631-3459

[3] Ingeniero en Control e Instrumentación Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Maestría en ciencias de la educación, Universidad de San Buenaventura, Colombia. Docente de planta categoría asociado Universidad Distrital Francisco José De Caldas Colombia. E-mail: mrperezp@udistrital.edu.co, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7487-2600.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

Resumen

El presente artículo muestra la arquitectura y las herramientas usadas en el desarrollo de un juego 2D que funciona tanto en Android y IOS. Para ello se usa la herramienta Cocos2DX la cual permite el desarrollo de juegos 2D que tienen la portabilidad y potencia necesaria para ejecutarse en estos dos ambientes móviles. Es importante anotar que el artículo también muestra cómo se modeló e implementó un juego, llamado Laberinto 2D, en Cocos 2DX, esto sirve para ilustrar cómo Cocos2DX se ocupa de todo el procesamiento de gráficos OpenGL y de esta forma no se presenten inconvenientes al ejecutarse en diversos dispositivos móviles. Al final se muestra el funcionamiento del juego aplicando la arquitectura y las herramientas propuestas.

Palabras clave: Cocos2DX, Juegos 2D, Juegos móviles

1. Introducción

En la sociedad actual las aplicaciones móviles toman cada vez más importancia [1], lo cual ha llevado a que se desarrollen una gran cantidad de aplicaciones móviles dedicadas a los juegos [2]. Esto no quiere decir que cualquier aplicación por ser móvil sea entretenida [3], sino que existen aplicaciones que por ser de tipo juego, deben ser entretenidas. En el mercado existen cantidad de lenguajes que van y vienen y que se hace analizar a cerca de su futuro, pasado y presente [4] [5] [6]. Sin embargo, dependiendo el tipo de juego se hace mejor seguir un tipo de arquitectura concreta [7], es decir, no todos los juegos que se ejecutan en dispositivos móviles tienen la misma arquitectura [8]. Se hace necesario evaluar múltiples aspectos antes de tomar

una decisión de seleccionar una herramienta [9] [10] [11]. La ventaja del desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles es que en el caso de los estudiantes universitarios, se torna en un tema de gran interés que cobija a diversos áreas [9], no sólo las áreas de informática [12] y en el caso de la pedagogía, los juegos son una herramienta pedagógica útil [13] [14] [15] En el caso de los juegos 2D sobre dispositivos móviles se presentan aspectos tan particulares que los diferencian de otros juegos, con lo cual el plantear resulta una buena idea presentar una arquitectura que permita a otras personas conocer los elementos indispensables para desarrollar este tipo de software. La razón por la cual mostrar una arquitectura es importante, es porque esa muestra las importantes decisiones de diseño que son inherentes a un sistema [16] [17], esto facilita que la sociedad avance en el desarrollo de este tipo de aplicaciones. Un ejemplo concreto de este tipo de cuestiones es la animación de fragmentos basados en script, los cuales son más apropiados para juegos 2D [18]. También es importante anotar que a veces los diseños pueden mejorar basados en la experimentación que se tenga de diseños existentes [3], por esta razón, el artículo muestra la arquitectura para esta sea tomada como base al desarrollar nuevos juegos y sea la humanidad la que la valide.

De otra parte, la construcción de juegos 2D requieren el uso de diversas herramientas para lograr un juego medianamente aceptable tanto en rendimiento como en interfaz gráfica [19], a manera de ilustración el artículo presenta las herramientas usadas en la construcción de un laberinto.

Para la construcción del juego que presenta en este artículo se usó la herramienta Cocos2DX el cual es un entorno ampliamente usado por los desarrolladores de juegos 2D. Cabe anotar que este no es el único entorno existente para el desarrollo de juegos 2D, existen otros como Corona SDK [20], libGDX [21], Agk app game Kit, 2D Toolkit, Gideros Mobile, Shiva, Moai, BatteryTech, V-Play.

El artículo inicia una explicación corta sobre la arquitectura que implementan las APIs de Cocos2DX. Luego se plantea una arquitectura que sirve de base para la construcción de juegos 2D sobre la plataforma Cocos2DX, dicha arquitectura se codificó en el lenguaje Objective-C incluido en Cocos2DX, el cual es un lenguaje que elementos de C, C++ y Objective-C. Además, de Cocos2DX se usaron como: Sonidos, Sprites [22], partículas y tipografías construidos con las herramientas sfxr para Windows, Texture Packer, Particle Designer y Glyph Designer respectivamente. Luego se muestra la ejecución de la aplicación en donde se puede apreciar que funciona tanto en Windows, Iphone como smartphone. Finalmente se presentan unas conclusiones sobre el trabajo realizado.

2. La arquitectura de Cocos2DX

En la figura arquitectónica de Cocos2DX (ver figura 1), se puede apreciar que la arquitectura del framework para desarrollo de juegos Cocos2DX es bastante robusta en el sentido que permite la ejecución de juegos sobre los sistemas operativos iOS, Android, OSX (de la empresa Apple Inc), Windows y Ubuntu.



Figura 1: Basado en Arquitectura de Cocos2DX, [23]

Para lograr la portabilidad deseada en la ejecución de juegos se implementa una serie de capas intermedias que se encargan de comunicarse entre el código del juego y el dispositivo en el que se ejecuta el software. Posee además una serie de utilidades interesantes como es el caso de Box2D que es una biblioteca de simulación de cuerpo rígido 2D, está escrito en lenguaje C portable. También trae otra herramienta de simulación llamada Chipmunk en la que permite que los objetos del juego se comporten como objetos de la vida real, esto quiere decir que incorpora propiedades como elasticidad, choque rebote y otras propiedades que permiten el comportamiento real.

En la parte de programación Cocos2DX incluye soporte para enlazarse con programas escritos en lenguaje C++ y esto se logra con Cocos2d-x lua [22]. La potencia de Cocos2DX permite incluso ejecutar código JS y esto lo logra debido a que incluye en su arquitectura un

componente de scripting que hace referencia a la máquina virtual SpiderMonkey [2] que es la máquina virtual de Firefox.

La incorporación y el trabajo con sonidos se puede hacer usando herramientas adicionales como sfxr, sin embargo, sin importar si estos sonidos son desarrollados en herramientas externas, se pueden adicionar algunos efectos propios de Cocos2DX que permitan enriquecer la experiencia auditiva de los usuarios en los juegos [17]. Entre estas APIs contenidas en cocos2DX, se encuentra el API CocosDenshion la cual es la encargada de reproducir los sonidos incorporados con otras herramientas y cuenta con una serie de efectos opcionales que pueden incluirse o no dependiendo las necesidades del programador.

Finalmente, la plataforma Cocos2DX incorpora elementos que permiten su ejecución en diversos sistemas operativos y para ello, hace uso de unos adaptadores y una librería llamada “3rd libs”, que se comunica con el sistema operativo específico dependiendo las necesidades de portabilidad.

3. Metodología

La mayoría de motores de juegos para 2D están actualmente desarrollando funcionalidades para desarrollar juegos en 3D [22] [24], y en el caso de las aplicaciones móviles de juegos, la interactividad es algo que se debe buscar en cualquier aplicación para dispositivos móviles [25] y obviamente, los juegos no pueden escapar a este concepto [26]

Es importante tener en cuenta que las arquitecturas y los diseños deben ser convergentes y generales para lograr que estas arquitecturas funcionen diversos lenguajes de programación

concretos [27] [28]. Aunque Cocos2D provee una serie de funcionalidades para modelar el juego 2D en este artículo se implementa una arquitectura a otros entornos de desarrollo como Unity3D, Adobe Flash esto se ve reflejado en el prototipo donde se integran estas otras dos plataformas, esto con el fin de probar que la arquitectura era lo suficientemente aplicable a estos entornos. Esto se hizo tan sólo a modo de prueba, puesto que el objetivo central es continuar con el desarrollo de juegos 2D en el entorno de desarrollo Cocos2DX.

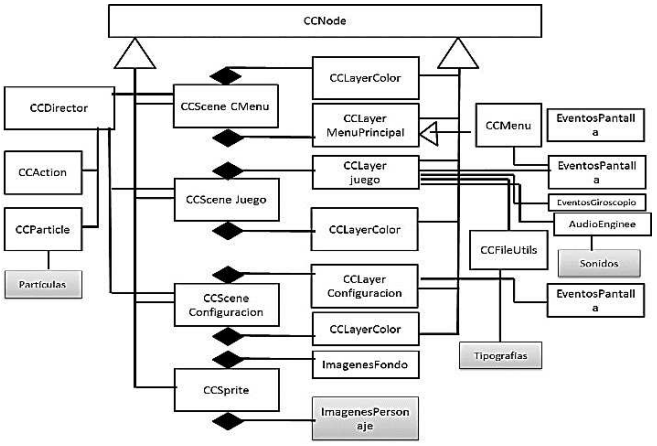


Figura 2: Arquitectura implementada en el laberinto usando Cocos2DX. Fuente: elaboraciójn propia.

La arquitectura del juego "Laberinto" (ver figura 2) se basa en los conceptos de "contenedor", "nodo", "escena", "capa", "sprite" [16], "director", "particle" y "evento". Un juego más complejo podría requerir el uso de elementos adicionales, sin embargo, un juego tradicional como un laberinto sobre móviles tan sólo requirió los conceptos mencionados anteriormente. La figura 2 muestra cómo la gran mayoría de clases en Cocos2DX se basan en la clase CCNode, la cual es la forma para designar casi cualquier clase en Cocos2D. Las escenas en Cocos2DX son la

forma más apropiada para hacer divisiones funcionales en una aplicación tipo juego, debido a que permiten separar los momentos de acción con respecto a los pantallazos mostrados en los diversos dispositivos móviles. Es posible que toda la aplicación se haga como una escena, pero esto arquitectónicamente no es deseable. El juego "laberinto 2D", presenta un menú inicial para que el usuario inicie el juego, una buena práctica recomendada, [17]; en esta primera escena se le muestra al usuario el nombre de la aplicación. La segunda escena programada es propiamente la escena del juego en donde se muestra el laberinto y finalmente la tercera escena es donde se muestra la posibilidad de ver los autores y realizar alguna configuración al juego.

La arquitectura del laberinto (ver figura 2), fue construida a partir de la implementación de un proceso metodológico de construcción de software adaptado a móviles [19] que nos permitiera en un principio hacer un análisis de las posibles herramientas que se pueden usar y analizar los pros y los contras de implementarlas en el laberinto 2D.

4. Resultados

Se parte de la teoría que es necesario profundizar en las herramientas que se van a usar para explotarlas al máximo y de esta forma hacer aplicaciones que tengan en cuenta las necesidades reales del usuario [17], que tengan un impacto a nivel de usabilidad en el usuario [5] y que permitan mejorar la forma como se desarrolla la primera versión del prototipo a partir de las experiencias de los usuarios iniciales de un sistema [14]. En este sentido se hizo un estudio de qué herramientas se podrían usar para mejorar la experiencia de usuario en el

desarrollo de juegos 2D y se concluyó que era necesario trabajar Cocos2DX, debido a que es una herramienta muy poderosa con altas prestaciones para el desarrollo de este tipo de juegos. Se analizaron algunas herramientas buenas para este propósito como Unity3D [13], pero al final se concluyó que las herramientas basadas nativamente en Objective-C aprovechan mejor las características de los procesadores provistas en los dispositivos móviles, [3].

Se emprendió la tarea de comprender la forma de programar en Objective-C, ya que es un paradigma que, aunque recoge algunos aspectos del lenguaje C, tiene grandes diferencias que pueden confundir a los programadores de lenguajes como C++, [20]. Existen un sinnúmero de tipos de aplicaciones que se basan en este lenguaje y que han tenido gran aceptación entre las personas por su alto rendimiento [7], en resumen, se puede decir que es un lenguaje con mucho futuro [10]. Por su naturaleza, el lenguaje Objective-C tendrá mucha acogida en el futuro y basados en este lenguaje se seguirán desarrollando una variedad de herramientas de diseño por su alta eficiencia, sobre todo en ambientes con pocos recursos como en el caso de los dispositivos móviles, [4].

Debido a que OpenGL es una tecnología ampliamente usada en el caso de aplicaciones móviles innovadores y con interfaces de usuario sorprendes [10] [16] [17], se estuvo investigando si usar una herramienta que directamente manipule lenguaje OpenGL, y se concluyó que no importa si otra herramienta lo genera, lo importante es contar con una herramienta que permita total interacción con este tipo de lenguajes [8,18], debido a que es un

lenguaje que se sigue imponiendo por su alto rendimiento [11, 12,15]. Esta fue otra razón que fortaleció la selección de la plataforma Cocos2DX.

Si se quiere obtener el máximo de provecho y mejorar la experiencia de usuario final de un juego, se puede aprovechar la ventaja que posee Cocos2DX de incorporar elementos del juego hechos con otras herramientas, en esta parte del artículo se muestra el entorno principal usado Cocos2DX y las otras herramientas que se usaron para añadir al juego elementos de alta calidad que mejoren la experiencia de usuario.

Como eje central del desarrollo se usó la herramienta cocos 2DX en donde se referencian todos los objetos creados con otras herramientas. En esta herramienta se programaron con Objective-C todas las clases de la arquitectura del laberinto (ver figura 2).

El entorno de desarrollo permite la creación de lienzos (ver figura 3) que es una distribución gráfica de los elementos en las escenas donde se programan sus posiciones. El entorno de desarrollo mostrado en la figura 3 muestra un pantallazo del ambiente de desarrollo mientras se programaba el laberinto.

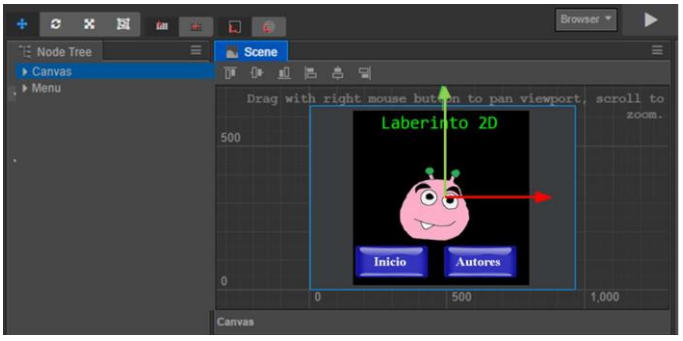


Figura 3: El entorno de desarrollo Cocos2DX. Fuente: elaboración propia.

El juego desarrollado en Cocos2DX se puede ejecutar incluso en ambientes no móviles como Windows (ver figura 4) gracias a todo el soporte de interoperabilidad provisto por las librerías "3rd libs"



Figura 4: Ejecución del juego en ambiente Windows. Fuente: elaboración propia.

Sfxr es el programa que se usó para la realización de efectos de sonido a fin de ser incorporados en los juegos de computadora. Con este programa se pueden hacer muchas cosas entre ellas: modificar la forma de la onda para aplicar efectos a los sonidos, se pueden aplicar filtros de compresión y armónicos que permiten quitar brillos a los sonidos de un juego, incorpora un potente mezclador y se puede revertir hasta sintetizadores

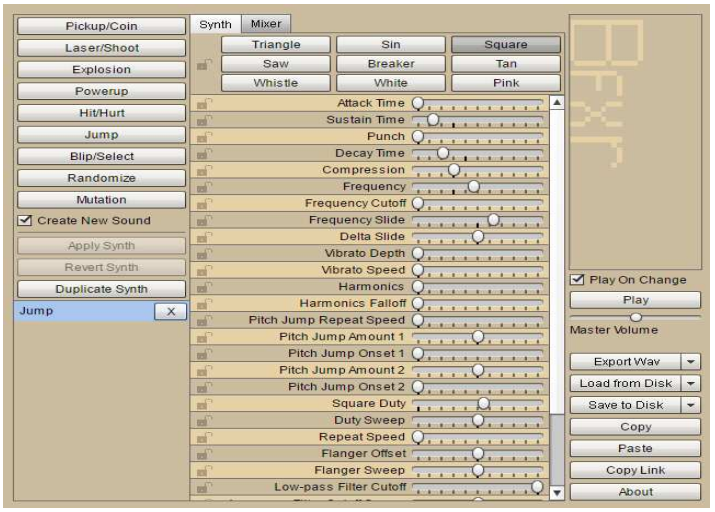


Figura 5: El entorno para creación de sonidos Sfxr. Fuente: elaboración propia.

Los sprites son importantes para mejorar el rendimiento de un sistema [1]. Una hoja de sprite es un archivo de imagen que contiene varios gráficos en una cuadrícula al estilo mosaico. Estos gráficos son cargados por las aplicaciones como cocos2DX y permiten que en forma dinámica el juego muestre cada una de las imágenes por separado como una animación. La ventaja de este tipo de técnicas se refiere a la carga en memoria de las imágenes, por cuanto todas las imágenes quedan cargadas al inicio del juego y a medida que se requieran se van cargando las imágenes para dar una apariencia de animación, cuando en realidad lo que se está mostrando es una parte del archivo de imagen. En la siguiente gráfica se muestra una parte del sprite creado para el desarrollo del juego 2D.

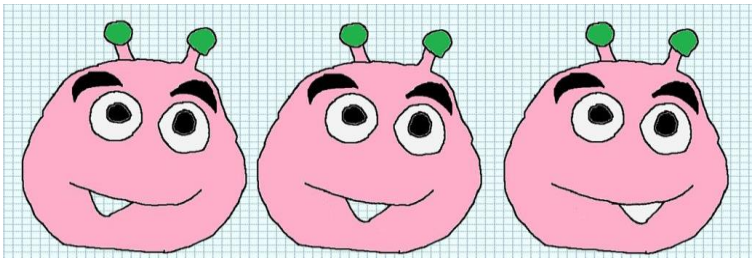


Figura 6: Sprite creado para el juego. Fuente: elaboración propia.

La herramienta usada fue “Texture Packer” y las razones fundamentales fueron: reduce memoria, no calidad, cuando hay demasiados sprites se puede manejar esta complejidad con algo llamado multipack, permite exportar a una gran cantidad de frameworks para la realización de juegos y tareas de automatización con líneas de comandos.

Otra de las razones poderosas que motivaron la elección de la herramienta “Texture Packer”, es que es un frameworks que permite exportar a otros frameworks como: Corona SDK [1], libGDX [6], Agk app game Kit, 2D Toolkit, Gideros Mobile, Shiva, Moai, BatteryTech yV-Play.

Los efectos de sistemas de partículas ayudan bastante a dar una experiencia agradable a los usuarios de juegos en general [10] y por esta razón se decidió incorporar estos elementos en el juego. La herramienta usada fue “Particle Designer”, y las razones fundamentales de su elección están dadas por las siguientes funcionalidades que ofrece: crear efectos de partículas a partir de efectos de prueba que ya vienen preestablecidos y luego incorporarlos al juego, permite la generación de animación, alfa-canal y efectos de partículas, incluso codificados, todo esto a través de una línea de tiempo. Se pueden crear efectos tipo bucle

Las tipografías se pueden crear a mano, es posible que se halla visto el tiempo que se gasta haciendo este tipo de cosas y se ve la necesidad de usar un software especializado. Se estuvieron analizando algunas posibilidades para el desarrollo de este tipo de tipografías entre las que se analizaron: FontForge, Robofont, FontLab, FontoGrapher y Glyphs. Inicialmente se desarrolló el juego usando Glyphs, aunque, una vez desarrollado el juego se logró ver que existen otras posibilidades que muy seguramente serán tenidas en cuenta para el desarrollo de mejoras del juego. Entre estas posibilidades futuras se tendrá en cuenta FontForge, ya que tiene una ventaja con respecta al resto de posibilidades analizadas y esta radica básicamente en ser una herramienta gratuita de buena calidad y de código abierto.

Con el uso de las herramientas anteriores, se ha desarrollado la aplicación mostrada en la figura 7, en donde se puede apreciar que la interoperabilidad de las aplicaciones con Cocos2DX es alta, debido a que la interfaz gráfica no cambia de apariencia en ninguno de los dispositivos para los cuales está diseñada.



Figura 7: Pantallazo inicial de la aplicación Laberinto 2D sobre un iPhone. Fuente: elaboración propia.

El juego consiste en mostrar un muñeco que el usuario puede mover bien usando el dedo o moviendo el celular haciendo uso internamente del giroscopio proporcionado por los dispositivos móviles (véase figura 8).

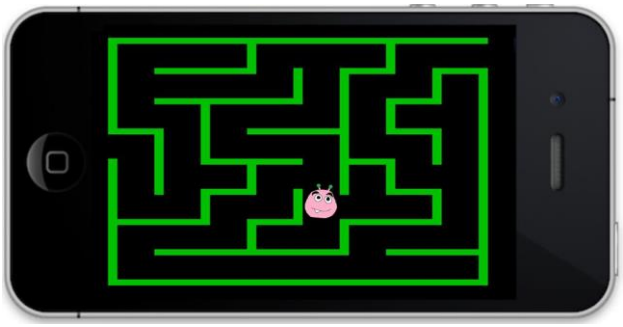


Figura 8: Juego Laberinto 2D en acción. Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Se puede concluir que la decisión sobre el uso de herramientas adicionales a la herramienta central con la que se realiza un juego en 2D es definitiva para el éxito de un proyecto de juego sobre dispositivos móviles, por cuanto a pesar de que los diversos fabricantes de herramientas auxiliares prometen la total interoperabilidad a la hora de la práctica no dejan de presentarse inconvenientes.

Cuando se requiere la realización de un juego para una tecnología específica como Android, se pensaría a primera medida que lo más recomendables es hacer dicho desarrollo en un entorno especializado en Android, sin embargo esta decisión que parecería natural no es la mejor por varias razones, la primera razón es que aunque parezca raro los entornos de desarrollo para la realización de juegos en Android no están adaptados a las necesidades

específicas de los juegos en 2D y los entornos de desarrollo Unity3D, Cocos2DX, Marmalade o incuso Adoble Flash son entornos que permiten compilar para diversas plataformas resultan ser mejores elecciones dado que si bien presentan un desgaste en el momento de hacer la traducción a la plataforma concreta, también es cierto que tienen tan bien desarrolladas las funciones concretas de física y de juegos en 2D que generan un código más eficiente que si se incluyen estas funcionalidades concretas desde cero. Se tendría que desarrollar y estudiar bastante la forma como se implementa la lógica de un juego en 2D desde cero para una plataforma específica. De otra parte, la otra razón por la cual no es una buena elección desarrollar para una plataforma específica es que la gran mayoría de empresas que implementan la lógica de juegos 2D, lo hacen pensando en múltiples plataformas y es así como las plataformas para juegos 2D sobre una plataforma concreta son casi nulas y la tendencia no va encaminada a este desarrollo. Finalmente, una razón también de peso que apoya la idea de desarrollar para múltiples plataformas, es que la probabilidad que se requiera que un desarrollo comience a ejecutarse sobre diversas plataformas incrementa en el sentido que no es claro en este momento si una plataforma se va a imponer sobre la otra y se prevé que múltiples plataformas actuales sigan perdurando en el futuro.

Una vez tomada la decisión de desarrollar sobre un framework para múltiples plataformas, la pregunta que viene es: ¿Se tomó la mejor decisión cuando se eligió a Cocos2D como el framework multiplataforma para el desarrollo del juego 2D? La conclusión es que la elección que se hizo de tomar a Cocos2D como framework multiplataforma fue buena dependiendo las

necesidades de mejora que se requieran hacer sobre el laberinto desarrollado. Por ejemplo, si el juego del laberinto que se desarrolló no requiere mayores mejoras, se puede asegurar que la decisión de desarrollar el juego en Cocos2D, no necesariamente fue la mejor opción en el sentido que muy probablemente el mismo juego y con la misma calidad se pudo haber desarrollado de una forma más rápida con la tecnología de Adobe Flash. Sin embargo, si las necesidades del juego crecen es posible que el rendimiento del laberinto se vea seriamente afectado y en este sentido el esfuerzo de aprender Objective-C se ve recompensado con las mejoras en rendimiento cuando el juego cobra especial complejidad y se torna más costoso computacionalmente hablando. Otra forma de razonar mostraría que la pregunta hecha puede estar ligada a la necesidad de hacer código abierto o no. Si no se tiene ninguna necesidad de ejecutar código abierto, la decisión de escoger a Cocos2D, a Flash a Unity3D o Marmalade, es indiferente en este sentido, pero si la decisión se toma pensando que es una necesidad desarrollar para código abierto, sin lugar a dudas la mejor elección en este sentido es Cocos2D en el sentido que es la plataforma de código abierto más completa en este momento y totalmente gratuita. Tanto así que después de elaborar el laberinto se ha podido ver la posibilidad de hacer múltiples mejoras al laberinto que incluyen mejoras en el manejo de la física basados en APIs libres que se van encontrando a medida que se profundiza en el entorno de desarrollo Cocos2D. Las posibilidades de mejora del juego laberinto son muchísimas y existe la posibilidad de seguirlo mejorando manteniendo la condición de desarrollo basado en código abierto.

En el futuro mediano y a largo plazo no se puede concluir que Cocos2D siga siendo la plataforma por excelencia, en el sentido que las competencias como Flash, Marmalade y Unity3D van ampliando sus funcionalidades y siguen estando en la batalla futura. Sin embargo, de todos estos rivales lo que sí se puede concluir es que el rival más serio de todos con los que cuenta Cocos2D es Unity3D y en este sentido no es claro si en un futuro va a imponerse uno u otro. Es muy probable que sigan permaneciendo estas dos opciones. En este momento se puede concluir que las comparaciones entre Cocos2DX y Unity3D no han sido objetivas, en el sentido que casi siempre las comparaciones que se encuentran en los textos son comparaciones de personas expertas en una o en otra tecnología y no es fácil encontrar personas expertas en las dos tecnologías que hagan comparaciones más objetivas a cerca de las dos tecnologías. Se concluye entonces que se requiere en el mundo más personas expertas en estas dos tecnologías para hacer comparaciones más cercadas a la realidad sobre estas plataformas de desarrollo de juegos 2D.

Referencias

[1] Y. A. Arévalo Ortega, S. R. Corredor Vargas y G. A. Higuera Castro, «Análisis forense con herramientas de hacking en dispositivos android,» *Visión Electrónica,* vol. 13, nº 1, pp. 162-177, 2019.

[2] L. iyuan y H. Wenfeng, «Development of Puzzle Game for IOS Platform Based on Unity3D,» de *3rd International Conference on Applied Computing and Information Technology/2nd International Conference on Computational Science and Intelligence (ACIT-CSI)*, 2015.

[3] A. Lima y E. A. da Costa, «Experimental Approach of the Asymptotic Computational Complexity of Shaders for Mobile Devices with OpenGL ES,» de *Brazilian Symposium on Computer Games and Digital Entertainment*, 2014.

[4] B. J. Cox, The objective-C environment: past, present, and future, 1987.

[5] G. Bournoutian y A. Orailoglu, «On-device objective-C application optimization framework for high-performance mobile processors,» de *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2014.

[6] R. Rawlings, «bjective-C: an object-oriented language for pragmatists,» de *Colloquium on Applications of Object-Oriented Programming*, 1989.

[7] G. Song, S. Ren, D. Zhang, K. Liu, Y. Sun y X. A. Wang, «Research on War Strategy Games on Mobile Phone based on Cocos2d-JS,» de *10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC)*, 2015.

[8] S. Guozhi, R. Shuxia, Z. Dakun, L. Kunliang, S. Yumeng y A. W. Xu, «Research on War Strategy Games on Mobile Phone,» *10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC),* pp. 151-155, 2015.

[9] B. A. Brady, A. K. Jones y I. S. Kourtev, «Efficient CAD development for emerging technologies using Objective-C and Cocoa,» de *International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2004*, 2004.

[10] C. W. Cho, C. P. Hong, J. C. Piao, Y. K. Lim y S. D. Kim, «Performance optimization of 3D applications by OpenGL ES library hooking in mobile devices,» de *13th International Conference Computer and Information Science (ICIS), 2014 IEEE/ACIS* , 2014.

[11] J. C. Piao, C. W. Cho, C. G. Kim, B. Burgstaller y S. D. Kim, «An Adaptive LOD Setting Methodology with OpenGL ES Library on Mobile Devices,» de *International Conference on Convergence and Security (ICITCS)*, 2014.

[12] F. A. Manrique Suarez, L. C. Velásquez Rodríguez y G. M. Tarazona Bermúdez, «Estado del arte sobre aplicaciones móviles: caso de estudio enfocado a estudiantes universitarios en Bogotá, Colombia,» *Visión Electrónica,* vol. 11, nº 2, pp. 279-288, 2017.

[13] R. Besas, R. O. Atienza, T. Tai y R. Cruz, «An implementation of a structured and highly engaging learning environment on educational games for elementary education,» de *IT in Medicine and Education (ITME)*, 2011.

[14] C. Carter, Q. Mehdi y T. Hartley, «Navigational techniques to improve usability and user experience in RPG games,» de *17th International Conference on Computer Games (CGAMES)*, 2012.

[15] C. Le Marc, J. P. Mathieu, M. Pallot y S. Richir, «Serious gaming: From learning experience towards User Experience,» de *International Technology Management Conference (ICE)*, 2010.

[16] S. F. Hsiao, S. Y. Li y K. H. Tsao, «Low-power and high-performance design of OpenGL ES 2.0 graphics processing unit for mobile applications,» de *International Conference on Digital Signal Processing (DSP)* , 2015.

[17] S. F. Hsiao, P. H. Wu, C. S. Wen y L. Y. Chen, «Design of a programmable vertex processor in OpenGL ES 2.0 mobile graphics processing units,» de *International Symposium on VLSI Design, Automation, and Test (VLSI-DAT)*, 2013.

[18] X. Zhao y X. Huang, «A general solution of script-based fragment animation,» de *6th IEEE International ConferenceSoftware Engineering and Service Science (ICSESS),* , 2015.

[19] L. Wang, «Design and Implementation of Four Arithmetic Operations Learning Games in Primary Mathematics Based on cocos2d-js,» *3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE),* pp. 595-598, 2018.

[20] M. P. A. Balayan, V. V. B. Conoza, J. M. M. Tolentino, R. C. Solamo y R. P. Feria, «On evaluating skillville: An educational mobile game on visual perception skills. In Information, Intelligence, Systems and Applications,» de *The 5th International Conference IISA 2014,*, 2014.

[21] B. Cassidy, G. Stringer y M. H. Yap, «Mobile Framework for Cognitive Assessment: Trail Making Test and Reaction Time Test,» de *Computer and Information Technology (CIT)*, 2014.

[22] Y. Lu, W. Gao y F. Wu, «Efficient background video coding with static sprite generation and arbitrary-shape spatial prediction techniques,» *Transactions on Circuits and Systems for Video Technology,* vol. 13, nº 5, pp. 394-405, 2013.

[23] Cocos2D-x, «ARCHITECTURE OVERVIEW,» [En línea]. Available: http://www.cocos2d-x.org/wiki/Engine_Architecture. [Último acceso: 14 02 2016].

[24] Y. Lu, Y. Liu y S. Dey, «loud mobile 3D display gaming user experience modeling and optimization by asymmetric graphics rendering,» *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,* vol. 9, nº 3, pp. 517-532, 2015.

[25] S. Arefin Riffat, F. Harun y T. Hassan, «An Interactive Tele-Medicine System via Android Application,» *Advanced Computing and Communication Technologies for High Performance Applications (ACCTHPA),* pp. 148-152, 2020.

[26] Y. Liu, H. Dar y R. Sharp, «Mobile Gamer Modelling and Game Performance Preference Measurement,» *IEEE Conference on Games (CoG),* pp. 632-635, 2020.

[27] J. C. Piao, C. W. Cho, C. G. Kim, B. Burgstaller y S. D. Kim, «An adaptive LOD setting methodology with OpenGL ES library on mobile devices,» de *IT Convergence and Security (ICITCS)*, 2014.

[28] E. C. Chan y B. G. , «Appendix B: Introduction to Objective-C Programming in iPhone,» de *Introduction to Wireless Localization: With iPhone SDK Examples*, pp. 261-304.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

PRELIMINARY RESULTS OF A COMPACT LINEAR ACCELERATOR FOR ONE ION BEAM

Resultados preliminares de acelerador lineal compacto para un haz de iones

Víctor Alfonso Díaz Gómez[1], Edwin Munévar Espitia[2], J. Alfonso Leyva[3]

Resumen

Las simulaciones computacionales de la extracción de haces de iones en sistemas de aceleración de iones se han utilizado durante más de tres décadas. Aquí se describe un sistema de extracción de iones con un sistema de extracción de siete electrodos. Con la plataforma computacional MATLAB R2020a. se resuelven los potenciales electrostáticos para las configuraciones de electrodos correspondientes a la columna aceleradora de interés. Los potenciales electrostáticos se determinan resolviendo la ecuación de Laplace. Adicionalmente, se utiliza un código de partículas en la celda (particle-in-cell, PIC) para simular el plasma y el haz de iones. En este artículo se presentan resultados preliminares para el potencial electrostático y la trayectoria de iones. Este tipo de columnas aceleradoras de partículas cargadas tiene diversas aplicaciones industriales y médicas tales como la implantación iónica, imágenes diagnósticas y terapia hadrónica, entre otras.

Palabras clave: acelerador lineal, haces de iones, potenciales electrostáticos, columnas aceleradoras.

[1] Maestría en Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá – Colombia.
[2] Licenciatura en Física,Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia
[3] Departamento de Física, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá - Colombia

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

Abstract

Computational simulations for extraction of ion beams have been used on ion acceleration systems for more than three decades. Here it describes an extraction system of ions with a system composed of seven electrodes. The employed program is MATLAB R2020a. This program solves the potentials in the spaces among the electrodes, which are determined by the Laplace equation and uses a code of particles in the cell to simulate the plasma and the ion beams. The purpose of this article is to determine whether the codes can model appropriately the plasma meniscus, the beam interface and therefore, predict successfully the trajectory of the ions and the beam shape in a wide range. Different electrode configurations are analyzed in accelerator columns and one of them is selected for a detailed description.
All of this in order to use the accelerator column in industrial and medical applications such as ion implantation, diagnostic images, and hadronic therapy.
Keywords: linear accelerator, ion beams, electrostatic potentials, accelerator columns.

1. Introducción

Los aceleradores de partículas fueron principalmente concebidos, diseñados y utilizados para la investigación en física nuclear y física de altas energías. En la actualidad, se utilizan cada vez más en campos tan diversos como la arqueología, la ciencia de materiales, la biología y la medicina. En el mundo hay más de 8.000 pequeños aceleradores de bajas energías (hasta unos pocos MeV por unidad de masa para iones ligeros) dedicados a la implantación de iones, espectroscopía de masas, emisión de rayos X inducidos por protones (PIXE) [2]. Las columnas aceleradoras se utilizan en aplicaciones industriales como por ejemplo en la implantación iónica, proceso propio de la ingeniería de materiales que se utiliza para el mejoramiento de las

propiedades superficiales de los materiales [3]. Uno de los problemas actuales en la industria metalmecánica de alta tecnología y en la fabricación de aparatos de precisión, es el desarrollo de técnicas de tratamiento superficial que logren mejorar las propiedades de los materiales tales como: microdureza, resistencia al desgaste por fricción, resistencia a la corrosión. Desde los años 70 se realizan investigaciones intensas en el área de tratamiento de superficies de materiales de construcción por haces de partículas cargadas y especialmente por haces iónicos [4]. En relación con la corrosión, la modificación de las superficies comprende la aplicación de tecnologías para la obtención de propiedades deseadas que conllevan a la protección de diversos materiales sometidos a diferentes medios agresivos [5]. Con en el estudio de la implantación iónica se obtuvieron resultados positivos que mostraron cambios significativos de las propiedades de metales, como el aumento de la resistencia a la corrosión y el aumento de resistencia a la fatiga de metales [6]. Desde los métodos tradicionales como el esmaltado o la electrodeposición de metales, hasta las técnicas de desarrollo más reciente, como la implantación de iones, son de interés mundial para mitigar los problemas de corrosión [7][8]. Una aplicación médica importante con aceleradores es la toma de imágenes diagnósticas. El diagnóstico por imágenes tuvo un asombroso avance durante el siglo XX, es en la actualidad un método complementario esencial de la práctica clínica y consecuentemente tiene un papel preponderante en los procedimientos terapéuticos y la educación médica [9]. Los médicos y estudiantes de Medicina siempre han necesitado una buena comprensión topográfica de la anatomía humana antes de examinar a un paciente. Hoy a esa necesidad se le añade la

comprensión de cortes seccionados por Rayos X, ultrasonido, tomografías y resonancias, es decir, información morfológica revelada por nuevas técnicas de imágenes [10]. El término imagenología médica se refiere al estudio de imágenes obtenidas del cuerpo humano y la tecnología para su obtención y procesamiento, [11]. La principal función de los estudios de imagen en medicina es proporcionarle al médico la información necesaria para hacer diagnóstico de la enfermedad del paciente y así valorar su respuesta al tratamiento. El abanico de métodos de imagen en medicina es amplio y dentro de los más utilizados se encuentran los Rayos X, el Ultrasonido, la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM) [12]. Los Rayos X son un tipo de radiación electromagnética ionizante que debido a su pequeña longitud de onda tienen capacidad de interacción con la materia. Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos, mayores son su energía y poder de penetración. Los componentes fundamentales que conforman el equipo radiológico convencional son: el tubo de Rayos X, el generador de radiación y el detector de radiación. La utilidad de las radiografías para el diagnóstico se debe a la capacidad de penetración de los rayos. Los rayos X son disparados del tubo de rayos hacia una placa y se atenúan a medida que pasan a través del cuerpo de la persona, siendo aquí donde juegan un papel importante los procesos de absorción y dispersión [13]. Por otro lado, según la organización mundial de la salud (OMS), el cáncer es una de las principales causas de muerte en todo el mundo, con 7,7 millones de muertes (alrededor del 13% de todas las muertes) en 2016, más del 70 % de muertes por esta causa se registró en países de ingresos bajos y medianos. Esta cifra, según cálculos para 2030 llegará a superar

los 13,1 millones, [14]. Los tratamientos a diferentes tipos de cáncer han mejorado considerablemente en la última década como resultado de la intensa investigación básica y aplicada junto al desarrollo de equipos y metodologías terapéuticas, [15]. Existen 27 instalaciones de protones en el mundo que aprovechan aceleradores de investigación de física de altas energías o más recientemente nuevas instalaciones pensadas y construidas para terapia y tratamientos contra cáncer, [16]. La hadronterapia presenta varias ventajas para el tratamiento de tumores que requieren un alto grado de precisión al encontrarse cerca de órganos vitales, [17]. Esto se debe a que los haces de hadrones al ingresar al cuerpo presentan una menor dispersión que haces de electrones y rayos gamma. Por esta razón, los tejidos sanos y las estructuras situadas cerca a la trayectoria del haz reciben muy poca radiación, [18]. Otra de las opciones clínicas con propiedades físicas similares al tratamiento con protones es el tratamiento con partículas pesadas como los iones de carbono. Además, ofrecen una mayor eficacia biológica en determinados tipos de tumores. Las características de la radiación constituida por partículas pesadas la convierten en una herramienta muy útil para el uso terapéutico. Los protones, los núcleos de helio o los iones de carbono están siendo empleados con éxito en instalaciones en centros médicos de todo el mundo, [19].

El objetivo de este trabajo es ver la importancia de las simulaciones computacionales del estudio de la geometría del campo y potencial eléctrico para un conjunto específico de electrodos y su relevancia en la determinación de trayectorias de partículas inmersas en dicho campo. Las simulaciones de extracción por haz de iones pueden facilitar el diseño de un

sistema de extracción [1], y de esa manera caracterizar las bases de diseño de un sistema de aceleración del tipo columna aceleradora de iones. En particular, estudiaremos el diseño para una columna aceleradora de iones mostrada en la figura 1:



Figura 1. Columna aceleradora compacta diseñada por LBNL. Fuente: elaboración propia (Columna aceleradora "Diseño en Solid Edge")

Inicialmente, los datos obtenidos para la configuración simulada en el presente trabajo corresponden con la columna aceleradora modelada por Lawrence Berkeley National Laboratory, en su publicación [20]. El Software de cálculo utilizado en el laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) fue IGUN, que a su vez fueron la base de la investigación desarrollada en la tesis de maestría en la Pontificia Universidad Javeriana por Jorge Alberto Cifuentes [21], la cual es la base de partida de esta investigación.

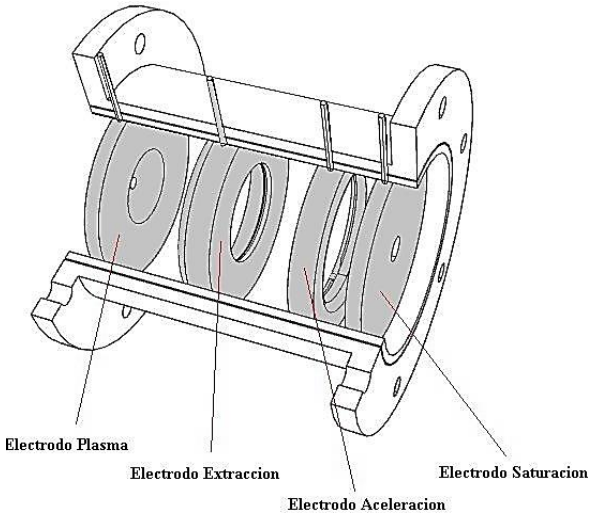


Figura 2. Descripción de la columna aceleradora compacta diseñada por LBNL. Fuente: elaboración propia.

En las figuras 1 y 2, se ha dibujado en Solid Edge la columna aceleradora seleccionada donde podemos observar que se encuentra compuesta por cuatro electrodos: plasma, extracción, aceleración y supresión. La caracterización de cada uno de estos electrodos se presenta en un apartado más adelante.

Simulación computacional con JAVA

JAVA es un lenguaje orientado por objetos, independiente de la plataforma hardware donde se desarrolla, y que utiliza una sintaxis similar a la de C++ pero reducida. Dispone de una gran funcionalidad de base (incrementada por la gran cantidad de código de terceros existentes). Se

utiliza un simulador de líneas de campo eléctrico en JAVA para situaciones ideales en un sistema de placas paralelas obteniendo las siguientes simulaciones:

Se puede observar en la figura 3, en la zona entre las placas paralelas que los vectores de campo eléctrico en color blanco se organizan y todos apuntan en una misma dirección, los vectores en color verde representan el movimiento que tienen los iones dentro de la fuente de plasma cuando las placas están conectadas a la fuente de alto voltaje.

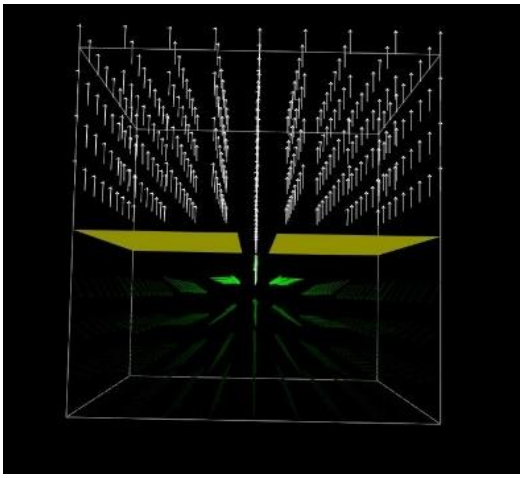


Figura 3. Simulación con JAVA 32, vectores de campo 3D en sistema placas paralelas con una placa ranurada, [23].

Este código de simulación de JAVA permite variar el campo de fuerza entre las placas, así como también variar el número de partículas y el ancho de la ranura en la placa del electrodo plasma.

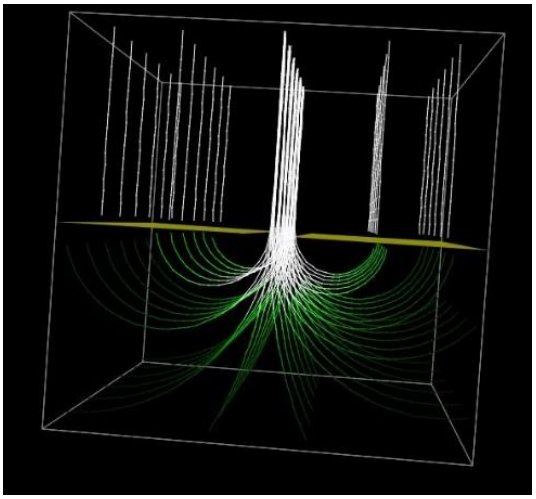


Figura 4. Simulación con JAVA 32, Líneas de flujo 3D en un sistema de placas paralelas con una placa ranurada, [23].

Se ha seleccionado un campo eléctrico, un número de partículas fijo y se ha utilizado un diámetro de 5 mm para el ancho de ranura, obteniendo los vectores de campo y las líneas de campo dentro de la columna ver figuras 5, 6. Una característica importante de las líneas equipotenciales es que estas son perpendiculares a las líneas del campo eléctrico en todo punto ver figura 5, lo cual resulta de las propiedades del operador gradiente. El electrodo (color azul), se encuentra ubicado en la boquilla de la fuente de iones, en la simulación se observa cómo los vectores del campo eléctrico se organizan dentro del sistema de placas paralelas.

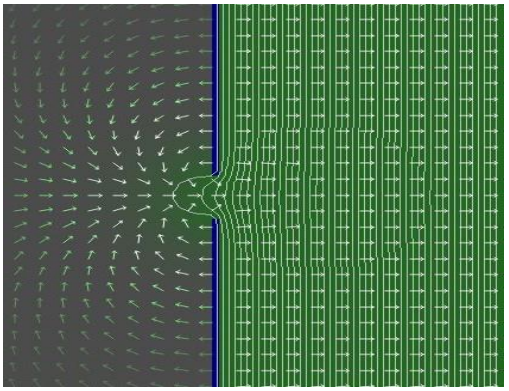


Figura 5. Lineas equipotenciales y vectores de campo, [23].

En la figura 6 se observan las líneas de campo eléctrico en la columna aceleradora. Una partícula cargada que se encuentre en una región donde hay un campo eléctrico, experimenta una fuerza igual al producto de su carga por la intensidad del campo eléctrico. Si el campo es uniforme, la fuerza es constante y también lo es la aceleración.

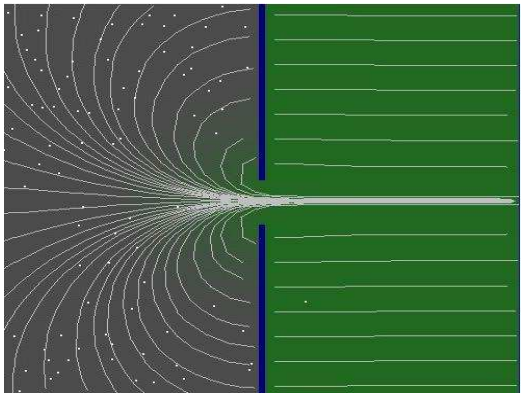


Figura 6. Simulación con JAVA 32, trayectoria de los iones en un sistema de placas paralelas con una placa ranurada, [23].

Como puede observarse en la figura 7, la simulación muestra que el diámetro de la ranura en el electrodo que conecta a la fuente de iones influye directamente en la trayectoria y focalización de las partículas, en la imagen se detalla cuatro simulaciones donde se varía el ancho de la ranura.

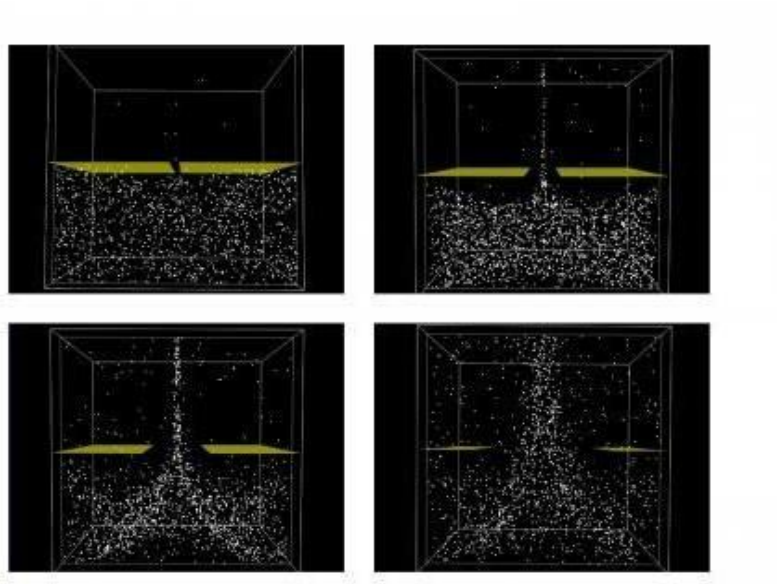


Figura 7. Simulación de las trayectorias de los iones en un sistema de placas paralelas con una placa ranurada con diferentes distancias de separación, [23].

Si es demasiado pequeña la ranura del electrodo las partículas no tienen posibilidad de introducirse en la zona de extracción; si es demasiado grande, muchas partículas no logran ser focalizadas en el haz iónico. Así con la ayuda de java podemos tener una visualización de la

trayectoria de las partículas dentro de dos placas conectadas a una diferencia de potencial y con una de las placas ranuradas.

2. Materiales y métodos

Construcción de electrodos

Se realiza un corte transversal de la columna de tal manera que se obtiene una vista en 2D de los electrodos y del sistema de aceleración, esto con el fin de facilitar el estudio experimental y el desarrollo de la toma de datos.

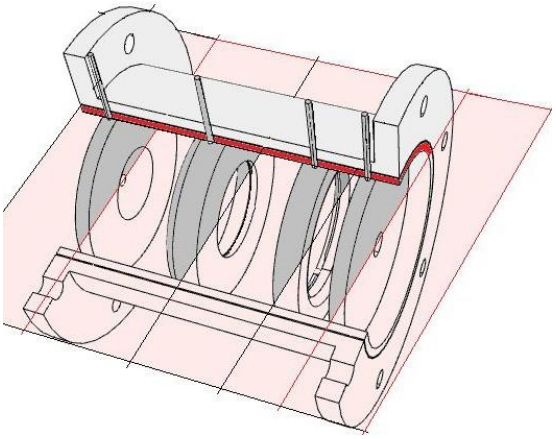


Figura 8. Corte transversal de la columna aceleradora. Fuente:elaboración propia.

A partir del corte transversal desarrollado sobre la columna (figura 8), se obtiene una imagen en 2D de los electrodos en color azul (figuras 9,10,11,12), así podemos observar el plano de corte sobre los electrodos en vista superior.



Figura 9. Corte transversal del electrodo plasma vista superior. Fuente: elaboración propia.

De esta manera tenemos una representación gráfica de cada uno de los electrodos en 2D para proceder a dibujarlos y pasar a la fase de construcción.

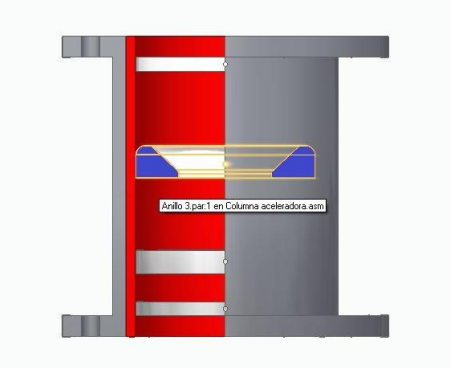


Figura 10. Corte transversal del electrodo extracción. Fuente: elaboración propia.

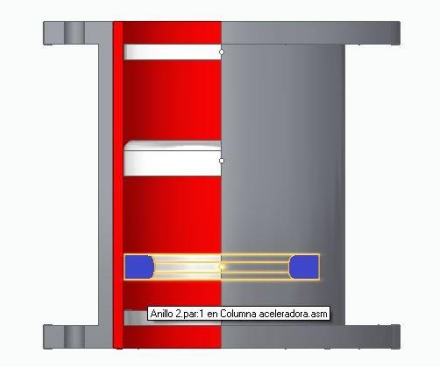


Figura 11. Corte transversal del electrodo aceleración. Fuente: elaboración propia.



Figura 12. Corte transversal del electrodo saturación. Fuente: elaboración propia.

Finalmente se obtiene una imagen en 2D de la columna aceleradora a partir de todas las gráficas anteriores (ver figura 13), donde podemos observar el plano de corte sobre la columna en vista superior, así tenemos una representación gráfica para proceder a dibujar las partes y construirlas.

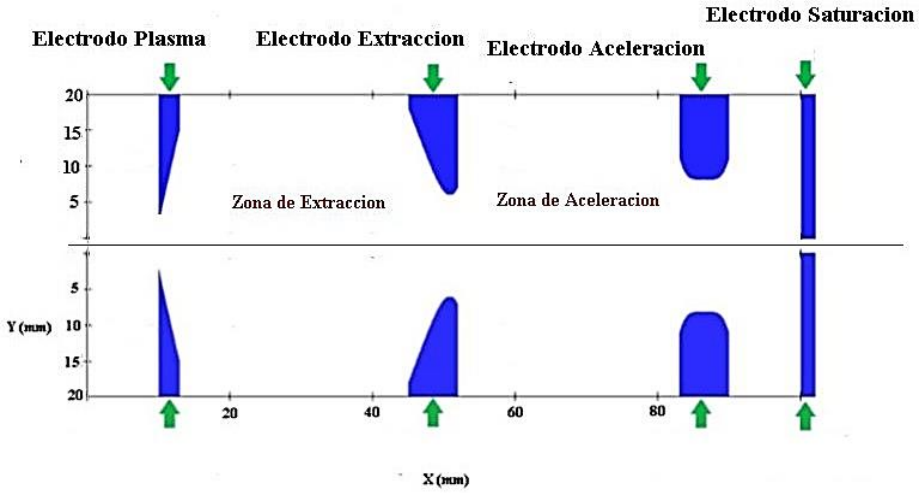


Figura 13. Vista superior de la columna aceleradora en corte transversal, [20], [21].

El electrodo plasma se encuentra ubicado a la salida de la fuente RF, con una apertura de 2.5 mm de radio y una geometría en forma de cuña, inicialmente plano y finalizando en punta. El electrodo de extracción se encuentra localizado a una distancia de 32 mm del electrodo plasma, tiene una geometría semi triangular y su punta termina en un semicírculo. La región comprendida entre este par de electrodos se conoce como la zona de extracción y su geometría difiere de un par de placas plano-paralelas.

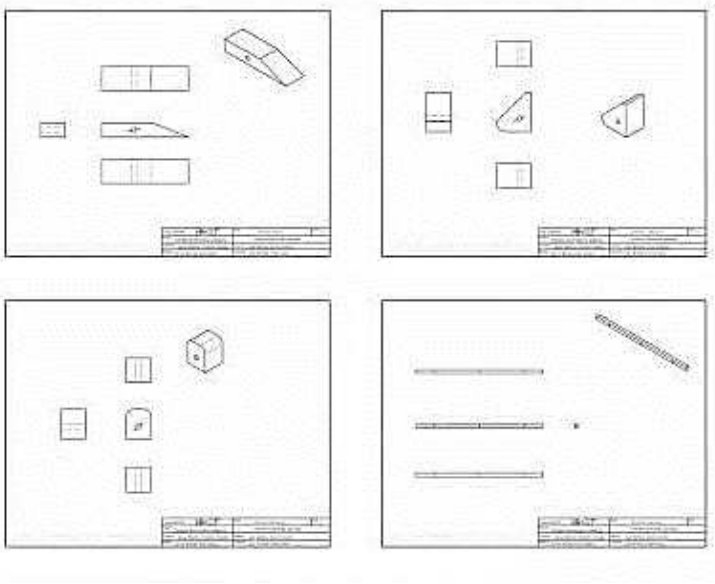


Figura 14. Dibujo de los planos terminados de los electrodos listos para la fase de construcción. Fuente: elaboración propia.

El electrodo de aceleración se encuentra localizado a una distancia de 31 mm del electrodo de extracción, su geometría es inicialmente rectangular y finaliza con un semicírculo de 0.5 cm de radio. Por último, se tiene un electrodo de supresión que se encuentra localizado a 12 mm del electrodo acelerador. A partir de los electrodos en corte transversal de la columna y de los planos dibujados en Solid Edge, se obtiene el diseño de cada uno de ellos. En las figuras 14 y 15, se puede observar el dibujo de los planos y el diseño de los electrodos seleccionados y diseñados en Solid Edge, de esta manera se encuentran listos para la fase de construcción.

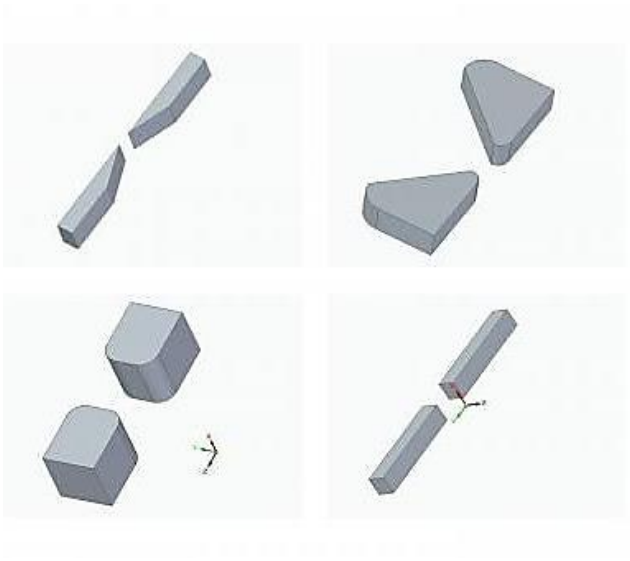


Figura 15. Diseño en Solid Edge 2020 f de los electrodos de la columna aceleradora. Fuente: elaboración propia.

Los electrodos se construyeron en aluminio según la escala seleccionada. Finalmente, al igual que con el par de electrodos construidos que simularán el electrodo de extracción (figura 16), se procede a la construcción de los demás electrodos que componen la columna seleccionada (figuras 17, 18 y 19). Se construyen todos los electrodos en la empresa AXIOMÁTICA S.T, esta es una empresa colombiana de Bogotá D.C que presta servicios de ingeniería mecánica y eléctrica, diseñan y calculan sistemas en los campos de mecanismos y máquinas con todo lo que respecta a intercambio de calor estructuras, instalaciones eléctricas de control y potencia. Con los electrodos construidos se procede a la toma de datos en el laboratorio de Física de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Macarena A.



Figura 16. Par de electrodos construidos en aluminio que simulan el electrodo extracción. Fuente: elaboración propia.



Figura 17 . Par de electrodos construidos en aluminio que simulan el electrodo plasma. Fuente: elaboración propia.



Figura 18 . Par de electrodos construidos en aluminio que simulan el electrodo aceleración. Fuente: elaboración propia.



Figura 19 . Electrodo construidos en aluminio que simulan el electrodo saturación. Fuente: elaboración propia

3. Mediciones Experimentales

Bandeja electrolítica

Para describir las trayectorias de los iones es necesario encontrar tanto los vectores de campo eléctrico como las líneas de campo dentro del sistema. Para ello, lo importante es encontrar la distribución de potencial en cada región en la bandeja electrolítica. Es necesario esquematizar las geometrías de la columna aceleradora en un plano, lo que requiere realizar un corte transversal. Esto trae como consecuencia que cada electrodo de la columna será representado por dos electrodos planos conectados entre sí y con una geometría característica previamente seleccionada. Con el objetivo de disminuir la incertidumbre posicional, se construyó sobre una hoja de acetato una matriz de 6000 orificios distanciados 2 mm en ambos ejes según se muestra en la figura 20. Esto significa que se midieron 6000 datos de potencial en la bandeja diseñada para este experimento.

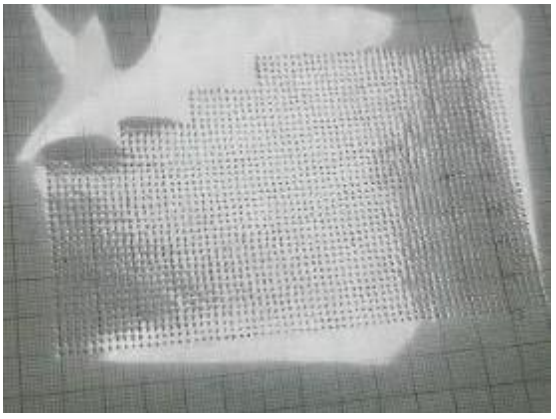


Figura 20. Construcción de la matriz de puntos, imagen tomada a contraluz para poder apreciar la distribución de los huecos. Fuente: elaboración propia.

Se requiere precisión manual para lograr la coincidencia entre los puntos de la hoja milimetrada y los huecos de la lámina de acetato. Para describir las trayectorias de los iones es necesario encontrar la distribución de potencial en cada región. Esto se logra obteniendo las líneas equipotenciales al esquematizar las geometrías de la columna en un plano, lo que requiere realizar un corte transversal, esto trae como consecuencia que cada electrodo de la columna será representado por dos electrodos planos de aluminio, conectados entre sí y con una geometría característica. Para la realización del experimento se construyeron los pares de electrodos en dimensiones mayores, pero guardando las proporciones del modelo original. El método experimental utilizado se basó en la construcción de las diferentes partes de electrodos que modelan geométricamente en 2D las partes de la columna aceleradora (figura 21).

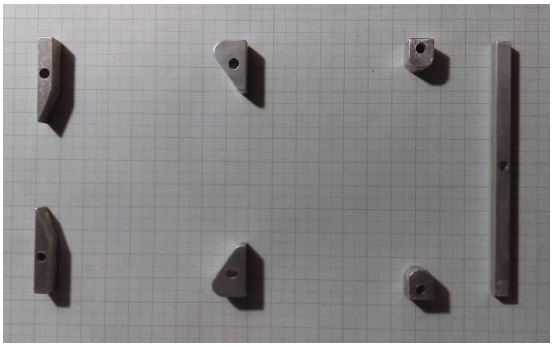


Figura 21. Ubicación de los electrodos sobre la hoja de acetato con 6.000 puntos. Fuente: elaboración propia

Los electrodos se fijaron con pegamento especial sobre la lámina de acetato y se introduce todo el sistema dentro de una cubeta de vidrio.

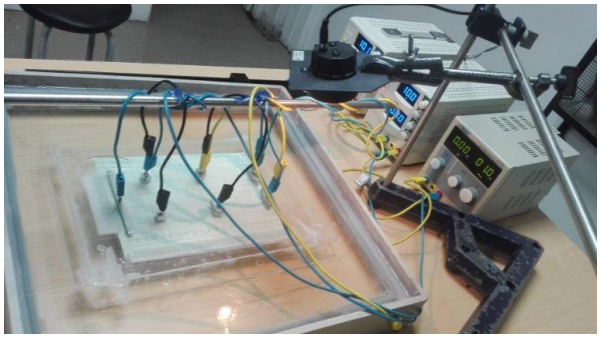


Figura 22. Montaje experimental "Laboratorios de física Universidad Distrital". Fuente: elaboración propia

Cada uno de los electrodos está sometido a la acción de un voltaje los cuales están referidos al electrodo del plasma. Los valores seleccionados fueron: 100 kV para la extracción, 200 kV para la aceleración y 190 kV para la supresión. Así para el desarrollo de la práctica experimental

y la toma de datos se genera un circuito que nos representa una escala disminuida de nuestro sistema de aceleración. Tres fuentes de voltaje simulan las tres regiones de la columna aceleradora (ver figura 22). Se midió la tensión entre el electrodo plasma y cada punto de la matriz, cada punto requiere esperar un tiempo (10 s aproximadamente) para lograr una relativa estabilidad en la medición. Se obtuvo una matriz V(x,y) (ver figura 23), que establece los diferentes valores de potencial a lo largo de la columna. La matriz de datos obtenida se graficó en MATLAB R2020a.

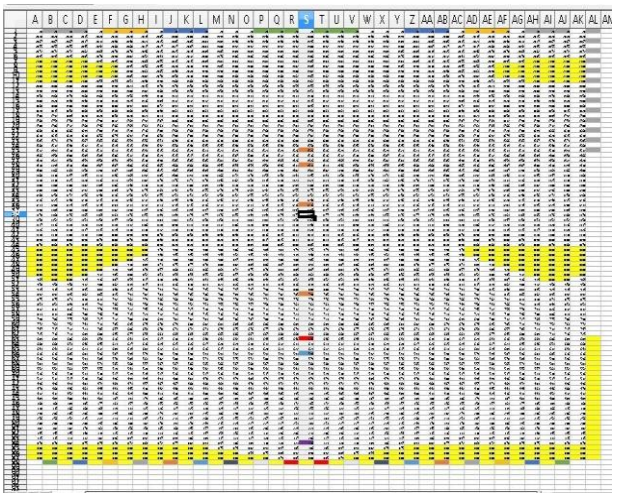


Figura 23. Matriz V(x,y) que establece los diferentes valores de potencial a lo largo de la columna son 6000 mil datos tomados. Fuente: elaboración propia.

4. Resultados y discusiones

Simulación Computacional con MATLAB R2020a

MatLab® (abreviatura de *MATrix LABoratory*, «laboratorio de matrices») es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes. MATLAB combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices. La matriz de datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio se utiliza para generar distintos tipos de gráficos con el paquete de herramientas de MATLAB R2020 a. La matriz de los datos se utiliza para obtener las líneas equipotenciales, vectores de campo, líneas de campo eléctrico, para finalmente describir las trayectorias de los iones dentro de la bandeja electrolítica.

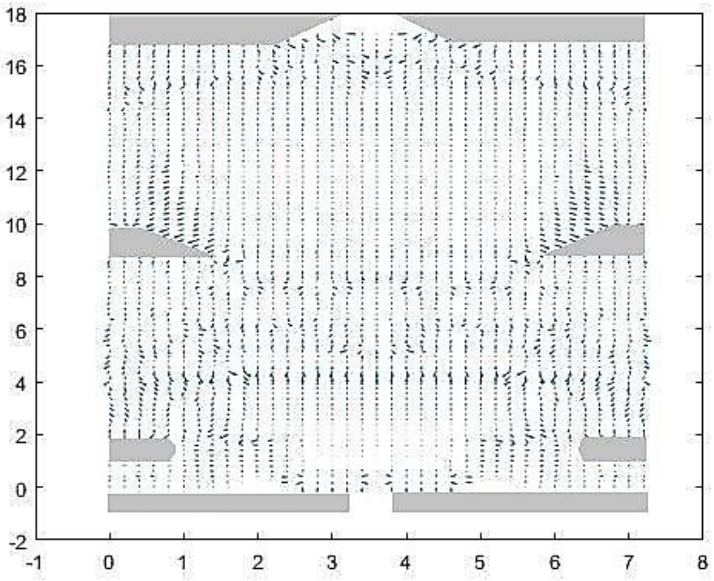


Figura 24. Simulación computacional del campo vectorial. Fuente: elaboración propia

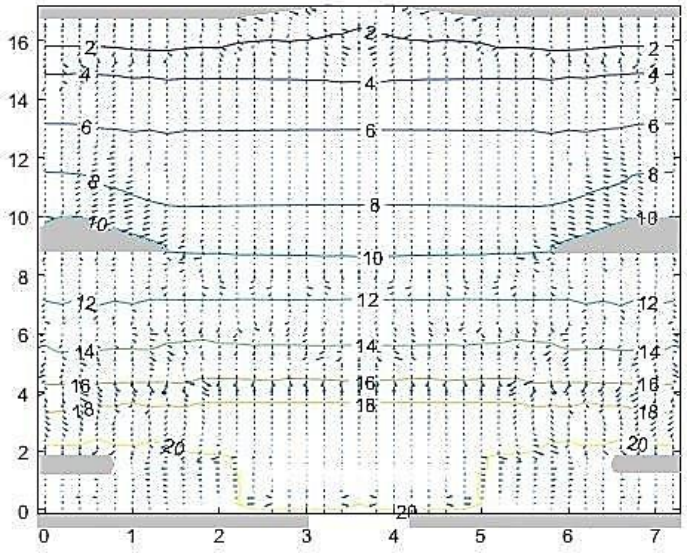


Figura 25. Simulación computacional de líneas equipotenciales y vectores de campo. Fuente: elaboración propia

Las líneas equipotenciales son las líneas de contorno que trazan y que pasan por puntos que tienen el mismo potencial eléctrico. Como se puede observar en la figura 25, las líneas equipotenciales siempre son perpendiculares a los vectores de campo eléctrico.

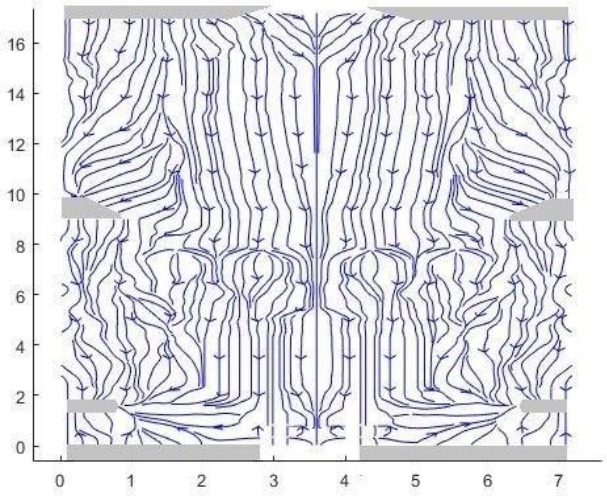


Figura 26. Líneas de campo eléctrico generadas dentro de la columna aceleradora. Fuente: elaboración propia.

En la figura 26 se observan las líneas de campo simuladas dentro de la columna aceleradora, los electrodos seleccionados y construidos se encuentran con color gris.

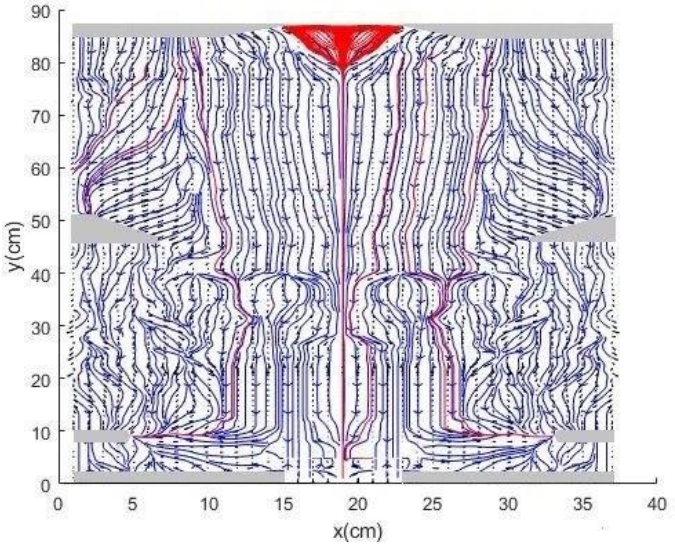


Figura 27. trayectorias de los iones y líneas de campo generadas dentro de la columna aceleradora "no focalizada". Fuente: elaboración propia

La simulación de la figura 27, nos permite detallar las trayectorias de algunas partículas que no logran ser focalizadas y por lo tanto no entran al haz iónico, se observa claramente que las partículas que no se focalizan se dirigen sobre las líneas de campo eléctrico hacia los electrodos más próximos. En este caso la mayoría se dirigen al electrodo de saturación.

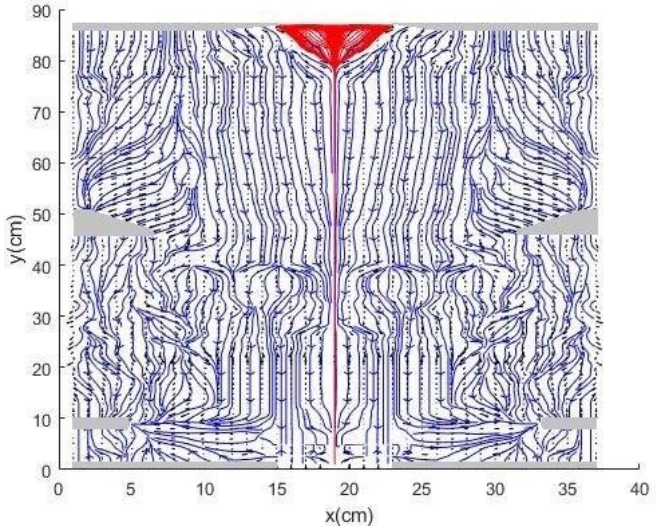


Figura 28. Trayectorias de los iones y líneas de campo generadas dentro de la columna aceleradora " focalizadas". Fuente: elaboración propia

Es importante contar con una simulación para visualizar el rango donde pueden encontrarse los iones para que puedan ser focalizados eficazmente y detallar en qué lugares de la bandeja electrolítica estos se salen de la línea de acción. En la figura 28, se observa la simulación de las trayectorias focalizadas de los iones acelerados en la columna completa. Como se puede observar, se encuentran los siete electrodos planteados en nuestra hipótesis, alrededor de cada uno de ellos se presentan las líneas equipotenciales y perpendicularmente a estas, los vectores de campo eléctrico E.

Descripción del movimiento de un protón en la columna aceleradora

Un campo eléctrico ejercerá una fuerza sobre una partícula de carga dada por:

$$\vec{F}_e = \vec{E}q \qquad (1)$$

Una partícula de masa m y carga q que se coloca en reposo en un campo eléctrico uniforme y se libera, describe un movimiento que se asemeja al de un cuerpo que cae en el campo gravitacional terrestre. La aceleración (constante) está dada por:

$$a = \frac{\vec{E}q}{m} \qquad (2)$$

La trayectoria, la velocidad, la aceleración de las partículas cargadas, se determinaron a partir del desarrollo de las ecuaciones de movimiento en combinación con la aceleración en función del campo eléctrico [23].

$$X_f = \left(\frac{qE}{2m}\right)\left(t^2\right) \qquad (3)$$

$$V_f = V_o + \left(\frac{qE}{m}\right)\left(t\right) \qquad (4)$$

$$K = \tfrac{1}{2}m(V_o^2 + (a^2)(t^2)) \qquad (5)$$

$$A_p = \frac{2(X_f)}{t^2} \qquad (6)$$

En total son 3 zonas en la columna donde las partículas son interceptadas por el campo; zona de extracción, zona de aceleración y la zona de saturación. En estas zonas las partículas presentan cambios en su velocidad debido al campo eléctrico que se genera entre los

electrodos, en este artículo se presentan las gráficas en la primera zona o la llamada zona de extracción, donde se describe distancia recorrida, velocidad, aceleración y energía cinética de la partícula; teniendo en cuenta que el sistema se comporta como un sistema de placas paralelas.

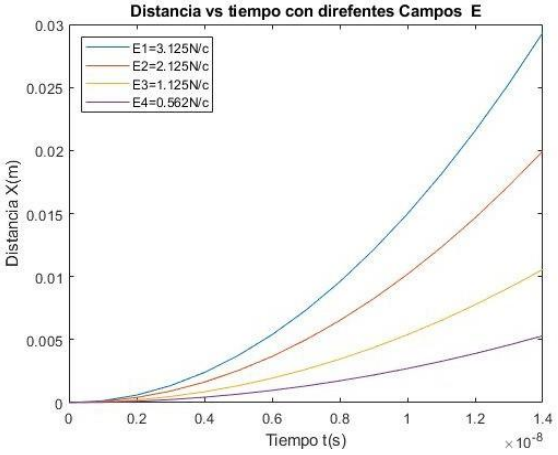


Figura 29. Distancia vs tiempo en la zona de extracción con una distancia de 32 mm entre los dos primeros electrodos. Fuente: elaboración propia.

Al observar la figura 29. podemos decir que entre mayor es el campo eléctrico E aplicado a los protones en un tiempo determinado, estos recorren mayores distancias. la pendiente de la gráfica está cambiando lo que indica que aumenta su velocidad. Con un campo eléctrico de $E_1 = 3{,}125\frac{N}{}$ recorren una distancia de 32 mm en un tiempo de 14,629 ns.

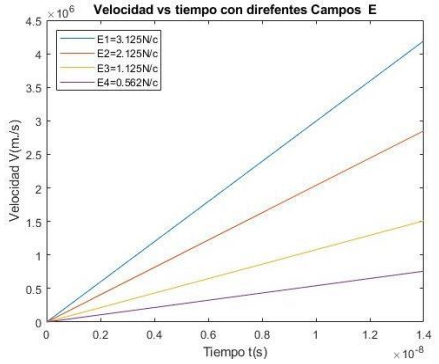


Figura 30. Velocidad vs tiempo en la zona de extracción. Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la velocidad inicial del protón en la ranura del electrodo plasma es igual a cero, podemos utilizar las leyes de la cinemática si términos relativistas y obtener la figura 30. donde se observa claramente que a medida que se utiliza un campo eléctrico mayor entre los electrodos, se logra obtener una mayor velocidad de los protones cuando estos atraviesan la zona de extracción.

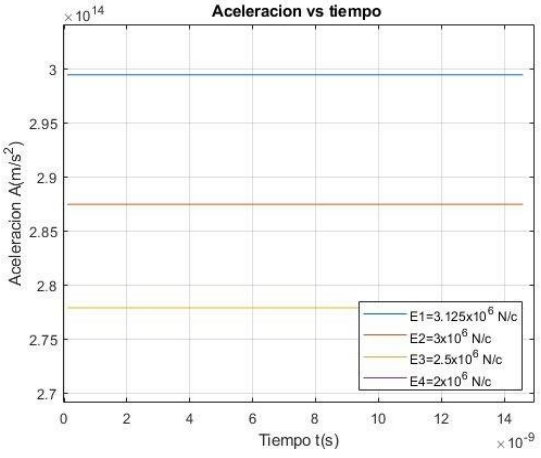


Figura 31. Aceleración vs tiempo en la zona de extracción. Fuente: elaboración propia.

La figura 31 aceleración-tiempo (*a-t*) del movimiento de los deuterones en la columna muestra que la aceleración permanece constante a lo largo del tiempo. Esta integral indefinida requiere una constante integración, pero en este caso físico, la constante de integración tiene un significado bien definido y se puede determinar cómo las condiciones iniciales del movimiento. Note que si establece t=0, entonces v = v_0, el valor de la velocidad inicial que es igual a cero en la boquilla del electrodo plasma.

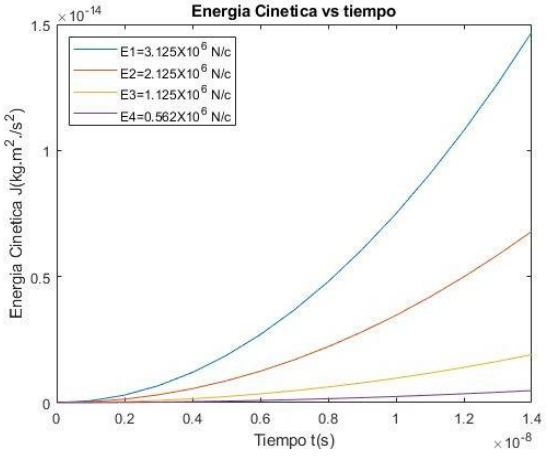


Figura 32. Energía cinética vs tiempo en la zona de extracción. Fuente: elaboración propia.

La velocidad que adquieren los protones en la columna es directamente proporcional al campo eléctrico generado por los electrodos al ser estos conectados a una fuente de voltaje con 100 Kv entre el electrodo plasma y el electrodo extracción. Observemos que con un campo eléctrico E_1

de $3{,}125x10^{6}\frac{N}{C}$ las partículas adquieren una energía cinética de $E_{k1} = 1{,}6020x10^{-14} Julios$. Pero si disminuimos el campo la energía cinética disminuye, un pequeño cambio de valor en el campo eléctrico conlleva a un gran cambio de velocidades de los protones, figura 32.

Los resultados obtenidos para un protón que se sitúe dentro de la columna aceleradora ver tabla 1.

Tabla 1. Descripción del movimiento para el protón en la zona de extracción

Campo eléctrico	$E_3 = 3{,}1250x10^{6}\frac{N}{C}$
Distancia recorrida	$x_3 = 32\ mm$
Velocidad inicial	$V_o = 0\frac{m}{s}$
Velocidad final	$V_f = 4{,}3775x10^{6}\frac{m}{s}$
Aceleración	$a_3 = 2{,}9942\ x10^{14}\frac{m}{s^2}$
Energía cinética	$K_3 = 1{,}6020x10^{-14} Julios$
Masa del protón	$m_p = 1{,}672\ x10^{-27} kg$
Tiempo empleado	$t = 14{,}629\ x10^{-9} s$
Voltaje aplicado entre electrodos	$u = 100\ kv$

Fuente: elaboración propia

Se han resumido todos los valores encontrados para un protón en la zona de extracción con las condiciones dadas a nuestra columna aceleradora seleccionada.

Comparación de la simulación de MatLab R2020® con el programa de Ibsimu y IGUN.

Comparación de gráficas obtenidas con simulaciones de las tesis de la universidad javeriana y la tesis de la universidad de Berkeley, detallando específicamente la zona de extracción para el análisis de meniscos y trayectorias, utilizando las condiciones normales típicas de una fuente de radiofrecuencia, figura 33.

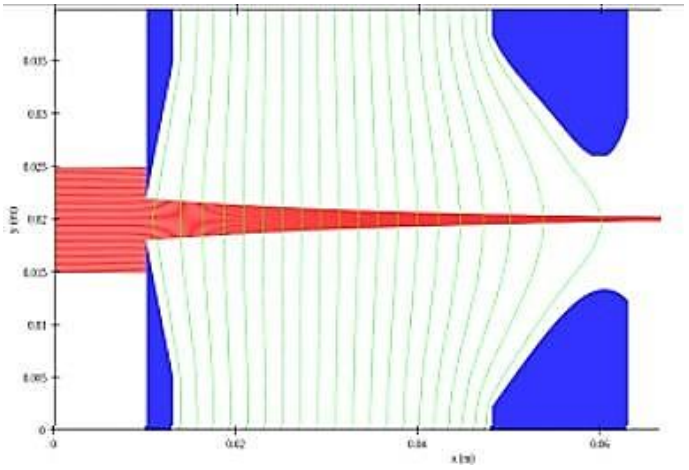


Figura 33. Simulación obtenida en la tesis de Maestría "Evaluación Preliminar de la Aceleración de D en un Generador de Neutrones D-D Compacto de Alto Flujo. "Universidad Javeriana", [21].

Simulación de las trayectorias de partículas en la columna aceleradora en la zona de extracción para un voltaje de -100 Kv con una distancia de separación de 45 mm entre los dos primeros electrodos.

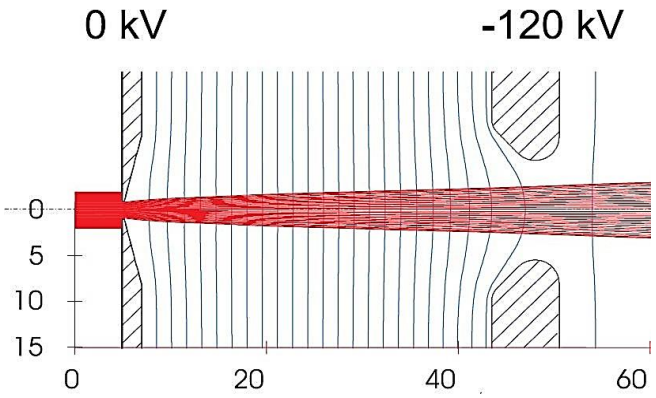


Figura 34. Simulación obtenida en la tesis de Doctorado "Development of High-Intensity D-D and D-T Neutron Sources and Neutron Filters for Medical and Industrial Applications" . Jerome Verbeke, [20].

Se puede observar en la figura 34, la simulación de las trayectorias de las partículas en la zona de extracción, el electrodo de extracción se encuentra con un voltaje de -120 Kv con una distancia de separación de 42 mm entre el electrodo plasma y electrodo extracción, simulación desarrollada con el código IGUN. Esta es solo una de las simulaciones que presenta la tesis LBLN pero solo se muestra esta debido a que son los voltajes más cercanos a la columna seleccionada y estudiada en este trabajo.

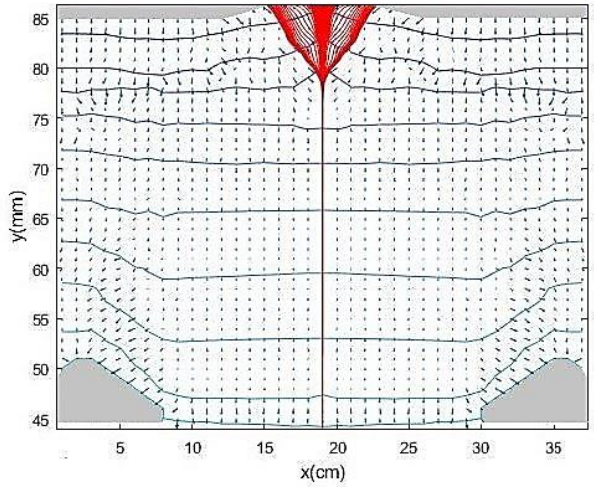


Figura 35. Simulación obtenida en la tesis de Maestría "Diseño preliminar de un prototipo de un acelerador de iones ligeros" Columna seleccionada y estudiada es esta tesis de maestría. Fuente: elaboración propia.

La simulación desarrollada con MatLab R2020, ver figura 35, muestra la simulación de las trayectorias de los protones en la zona de extracción, para un voltaje de -100 Kv y con una distancia de separación de 32 mm entre el electrodo plasma y electrodo extracción, esta es la simulación obtenida con los datos tomados en el laboratorio de física de la universidad distrital sede Macarena A, datos obtenidos del montaje experimental con la bandeja electrolítica y los electrodos debidamente seleccionados y construidos. Si se observan detalladamente las 3 figuras anteriores, puede verse claramente que las líneas equipotenciales generadas dentro de la columna aceleradora son muy parecidas, alrededor de los electrodos se generan estas líneas que rodean y toman la forma de contorno de las figuras geométricas de los electrodos y se observan que los vectores de campo son perpendiculares a estas líneas generado los cambios

en las trayectorias en las partículas tratadas. Finalmente se detalla que en las tres simulaciones se logra focalizar las partículas de tal manera que se genera un haz partículas con una dirección estable.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se simularon las geometrías de los electrodos seleccionados a una escala mayor ×10, los potenciales utilizados en la fase de toma de medidas son 1 a 10 de voltaje y las trayectorias propuestas en el artıculo de LBNL, [20].

Los datos obtenidos para la configuración simulada en el presente trabajo corresponden con la columna aceleradora modelada en [20] y [21]. El Software utilizado fue IGUN y Ibsimu mientras que en este trabajo se utilizó MatLab R2020® a y Solid Edge 2020 f.

Se diseñó y se construyó la bandeja electrolítica y los electrodos para la toma de datos y la validación del código con MatLab R2020® a, como método para simular la trayectoria de los iones en la bandeja electrolítica. Dicha validación se dio en dos partes: primero, comparándola con la columna aceleradora propuesta en [21] y segundo, mediante un procedimiento experimental y toma de datos.

La columna aceleradora lineal estudiada se compone de cuatro electrodos: plasma, extracción, aceleración y saturación. La columna consta de tres regiones donde se aumenta la velocidad de los iones, zona de extracción, zona de aceleración y zona de saturación El sistema puede

extraer iones cargados positivos, negativos, protones hadrones, iones de carbono y iones de helio, según el ajuste del campo eléctrico y la geometría de los electrodos. Los parámetros examinados, es decir, el voltaje aplicado y la distancia de separación, se variaron para estudiar su efecto sobre la estructura de la columna aceleradora de iones.

Se utilizó el código MatLab® para observar el comportamiento del haz de iones al variar el kilovoltaje de extracción y la distancia entre electrodo plasma y extracción, así en la simulación se observó que la focalización del haz disminuye al aumentar la distancia de separación entre los dos primeros electrodos. Cada distancia de separación y voltaje aplicado tiene una condición de extracción de haz óptima.

La simulación de las trayectorias de los iones en la columna nos permite detallar el rango o la zona donde las líneas de campo generadas en el sistema quedan fuera de la línea de acción de las partículas y no las pueden focalizar.

La simulación de las trayectorias de los iones muestra una distribución de haz estable y una calidad de haz mejorada al tener un diámetro adecuado en la boquilla de la fuente de iones

Se encontraron los datos numéricos de la caracterización del movimiento para un protón en la primera zona de extracción con un voltaje de 100 kv y una separación de 32mm con respecto al siguiente electrodo.

Referencias

[1] Simulation Study on Duoplasmatron With Optimization of Ion Beam Extraction System S. Park and Y. Kim. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 45, NO. 6, JUNE 2017 955.

[2] Aceleradores de partículas: Modelos para su diseño y la dinámica del haz MODELIZACIÓN APLICADA A LA INGENIERÍA. R. Strangis. CYCLOTOPE, Houston, Texas, Estados Unidos. Junio 2011.

[3] Presente y futuro de la implantación iónica: se describe la naturaleza, características, ventajas y desventajas de los tratamientos de superficie por implantación iónica; además el actual estado de desarrollo de esta tecnología, sus aplicaciones y las previsiones de su evolución en los próximos años. T. Rodríguez. 1998.

[4] IMPLANTACIÓN IÓNICA. H. J. Dulcé Moreno, V. D. Dougar-Jabon y P. A. Tsygankov. Universidad Francisco de Paula Santander, A.A.1055 Cúcuta, Colombia, Universidad Industrial de Santander, A.A.678 Bucaramanga, Colombia, Moscow Bauman State Technical University, Moscow, Russia. 2016.

[5] Modificación superficial de un acero AISI SAE 1045 mediante la implantación de iones de nitrógeno y titanio. D. V. Salinas, D. Y. Peña y L. F. Chinchilla. Universidad Industrial de Santander UIS. Universidad Pontificia Bolivariana UPB. Julio 2011.

[6] Microcavity engineering by plasma immersion ion implantation, Materials Chemistry and Physics. P. K. Chu and N. W. Cheung. 57, 1998, 1-16.

[7] A review of recent developments in ion implantation for metallurgical application. Se realiza este trabajo o proyecto con el objetivo de identificar oportunidades para la aplicación industrial de la implantación iónica. R. Hutchings. 1994.

[8] Experimental investigation on corrosion and hardness of ion implanted AISI 316L stainless steel. Materials & design technology. V. Muthukumaran. 2010.

[9] Una mirada a los medios para diagnóstico por imágenes desde la educación médica. L. Esquivel Sosa, Y. Fleites García y Y. Jiménez González. EDUMECENTRO 2018;10(1): ISSN 2077-2874 RNPS 2234 Santa Clara ene.-mar.

[10] La revolución científico-técnica y su impacto en las ciencias médicas. M. Hernández Pino. La Habana: Universidad Virtual de Salud Manuel Fajardo. 6 Sep 2016.

[11] Imágenes Médicas: adquisición, análisis, procesamiento e interpretación. G. Passariello y F. Mora. Eds. Venezuela: Equinoccio, Ediciones de la Universidad Simón Bolívar;1995.

[12] IMÁGENES DIAGNÓSTICAS: CONCEPTOS Y GENERALIDADES DIAGNOSTIC IMAGES: CONCEPTS AND GENERALITIES I. R. Raudales Díaz. Rev. Fac. Cienc. Méd. Enero - Junio 2014.

[13] Getting started in clinical radiology from image to diagnosis. G. W. Eastman, C. Wald and J. Crossin. Germany: Thieme; 2005.

[14] «Organización Mundial de la Salud,» 1 febrero 2018. [En línea]. Available: http://www.who.int/es/newsroom/fact-sheets/detail/cancer.

[15] El Cáncer. J. G. de la Garza Salazar y P. Juárez Sánchez. Universidad Autónoma de Nuevo León. Centro, Monterrey, Nuevo León, México, C.P. 64000 Primera edición, 2014.

[16] Hadronterapia. J. L. Herranz, E. Herraiz, S. Vicente, J. España, J. L. Cal-Gonzalez y J. M. Udías. Primer Encuentro Complutense para la Divulgación en Física Nuclear y de Partículas [Internet]. gfn; 2008

[17] Proton Therapy: state of the art and clinical applications. I. López Moranchel and P. I. Maurelos Castell, 1). Centro de Formación Profesional San Juan de Dios, GENUD Toledo

Research Group. (Universidad de Castilla-La Mancha). REVISTA OFICIAL DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ENFERMERÍA ONCOLÓGICA. 2019.

[18] Proton Therapy. A. R. Smith. Med Phys. 26 de enero de 2009 [citado 20 de abril de 2019];36(2):556-68.

[19] The risk of radiation-induced second cancers in the high to medium dose region: a comparison between passive and scanned proton therapy, IMRT and VMAT for pediatric patients with brain tumors. M. Moteabbed, T. I. Yock, H. Paganetti. Phys Medicina Biol [Internet]. 21 de junio de 2014 [citado 20 de abril de 2019];59(12):2883-99. D.

[20] A Sealed-Accelerator-Tube Neutron Generator for Boron Neutron Capture Therapy Application. K. N. Leung, Y. Lee, J. M. Verbeke, J. Vujic, M. D. Williams, L. K. Wu, N. Zahir. Lawrence Berkeley National Laboratory University of California Berkeley Berkeley USA Nuclear Engineering Department. La jolla, CA septiembre 1998.

[21] Evaluación Preliminar de la Aceleración de D en un Generador de Neutrones D-D Compacto de Alto Flujo. J. A. Cifuentes Parada, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, Departamento de Física Bogotá D.C., Colombia 2019.

[22] Physics. D. Halliday and R. Resnick. Wiley; Part 2 edition, 1978.

[23] Educational Applets:

https://www.falstad.com/vector2de, https://www.falstad.com/vector3de

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

CAPTURE SYSTEM OF HORIZONTAL BICYCLES' KINETIC VARIABLES FOR SIMULATION:

Possibility of interaction with a computer to generate simulators for serious games

Sistema de captura de variables cinéticas de bicicletas horizontales para simulación:

Posibilidad de interacción con computador para generar simuladores de juegos serios

***Santiago Caro*[1]*, Juan Pablo Vasco*[2]*, Daniel Duque*[3]*, Sofia C. Henao*[4]**

***Jonathan Gallego*[5]**

Abstract

In this study, a system has been developed that measures the speed, the turning angle, and the braking force in bicycles or tricycles in static mode; it also electromechanically controlls the resistance to pedaling, opening the possibility of using the system in conjunction with a virtual reality simulator for computer, to offer a new rehabilitation tool for lower limb amputees that use

[1] Bioengineer, Universidad de Antioquia, Colombia. Student: Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: santiago.caroz@udea.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2158-1911

[2] Bioengineer, Universidad de Antioquia, Colombia. Student: Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: juanp.vasco@udea.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7284-178X

[3] Bioengineer, Universidad de Antioquia, Colombia. Student: Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: daniel.duqueu@udea.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7924-8030

[4] Mechanical Engineer, Universidad Nacional de Colombia, Colombia; MBA, Universidad EAFIT and HHL – Handleshochschule Leipzig, Colombia and Germany PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Assistant Professor: Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: sofia.henao@udea.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2146-9230

[5] Bioengineer, Universidad de Antioquia, Colombia. Ms.C Biomedical Engineering, RWTH Aachen, Germany. Ms.C Bioengineering, Trinity College Dublin, Ireland. Assistant Professor: Universidad de Antioquia, Colombia. E-mail: jonathan.gallego@udea.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9737-6850

prostheses. The study was divided into two stages. The first was a proof of concept, implemented on a bicycle, evaluating the system requirements, the possible solutions, the necessary couplings for the selected sensors and actuators, to test the effectiveness of its operation. In the second stage, the system was coupled to a horizontal three-wheeled bicycle with new adjustments and improvements to evaluate the system's performance. The sensors and actuators implemented, together with the appropriate coupling systems, worked as expected, so that, a new rehabilitation alternative for amputees is generated based on an appropriate communication protocol with a simulator.

Keywords: Instrumented bicycle, Capture system Photo-interrupter, Lineal Potentiometer, Raspberry Pi, Rehabilitation.

Resumen

En este estudio se ha desarrollado un sistema que mide la velocidad, el ángulo de giro y la fuerza de frenado en bicicletas o triciclos en modo estático, controlando la resistencia al pedaleo electromecánicamente, abriendo la posibilidad de usar el sistema en conjunto con un simulador de realidad virtual para computador, con el objetivo de ofrecer una nueva herramienta de rehabilitación para amputados de miembro inferior que usan prótesis. Se dividió el estudio en dos etapas, la primera fue una prueba de concepto implementada sobre una bicicleta, evaluando los requerimientos del sistema, las posibles soluciones, los acoples necesarios para los sensores y actuadores seleccionados con el fin de evaluar la efectividad

del funcionamiento. En la segunda etapa se acopló el sistema a una bicicleta horizontal de tres ruedas mediante ajustes y mejoras, para finalmente evaluar el desempeño del sistema. Los sensores y actuadores implementados, en conjunto con los sistemas de acople apropiados, los cuales funcionaron de acuerdo con lo esperado, de manera que, con un protocolo de comunicación apropiado con un simulador, se genera una nueva alternativa de rehabilitación para amputados.

Palabras Clave: Bicicleta instrumentada, Foto-interruptor, Potenciómetro lineal, sistema de captura, Raspberry Pi, Rehabilitación.

1. Introducción

A nivel mundial se estima que diariamente se realizan alrededor de 2.800 amputaciones [1], sus principales causas están relacionadas con enfermedades vasculares, de origen congénito, traumatismos o cáncer, [2]. En Latinoamérica, se estima que entre el 0,5-1% de la población cuentan con esta condición, [3]. En cuanto a la amputación de miembro inferior, las principales causas son las mismas que se presentan a nivel mundial, sin embargo, en Colombia, los accidentes de tránsito y el conflicto armado también tienen gran influencia, [4].

Las prótesis son el dispositivo que mejores resultados ha mostrado para que el amputado recupere su vida cotidiana; sin embargo, se presentan diversos factores físicos y psicológicos por los cuales la persona deja de usarla, [5], [6]. Los anteriores problemas se denominan problemas de adherencia a la prótesis y, junto con el sedentarismo de los amputados,

conforman los motivos por los cuales el Grupo de Investigación GIBIC, de la Universidad de Antioquia, propone utilizar una bicicleta horizontal de tres llantas (*i.e.* triciclo) con el objetivo de realizar el entrenamiento y rehabilitación de pacientes con amputación de miembro inferior transtibial o transfemoral. Se espera que este sea un posible mecanismo para mejorar la adherencia del paciente a su prótesis y aumentar la actividad física desde un espacio controlado, estático y en interiores, al implementar un juego serio de realidad virtual.

Se ha encontrado que, el uso de bicicletas o triciclos para aumentar el nivel de actividad física y mejorar la adherencia aumentan la fuerza muscular del miembro inferior sano y el amputado, con bajo impacto sobre la pierna amputada, ya que se deposita la mayoría del peso corporal sobre la estructura del vehículo, siendo una excelente herramienta de rehabilitación, [7].

Los juegos serios con realidad virtual han mostrado una efectividad sobresaliente en procesos de rehabilitación cognitiva y motora, [8]. Hay estudios que han implementado entrenamientos de marcha mediante simuladores virtuales, mejorando la cinemática de marcha en la pelvis y la cadera, reduciendo el consumo de oxígeno y aumentando la simetría vertical de la fuerza de reacción del suelo, [9].

El presente estudio se dividido en dos etapas, la primera etapa se denomina prueba de concepto y evalúa en primera instancia los requerimientos de un sistema que permita adquirir variables cinemáticas de una bicicleta o triciclo para poder interactuar a futuro con un computador, para luego decidir entre diferentes opciones de sensores y actuadores con el fin de cumplir los requerimientos; en esta etapa se usó una bicicleta convencional y acoples

apropiados para el ajuste de los sensores y actuadores. La segunda etapa implementó el triciclo y nuevos acoples. En ambas etapas se realizaron pruebas y se analizó el comportamiento de cada elemento del sistema y se observó que el sistema diseñado cumple con el objetivo de capturar las señales de interés y de controlar el esfuerzo sobre el pedaleo.

2. Materiales y Metodología

Este estudio se dividió en dos etapas. En la primera se diseñó y evaluó un prototipo de sistema de captura y control de variables cinemáticas sobre una bicicleta convencional. Luego se avanzó hacia la segunda etapa donde se mejoró el sistema y se ajustó a una bicicleta horizontal de tres llantas, realizando cambios necesarios y mejoras factibles.

2.1. Requerimientos del sistema

Antes de comenzar las etapas de diseño se realizó un análisis de los requerimientos de un sistema capaz adquirir variables cinemáticas de una bicicleta o triciclo para poder interactuar con un sistema de realidad virtual para computador de manera que la experiencia de la inmersión pueda ser similar a la conducción de dichos vehículos en un campo abierto. A continuación, se presentan de las variables cinéticas que deben ser capturadas.

2.1.1. Medición de velocidad de bicicleta sin desplazamiento

Se necesita medir la velocidad de la llanta trasera mientras se pedalea para que desde el computador se pueda simular adecuadamente la velocidad del vehículo virtual. La llanta

trasera estará sujeta a un dispositivo de fijación con rodillo, de esfuerzo regulable, que permitirá el giro de la llanta sin que se genere desplazamiento alguno.

2.1.2. Medición de ángulo de giro del manubrio

El simulador permitirá al usuario decidir la dirección a la cual dirigirse en el entorno virtual, por lo tanto, es necesario medir el ángulo de giro y dirección del manubrio real.

2.1.3. Medición de fuerza de frenado

El simulador debe detectar la acción y magnitud de fuerza de frenado de la bicicleta para evitar falsos movimientos simulados cuando debería estar quieto o disminuyendo la velocidad. Esta etapa es necesaria debido a que el sensor de velocidad tiene una histéresis asociada y disminuye la sensación de respuesta inmediatamente después del frenado.

2.1.4. Control de resistencia al pedaleo según pendiente

La simulación tendrá rutas con diferentes pendientes. En este artículo se propone que las pendientes sean simuladas en el entorno real mediante la regulación de esfuerzo sobre el rodillo en el que está montado la bicicleta, por lo cual es preciso controlar la resistencia que ofrece el rodillo de acuerdo con el grado de inclinación de la pendiente en que se encuentre la simulación.

2.1.5. Sistema de medición y control

Con el fin de restarle carga al computador que estará realizando el procesamiento gráfico del simulador es necesario que exista un sistema externo capaz de adquirir y procesar las señales

de los sensores, controlar los actuadores para la regulación de esfuerzo y servir de puente de comunicación entre el simulador con la bicicleta.

2.2. Materiales Etapa 1

Se utilizó una bicicleta convencional de dos ruedas tipo montaña con diferentes velocidades. Respecto al dispositivo que garantizó la fijación de la bicicleta, se eligió un rodillo con regulador de esfuerzos de acción y control mecánico con referencia TL110, fabricado y comercializado por la empresa colombiana Prodalca S.A, [10]. Para la medición de velocidad en una bicicleta se han utilizado diferentes métodos como la medición por GPS, el uso de un dínamo y el sensor de efecto Hall, [11]. El primero de estos fue descartado inmediatamente debido a que la bicicleta no se desplazaría. El segundo fue descartado debido a la complejidad que se presentaría al acoplar todos los elementos necesarios además del dínamo, tales como un rectificador de onda y un optoacoplador. La tercera opción fue elegida por su sencillez, economía y precisión. Se prefirió un sensor de efecto Hall digital A3144 por su facilidad en la implementación, programación y debido a que no se necesitan valores específicos de campo magnético sino solamente la detección de su presencia, [12].

En el caso del ángulo de giro del manubrio no se encontraron muchas opciones en la literatura. En un estudio usaron unidades de medición inercial (IMUs) para su detección [13] y en otro, un sistema óptico que constaba de una fuente de luz y una cámara, [11]. La IMU se probó, pero mostró mucha latencia; además, con el manubrio quieto, la IMU arrojaba un valor de

rotación inexistente a velocidad baja pero constante y que precisaba de un procesamiento adicional por software. El sistema óptico se descartó por su complejidad y tamaño. Por lo tanto, se decidió usar un potenciómetro lineal ajustado mecánicamente con el manubrio. Aunque no se encontró ningún registro bibliográfico de dicha implementación, su comportamiento al cambiar de resistencia de forma lineal a medida que hay una rotación fue la clave para su elección.

Para el control de la resistencia según la pendiente de la superficie en el entorno virtual, teniendo en cuenta el sistema mecánico de regulación de esfuerzos del rodillo controlado por una guaya, se implementó un servomotor porque posee gran torque y puede permanecer bloqueado en una posición hasta recibir una señal para ubicarse en otra. Respecto a la medición del frenado, su implementación se realiza en la segunda etapa con el fin de probar el concepto de captura de variables de manera más sencilla inicialmente. El dispositivo usado como sistema de control para la captura, procesamiento y accionamiento de actuadores fue un Arduino UNO, cuyo microcontrolador es un ATMEGA 328p, [14].

2.3. Materiales Etapa 2

En esta etapa se usó una bicicleta horizontal de tres llantas con mayor estabilidad y comodidad por poseer dos llantas delanteras, una trasera y un asiento con espaldar. Dicha bicicleta horizontal cuenta con un motor eléctrico que permite la asistencia del pedaleo que puede ser

útil para personas con alguna discapacidad, [15]. Su funcionamiento estático se garantiza con el mismo elemento de fijación elegido para la primera etapa.

Para la medición de la velocidad se cambió del sensor de efecto Hall por un foto-interruptor con salida digital (TCRT5000). Aunque ambos funcionan con diferentes fenómenos físicos, se utiliza el mismo principio para su implementación en la medición de velocidades. Se realizó este cambio debido a que el motor eléctrico del triciclo puede generar campos electromagnéticos ruidosos que puede interferir con la lectura del sensor de efecto Hall y por lo tanto obtener medidas erróneas de velocidad. Al utilizar el foto-interruptor, la fuente de ruido electromagnético fue descartada.

Debido a los buenos resultados con el potenciómetro lineal para la medición del ángulo de giro, se implementó nuevamente en la segunda etapa. Igualmente, para el control de la resistencia al pedaleo se mantuvo el uso de un servomotor, pero en este caso uno de referencia HS-485HB, de mayor torque.

En esta etapa se decidió incluir el sensor para medir la fuerza de frenado. En la literatura se encontró el uso de un potenciómetro deslizante para este fin, [11]. Sin embargo, se descartó debido a que el triciclo cuenta con un freno de disco y las dimensiones de dicho sistema no permiten el uso del potenciómetro mencionado. Por tal motivo, se procedió a ensayar el uso de un sensor de flexión piezorresistivo ubicado directamente en la palanca de freno, el cual cambia su resistencia a medida que se flexiona.

Finalmente, tras una búsqueda bibliográfica comparativa entre dispositivos, el controlador utilizado fue la Raspberry Pi 4, que además de ser ampliamente usada, se ha mostrado su utilidad en la adquisición de datos de vehículos de tracción humana, [16]. Además, se necesitó de un conversor análogo-digital (ADS1115) de 16 bits porque a diferencia del Arduino, la Raspberry únicamente permite la entrada de señales digitales. Se hizo uso del ADC únicamente para el potenciómetro lineal y el sensor de flexión, ya que sus salidas son analógicas.

2.4. Implementación de sistema

2.4.1. Etapa 1

Se realizó una caracterización del comportamiento de cada sensor, de sus propiedades y limitaciones, encontrando características como: la distancia máxima a la cual el sensor de efecto hall detecta la presencia del campo magnético de un imán de neodimio de 2 cm, el tipo de lógica de salida de este (salida en alto en presencia de campo), la función de transferencia del potenciómetro (ecuación (1)), entre otros.

$$Ángulo\ de\ giro = \frac{Valor_{ADC}+6340}{281} \qquad (1)$$

Con el fin de tener un diseño conceptual antes de proceder a la creación de piezas de acople de los medidores y el actuador, se realizó un diseño 3D del sistema bicicleta-rodillo en el software Autodesk Inventor, sobre el cual se decidió la ubicación de los sensores y se diseñaron las piezas conceptuales de acople. En la se observa la ubicación de dos imanes de

neodimio que son detectados por el sensor de efecto Hall ubicado en la caja acoplada al tirante superior de la bicicleta, garantizando estar dentro del rango de detección del sensor, permitiendo la medición de la velocidad de la llanta trasera, figura 1.

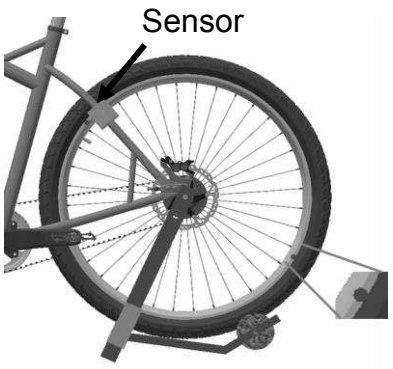


Figura 1. Diseño conceptual en Autodesk Inventor de la ubicación de los imanes para medición indirecta de la velocidad y ubicación del sensor de efecto Hall. Fuente: elaboración propia.

Para el correcto acople del potenciómetro lineal a la bicicleta fue necesario el diseño de un sistema de dos poleas de igual diámetro entre el eje del manubrio y el potenciómetro ubicado justo sobre el tubo superior del marco. La Figura 13 presenta la implementación final del sistema acoplado, observando el ensamble entre bicicleta convencional y el rodillo, así como la ubicación general de los componentes de medición y control, y el detalle de cada uno. Se ubicó el servomotor en el lugar que permite mayor proximidad al sistema mecánico controlado por guaya que regula la resistencia al pedaleo que ofrece el rodillo.

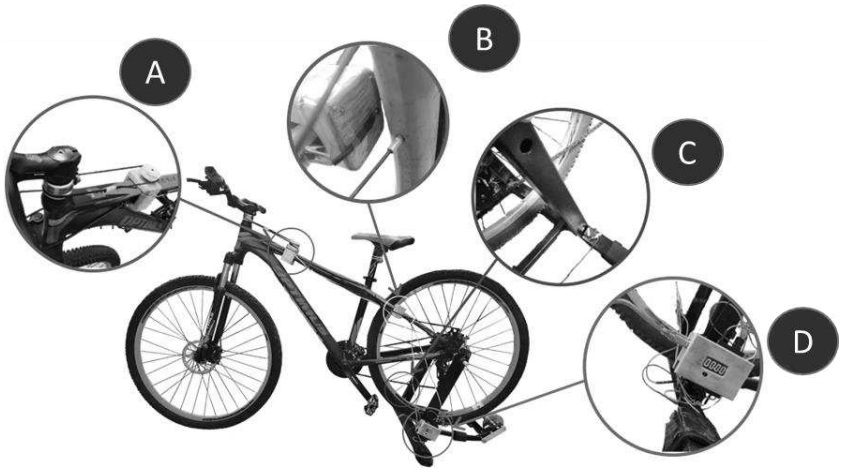


Figura 13. Sistema implementado para captura de variables cinemáticas en bicicleta convencional para funcionamiento estático, con detalles de los sistemas de acople y elementos utilizados (A: Sistema de medición de giro, B: Sensor Hall, C: Servomotor, D: Arduino con display). Fuente: elaboración propia.

El procesamiento de las señales de los sensores para obtener las variables que se requería medir se hizo como se muestra en la Figura .

Se hace lectura de los pulsos detectados por el sensor Hall que denotan el ángulo de giro de la llanta, por lo que por cada pulso se hace referencia a un ángulo recorrido, con este dato y con el radio de la llanta se realiza el cálculo de velocidad cruda. Este dato de velocidad fue promediada con 9 datos de velocidad crudos adicionales mediante la técnica de promedio móvil para obtener la velocidad promedio, [17]. Simultáneamente, se registra el valor del ADC del pin del potenciómetro y se realiza una conversión de ADC a grados mediante la ecuación (1). Los datos obtenidos se muestran en un panel de 7 segmentos. Finalmente, se realizó un sistema de visualización en computador de los datos adquiridos, enviados desde el Arduino,

por medio de comunicación UART. Dicho sistema se creó implementando un código de Python que necesitó principalmente de las librerías PySerial [18] y DrawNow [19].

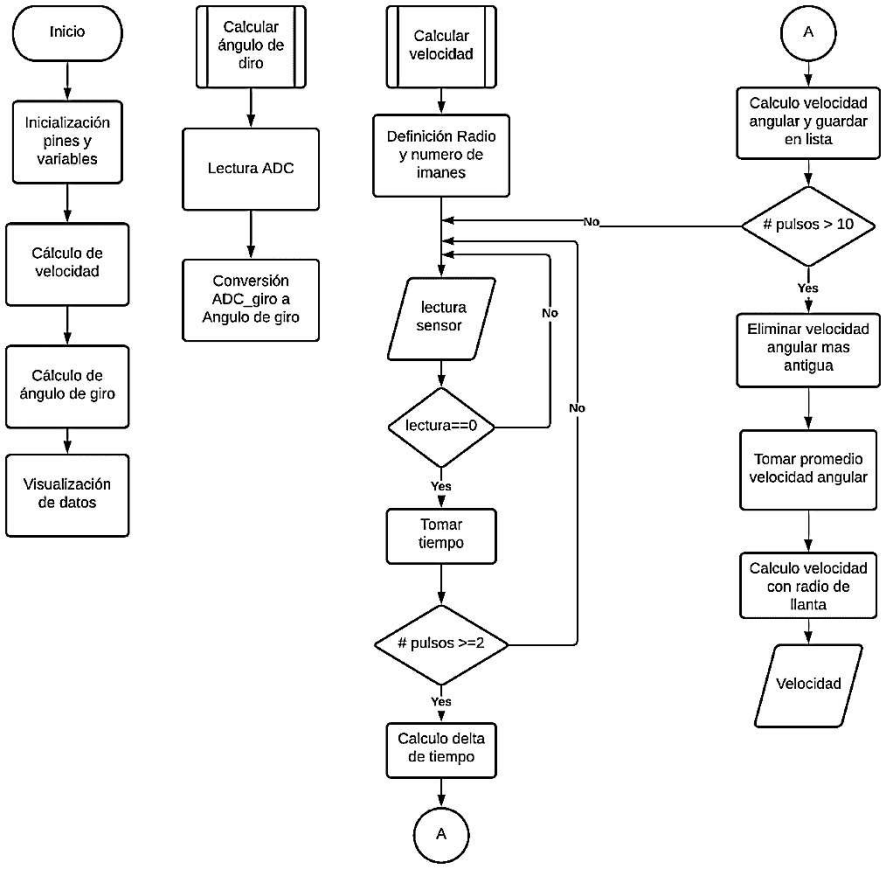


Figura 3. Diagrama de flujo Arduino etapa 1. Fuente: elaboración propia.

2.4.2 Etapa 2

Al igual que en la etapa anterior, se realizó una caracterización de los sensores y otros elementos, detectando así: el tipo de lógica del foto-interruptor, el protocolo de comunicación

para conversión del ADC usando el ADS1115, los rangos del porcentaje de dureza del PWM para controlar el movimiento del servomotor según el nivel de esfuerzo necesario para frenar el rodillo, el funcionamiento del sensor de flexión, entre otros.

En esta etapa se diseñaron nuevas piezas de acople debido al cambio drástico de geometría del vehículo, como el sistema de la dirección; además, la caracterización de sensores como el foto-interruptor implicaban una ubicación diferente. Se construyó un modelo 3D en el Software Autodesk Inventor del sistema triciclo-rodillo sobre el cual se decidió la ubicación de los componentes y se diseñaron sus piezas de acople. Dicho modelo se hizo con las medidas exactas con el fin de obtener los acoples necesarios mediante impresión 3D.

Respecto al potenciómetro, se diseñó el sistema de acople y transmisión del giro que se observa en la Figura 4 (C). Dicho sistema gira la perilla del potenciómetro ejerciendo palanca sobre él por efecto del desplazamiento de la barra de transmisión que existe entre las ruedas. En el caso del servomotor se realizó un acople para anclarlo al dispositivo de fijación (Figura 4(A)). Este acople consta de dos piezas que se unen con tornillos y tiene un espacio destinado al correcto funcionamiento del actuador. Este actuador se controla mediante una señal de PWM cuyo rango de dureza fue caracterizado para que cubra el rango de giro requerido para halar la guaya del sistema mecánico de regulación de esfuerzos desde un punto de resistencia nula hasta el bloqueo máximo al rodamiento.

La Raspberry Pi cuenta con una carcasa acoplada al triciclo en un lugar seguro y de fácil acceso, motivo por el cual se diseñó una pieza cuya ubicación es óptima para no verse afectada por el mecanismo del triciclo y de ruidos electromagnéticos, dicha pieza es asegurada y ensamblada mediante tornillos como se observa en la Figura 44 (B).

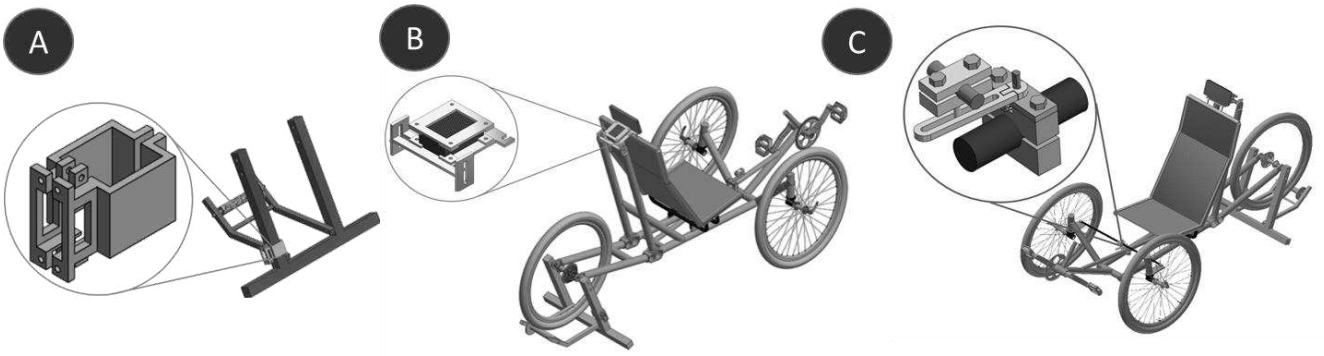


Figura 4. Piezas de acople para el servomotor(A), la Raspberry (B) y el potenciómetro(C). Ubicados en el dispositivo estático y triciclo. Fuente: elaboración propia.

Para el sensor de velocidad con el foto-interruptor que permite detectar reflexión de luz, no fue necesario el diseño de un acople externo debido a que se aprovecharon los agujeros del sistema de frenado del triciclo (freno de disco) los cuales son equidistantes respecto al eje de rotación de la rueda, todos atravesando la superficie metálica reflectante del disco, permitiendo usar el sensor como un encoder [20]. En el caso del sensor de frenado tampoco se necesitó de un acople externo, ya que se ajustó al freno del triciclo de tal forma que se flexiona dependiendo de la fuerza que la persona ejerce al presionar el freno.

Se diseñó un diagrama de conexiones implementando una placa de pruebas. Dicho concepto se observa en la Figura 5, en él se incluye la Raspberry Pi, el servomotor controlado por señal PWM, foto-interruptor, el potenciómetro, el sensor de flexión con su subcircuito de acondicionamiento y el conversor ADC externo ADS1115 de 16 bits que recibe las señales analógicas del sistema, que son enviadas como digitales a la Raspberry Pi usando el protocolo I2C. Toda la alimentación eléctrica del sistema es suministrada por los respectivos pines en la Raspberry Pi, la cual a su vez está alimentada por un adaptador de corriente conectado al tomacorriente.

Para poder realizar el intercambio de información entre un computador (maestro) y la Raspberry (esclavo) se diseñó un protocolo de comunicación (ver Figura 66), en el cual el Maestro le puede enviar al esclavo dos tipos de instrucciones.

La primera instrucción que se puede enviar desde el maestro hacia el esclavo es una *solicitud* de toda la información de las variables cinéticas (Velocidad, ángulo de giro y fuerza de frenado) y el esclavo envía los datos en forma concatenada donde se inicia con una letra que indica la variable que se está enviando (“V” para velocidad, “A” para ángulo y “F” para frenado), seguido del número de dígitos que tiene la variable y finalmente el valor de la variable. El orden de envío es velocidad, ángulo de giro y fuerza de frenado. Al final del último dígito de la última variable se concatena un “/” usado como carácter de terminación de envío de datos.

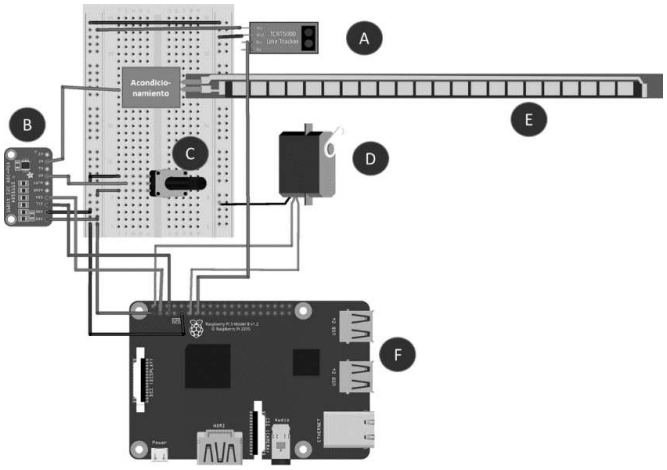


Figura 5. Concepto del diagrama de conexiones del sistema y sus componentes. A) Foto-interruptor, B) Conversor ADC ADS1115, C) Potenciómetro Lineal, D) Servomotor, E) Sensor de flexión, F) Raspberry Pi. Fuente: elaboración propia.

La segunda instrucción es la *modificación de pendiente* representada por la letra “M”. Cuando el esclavo recibe dicha instrucción, se hace lectura de los datos siguientes que corresponden a aumento en el ángulo de la pendiente (o resistencia al pedaleo) que debe ser modificada por la Raspberry, este dato se convierte en un porcentaje de dureza el cual modifica al PWM y este a su vez cambia el ángulo de giro del servomotor para ajustar el esfuerzo realizado sobre el rodillo y de esta manera simular el cambio de pendiente.

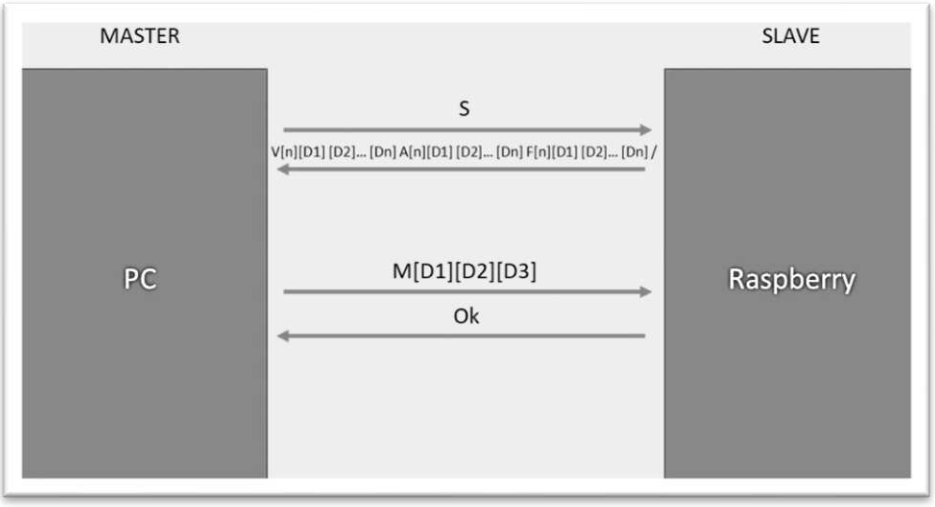


Figura 6. Protocolo de comunicación entre Raspberry y computador. Fuente: elaboración propia.

Con el protocolo de comunicación definido, se diseñó el algoritmo de funcionamiento al interior de la Raspberry (Figura 7) el cual se programó con Python. Lo primero que se hace es la inicialización de los elementos y de los dos tipos de comunicación serial implementados (UART e I2C). Posteriormente, se entra en un ciclo infinito donde la Raspberry está leyendo constantemente el puerto UART esperando a que llegue una de las instrucciones. Cuando llega la instrucción “S”, de inmediato se obtiene la velocidad que se calcula con el mismo principio que se usó en el Arduino. Luego, se pide al ADC que envié el valor ADC correspondientes al giro y a la fuerza de frenado, para finalmente concatenar los valores y enviarlos por comunicación serial.

Finalizadas cualquiera de las dos tareas, la Raspberry continúa leyendo el puerto UART a la espera de una nueva instrucción.

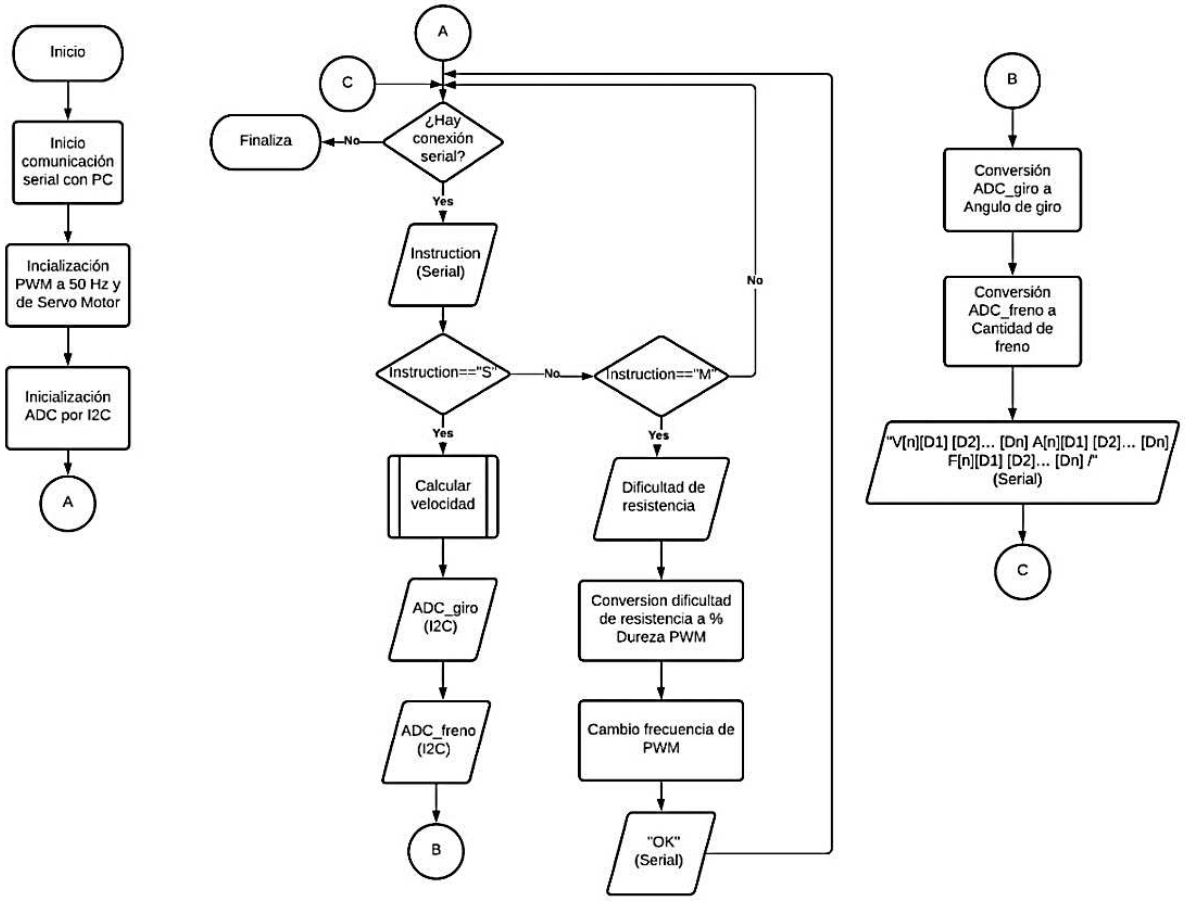


Figura 7. Diagrama de flujo funcionamiento Raspberry en la etapa 2. Fuente: elaboración propia.

3. Resultados y análisis

3.1. Etapa 1

El sensor utilizado para la medición de la velocidad (el sensor de efecto Hall A3144) fue efectivo para la medición indirecta de la velocidad; sin embargo, los imanes deben estar muy cerca para que se pueda detectar el campo magnético. Debido a esto, se tuvo que diseñar una pieza adicional para que el sensor estuviera a una distancia aproximada de 1 cm de los imanes.

El potenciómetro lineal resultó ser un dispositivo demasiado útil para la medición del ángulo de giro del manubrio de la bicicleta a pesar de no estar reportado su uso en la literatura, ya que, al ser un dispositivo mecánico, la resistencia se comporta como una variable continua por lo que no hay resolución mínima y la rotación del manubrio es proporcional a la rotación del potenciómetro. La limitante del sistema de acople es su diseño específico para la bicicleta utilizada en el estudio, lo que afecta su aplicabilidad.

Arduino Uno con sus 16 MHz trabajó lo suficientemente rápido para realizar la toma de datos y cálculo de variables. El inconveniente encontrado se situó en la conexión con Python, puesto que, al ser este un intérprete, el procesamiento de los datos entrantes era muy lento, generando un retardo en la visualización; esto aumentó el tiempo de ejecución del sistema debido al llenado del buffer del serial de Python.

Con las librerías de Arduino implementadas se pudo generar una gráfica que mostró la velocidad y el ángulo de giro en tiempo real, con un retraso de 1 segundo, obteniendo la gráfica

que se puede observar en la Figura 14, se aclara que la gráfica (B) no corresponde a la misma prueba que se observa en la imagen (A).

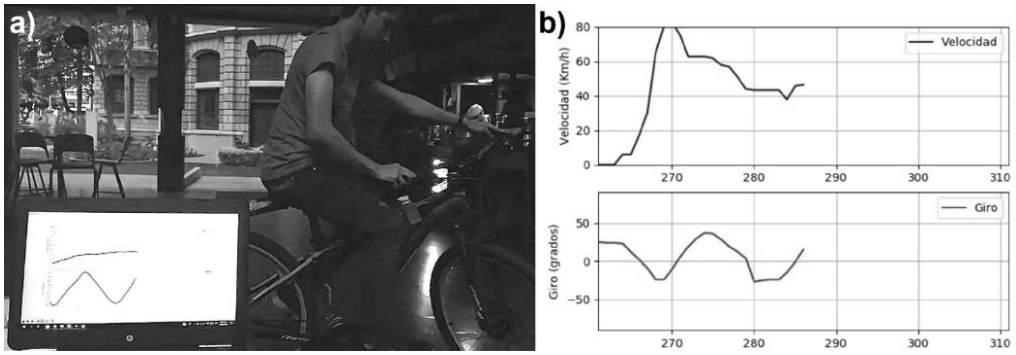


Figura 14. Prueba en tiempo real del simulador (A) y grafica de velocidad y ángulo de giro del manubrio (B). Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se pudo observar que el dispositivo de fijación, con las modificaciones realizadas, cumplía con los requisitos planteados para ser una estación de entrenamiento. La ventaja de este dispositivo es su fácil intervención, dando la posibilidad de un fácil acople del servomotor al sistema de esfuerzo regulable.

3.2. Etapa 2

El foto-interruptor entrega un valor bajo con la presencia de una superficie reflectiva, por lo que se tuvo esto en cuenta en la programación del procesamiento de captura de velocidad. Se halló que el porcentaje de dureza de la señal de PWM, necesario para controlar el servomotor en un rango de 0°-180°, debe variar entre el 1% y el 12%, variando levemente respecto a los valores nominales de dureza asociados a un servomotor, que según la literatura se encuentra

entre 5%-10%. Respecto al potenciómetro como medidor del ángulo de giro se obtuvo el mismo comportamiento exitoso de la etapa 1. Sin embargo, la migración del medidor al triciclo requirió de un sistema completamente diferente de acople para la transmisión del giro de la dirección a la perilla del potenciómetro. Aunque en esta etapa fue necesario implementar un sistema de cuatro barras, se obtuvo el comportamiento esperado. Cabe aclarar que el rango de movimiento con el nuevo sistema de acople se vio disminuido a 100° aproximadamente, mientras que con el sistema de las poleas se alcanzaba un rango de movimiento total de 180° aproximadamente. El rango de giro del triciclo es mucho menor al rango de la bicicleta convencional debido a que en el primero de ellos se limita el rango por un contacto entre las llantas y el asiento del conductor en sus topes máximos.

Con respecto al servomotor, se encontró que el rango de movimiento generado cumple con el requerimiento de desplazamiento de la guaya para llevar el sistema mecánico de resistencia al pedaleo desde resistencia nula hasta bloqueo absoluto, generando un acortamiento total en la guaya de aproximadamente 2cm, misma distancia total recorrida por la guaya, atada a un extremo de la palanca del servomotor, llevada desde los 0° hasta los 180° con la señal PWM.

Los sistemas de medición de velocidad y frenado, los cuales no necesitaron sistemas de acople, fueron ubicados exitosamente con elementos adherentes para ser probados en su función. El foto-interruptor en conjunto con el disco del freno y sus respectivos agujeros en la superficie reflectiva mostraron una correcta medición de velocidad y una mejor resolución en

el tiempo respecto al sistema de la etapa 1, lo anterior se debe a la presencia de una mayor cantidad de marcadores que generan más pulsos para una revolución completa de la llanta, respecto a los dos imanes que funcionaban como marcadores.

El sensor de flexión permitió medir correctamente la fuerza de frenado que hace el usuario al poder detectar una medida proporcional al desplazamiento de la palanca de freno; sin embargo, fue necesario una etapa considerable de acondicionamiento analógico para tener un rango de variación más amplio de voltaje en la entrada del ADC de manera que se tuviera una mejor resolución en la medición.

El uso del protocolo de implementación utilizado permite al computador pedir información cada cantidad de tiempo determinado, evitando de esta manera que el sistema se sature como lo ocurría con el Arduino en la etapa 1. Sin embargo, esta frecuencia de muestreo tampoco puede ser demasiado baja debido a que la simulación debe ser lo más fiel posible a la realidad. Es necesario la realización de pruebas adicionales al sistema para determinar cuál es la frecuencia óptima de muestreo de variables.

4. Conclusiones

Para cada una de las variables cinemáticas y cinéticas que se necesitaban medir se pueden encontrar en la bibliografía algunas opciones de cómo hacerlo, pero no todas son óptimas para el propósito del sistema. Por lo tanto, los sensores seleccionados se caracterizan por su

sencillez y facilidad de implementación, sin dejar de lado su precisión. En los casos de las variables cuyas opciones de medición según la literatura no eran los adecuados para este sistema, como lo fue para la medición del giro y la fuerza de frenado, se buscaron otras alternativas.

Las mediciones realizadas por los sensores seleccionados, aunque presentaron resultados acordes a lo esperado, en cuanto a su comportamiento, no fueron comparados con valores de referencia. Según lo anterior una de las siguientes tareas de este proyecto es realizar las comparaciones de las mediciones tomadas por el sistema desarrollado con mediciones de sistemas de referencia, para de esta manera hacer el cálculo del error y posteriormente llevar a cabo correcciones de ser necesario.

Acoplar los sensores a los diferentes tipos vehículos presenta ciertas complicaciones, aunque su funcionamiento deba ser el mismo. Esto se da por las diferencias estructurales entre el triciclo y la bicicleta, provocando que sea necesario el diseño de acoples únicos dependiendo de cuál se esté usando. Por estas razones no fue posible hacer un sistema adaptable a cualquier vehículo.

Es posible regular de forma electromecánica la resistencia al pedaleo ofrecida por el dispositivo durante el funcionamiento estático usando un servomotor de alto torque controlado por medio de una señal enviada desde la Raspberry. Sin embargo, es necesario la caracterización previa

del funcionamiento del servomotor para adecuar el porcentaje de dureza con el ángulo de giro del motor y, por lo tanto, con el nivel de esfuerzo generado sobre el rodillo.

Reconocimientos

Se agradece a Minciencias (previamente Colciencias) y al grupo GIBIC de la Universidad de Antioquia, por la financiación parcial de este estudio, contenido en el proyecto “Evaluación de estrategia combinada para mejorar la adherencia de sujetos amputados por Artefactos Explosivos Improvisados (AEI) al uso de prótesis de miembro inferior de bajo costo” en el marco de la convocatoria nacional 808-2018.

Referencias

[1] M. Sereday, M. Damiano, and S. Lapertosa, “Amputaciones de Miembros Inferiores en diabéticos y no diabéti-cos en el ámbito hospitalario,” *Alad(Asociación Larinoamericana de Diabetes)*, pp. 9–15, 2009, [Online]. Available: http://www.revistaalad.com.ar/pdfs/0905_Amp_de_Miem.pdf.

[2] C. Quintero Quiroz, A. Jaramillo Zapata, M. T. De Ossa Jiménez, and P. A. Villegas Bolaños, “Estudio descriptivo de condiciones del muñón en personas usuarias de prótesis de miembros inferiores,” *Rev. Colomb. Médicina Física y Rehabil.*, vol. 25, no. 2, pp. 94–103, 2018, doi: 10.28957/rcmfr.v25n2a1.

[3] L. H. Lugo and G. Desarrollador, “Guía de Práctica Clínica.”

[4] O. Horgan and M. M. A. C. Lachlan, “Psychosocial adjustment to lower-limb amputation : A review,” 2004, doi: 10.1080/09638280410001708869.

[5] B. L. Martín, M. Jesús, and P. Hernández-Rico, “Amputación.”

[6] “Convocatoria para proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación y su contribución a los retos de país- 2018 | Convocatoria 808 | COLCIENCIAS.” https://www.colciencias.gov.co/convocatorias/investigacion/convocatoria-para-proyectos-ciencia-tecnologia-e-innovacion-y-su-0 (accessed Aug. 04, 2019).

[7] W. L. Childers, R. S. Kistenberg, and R. J. Gregor, “The Biomechanics of Cycling with a Transtibial Amputation: Recommendations for Prosthetic Design and Direction for Future Research,” *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 33, no. 3, pp. 256–271, Sep. 2009, doi: 10.1080/03093640903067234.

[8] I. Pinilla Giménez, “Juego serio para terapias de rehabilitación motora y cognitiva con realidad virtual,” 2017, Accessed: Aug. 29, 2019. [Online]. Available: http://uvadoc.uva.es/handle/10324/23073.

[9] G. Fiedler, J. Akins, R. Cooper, S. Munoz, and R. A. Cooper, “Rehabilitation of People with Lower-Limb Amputations,” *Curr. Phys. Med. Rehabil. Reports*, vol. 2, no. 4, pp. 263–272, Dec. 2014, doi: 10.1007/s40141-014-0068-8.

[10] Prodalca, “Rodillo personal trainer con regulador de esfuerzo,” 2019. https://prodalca.com.co/producto/rodillo-personal-trainer-con-regulador-de-esfuerzo/.

[11] C. Sun and Z. Qing, “Design and Construction of a Virtual Bicycle Simulator for Evaluating Sustainable Facilities Design,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/5735820.

[12] T. Instruments and I. Sloa, “Chapter 16 Active Filter Design Techniques Excerpted from Op Amps for Everyone Literature Number: SLOD006A.”

[13]L. Xiong *et al.*, “IMU-based automated vehicle slip angle and attitude estimation aided by vehicle dynamics,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 8, 2019, doi: 10.3390/s19081930.

[14] “Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store.” https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3.

[15] S. Sanghani, *Stumps and Cranks: An Introduction to Amputee Cycling*. .

[16] M. Ambrož, “Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human powered vehicles,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 100, pp. 7–18, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2016.12.037.

[17] F. Villarreal, “Introducción a los modelos de pronósticos,” *Univ. Nac. del Sur*, pp. 1–121, 2016.

[18] “pySerial 3.0 documentation.” https://pythonhosted.org/pyserial/.

[19] “python-drawnow: MATLAB-like drawnow to easily update a figure.” https://github.com/stsievert/python-drawnow.

[20] J. D. Rairan-Antolines and J. M. Fonseca-Gómez, “Algoritmo para la aproximación de la velocidad de giro de un eje mediante un encoder incremental,” *Ing. y Univ.*, vol. 17, no. 2, pp. 293–309, 2013.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

ARTIFICIAL INTELLIGENT DEVICE FOR PHYSICAL AND MENTAL STATE MONITORING IN PULMONARY CANCER ONCOLOGY, A PROPOSAL

Dispositivo inteligente artificial para monitoreo de estado físico y anímico en oncología torácica pulmonar, una propuesta

***Leonardo Gonzalez Gutierrez*[1], *Julio César Caicedo Eraso*[2], Diana Rocio Varón Serna[3]**

Abstract

In the world, lung cancer is a leading cause of death, and in the United States, 135.720 lung cancer deaths were estimated by 2020 without taking into account the global contingency of the Covid-19 pandemic. This type of cancer is more common in few developed countries, and in Colombia about 3.875 people die annually from lung cancer. With the advance of technology, algorithms have been developed that can detect cancer at a very early stage based on images of the x-rays. This project aims to use artificial intelligence to analyze physical and mental state in patients with lung cancer, using an intelligent device capable of obtaining vital signs and using machine learning models to analyze their current state, may be used for patients in

[1] Student, Universidad de Caldas, Colombia. Student, Systems and Computer Engineering: Universidad de Caldas, Colombia. E-mail: leonardo.1701716481@ucaldas.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1837-4225

[2] Doctoral degree, Universidad de Caldas, Colombia. Associate professor, Systems and Informatics Department: Universidad de Caldas, Colombia. E-mail: julioc.caicedo@ucaldas.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4073-9152

[3] Master's degree, UNAD, Colombia. Professor, Electronics and Automation Department: Universidad Autónoma de Manizales, Colombia. Occasional Professor, Systems and Informatics Department: Universidad de Caldas, Colombia. E-mail: diana.varons@autonoma.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5887-3427

oncology clinics or at their place of residence, the doctor may use this tool to diagnose your patient more effectively and follow up on your chemotherapy.

Keywords: lung cancer, artificial intelligence, patient, physical state, mental, oncology.

Resumen

En el mundo una de las principales causas de muertes es el cáncer pulmonar, en Estados Unidos se estimaba 135.720 muertes por cáncer pulmonar para el año 2020 sin tener en cuenta la contingencia mundial de la pandemia de Covid-19. Este tipo de cáncer se hace más frecuente en países pocos desarrollados, en Colombia mueren alrededor de 3.875 personas anualmente por cáncer pulmonar. Con el avance de la tecnología se han desarrollado algoritmos capaces de detectar cáncer en una fase muy temprana con base a radiografías. Este proyecto tiene como objetivo usar la inteligencia artificial para analizar el estado físico y anímico en pacientes con cáncer pulmonar, usando un dispositivo inteligente capaz de obtener los signos vitales y utilizar modelos de machine learning para analizar su estado actual, podrá ser de uso para pacientes en clínicas oncológicas o en su lugar de residencia, el médico encargado podrá usar esta herramienta para diagnosticar a su paciente de forma más efectiva y hacer el debido seguimiento en sus quimioterapias.

Palabras clave: cáncer pulmonar, inteligencia artificial, paciente, estado físico, anímico, oncología.

1. Planteamiento del problema

Una de las principales causas de muerte en el mundo es por cáncer pulmonar. En Colombia cada año mueren alrededor de 3.875 personas por cáncer de pulmón [1] de acuerdo con [2] en Chile es la segunda causa de muerte después del cáncer gástrico. Las muertes por este tipo de enfermedad han aumentado, hay pocos países desarrollados como lo es Estados Unidos, con una baja tasa de muertes de cáncer pulmonar como lo han reportado [3], tablas 1-3.

Tabla 1. Tasa de muertes por cáncer en Estados Unidos 2013-2017, [4].

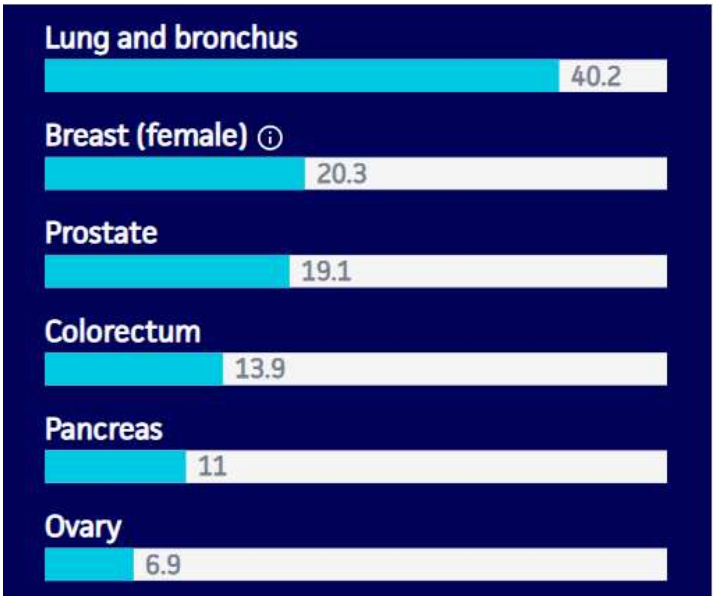
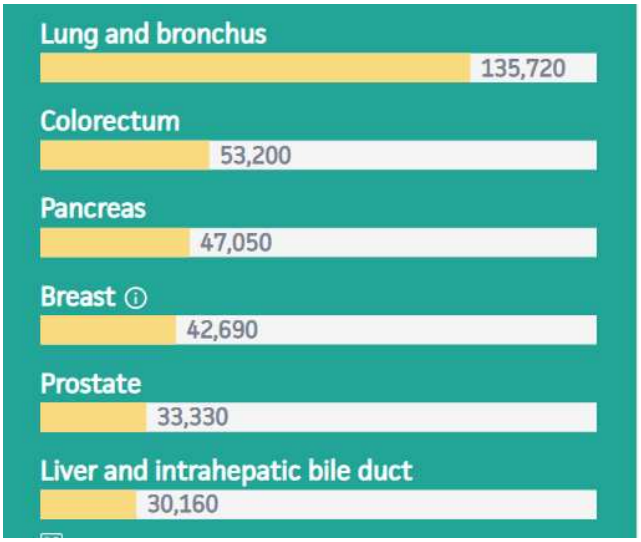


Tabla 2. Estimación de muertes por cáncer para 2020 en Estados Unidos. Hombre y Mujer, [4].



Tasa media anual por cada 100.000 habitantes, edad ajustada a la población estándar de los Estados Unidos del año 2000. Las tasas de relaciones públicas son para 2011-2015.

Google ha desarrollado un algoritmo que detecta el cáncer de pulmón, según [5]: *Algoritmo de Google es capaz de distinguir entre dos subtipos de cáncer de pulmón con una precisión entre 83% y el 99% de ocasiones*. Actualmente no se presentan dispositivos asistentes inteligentes que guíen en las actividades físicas a un paciente con cáncer pulmonar en el transcurso de su día, [6]. El análisis de datos con base a pequeños dispositivos inteligentes artificiales es el futuro de la oncología, con el uso actual de dispositivos móviles en la investigación en este tipo cáncer, describen cómo pueden aportar análisis del estado físico y emocional de un paciente

a una clínica de oncología [7] he incorporar el asistente inteligente artificial como apoyo psicológico, para las necesidades y prevenciones derivadas de la angustia en la experiencia con al cáncer y sus tratamientos, [8].

Por lo expuesto, el objetivo de la investigación radica en Analizar el estado físico y anímico en pacientes diagnosticados con cáncer torácico pulmonar con la incorporación de un dispositivo asistente inteligente artificial.

Y como objetivos específicos:

1. Desarrollar y validar el dispositivo inteligente para análisis de estado físico y anímico en pacientes con cáncer pulmonar

2. Identificar patrones en el estado físico y anímico en los pacientes con cáncer pulmonar con la utilización de un dispositivo inteligente artificial

3. Categorizar las anomalías respiratorias y afectación emocional en el paciente

4. Comparar el uso del dispositivo en pacientes para el diagnóstico médico en una clínica de oncología

Teóricamente, la investigación se contextualiza en la denominada Teoría de la computación, la que se fundamenta bajo la lógica y las matemáticas que dan origen a las ciencias de la computación. Las teorías de base son dos: teoría de autómatas y teoría de lenguajes formales.

Se utiliza para el diseño y construcción de software y hardware, y deducir si es posible desarrollar un problema, [9].

Por otro lado, la Inteligencia artificial es un campo de la informática dedicado a la solución de problemas asociados comúnmente a la inteligencia humana, como es el aprendizaje, solución de problemas y reconocimientos de patrones. Con la participación de la computación las máquinas tienen la facultad de aprender, entender o comprender una situación, [10].

De otra parte, el Cáncer se define como la mal formación de células que se duplican en un órgano que puede invadir tejidos cercanos a su ubicación afectando órganos. El nombre del tipo de cáncer reside en el órgano que se forma, [16].

Y, finalmente, la Semiología de los signos vitales de acuerdo con [11]: *son valores que permiten estimar la efectividad de la circulación, respiración y funciones neurológicas basales y su réplica a diferentes estímulos fisiológicos y patológicos. Los SV son la cuantificación de acciones fisiológicas, como la frecuencia y ritmo cardíaco (FC), la frecuencia respiratoria (FR), la temperatura corporal (TC), la presión arterial (PA o TA) y la oximetría (OXM).*

2. Metodología

La metodología general de la investigación se fundamenta bajo el modelo de levantamiento de requisitos, análisis, diseño, desarrollo e implementación, pruebas de desarrollo y validación piloto para el software y hardware.

3. Desarrollo del dispositivo inteligente hardware y aplicativo móvil

Se aplicará la metodología de desarrollo ágil SCRUM para el aplicativo móvil y asistente analizador, [17]. Se aplicará la metodología QFD (Quality for Design) para el diseño de hardware basado en la calidad [18-19] del brazalete, tendrá como modo de sincronización por Bluetooth con el dispositivo móvil para la recolección del estado físico con base a signos vitales.

Como modelo para el diseño y construcción del brazalete se tomará como referente Liip Smart Monitor *"pulsera inteligente que mide en tiempo real pulso y oxígeno a un bebé"* [12] y el equipo de signos vitales Esfigmomanómetro Digital Connex® ProBPTM 3400, [13], figuras 1-2.



Figura 1. Brazalete Liip Smart Monitor, [12].



Figura 2. Esfigmomanómetro Digital Connex® ProBPTM 3400, [13].

- Se utilizará para el desarrollo del aplicativo móvil el Framework Flutter y editor de texto Visual Studio Code.
- Se utilizará el lenguaje Python para el asistente de análisis de datos.
- Los modelos a utilizar para el análisis de estado físico y anímico serán el modelo de clasificación y predicción implementando las técnicas de machine learning con Python, [14].

3.1. Validación del dispositivo inteligente con pacientes con cáncer pulmonar

Con el desarrollo del dispositivo tipo brazalete, aplicativo móvil y asistente analista de datos.

Validaremos de forma secuencial:

- Dispositivo sincronizado con Bluetooth con el celular y aplicativo móvil
- Transmisión de datos al servidor principal desde el dispositivo móvil
- Entrada de datos de los signos vitales al servidor para la clasificación y predicción

- Respuesta al cliente informando su estado físico y posibles actividades a desarrollar en su día
- Recolección de información y entrenamiento del modelo para el análisis de estado físico y anímico
- Análisis en tiempo real del paciente con cáncer pulmonar

3.2. Identificación de patrones en estado físico y anímico en las diferentes etapas del cáncer

El cáncer de pulmón presenta diferentes etapas: etapa oculta, etapa 0, etapa I, etapa II y etapa III. El paciente en una etapa recibe un tratamiento distinto a las que se realiza en las demás por el nivel de afectación del cáncer en el pulmón y en los diferentes órganos que se llegan afectar, [15].

Con el uso del machine learning, la captación de los signos vitales y datos del estado anímico en el modelo. Buscaremos segmentar los pacientes de las diferentes etapas del cáncer para hacer su análisis de estado, categorizar las anomalías respiratorias en la etapa de cada cáncer pulmonar para generar su respectivo informe en el avance o declinación de la salud del paciente.

3.3. Pruebas piloto en pacientes con cáncer pulmonar en hospital oncológico

La prueba piloto en el análisis en tiempo real de signos vitales y estado anímico de pacientes con cáncer pulmonar con el dispositivo inteligente, se llevará a cabo en un hospital oncológico en donde se buscará analizar las diferentes etapas del cáncer y generar reportes médicos con recomendación de actividades que puede realizar el paciente en donde el oncólogo encargado de cada paciente verifique si el dispositivo está reportando los datos del paciente y los modelos de machine learning están haciendo su respectivo análisis en la predicción, segmentación y análisis del paciente.

4. Resultados esperados

Resultado	**Descripción**	**Indicador de logro**
Generación de nuevo Conocimiento	Desarrollo de dispositivo inteligente artificial brazalete para análisis en tiempo real para hospitales oncológicos con pacientes con cáncer pulmonar.	● 2 artículos científicos ● 1 brazalete ● 1 aplicativo móvil ● Asistente artificial para análisis de signos vitales

Resultado	**Descripción**	**Indicador de logro**
Fortalecimiento de la comunidad científica colombiana	Formación de investigadores Establecimiento de redes de conocimiento Capacitación en médicos especializados en oncología	● Formación investigadores: 1 pregrado ● Una capacitación en el uso del dispositivo inteligente ● Interacción con médicos especializados en oncología torácica pulmonar
Apropiación social del conocimiento	Presentación de los resultados ante la comunidad científica y médica	● 1 ponencia en evento científico nacional en el área de la salud
Software	Instaladores, código fuente o manual de instalación.	● Instalador de aplicativo móvil

Resultado	Descripción	Indicador de logro
		• Software para análisis de signos vitales en pacientes con cáncer pulmonar • Trámite interno de la patente del software
Prototipo	Planos del brazalete	• Plano de prototipo de brazalete • Brazalete inteligente artificial • Trámite interno de la patente del brazalete

5. Impactos esperados a partir de los resultados esperados

Se espera en una segunda fase el uso del dispositivo inteligente en hospitales oncológicos del país para monitoreo de pacientes con cáncer de pulmón a nivel regional y nacional. Para esta

fase se requiere del dispositivo y el asistente en funcionamiento. En una tercera fase incorporarlo en pacientes que se encuentran fuera del hospital con la patología de cáncer pulmonar para monitorear a distancia por parte del médico encargado.

Este proyecto fortalecerá el diagnóstico, por parte de oncólogos, en hospitales con pacientes con cáncer pulmonar y también las áreas de la salud e ingeniería, fomentará el uso de la inteligencia artificial en el internet de las cosas en la salud.

Referencias

[1] MinSalud, “33 mil personas al año mueren de Cáncer en Colombia.” https://www.minsalud.gov.co/Paginas/33-mil-personas-al-año-mueren-de-Cáncer-en-Colombia.aspx.

[2] D. Raúl Pefaur, “Imaginología actual del cáncer pulmonar,” *Rev. Médica Clínica Las Condes*, vol. 24, no. 1, pp. 44–53, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/S0716-8640(13)70128-7.

[3] C. R. José Miguel, “Estado actual del tratamiento del cáncer pulmonar,” *Rev. Médica Clínica Las Condes*, vol. 24, no. 4, pp. 611–625, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/S0716-8640(13)70200-1.

[4] Society American Cancer, “Cancer Statistics Center,” 2020.

https://cancerstatisticscenter.cancer.org/?_ga=2.68534866.2102841857.1593652002-2027832360.1593652002#!/.

[5] Diariopresente.mx, “Google desarrolla algoritmo que detecta el cáncer de pulmón,” 2018. [Online]. Available: https://www.diariopresente.mx/actualidad/google-desarrolla-algoritmo-que-detecta-el-cancer-de-pulmon/218050.

[6] M. F. Abbod, J. W. F. Catto, D. A. Linkens, and F. C. Hamdy, “Application of Artificial Intelligence to the Management of Urological Cancer,” *J. Urol.*, vol. 178, no. 4, pp. 1150–1156, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.juro.2007.05.122.

[7] J. M. Purswani, A. P. Dicker, C. E. Champ, M. Cantor, and N. Ohri, “Big Data From Small Devices: The Future of Smartphones in Oncology,” *Semin. Radiat. Oncol.*, vol. 29, no. 4, pp. 338–347, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2019.05.008.

[8] K. Cieślak, “Professional psychological support and psychotherapy methods for oncology patients. Basic concepts and issues,” *Reports Pract. Oncol. Radiother.*, vol. 18, no. 3, pp. 121–126, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.rpor.2012.08.002.

[9] H. Contreras, “Teoria de la Computacion para Ingeniería de Sistemas: Un enfoque practico.” Caracas: Saber, Ula. V, 2012, [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39872592/tema1.pdf?1447177931=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTema1.pdf&Expires=1594305464&Signature=Fe86rqeud4Y7osvWzUUhOYTIZCaL-k~pJaar2XxVbujlot-4xV9wYpduKdxkZ5zHaSPhUOCcpH1v0k7Y5shbONvWqbXmdTzdO.

[10] A. GALIPIENSO, M. ISABEL, M. A. CAZORLA QUEVEDO, O. Colomina Pardo, F. ESCOLANO RUIZ, and M. A. LOZANO ORTEGA, *Inteligencia artificial: modelos, técnicas y áreas de aplicación*. Editorial Paraninfo, 2003.

[11] J. V. González, O. A. V. Arenas, and V. V. González, “Semiología de los signos vitales: Una mirada novedosa a un problema vigente,” *Arch. Med.*, vol. 12, no. 2, pp. 221–240, 2012, [Online]. Available: https://www.redalyc.org/pdf/2738/273825390009.pdf.

[12] Liip.care, “Liip Smart Monitor,” 2019. https://liip.care/es/.

[13] Welchallyn.com, “Equipos de signos vitales,” 2018.

https://www.welchallyn.com/content/welchallyn/latam/es/products/categories/patient-monitoring/vital-signs-devices.html#.

[14] Scikit-learn.org, “Scikit-learn machine learning in python,” 2019. https://scikit-learn.org/stable/index.html.

[15] Cancer Treatment Centers of America, “Lung cancer stages,” 2020. https://www.cancercenter.com/cancer-types/lung-cancer/stages.

[16] NIH (Instituto Nacional del Cáncer), “¿Qué es el cancer?,” 2015. https://www.cancer.gov/espanol/cancer/naturaleza/que-es%0A.

[17] Roger S. Pressman. (2010). *Ingeniería del Software Un enfoque práctico.* Vol. 3, Séptima Edición. pp. 70

[18] Castro, F.D. (2008). *Metodologia de projeto centrada na casa da qualidade. Tesis de Maestría, universidade federal rio grande do sul,* Porto Alegre, Brasil

[19] Pahl, G., & Beits, W. (2013). *Engineering design: a systematic approach.* Springer Science Business Media

[20] R. De Armas, A. Alfonso, y L. Rojas, “Tomografía local con bases daubechies", Visión Electrónica, vol. 9, no. 2, pp. 300-311, 2015.

[21] C. H. Caicedo y A. Smida, “Intensidad informacional para la longitudinalidad asistencial en sistemas de salud", Visión Electrónica, vol. 10, no. 1, pp. 83-95, 2016. https://doi.org/10.14483/22484728.11612

[22] J. R. Torres Castillo, J. S. Pérez Lomelí, E. Camargo Casallas, y M. Ángel Padilla Castañeda, “Dispositivo háptico vibrotáctil inalámbrico para asistencia de actividades motoras", Visión Electrónica, vol. 12, no. 1, pp. 58-64, 2018. https://doi.org/10.14483/22484728.13310

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

NOAA SATELLITE WEATHER STATIONS: STATE OF THE ART, PERSPECTIVE AND FUTURE PROJECTION

Estaciones satelitales meteorológicas NOAA: Estado del arte, perspectiva y proyección futura

Julián Peña Becerra1, Edith Paola Estupiñán Cuesta2, Juan Carlos Martínez Quintero3

Abstract

In this document, a documentary review of the impact of the implementation of satellite ground stations linked to NOAA's meteorological satellites is carried out, highlighting the implementation of software defined radio and the possible applications that could be given to the satellite stations in terms of data and information processing; This work is done in order to find the main characteristics of these satellite communications systems and the different

1 Estudiante de la Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. E-mail: u1401225@unimilitar.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7306-2726

2 Ingeniera en Telecomunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Magister en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Universidad Militar Nueva Granada/Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. E-mail: edith.estupinan@unimilitar.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4100-4943

3 Ingeniero Electrónico, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. Especialista en Seguridad física e informática, Escuela de comunicaciones Militares, Colombia. Magister en Sistemas automáticos de producción, Universidad tecnológica de Pereira, Colombia. Universidad Militar Nueva Granada/Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. E-mail: juan.quinteroq@unimilitar.du.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9893-6592

applications, which are oriented towards the control and monitoring of natural phenomena for documentation and prevention of these; presenting the projection with the implementation is in Cloud and research in the years.

Keywords: NOAA, Satellite, Software Defined Radio, Antenna, Digital Signal Processing

Resumen

En este documento se realiza una revisión documental del impacto de la implementación de estaciones satelitales terrestres enlazadas a los satélites meteorológicos de la entidad NOAA resaltando la implementación de radio definido por software y las posibles aplicaciones que se le podrían das a las estaciones satélites en cuanto al procesamiento de datos e información; este trabajo es realizado con el fin de hallar las principales características del estos sistemas de comunicaciones satelitales y las diferentes aplicaciones, las cuales esta orientadas hacia el control y monitoreo de fenómenos naturales para documentación y prevención de estos; presentando la proyección con la implementación es en Cloud y las investigaciones en los años.

Palabras clave: NOAA, Satélite, radio definido por software, antena, Procesamiento Digital de Señales.

1. Introducción

El impacto climático que se ha generado debido a diferentes fenómenos naturales ha provocado alertas y afectaciones en diferentes sectores sociales y económicos de diferentes países, por ejemplo entre el 25 y 28 de abril del 2011 se presentó la primera oleada de tornados en Estados Unidos que generarían daños catastróficos en el sur y Este del país, frente a este problema surge el plan estratégico Construyendo una Nación Preparada para el Clima (Building a Weather-Ready Nation) por parte del NWS (National Weather Srvice) conocida como Servicio Meteorológico Nacional, en donde las entidades tomadoras de decisiones de la comunidad tienen acceso a información que es comprensible y los prepara para tomar medidas para salvaguardar vidas y medios de subsistencia antes de la aparición de condiciones peligrosas, utilizando los últimos avances en ciencia y tecnología, modelado, ciencias sociales y sistemas de entrega de información. En colaboración con NOAA (National Oceanic and *Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Facultad Tecnológica* Atmospheric Administration) y conocida como Administración Nacional Oceánica y atmosférica, operará como un potenciador de prevención que eleva el nivel de preparación frente a las catástrofes [1], esto será realizado por medio de la adquisición y análisis de información meteorológica, así de esta forma poder preservar las vidas de las personas. por medio del desarrollo de toma de datos, recomendaciones para prevención de riesgos y diferentes investigaciones. La entidad de NOAA se ha destacado por tener a su disposición diferentes ramas de investigación,

principalmente está dedicada a mantener informado al público de un ambiente cambiante, mediante pronósticos meteorológicos diarios, advertencias de tormentas severas, monitoreo climático, manejo de pesquerías, restauración costera y apoyo al comercio marino [2], [3]–[8]. Los beneficios de la obtención de información meteorológica son: 1) Cuantificación y estimación de los servicios, es decir, si afectan empresas, personas y/o entidades gubernamentales para la reducción de costos en función de la disponibilidad de la información, 2) Preparación para fenómenos naturales y 3) Decisiones comerciales [9], [10]. Teniendo en cuenta los impactos que tienen los fenómenos naturales y los beneficios que se pueden obtener de ellos por medio de la obtención de información meteorológica en este artículo se presenta una revisión documental donde se observa la perspectiva de la entidad NOAA y sus aplicaciones en el desarrollo de información meteorológica, aclarando que esta revisión está orientada a ser una herramienta para conseguir una visión de cómo está orientadas las investigaciones de la entidad NOAA y sus diferentes aplicaciones académicas y en casos de estudio. Este documento está dividido en cinco secciones: 1) Clasificación de satélites de NOAA, 2) implementación de estaciones satelitales terrestres a través de SDR, 3) Aplicaciones de información meteorológica, 4) análisis meteorológico en Colombia y 5) Proyección y conclusiones.

2. Contextualización teórica satélites NOAA

De las diferentes ramas de desarrollo de NOAA los satélites son considerados unos de los campos más abiertos a investigaciones operado por NESDIS (Servicio Nacional de Satélites Ambientales, Datos, e Información), encargada de brindar acceso seguro y oportuno a datos e información ambiental global de satélites y otras fuentes para promover y proteger la seguridad del medio ambiente. Principalmente la información meteorológica proporcionada por esta entidad que es proveniente de la constelación de satélites POES (Satélites ambientales operacionales polares) y GOES (Satélite medioambiental operacional geoestacionario), estos satélites vuelan en las orbitas las cuales se encuentran sincronizadas con el sol, es decir, que siempre orbitaran en la misma posición y exactamente a la misma hora lo que les permite obtener una visión global de la tierra [11]; en la tabla 1 resume de los satélites desplegados por NOAA y los cuales están destinados a la trasmisión de datos climáticos en dos orbitas la polar y la geoestacionaria.

Tabla 1. Descripción de estado de los satélites de NOAA. [12]–[15]

Satélite	Orbita	Operación
GOES-8 a 12	GEO	Apagado

Satélite	Orbita	Operación
GOES-14	GEO	Apagado
GOES-15	GEO	En orbita
GOES-16	GEO	En orbita
GOES-17	GEO	En orbita
NOAA-11, 12, 14, 16, 17	Polar	Apagado
NOAA-15	Polar	En orbita
NOAA-18	Polar	En orbita

Satélite	Orbita	Operación
NOAA-19	Polar	En orbita
NOAA-20	Polar	En orbita
Suomi NPP	Polar	En orbita

Fuente: elaboración propia.

La transmisión de imágenes satelitales está expuestas a factores como el ruido afectan la calidad de la imagen, para la corrección en la transmisión de estas imágenes se realizan comparación entre los satélites para determinar cuál es más óptimo, para ello en [16], [17] se desarrolló un algoritmo para mitigar el ruido de rayas o *stripping noise* que es común en las imágenes de censado remoto geoespacial sobre los canales de ATMS (sondas de tecnología de microondas avanzada) y la comparación entre los satélites NOAA-20 y S-NPP, con respecto al parámetro RO (ocultación de Radio); el algoritmo desarrollado permitió reducir los niveles de ruido encontrando que en el satélite NOAA-20 en los canales ATMS tiene una mayor tendencia en magnitud permitiendo tener una mayor simetría en sus diferentes canales (bandas de frecuencias).en [18] realizan el mejoramiento del sensor VIIRS (Visible Infrared

Imaging Radiometer Suite) conocido también como Conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles en función de mejorar la geolocalización antes y después del procesamiento donde se incorporan la corrección y la calibración de los parameros geométricos. Estos desarrollos fueron un paso importante dado que los datos obtenidos de las predicciones numéricas del clima permiten realizar un uso efectivo de los datos para los estudios climatológicos.

Cada GOES o POES tiene diferentes tipos de sensores y componentes como se puede observar en la figura 1, esta información proporcionada por estos elementos es transmitida por medio de las diferentes bandas de cada uno de los satélites; cada banda muestra parámetros meteorológicos diferentes como lo pueden ser: vapor de agua, ozono, CO2, partículas de nube, nieve /hielo, GeoColor, entre otras [19], [20].



Figura 1. Instrumentos y componentes de los satélites POES, [21].

Esta información satelital presenta la oportunidad de realizar estaciones satelitales de bajo costo dado la accesibilidad de la información. A continuación, se expondrán las diferentes aplicaciones que se le han dado y que elementos necesita para su funcionamiento.

2.1 Estaciones Satelitales Terrestres

Las estaciones satelitales terrestre cuentan con las capacidades de realizar tareas de procesamiento de información de las señales enviadas desde los satélites, estas cuentan con dispositivos activos como amplificadores, y pasivos como reflectores o filtros. Los diferentes tipos de dispositivos SDR son capaces de recibir señales de radio frecuencia convertirlas en banda base, digitalizarlas y a enviarlas por interfaces como USB, permitiendo así una optimización en hardware entre las antenas y el sistema de cómputo para la construcción de estaciones satelitales terrestres, para así observar las posibles aplicaciones de este sistema en la recepción de imágenes meteorológicas.

Por definición SDR (Radio definido por software) se refiere a los sistemas de radio en los que casi toda la funcionalidad asociada a la capa física se implementa en un software que utiliza algoritmos de PSD (Procesamiento de Señal Digital) [22]; las plataformas de software más representativas son GNU radio, LabVIEW y Matlab. Para realizar el procesamiento de los archivos de los satélites de NOAA se tiene que conectar un dispositivo compatible con la

plataforma SDR que se haya elegido como en [23]–[29] los cuales hace uso de los dispositivos que se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Dispositivos transceptores de señales, [23]–[25], [30]–[32].

Hardware	**Ancho de banda**	**Frecuencia de muestreo**
Icom PCR-1500	10 kHz - 3,3GHz	< 5MHz
USRP 2920	50 MHz - 2,2GHz	20 MHz – 40 MHz
RTL-SDR 2832U	500 kHz - 1,766GHZ	500 kHz – 24MHz

Fuente: elaboración propia.

Estos dispositivos cumplen con la función de realizar la conexión entre la antena receptora y un equipo de cómputo. En el equipo de cómputo se hace el procesamiento digital de las señales de radio en banda base y procesamiento de imágenes por medio de programación en bloques como en [23], [25], [29], [33], que consta en tres etapas, la primera es el filtrado y

remuestreo, seguido de la decodificación y demodulación, y por último la visualización y almacenamiento de las imágenes.

2.2 Antenas

Los satélites de NOAA en un rango de frecuencias de 137.5 MHz y 137.9 MHz realizan APT (Transmisión automática de imágenes) en modulación de AM o FM con señales polarizadas circularmente hacia la derecha, [21]. La antena y la polarización circular es fundamental al momento de recibir la señal y una mejor calidad de las imágenes dado que una buena antena permite captar la cantidad necesaria de señal para que las imágenes tengan una mejor resolución en función de su antena receptora. Por lo tanto, se han realizado diferentes diseños de arreglos antenas como antenas de dipolos cruzados, helicoidales cuadrifilares y parabólicas. Estas antenas cumplen dos características: 1) Están adaptadas para recibir señales polarizadas circularmente a la derecha y 2) tener un patrón de radiación omnidireccional, ver figura 2. En [34]–[36] se enfocan en la elaboración de las antenas receptoras de imágenes satelitales del clima de satélites NOAA, en donde se mide el rendimiento de cada una a partir de valores como R.L (Perdida de Retorno), VSWR (razón de onda estacionaria), ganancia e impedancia, teniendo en cuanta que existen valores óptimos para arreglo de antenas como se muestra en la tabla 3, [36].

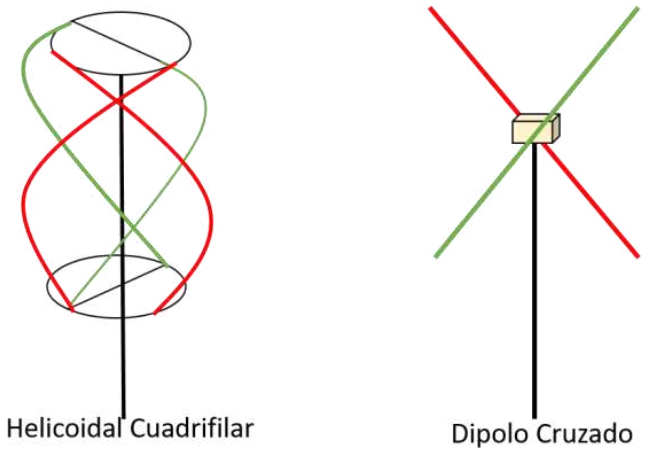


Figura 2. Esquema de antenas receptoras para los satélites de NOAA.

Tabla 3. Valores de referencia en las antenas receptoras de los satélites de NOAA de acuerdo a [36].

Parámetros	**Valores NOAA**
Frecuencia	137,5 MHz - 137,9MHz
Pérdida de Retorno	< -10 dB
VSWR	< 2

Parámetros	**Valores NOAA**
Ganancia	> 3 dB
patrón de radiación	Omnidireccional

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta la implementación de las antenas, el hardware y software de SDR, juntos dan paso a las estaciones satelitales terrestres de bajo costo, en [37], [38] se expresó una reducción de costos de un 50% a 55% en infraestructura necesaria para la implementación y una mayor flexibilidad para el procesamiento de las imágenes y dado que los satélites de órbita polar como NOAA -15, -18 y -19 están en constante transmisión no se tendrá que esperar a una especifica la obtención de datos. La reducción de costos y optimización de estas estaciones satelitales en su mayoría se debe al uso de herramientas de SDR para el procesamiento de la información, al igual como se mencionó en la sección 2.1 en [22] elementos como filtros físicos ahora con digitales y programables con las diferentes hermanitas GNU. Las estaciones satelitales terrestres se pueden resumir en tres etapas 1) Recepción, 2) acople y 3) procesamiento de las imágenes, como se puede observar en la figura 3.

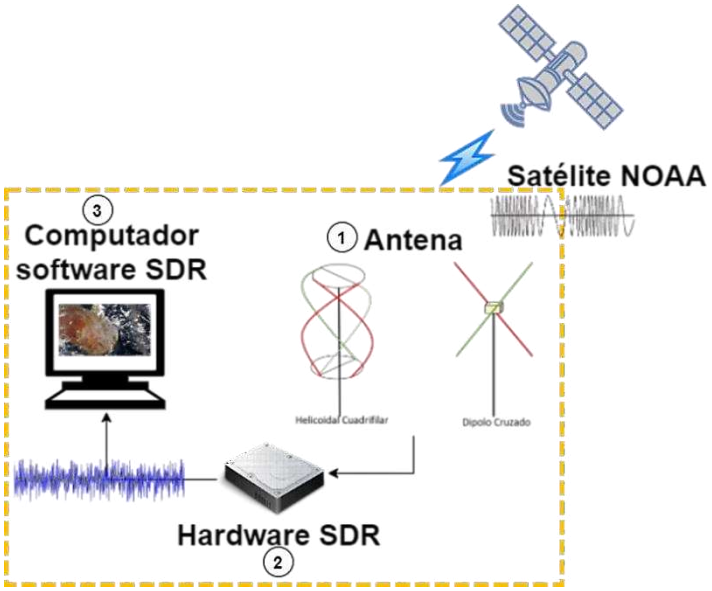


Figura 3. Estación satelital terrestre de bajo costo implementado SDR. Fuente: elaboración propia.

3. Aplicaciones de las estaciones satelitales

La implementación de estaciones satelitales de bajo costo y portables aumentan la cobertura de obtención de información; se han realizado diferentes estudios con los cuales se pueden observar las ventajas de estas estaciones, en [39], se presentaron casos de estudio en los cuales se busca la clasificación de estuarios y ciclones respectivamente; los estuarios son los entornos marinos más difíciles de clasificar debido a la gran variabilidad espacio-temporal que da lugar a condiciones bentónicas. En [40] por medio del entrenamiento de una red neuronal a partir de información del ciclón Gonu se determinó una relación entre el brillo de temperatura y el núcleo del ciclón encontrado patrones de comportamiento para la prevención de futuros ciclones; en [41] se evaluaron las alertar automáticas provenientes de los sensores de

detección de nubes volcánicas en función de las emisiones termales; este estudio fue realizado con la información térmica infrarroja de los satélites GOES-15 y Himawari-18 y el sensor VIIRS. Hay otras aplicaciones que no están en función de variables o el monitoreo sino también se han desarrollado estrategias para la teledetección de incendios forestales en función de las concentraciones de CO2 por medio de redes neuronales convolucionales [42], la predicción de columnas de ozono por algoritmos de regresión [43] o el uso de algoritmos de beamforming para el seguimiento de satélites LEO con arreglos de antenas adaptativas [44]. En la figura 4 se condensan las aplicaciones que hacen uso de la información NOAA y que se clasifican en cuatro grupos: 1) Monitoreo y control de variables climáticas como en [16], [17], [41], [45], [46], 2) Casos de estudio para análisis de ambientes o fenómenos naturales específicos como en [39], [40], 3) Redes Neuronales [40], [42], [43], [47] y 4) prevención de riesgos de fenómenos naturales [42], [47].

De las investigaciones que se documentaron en el apartado 2 y 3 se encuentran tres puntos clave en las investigaciones bajo las cuales muestran la orientación y la importancia de cada una de ellas, de forma separada todas están siendo orientadas hacia el estudio del clima y fenómenos naturales a través de datos meteorológicos; esto se puede evidencia en la tabla 4.

Tabla 4. Objetivos principales de las investigaciones realizadas con información meteorológica, [24], [27], [42].

Aplicaciones datos meteorológicos de NOAA		
Casos de studio	**Estaciones satelitales**	**Procesamiento de datos**
Estos se están orientado al análisis de fenómenos específicos, de los cuales se están obteniendo información del comportamiento para de esta forma caracterizar ambientes, impacto de fenómenos naturales y monitoreo de condiciones bajo los cuales se estén generando afectaciones a sectores públicos y privados	Estas investigaciones se están centrando en la elaboración de sistemas receptores de señales climáticas y meteorológicas de los satélites de NOAA, donde se puede resaltar el uso de hardware y software de Radio Definido por Software para la reducción de costos en el procesamiento digital de la información y el diseño de antenas receptoras en la elaboración de estaciones satelitales terrestres.	Existen diferentes métodos para el procesamiento de la información climática de los satélites de NOAA, de las investigaciones realizadas se resalta el uso de algoritmos y métodos de aprendizaje automático como las redes neuronales convolucionales las cuales buscan en su mayoría realizar la predicción del comportamiento de diferentes fenómenos naturales.

Fuente: elaboración propia.

3.1 Análisis meteorológico en Colombia

En Colombia hay una entidad denominado IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), la cual en el 2013 en conjunto con NOAA realizaron un taller sobre los ciclones tropicales y su impacto en diferentes aspectos socio económicos; también el IDEAM fue elegido en 2017 por la OMM (Organización Meteorológica Mundial) [48] como pionero para implementación del MMSC (Marco Mundial para los Servicio Climáticos), de esta forma pueden ofrecer a todos los sectores productivos del país mejor información hidrometereológica; el IDEAM ha llegado a desarrollar una interfaz la cual permite el análisis y visualización del estado meteorológico del país haciendo uso del satélite GOES-16 con sus 16 canales de información meteorológicos [49], a la vez que también reportan accidentes como deslizamientos e incendios. En la tabla 5 se analizan los factores en común presentes entre el IDEAM y NOAA, encontrando así, enfoques similares entre: la preservación de diferentes ecosistemas, la prevención de riesgos y la forma en presentar la información.

Tabla 5. Comparación de características entre NOAA e IDEAM, [50], [51].

	NOAA	**IDEAM**
	Copila la información climática de USA proporcionado noticas, mapas e	Consultar las características climatológicas de las diferentes regiones del territorio nacional

	NOAA	IDEAM
Clima	imágenes	
Aguas y Océanos	Proporciona datos, herramientas y servicios que respaldan las economías costeras y su contribución a la economía nacional.	Realiza estudios nacionales de la hidrología en los ríos y cuencas; Evaluación y Riesgo hidrológico
Ecosistemas	Enfocado gestión y conservación de santuarios marinos nacionales, protección de áreas marítimas y estuarios para permitir un beneficio económico local	Presenta la información de los procesos de investigación en ecosistemas continentales costeros y marinos, la estructura Ecológica, la dinámica de las coberturas, el monitoreo y seguimiento de la calidad de los suelos y las tierras.

Fuente: elaboración propia.

En Colombia se han realizado investigaciones como en [52] donde se realizó la comparación de dos herramientas se software para la coordinación del ROE (Recurso Orbita Espectro) en la órbita geoestacionaria, con los softwares Visualyse OSG y Sat-Coord se comparó el comportamiento de variables como la relación C/N (portadora ruido), relación C/I (portadora

interferencia), entre otras. De los resultados obtenidos resaltan la precisión de la herramienta Visualyse OSG y su capacidad de manejo, cálculos; sin embargo, ninguno de estas herramientas permite el análisis en bandas planificadoras. De la investigación se resalta la utilidad que ha sido para la ANE (Agencia Nacional del Espectro) en los estudios y planificación de frecuencias para las redes satelitales de órbita Geoestacionaria.

4. Proyección

La gran cantidad de datos que generan este tipo de sistemas hace que se utilicen nuevos medios o plataformas para procesar y almacenar datos meteorológicos y para seguir con estas aplicaciones se está orientando al uso de Cloud Computing; con el proyecto de NOAA denominado “NOAA Big Data Project” se han anunciado colaboraciones con AWS (Amazon Web Services), Google Cloud y Microsoft, en donde se busca la combinación de la información meteorología de NOAA, la creciente infraestructura de empresas de Cloud y la capacidad de procesamiento de la información, figura 4.

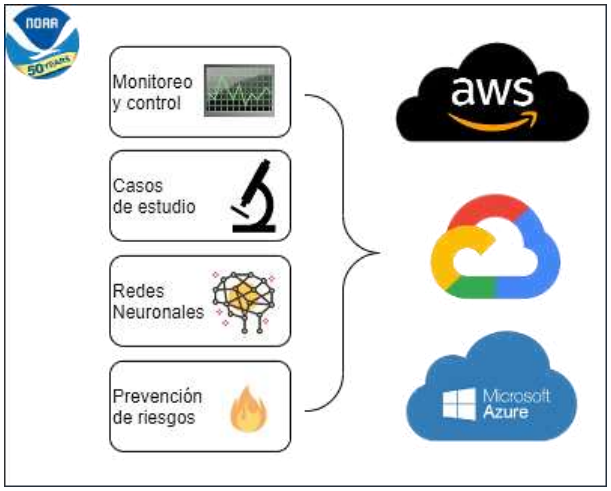


Figura 4. Aplicaciones de la información de NOAA, [53]–[55].

5. Conclusiones

Del análisis documental de los diferentes artículos que realizan desarrollos en base a la información meteorológica de los satélites de NOAA, se encuentra la importancia de llevar el registro, monitoreo y vigilancia del medio ambiente en función de la información de diferentes variables para la categorización de fenómenos naturales; permitiendo así que diferentes entidades crear planes de mitigación, realizar toma de decisiones que afectaran sectores públicos y privados.

El libre acceso a esta información meteorología ha habilitado diferentes campos de investigación como la vectorización del comportamiento del clima, la implementación de teledetección de fenómenos naturales con redes neuronales y con Inteligencia Artificial para el reconocimiento y predicción de patrones climáticos.

El uso de SDR en la elaboración de las estaciones satelitales evidencio dos ventajas considerables, en primera instancia la reducción de costos en hardware, dado que varios procesos como el filtrado de las señales puede ser implementados por bloques programables en una capa virtual y no física, en segunda instancia la movilidad y flexibilidad de las estaciones satelitales dado que disminuye la dificultad de movimiento y permite tener escalabilidad en la adquisición de resultados.

La implementación de infraestructura como servicio para el procesamiento, almacenamiento y obtención de información meteorológica de NOAA por medio de AWS, Google Cloud y Microsoft permite crecer y potenciar el análisis meteorológico ya que permite la implementación de nuevas herramientas como devops o serverless en el análisis meteorológico, donde se podrá usar infraestructura que pueda crecer vertical y/o horizontalmente, con resiliencia y que está diseñada para fallos.

Reconocimientos

Este trabajo fue desarrollado al interior del grupo de investigación GISSIC. Producto derivado del semillero de investigación Maxwell financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada.

Referencias

[1] N. W. S. US Department of Commerce, NOAA, "Your National Weather Service: Evolving to Build a Weather-Ready Nation," 2017. https://www.weather.gov/about/wrn (accessed Oct. 17, 2020).

[2] NOAA, "AboutOur Agency | National Oceanic and Atmospheric Administration." https://www.noaa.gov/about-our-agency (accessed Oct. 17, 2020).

[3] NOAA, "Marina y aviación | Administración Nacional Oceánica y Atmosférica," 2020. https://www.noaa.gov/marine-aviation (accessed Oct. 25, 2020).

[4] N. NESDIS, "About | NOAA National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS)," 2019. https://www.nesdis.noaa.gov/content/about (accessed Oct. 25, 2020).

[5] NOAA, "Gráficos | Administración Nacional Oceánica y Atmosférica,"2020. https://www.noaa.gov/charting (accessed Oct. 25, 2020).

[6] NOAA, "Educación Administración Nacional Oceánica y Atmosférica," 2019. https://www.noaa.gov/education (accessed Oct. 25, 2020).

[7] N. N. O. and A. A. US Department of Commerce, "National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Staff Directory Page," 2018.

[8] N. O. and A. A. US Department of Commerce, "NOAA's National Ocean Service," 2019.

[9] R. Weiher, "Assessing the Economic & Social Benefits of NOAA Data," 2008. Accessed: Nov. 19, 2020. [Online]. Available: https://www.oecd.org/sti/ieconomy/40066192.pdf.

[10] H. Kite-Powell, "Estimating Economic Benefits from NOAA PORTS ® Information: A Case Study of Houston," 2007. Accessed: Nov. 19, 2020. [Online]. Available:

https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/EstimatingEconomicBenefitsfromNOAAPORTSIn formation_Houston-Galveston.pdf.

[11] NASA, "Órbitas de Satélites," 2020. https://scool.larc.nasa.gov/Spanish/orbits-sp.html (accessed Oct. 17, 2020).

[12] N. OSPO, "GOES Status - Office of Satellite and Product Operations," Aug. 15, 2019. https://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/status.html (accessed Oct. 17, 2020).

[13] N.OSPO, "POES Operational Status- POES Status- OSPO," Mar. 22, 2019. https://www.ospo.noaa.gov/Operations/POES/status.html (accessed Oct. 19, 2020).

[14] NOAA, "NOAA Readies GOES-15 and GOES-14 for Orbital Storage | NOAA National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS)," Jan. 29, 2020. https://www.nesdis.noaa.gov/content/noaa-readies-goes-15-and-goes-14-orbital-storage (accessed Oct. 17, 2020).

[15] N. OSPO, "Suomi-NPP Operational Status - Office of Satellite and Product Operations," Apr. 14, 2016. https://www.ospo.noaa.gov/Operations/SNPP/status.html (accessed Oct. 19, 2020).

[16] X. Zou and X. Tian, "COMPARISON OF ATMS STRIPING NOISE BETWEEN NOAA-20 AND S- NPP Xiaolei Zou and Xiaoxu Tian Earth System Science Interdisciplinary Center , University of Maryland , College Park , MD 20740," *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 3105–3108, 2018, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8517482.

[17] X. Tian, X. Zou, and N. Sun, "COMPARISON OF RO-ESTIMATED ATMS BIASES BETWEEN NOAA-20 AND S-NPP Earth System Science Interdisciplinary Center , University of Maryland , College Park , MD 20740 Earth Resources Technology (ERT), Inc ., Laurel , MD

20707 , USA," *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 3101–3104, 2018, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519416.

[18] W. Wang, C. Cao, Y. Bai, S. Blonski, and M. A. Schull, "Assessment of the NOAA S-NPP VIIRS geolocation reprocessing improvements," *Remote Sens.*, vol. 9, no. 10, 2017, doi: 10.3390/rs9100974.

[19] N. NESDIS, "Imágenes del sector: América del Sur - Norte - NOAA / NESDIS / STAR," 2020. https://www.star.nesdis.noaa.gov/GOES/sector.php?sat=G16&sector=nsa (accessed Oct. 17, 2020).

[20] S. A. Buehler, V. O. John, A. Kottayil, M. Milz, and P. Eriksson, "Efficient radiative transfer simulations for a broadband infrared radiometer-Combining a weighted mean of representative frequencies approach with frequency selection by simulated annealing," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 111, no. 4, pp. 602–615, 2010, doi: 10.1016/j.jqsrt.2009.10.018.

[21] U.S. DEPARTMENT OF COMERCE, National Oceanic and Atmospheric Adminitration, and and National Environmental Satellite, Data, "National Oceanic and Atmospheric Administration User's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations," Feb. 2009. Accessed: Oct.17,2020. [Online]. Available:

https://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/Users_GuideBuilding_Receive_Stations_March_2009.pdf.

[22] J. Mitola, "The Software Radio Architecture," *Softw. Radio Technol.*, vol. 33, no. May, pp. 26–38, 2009, doi: 10.1109/9780470546444.ch1.

[23] V. Dascal, P. Dolea, O. Cristea, and P. Tudor, "Advanced Vhf Ground Station for Noaa Weather Satellite Apt Image Reception," *Acta Tech. Napocensis*, vol. 53, no. 3, pp. 1–7, 2012.

[24] C. Bosquez, A. Ramos, and L. Noboa, “System for receiving NOAA meteorological satellite images using software defined radio,” *Proc. 2016 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2016*, pp. 0– 3, 2016, doi: 10.1109/ANDESCON.2016.7836233.

[25] C. Velasco and C. Tipantuna, “Meteorological picture reception system using software defined radio (SDR),” *2017 IEEE 2nd Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ETCM.2017.8247551.

[26] E. B. Mikkelsen, “The Design of a Low Cost Beacon Receiver System using Software Defined Radio,” *Inst. Elektron. og telekommunikasjo*, no. July, pp. 1–83, 2009, [Online]. Available: http://hdl.handle.net/11250/2369478.

[27] D. J. M. Peralta, D. S. Dos Santos, A. Tikami, W. A. Dos Santos, and E. W. R. Pereira, “Satellite telemetry and image reception with software defineradio applied to space outreach projects in brazil,” *An. Acad. Bras. Cienc.*, vol. 90, no. 3, pp. 3175–3184, 2018, doi: 10.1590/0001- 3765201820170955.

[28] A. G. C. Guerra, A. S. Ferreira, M. Costa, D. Nodar-López, and F. Aguado Agelet, “Integrating small satellite communication in an autonomous vehicle network: A case for oceanography,” *Acta Astronaut.*, vol. 145, no. November 2017, pp. 229–237, 2018, doi: 10.1016/j.actaastro.2018.01.022.

[29] J. Lee Min, “Decoding Signals From Weather Satellites Using Software Defined Radio,” *Electron.Theses Diss.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–70, 2018, doi: 10.18041/2382-3240/saber.2010v5n1.2536.

[30] Icom, “INSTRUCTON MANUAL iPCR1500 iPCR2500,” *Screen*. Icom, Osaka, pp. 45–49, 2006, [Online]. Available: http://www.icomamerica.com/es/products/receivers/pc/pcr1500/default.aspx.

[31] National Instruments, "SPECIFICATIONS USRP-2920," Jul. 13, 2017. https://www.ni.com/pdf/manuals/375839c.pdf (accessed Oct. 19, 2020).

[32] RTL-SDR, "RTL-SDR Blog V3 Datasheet," Feb. 2018. Accessed: Oct. 19, 2020. [Online]. Available: https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2018/02/RTL-SDR-Blog-V3-Datasheet.pdf.

[33] N. Crisan and L. Cremene, "NOAA Signal Decoding And Image Processing Using GNU-Radio," *Acta Tech. Napocensis*, vol. 49, no. 4, pp. 1–5, 2012.

[34] D. Aguirre and P. R. Yanyachi, "Design of a parabolic patch antenna in band L, with double layer and air substrate, for weather satellite reception," *2017 6th Int. Conf. Futur. Gener. Commun. Technol. FGCT 2017*, pp. 10–14, 2017, doi: 10.1109/FGCT.2017.8103395.

[35] Y. Rafsyam, Z. Indra, E. E. Khairas, Jonifan, and W. A. Karimah, "Design of Double Cross Dipole Antenna as NOAA Satellite Signal Receiver for Monitor Cloud Conditions Application," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1364, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1364/1/012059.

[36] M. Fathurahman, Zulhelman, A. Maulana, and M. Widyawati, "Design and Development of Dipole Antenna for NOAA Satellite Image Acquisition System and Processing," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1364, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1364/1/012025.

[37] F. P. A. Escobedo, H. R. Alvarez, H. Salazar, C. G. R. Percing, and R. L. J. M. De Oca, "Low cost optimization method of a double cross antenna satellite reception system for the processing and improvement of meteorological satellite signals and images NOAA 15-18-19," *Proc. 2019 IEEE 1st Sustain. Cities Lat. Am. Conf. SCLA 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/SCLA.2019.8905749.

[38] A. E. Quiroz-Olivares, N. I. Vargas-Cuentas, G. W. Zarate Segura, and A. Roman-Gonzalez, "Low-cost and portable ground station for the reception of NOAA satellite images,"

Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl., vol. 10, no. 5, pp. 450–454, 2019, doi: 10.14569/ijacsa.2019.0100557.

[39] M. L. Keefer *et al.*, "Evaluating the NOAA Coastal and Marine Ecological Classification Standard in estuarine systems: A Columbia River Estuary case study," *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 78, no. 1, pp. 89–106, 2008, doi: 10.1016/j.ecss.2007.11.020.

[40] A. K. Mitra, P. K. Kundu, A. K. Sharma, and S. K. Roy Bhowmik, "A neural network approach for temperature retrieval from AMSU-a measurements onboard NOAA-15 and NOAA-16 satellites and a case study during Gonu cyclone," *Atmosfera*, vol. 23, no. 3, pp. 225–239, 2010.

[41] D. J. Schneider and M. J. Pavolonis, "ADVANCES IN VOLCANO MONITORING : THE ROLE OF JPSS INSTRUMENTS U . S . Geological Survey-Alaska Volcano Observatory , Anchorage , AK NOAA Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies , Madison , WI," *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 2798–2801, 2017, doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127579.

[42] C. Muñoz, P. Acevedo, S. Salvo, G. Fagalde, and F. Vargas, "Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA/16-LAC en la Región de la Araucanía, Chile," *Bosque*, vol. 28, no. 2, pp. 119–128, 2007, doi: 10.4067/s0717-92002007000200004.

[43] L. Carro-Calvo, C. Casanova-Mateo, J. Sanz-Justo, J. L. Casanova-Roque, and S. Salcedo- Sanz, "Efficient prediction of total column ozone based on support vector regression algorithms, numerical models and Suomi-satellite data," *Atmosfera*, vol. 30, no. 1, pp. 1–10, 2017, doi: 10.20937/ATM.2017.30.01.01.

[44] A. Antón, R. Martínez, M. A. Salas, and A. Torre, "Performance analysis and implementation of spatial and blind beamforming algorithms for tracking leo satellites with

adaptive antenna arrays," in *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009, Proceedings*, 2009, pp. 216–220.

[45] S. Soisuvarn, Z. Jelenak, P. S. Chang, Q. Zhu, and G. Sindic-Rancic, "Validation of noaa's near real-time ascat ocean vector winds," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 1, no. 1, pp. 118–121, 2008, doi: 10.1109/IGARSS.2008.4778807.

[46] A. Huang, L. Gumley, K. Strabala, S. Mindock, R. Garcia, and G. Martin, "COMMUNITY SATELLITE PROCESSING PACKAGE FROM DIRECT BROADCAST : PROVIDING REAL-TIME SATELLITE DATA TO EVERY CORNER OF THE WORLD Space Science and Engineering Center (SSEC) Cooperative Institute for Meteorological Studies (CIMSS) University of Wisconsin," *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 5532–5535, 2016, doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730443.

[47] K. R. Al-Rawi and J. L. Casanova, "APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES PARA EL CONTROL Y SEGUIMIENTO EN TIEMPO REAL DE LOS INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES NOAA-AVHRR," in *TELEDETECCION. Avances y Aplicaciones.VIII Congreso Nacional de teledeteccion*, 1999, no. January, pp. 244–247.

[48] Organización Meteorología Mundial, "IDEAM se fortalece en monitoreo y seguimiento de huracanes (IDEAM, Columbia) | Organización Meteorológica Mundial," Feb. 07, 2013. https://public.wmo.int/es/media/news-from-members/ideam-se-fortalece-en-monitoreo-y-seguimiento-de-huracanes-ideam-columbia (accessed Oct. 26, 2020).

[49] IDEAM, "VISOR DE IMÁGENES SATÉLITALES - IDEAM." http://www.pronosticosyalertas.gov.co/imagsatelital-portlet/html/imagsatelital/view.jsp (accessed Oct. 26, 2020).

[50] NOAA, "National Oceanic and Atmospheric Administration | U.S. Department of Commerce." https://www.noaa.gov/ (accessed Oct. 26, 2020).

IDEAM, “IDEAM - IDEAM.” http://www.ideam.gov.co/ (accessed Oct. 26, 2020).

[51] J. S. M. G, J. E. Ar, and M. L. Su, “Comparacion De Herramientas De Software Para La Coordinacion Internacional Del Roe En La Orbita Geoestacionaria,” *Visión Electrónica algo más que un estado sólido*, vol. 9, no. 1, pp. 5–12, 2016, doi: 10.14483/22484728.11009.

[52] Google Cloud, “Weather, climate big data from NOAA now in cloud | Google Cloud Blog,” Dec.19, 2019. https://cloud.google.com/blog/products/data-analytics/weather-climate-big-data-from-noaa-now-in-cloud (accessed Oct. 26, 2020).

[53] Amazon Web Services, “Registry of Open Data on AWS,” Dec. 19, 2019. https://registry.opendata.aws/collab/noaa/ (accessed Oct. 26, 2020).

[54] NOAA, “Cloud platforms unleash full potential of NOAA’s environmental data | National Oceanic and Atmospheric Administration,” Dec. 19, 2019. https://www.noaa.gov/media-release/cloud- platforms-unleash-full-potential-of-noaa-s-environmental-data (accessed Oct. 26, 2020).

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

EVALUATION OF THE USE OF A TELEOPERATED VEHICLE, FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Evaluación del empleo de un vehículo teleoperado, con fines educativos.

Abel Hernández Eskenazi[1], Josué Daniel Herrera Martínez[2], Raydel García Mesa[3]

Abstract

The use of robotics vehicles in the education of children and teenagers constitutes a modern tendency of great interest in Cuba, due to the quantity of knowledge that provides and the variety of disciplines that it integrates. The present work has as objective to evaluate the use of a teleoperated and robotic vehicle based on Arduino, in the education of children and adolescents from Cuba. It includes the study of the state of the art about educational robotics in the world and in Cuba, who allows to define the main educational activities permitted by robots and the parameters to evaluate in the vehicle of analysis. Afterwards, it carries out a description of the technical specifications of the device, which influences in the benefits obtained by the use of the vehicle. Finally, it carries out the evaluation taking into account the defined parameters in the study of the state of the art. It obtains as conclusions that the use of

[1] Student of Second Year of Telecommunications and Electronics Engineering, Technological University of Havana "CUJAE", Cuba, Participant of Researches, Wireless Sensors Group, Technological University of Havana "CUJAE", Cuba. E-mail: ahernandeze@tele.CUJAE.edu.cu
[2] Student of Second Year of Telecommunications and Electronics Engineering, Technological University of Havana "CUJAE", Cuba, Participant of Researches, Wireless Sensors Group, Technological University of Havana "CUJAE", Cuba. E-mail: jherreram@tele.CUJAE.edu.cu
[3] Telecommunications and Electronics Engineer, Technological University of Havana "CUJAE", Cuba. Master in Design of Electronic Systems, Technological University of Havana "CUJAE", Cuba. Researcher and Docent: Technological University of Havana "CUJAE", Cuba. E-mail: raydel.gm@cime.CUJAE.edu.cu

the vehicle with educational purposes would be very fruitful, in spite of minimum limitations that do not put directly in risk the quality of educational activities.

Keywords: Arduino, educational robotics, teleoperated vehicle.

Resumen

La utilización de vehículos robóticos en la educación de niños y adolescentes constituye una tendencia moderna de gran interés en Cuba, debido a la cantidad de conocimientos que provee Y la variedad de disciplinas que integra. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el empleo de un vehículo robótico teleoperado basado en Arduino, en la educación de niños y adolescentes cubanos. Contempla el estudio del estado del arte de la robótica educativa en el mundo y en Cuba, lo cual posibilitó definir las principales actividades educativas que permiten los robots y los parámetros a evaluar en el vehículo de análisis. Posteriormente, se realiza una descripción de las características técnica del dispositivo, las cuales influyen en los beneficios que se obtienen del empleo del vehículo. Para finalizar, se realiza la evaluación teniendo en cuenta los parámetros definidos en el estudio del estado del arte. Se obtienen como conclusiones que sería muy provechoso el empleo del vehículo con fines instructivos, a pesar de limitaciones mínimas que no ponen directamente en riesgo la calidad de las actividades educativas.

Palabras clave: Arduino, robótica educativa, vehículo teleoperado.

1. Introduction

Educational robotics is a didactic approach that can be easily integrated in different educational

environments, in which through the use of programmable robotic devices, and the application of project-based learning methodologies, it is possible to improve the process of knowledge acquisition of students, allowing them in turn to become familiar with information and communication technologies and use them to define a plan, organize and find a solution to a specific problem through research and experimentation [1], [4], [5].

In Cuba, robotics has begun to be present in the education of children and young people, based on the work developed by the Robotics and Mechatronics Group (GRM in Spanish) of the Technological University of Havana "CUJAE", which has carried out activities such as those developed in the project Educational Robotics Learn by Playing with EZ-Robots, where children and young people are stimulated in subjects associated with robotics, [4]. In spite of this, the number of projects related to educational robotics in Cuba is insufficient to satisfy the increasing demand of the use of these methodologies in the teaching of children and adolescents. For this reason, this work has as an objective to carry out an evaluation of the use of a teleoperated robotic vehicle based on Arduino (Figure 1), built by students from the Faculty of Engineering in Telecommunications of the Technological University of Havana "CUJAE", in the education of Cuban children and adolescents.

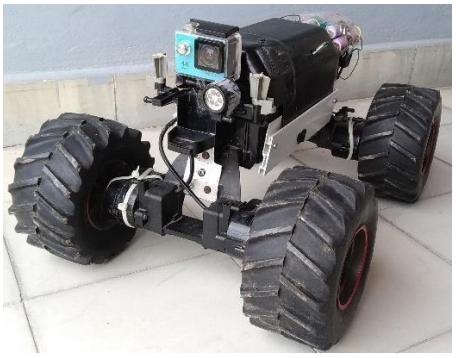


Figure 1. Teleoperated vehicle based on Arduino. Source: own.

The teleoperated vehicle to be evaluated is composed of different functional blocks:

- Locomotion system: Integration of mechanical components in charge of the movement (the wheels).
- Processor: Programmable hardware component that executes the instructions given to the vehicle.
- Communication system: Component that allows the communication between the operator and the vehicle.
- Power supply: Provides the energy of the system.
- Sensor: Component that captures physical quantities from the environment.
- Electromechanical system: Integration of components responsible for converting electrical energy into mechanical energy (motors and H-bridge).
- Manual control: Interface that allows sending instructions to the vehicle.
- Image capture: Made up of a camera and a circuit for lighting in areas of poor visibility.

2. State of the art

In this section, there will be a review of the current state of the art of educational or pedagogic robotics, where prototypes used in the world and in Cuba are presented.

2.1. KIBO Robot

KIBO (Figure 2) has been developed by Kinderlabs Robotics at Tufts University and is an educational robot for children equipped with sound, light and distance sensors, and a bar code reader that is the means by which all programming instructions are entered. It has an appearance that looks as if its physical design has not been completed, which invites children to complete it by using materials that allow for decoration and personalization, involving and inspiring them in the creation of projects with their own meaning in which they can develop creative and artistic skills, [5].



Figure 2. KIBO Robot, [5].

2.2. Mobile robot explorer from the University of Don Bosco

Another prototype developed for academic and educational purposes is the mobile robot explorer from the University of Don Bosco (Figure 3), El Salvador, which has an omnidirectional

locomotion system with 3 wheels [6]. Among the tools added to the system are a camera, a sensor of air temperature and humidity so that it can have more information about its environment. Although this prototype is used for academic purposes in higher education, it can be introduced in high school, adolescents and young people, to study the locomotion in mobile robots and IoT technologies (Internet of Things), [6].

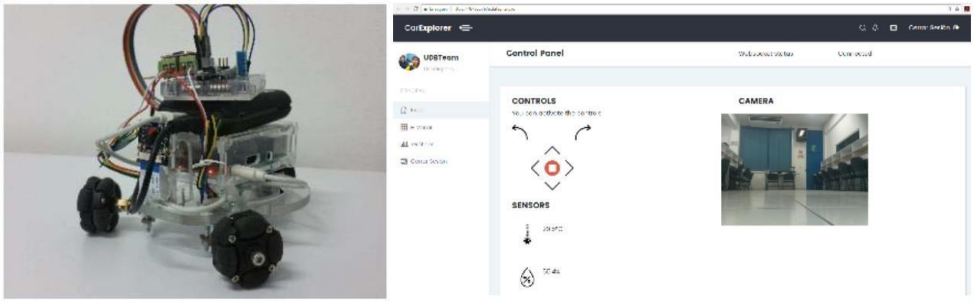


Figure 3. Mobile robot explorer from the University of Don Bosco and its web application for control and monitoring, [6].

2.3. EcateBot

EcateBot (Figure 4) is a mobile robot developed by the Autonomous University of the State of Mexico that exploits the desire of students to interact in a very easy and simple way with a robot. The project is accompanied by assembly instructions so that students can elaborate EcateBot, and at the same time apply concepts from the areas of physics, mathematics and programming, thus promoting their skills and competencies. The robot is remotely controlled from an Android device via Bluetooth, which communicates with an Arduino to execute the instructions sent by the operator. It also has lighting and sound elements, as well as materials

that support heavy use, [9].

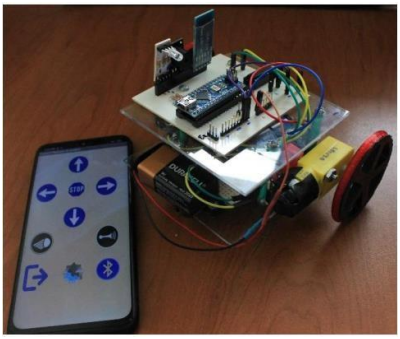


Figure 4. EcateBot and Android control application, [9].

2.4. Adventure Bot

EZ-Robot is a course given by the Robotics and Mechatronics Group of the Technological University of Havana "CUJAE". Among the robotic prototypes used is the Adventure Bot (Figure 5), which has an electronic board based on an ARM microcontroller, two continuous rotation servomotors responsible for locomotion through wheels, a camera, and audio handling devices such as a microphone and a speaker [4]. With the development of these courses it was proved that the Adventure Bot is an excellent material to be considered by those interested in studying topics related to science and technology, [4].



Figura 5. Adventure Bot, [4].

2.5. Conclusions of the study of the state of the art

From the study of the presented prototypes it can be concluded that certain activities exist that allow the use of a robot with an educational purpose:

- Interaction for commands: It consists in the execution of a determined task for part of the robot from a command sent by the operator.
- Construction of the robot: Implies the design and the construction of the robot. It allows the student to link to design criteria according to the different requirements of the device.
- Study of the environment from sensors: It consists of the obtaining of information of the environment from sensors installed in the vehicle.
- Programming of the robot: It consists of that the students participate directly in the elaboration of the algorithm that controls to the robot.
- Study of the parts that integrate the robot: It is about the study of the blocks that make to work to the robot as a system.

From the study carried out, the authors also defined the parameters to be evaluated in the tele-operated vehicle to determine if its use with educational purposes in Cuba is possible:

- Educational activities and areas of knowledge that allow developing
- Energy Autonomy
- Ages of interest
- Materials and size

3. Technical description

The technical specifications of the vehicle to be evaluated will be addressed below.

3.1. Locomotion system

The locomotion system is based on the reuse of the mechanical structure of a disused remote-controlled toy car. From a mechanical point of view, the use of this motor distribution allows independent control over the direction of movement of each wheel, which in turn allows greater maneuverability. This represents an advantage over the use of other systems such as front or rear-wheel drive, which do not allow such independent control due to the distribution of two motors only on the rear or front wheels, [11]. On the other hand, one disadvantage of the system used with respect to the others mentioned is the energy consumption caused by the use of a greater number of motors; however, this does not represent significant problems for the energy autonomy of the vehicle.

To make the turns the vehicle has a differential mechanism, represented in Figure 6 (left). This mechanism is to perform turns of up to 360 degrees without having to advance or vary the relative position of the vehicle from the change of direction of rotation of the wheels on one side over the other [11]. This configuration requires a smaller turning radius compared to other configurations such as the Ackerman, represented in Figure 6 (right), which consists of turning while moving from the control of a vertical axis on the front wheels [11]. After experimental tests during the construction of the vehicle, it was shown that the differential configuration is optimal

for transit through spaces with several obstacles.

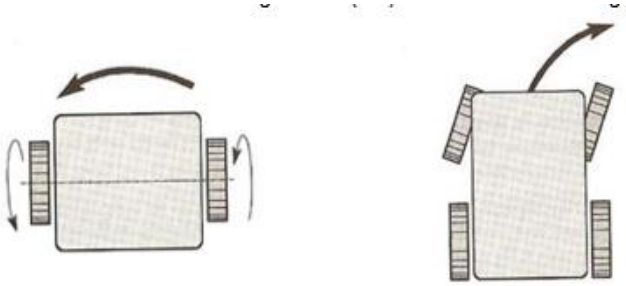


Figure 6. Rotation in differential configuration (left) and Ackerman configurations (right), [11].

3.2. Electronic board

The electronic board installed as a processor is an Arduino UNO (Figure 7), whose technical specifications are shown in Table 1, [7]. This board is a free hardware and software platform based on an Atmega328 microcontroller and a development environment with high-level programming language; it has enough memory space for the program that controls the vehicle operations and also has a number of input and output pins left over for future connections that can be used to improve the prototype. The Arduino UNO is a low cost board but with enough technical potential for a wide variety of projects, [7]. This is one of the advantages that it presents against the use of other open source boards such as Raspberry Pi, which is much more powerful and expensive, [7], [12].



Figure 7. Arduino UNO, [7].

Table 1: Technical specifications of the Arduino UNO, [7].

Microcontroller	Atmega328
Operating voltage	5V
Input voltage (Recommended)	7 – 12V
Direct current per IO pin	40 mA
Direct current on pin 3.3V	50 mA
Flash Memory	32kB
SRAM	2kB
EEPROM	1kB
Clock frequency	16 MHz

3.3. Communication system

The communication system is based on the Bluetooth module HC-05 (Figure 8). This module has the Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate) standard, which is compatible with most smart phones. Its working frequency is 2,4 GHz, the maximum transmission speed is 2,1Mbps (sufficient for loseless data exchange between the vehicle and the operator) and its power supply can vary between 3,6 and 6V with a current consumption of 50 mA, [8]. Its programming in Arduino is very simple and does not require external libraries. The maximum communication distance that can be achieved with this technology is 10 m [8], which is sufficient for indoor work

in classrooms and rooms. The compatibility with smartphones, the low consumption and its easy programming make the use of the HC-05 an advantage of the prototype evaluated for the instruction of children and teenagers.



Figure 8. Bluetooth Module HC-05, [8].

3.4. Motors, H-bridge module and battery

The electromechanical system of the vehicle is made up of four 12V DC motors with 300 mA consumption, also recycled from the toy by remote control, and a module containing four H-bridges distributed one for each motor. An H-jumper is a circuit that allows the control of the motors with the power they require using lower power stimuli. The H-bridge module implemented in the vehicle is a printed circuit at the Center for Research in Microelectronics (CIME) based essentially on the use of two transistors and two relays for each motor to control (Figure 9), [16]. This design has as a disadvantage over very popular commercial models, such as the L298N driver [2], [3], [8], the impossibility of controlling the speed of rotation; on the other hand, it has as advantages the control of four motors from the same circuit (the L298N allows the control of two DC motors from the same circuit) and a better use of the voltage provided by

the battery (the L298N has internal voltage drops of more than 1V due to switching transistors that are not present in the module implemented in the project [8]). The motors are powered from the battery that energizes the vehicle and the stimuli are made with the digital pins of the Arduino UNO.

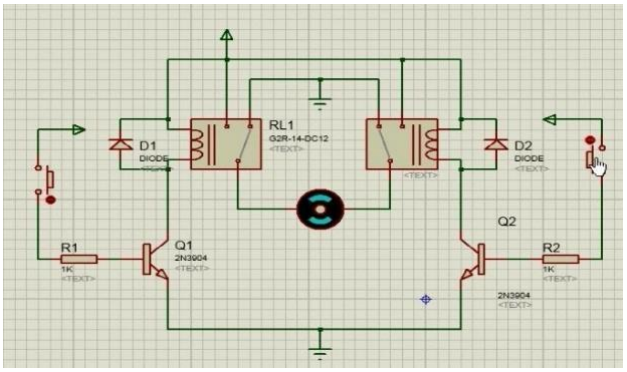


Figure 9. Diagram of the H-jumper that controls a motor, [16].

A total of 9 lithium-ion cells were used for battery the vehicle: 3 blocks in series, each consisting of 3 cells in parallel. In this way the battery provides a power supply of 11.1V and 6.6 Ah, comparable to the admissible values for the Arduino UNO in Table 1 and sufficient to supply the DC motors. In practice, the capacity of the battery used is lower than the theoretical value because most of the cells are recycled, which prevents the performance of the vehicle from being as efficient as it could be with new cells. The current battery gives the vehicle an autonomy of between 40 and 45 minutes of movement, which may be sufficient for its use in a classroom; however, if a new battery with the theoretical capacity is used, an autonomy greater than 2 hours would be achieved.

3.5. Sensor and lighting

The vehicle is equipped with the DHT11 digital temperature and relative humidity sensor (Figure 10), with which real-time measurements can be taken from the area where the vehicle is located. The DHT11 sensor works in a measurement range between 0 and 50 ℃ of temperature and between 20 and 90 % of relative humidity; its accuracy is ± 2 ℃ of temperature and ± 5 % of relative humidity [13], enough values to carry out experimental work by students on the behavior of these environmental variables under different conditions.

For the illumination, the focus of a disused flashlight was used, which is composed of six white LEDs in parallel that provide sufficient illumination for working with a camera in areas of darkness.

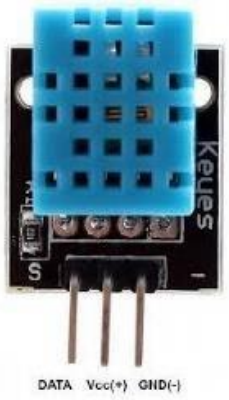


Figure 10. DHT11 sensor, [13].

3.6. Camera and image viewing application

The vehicle has a functional image capture block, which consists of a camera and the lighting circuit for areas of darkness. The camera model used is GoPro H9 (Figure 11), which is

previously programmed to capture images, process them and transmit them to a terminal [17]. It can capture images in Ultra High Definition (UHD) format resolutions, but wirelessly transmits in High Definition (HD) up to 1080p (1920 x 1080 pixels) [17]. Wireless transmission is via a Wi-Fi connection in the 2.4 GHz band and has its own battery that can be recharged with a USB cable [17]. To receive and view images in real time, the Ez iCam application is used (Figure 12), recommended by the camera manufacturers, [17]. This application runs on another smartphone that connects via Wi-Fi with the camera, from which it is possible to take pictures, videos and download images. Ez iCam is an application that can be downloaded for free from the Internet for any smartphone or tablet operating system, [17].



Figure 11. GoPro H9 Camera, [17].



Figure 12. Ez iCam Application. Source: own

3.7. Application for vehicle control and monitoring

For the vehicle-operator interface, an application is used (Figure 13) that allows the control of the vehicle and the monitoring of the sensor measurements at the same time. It was developed using the online platform for programming applications for Android devices App Inventor. It is a platform that presents a very intuitive language, based on visual and block programming. It also has several very interesting and useful pre-defined classes for Android projects [10], [15].

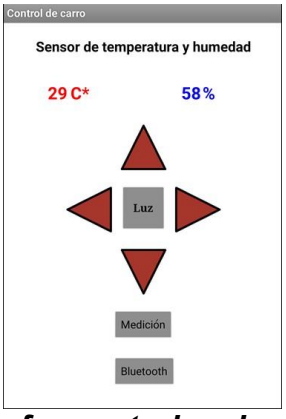


Figure 13. Application for control and monitoring. Source: own

4. Evaluation of the use of the vehicle for educational purposes

Based on the technical characteristics and taking into account the parameters established with the study of the state of the art, an evaluation will be made in this section on the advantages and limitations of the use of the analyzed vehicle for educational purposes.

4.1. Educational activities and areas of knowledge that allow to develop

As for the activities with educational purposes in which a robot can be employed, the vehicle

evaluated can, in different ways, be involved in all of them.

It allows interaction by commands through the application of control and monitoring, with which in a very intuitive way and with a friendly interface allows students to operate the movement, perform competitions to avoid obstacles against the clock under different levels of complexity, as well as make the measurements and monitor them. With this activity, the vehicle makes it possible to involve students in a playful way in the teleoperation of robots and in the manipulation of new technologies.

The construction of the robot can be carried out with the improvement of the current prototype by the students. The philosophy of using recycled materials can be maintained to encourage the reuse of resources. In this way students can use their creativity to add new parts to the vehicle such as a robotic arm, new sensors, or any other element of interest.

The study of the environment is carried out using the DHT11 sensor and the camera. Students can learn about the behavior of the temperature and relative humidity of the environment and maintain a real-time monitoring of the values through the application of control and monitoring. This allows the use of the vehicle in activities such as physics laboratories and solving mathematical problems from experimental data obtained. The camera allows the capture of images from the sites where the vehicle travels, allowing its observation in real time and after the operation of the vehicle.

The programming of the robot is possible due to the use of the Arduino UNO as processor, free

software platform and high-level language that can be learned by students from relatively early ages, [14]. The use of the Arduino technology is an advantage in the programming with educational purposes, because it has a community of programmers very active in the world, that has brought as result the presence in Internet of a lot of bibliography to initiate people in its employment, although they don't have a basic notion of the programming, [14]. Students can work on improvements to the current prototype, such as the incorporation of an automatic obstacle avoidance mode. Similarly, students can learn to program Android applications with the use of App Inventor and use the knowledge gained to modify the control and monitoring application with more complex tasks to perform. These activities stimulate the logical thinking of students, ability to solve problems and practice challenges, as well as encouraging vocational training in programming related careers.

The study of the parts of the robot can be carried out from the analysis of the functional blocks that conform the system. Introductory classes to robotics can be given where the parts of the mobile robot are exemplified through the teleoperated vehicle and the blocks that integrate it. In this way students can also learn how to apply knowledge of mechanics, electronics and wireless communications in the implementation of robotic systems.

4.2. Energy Autonomy

As discussed in the technical description section, the battery that powers the system provides a range that varies between 40 and 45 minutes of vehicle movement. This time may be sufficient for the use of the system in Elementary and High School classes, levels where classes

last 45 min. However, it would prevent prolonged use in events such as technology fairs lasting hours. For this last use it would be convenient to renew the battery.

4.3. Ages of interest

The use of the teleoperated vehicle could be oriented to different ages, depending on the activities that the students would perform with it.

It could start its use in Primary School children, from 5th and 6th grade (between 10 and 11 years old), who can learn about the vehicle from its teleoperation in a playful way, as well as from the monitoring of the measured variables, to introduce them to knowledge of physics.

Its use in students of High School who are between 12 and 14 years old, could also include the introduction to programming and robotics, from the Arduino platform and the study of the functional blocks that compose the vehicle.

In students of High School who are between 15 and 17 years old, its use can also include the programming of more complex tasks, in which students can link different disciplines that contribute to their preparation to enter university; the improvement of the current prototype from the construction of new parts and functional blocks; as well as the realization of measurements for experimental practices in physics laboratories that include mechanics, electronics or the study of temperature and relative humidity.

4.4. Materials and size

The materials used in the construction of the vehicle are mainly recycled, which gives a

fundamental value to the prototype: the reuse of the available resources, a very important principle to inculcate in the Cuban society, which demands technological solutions from reuse, creativity and innovation.

As for the dimensions, the evaluated prototype measures 29,5 cm high, 39,0 cm wide and 54,5 cm long. These measures compared to the state of the art designs represent a large prototype, which although it is an eye-catching vehicle, especially for children, it causes that its transportation is not so easy and its storage takes up considerable space.

5. Conclusions

The use of the teleoperated vehicle analyzed for educational purposes in Cuban children and adolescents turns out to be very fruitful because it allows carrying out a great number of activities that provide students with knowledge in the STEAM disciplines (Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics) from early ages, which have gained importance in the formation of new professionals in Cuba. On the other hand, the prototype presents limitations subject to improvements regarding energetic autonomy, which prevents its movement for more than 45 minutes, and its size, which makes difficult its transportation and storage.

It was demonstrated how useful is the use of this prototype with educational purposes, during the Robotics Course for children in the Technological Park La Finca de Los Monos, in Havana, Cuba, between July and August 2020, where it was used as a teaching means to exemplify the use of the Arduino platform, motors and sensors in robotics.

Acknowledgments

The authors would like to thank the workers of the repair shop Electrónica Viva, in Havana, Cuba, for their support, for giving space and resources to carry out the necessary tests and measurements for the obtained results.

References

[1] J. A. Niño, L. Y. Martínez y F. H. Fernández “Mano robótica como alternativa para la enseñanza de conceptos de programación en Arduino”, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol. 2, no. 28, pp. 132 - 139, may 2016.

[2] C. Flores-Vázquez, A. Rojas y K. Trejo, “Operación remota de un robot móvil usando un teléfono inteligente” INGENIUS, núm. 17, 2017.

[3] A. Cerón, “Sistemas robóticos teleoperados” Ciencia e Ingeniería Neogranadiana, no. 15, pp. 62-72, 2005.

[4] A. M. Rivera, L. A. O’Farril, C. Miguélez, P. Martínez y I. O. Benítez “Caracterización del ez-robot para su utilización en la robótica educativa”, Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, vol. 12, no. 11, pp. 73 - 80, nov 2019.

[5] M. G. da Silva, C. S. González “PequeBot: Propuesta de un Sistema Ludificado de Robótica Educativa para la Educación Infantil”, Actas del V Congreso Internacional de Videojuegos y Educación (CIVE'17), 2017.

[6] A. Marroquín, A. Gómez y A. Paz “Design and implementation of Explorer Mobile Robot controlled remotely using IoT Technology”, 2017.

[7] R. Batista, " Diseño e implementación de un sistema de iluminación inteligente de interiores ", tesis Eng., Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” CUJAE, La Habana, Cuba, 2019.

[8] S. Companioni, "Procesamiento de imágenes, obtenidas por un vehículo autónomo, para el reconocimiento de daños en cultivos ", tesis Eng, Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” CUJAE, La Habana, Cuba, 2020.

[9] J. A. Licona, “Diseño y desarrollo de un robot móvil a bajo costo para niños: EcateBot”, thesis Eng, Universidad Autónoma del estado de México, México D.F, México, 2019.

[10] R. A. Moreno, Desarrollo de aplicaciones para Android usando MIT App Inventor 2, 1era ed. Bogotá: Autoedición, 2016.

[11] L. A. Velazco, "Diseño de un sistema de control basado en linealización por realimentación para robot móvil tipo Ackerman con velocidad variable y movimiento en doble sentido describiendo trayectorias óptimas " thesis MSc, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2019.

[12] C. Vázquez, "Framework de comunicaciones para robótica educativa, distributiva y colaborativa” thesis Eng, Universidad de Extremadura, Badajoz, España, 2019.

[13] L. Rodríguez, "Diseño e implementación de una Estación Meteorológica para la agricultura basada en Arduino", thesis Eng, Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” CUJAE, La Habana, Cuba, 2019.

[14] D. Higuera, J. Guzmán, A. Rojas “Implementando las metodologías steam y abp en la enseñanza de la física mediante Arduino”, III Congreso Internacional en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de Software y Salud Electrónica y Móvil AmITIC, pp 133 – 137, 2019.

[15] J.M. Nova, " Diseño y desarrollo de una aplicación para monitorear la concentración de CO y CH4 en dispositivos móviles Android". thesis Eng, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, 2018.

[16] ECDRUM. “Circuito – inversión de giro de un motor de CD con relés”, 2018, [Online] Available at http: //ecdrumdownload.blogspot.com.

“Manual de la GoPro H9”, 2017, [Online] Available at http: //www.google.com.



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

TIC

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

FUNCTIONAL ANALYSIS FOR PIICO IOT PLATFORM

Análisis Funcional Para La Plataforma Iot Piico

Andres Sanchez-Martin[1], Sergio Gutierrez [2], Johana C Martinez[3], Félix Julián Gutierrez[4], Sebastian Enrique Villanueva [5], Juan José Ochoa[6], David Santiago Pachón Robayo[7]

Abstract

This paper presents the main challenges of an Internet of Things (IoT) platform. In this sense, an interoperability platform for IoT devices, called PIICO, is presented in the frame of an agriculture application. PIICO is a platform able to resolve interoperability between components and has the potential to be a stable IoT platform. Improvements opportunities of the main IoT PIICO components (nodes, gateway, and data analytics platform) are presented and

[1] MSc. in Systems and Computing Engineering, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Full-time profesor at Universidad de San Buenaventura / Systems Engineering Department, Colombia. E-mail: aasanchez@usbbog.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8288-3120

[2] Doctorate in Engineering, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Full-time profesor at Universidad de San Buenaventura / Electronic Department, Colombia. E-mail: sgutierrez@usbbog.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7773-6839

[3] Telecommunications Business and Services Specialist. Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá. Colombia. Full-time profesor at Universidad de San Buenaventura / Electronic Department, Colombia. E-mail: johmartinez@usbbog.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1725-0431

[4] Master in Multimedia and Communications. Universidad Carlos III de Madrid. España. Full-time profesor at Universidad de San Buenaventura / Electronic Department, Colombia. E-mail: fgutierrez@usbbog.edu.co ORCID: 0000-0002-0386-0861

[5] Undergraduate Student, Systems Engineering, Universidad de San Buenaventura, Colombia. E-mail: vsebastian@academia.usbbog.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2345-5828

[6] Undergraduate Student, Systems Engineering, Universidad de San Buenaventura, Colombia. E-mail: oojuan@academia.usbbog.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5394-3518

[7] Undergraduate Student, Electronics Engineering, Universidad de San Buenaventura, Colombia. E-mail: dspachon@academia.usbbog.edu.co ORCID: 0000-0002-4830-3698

discussed. The proposed improvements will make that an IoT platform improves its functionality, operation, security, and performance.

Keywords: IoT Node, IoT Gateway, Data Analytics platform, Big Data, Internet of Things, agriculture.

Resumen

Este documento presenta los principales desafíos de una plataforma de Internet de las cosas (IoT). En este sentido, se presenta una plataforma de interoperabilidad para dispositivos IoT, denominada PIICO, en el marco de una aplicación agrícola. PIICO es una plataforma capaz de resolver la interoperabilidad entre componentes y tiene el potencial de ser una plataforma de IoT estable. Se presentan y discuten las oportunidades de mejora de los principales componentes de IoT PIICO (nodos, puerta de enlace y plataforma de análisis de datos). Las mejoras propuestas harán que una plataforma IoT mejore su funcionalidad, operación, seguridad y rendimiento.

Palabras clave: Nodo IoT, puerta de enlace IoT, plataforma de análisis de datos, Big Data, Internet de las cosas, agricultura.

1. Introduction

Internet de las cosas (IoT) se ha convertido en un concepto bastante utilizado para resolver necesidades a través de aplicaciones en diversos sectores de la economía a nivel mundial; de acuerdo con el portal Globe News Wire constituye un negocio de 14.5 billones de dólares en 2020, [1]. Esta tecnología cada año toma más fuerza, impulsada por los distintos avances en

cuanto a la electrónica, las redes de comunicaciones y el análisis de información fomentado por los servicios de almacenamiento en la nube, [2].

IoT en forma general, es una red de dispositivos integrada por sensores, actuadores, sensor-actuador, equipos de comunicación, equipos Gateway y un sistema de almacenamiento y gestión de la información recolectada por los dispositivos, [3]. Los sistemas IoT pueden desplegarse en objetos cotidianos como: electrodomésticos, vehículos, líneas de producción industrial, entre otros; los protocolos de comunicación pueden ser alámbricos o inalámbricos, siendo estos últimos los más empleados, a saber: Zigbee, LoRa, Bluetooth y WiFi, entre otros. La información de los dispositivos IoT es direccionada hacia internet por un dispositivo Gateway [4]; posteriormente, la información es almacenada y procesada en la nube con el fin de ofrecer servicios a partir de los datos e información recolectada de los dispositivos IoT [5]. Uno de los retos de IoT es la gran variedad de tecnologías, protocolos de comunicación incompatibles entre sí, diversidad de fabricantes y el nivel de madurez respecto a las normas que los dispositivos deben cumplir [6], lo cual dificulta la interoperabilidad de estos dispositivos con los demás componentes de un sistema IoT, por ejemplo con las plataformas de procesamiento de la información, [7].

Como un aporte a la solución del problema de la interoperabilidad se da la incursión de Samsung en el mercado de IoT con el proyecto Artik en el 2015; el cual ofrecía un Gateway multiprotocolo y servicios complementarios para el desarrollo de aplicaciones en IoT, [8]. Pese a la expectativa generada, la evolución del mercado obligó a dicha empresa al cierre del

mencionado proyecto y un cambio de enfoque en su línea de IoT. En la actualidad, Samsung se encuentra trabajando con Open Connectivity Foundation (OCF) [9] con el objetivo de establecer estándares comunes para la interoperabilidad en IoT entre diversos fabricantes, junto con empresas como AllSeen, Alliance y OpenIoT, [7].

Respecto a las áreas de aplicación de IoT, se encuentran sistemas y dispositivos para domótica, Smart City, agricultura, logística, Smart Grids, salud y bienestar [10], entre otras [11]. Para el caso colombiano y enmarcado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que fueron constituidos para ser cumplidos con la Agenda 2030 [12], se plantean proyectos dirigidos a: ciudades y comunidades sostenibles, hambre cero y acción por el clima. En este contexto, desde IoT, los esfuerzos se han centrado actividades de agricultura inteligente [13]; los cuales han tenido avances en cuanto al planteamiento de modelos de referencias aplicados a agricultura inteligente [14] y de precisión [15]. Al igual que en temas de conectividad y autonomía de los dispositivos [16], recolección, integración y almacenamiento de datos [17], procesamiento, explotación y publicación de información [18] y/o servicios [19].

Teniendo en cuenta lo anterior, la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, a través del grupo de investigación SOLSYTEC ha venido desarrollando el proyecto titulado “Plataforma para la Interoperabilidad de dispositivos de Internet de las Cosas (PIICO)”, el cual está conformado por tres componentes principales: nodos, Gateway y una plataforma de procesamiento de información en la nube. El sistema se ha evaluado en la medición y transmisión de variables ambientales desde los nodos, por medio de tres protocolos WLAN

diferentes, hacia un Gateway que envía la información a la “Nube, (cloud)”. Posteriormente, en una plataforma de analítica de datos, se realiza el procesamiento de la información ambiental medida, [20]. El Gateway en esencia, se encarga de ser un puente o puerta de enlace entre los nodos, como fuente de transmisión de la información, y el componente cloud que realiza el análisis y tratamiento de datos.

Se destaca que la plataforma PIICO es un desarrollo que cumple con las funcionalidades de un sistema IoT y es una solución que permite interoperabilidad con dispositivos que utilicen diferentes protocolos de comunicación. Sin embargo, se requieren mejorar algunas características de los elementos que integran la plataforma PIICO para fortalecer el funcionamiento y estabilidad del sistema a largo plazo; es necesario considerar modificaciones de hardware y de software debido a las actualizaciones de algunos componentes del sistema, además se deben integrar estos cambios en la plataforma de analítica. Por lo tanto, desde un punto de vista funcional en el marco de una aplicación IoT de agricultura inteligente, en este artículo se examinan y presentan los componentes del sistema PIICO y se exponen oportunidades de mejora que se están implementando en la plataforma con el fin de continuar con la evolución de este proyecto.

El presente documento está organizado de la siguiente manera: En la sección II se presenta el estado actual del sistema, funcionando en el contexto de una aplicación de IOT de agricultura, en la sección III se describen algunos sistemas similares disponibles en el

mercado, en la sección IV se presentan las propuestas de mejora y en la sección V se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

2. Descripción funcional de la plataforma PIICO

La plataforma PIICO parte del desarrollo de un Gateway multiprotocolo [21] e integra una red de sensores y actuadores, los cuales están interconectados con tres estaciones autónomas (nodos inalámbricos), que se encargan de la transmisión bidireccional y simultanea de los datos recopilados del exterior, por medio de los protocolos Zigbee, Wifi y Bluetooth hacia el Gateway. Se destaca que PIICO es una plataforma IoT de comunicación heterogénea, con implementación de un Gateway multiprotocolo para su conexión a internet y este sistema puede ser adaptado para múltiples aplicaciones de IoT en diversos campos.

Actualmente PIICO se está evaluando en un escenario de IoT para agricultura donde se realiza el monitoreo de variables ambientales [20]. En este contexto de agricultura inteligente, el trabajo desarrollado permite que los nodos se encarguen de sensar 6 variables ambientales (humedad, temperatura, velocidad del viento, dirección de viento, radiación y pluviometría) y controlan dos actuadores (aspersor y led RGB). Además, publican los datos tomados en formato JSON a un bróker público, donde el componente cloud se subscribe al bróker y almacena la información en una base de datos documental, la estructura del escenario de prueba de PIICO se muestra en la Figura 1.

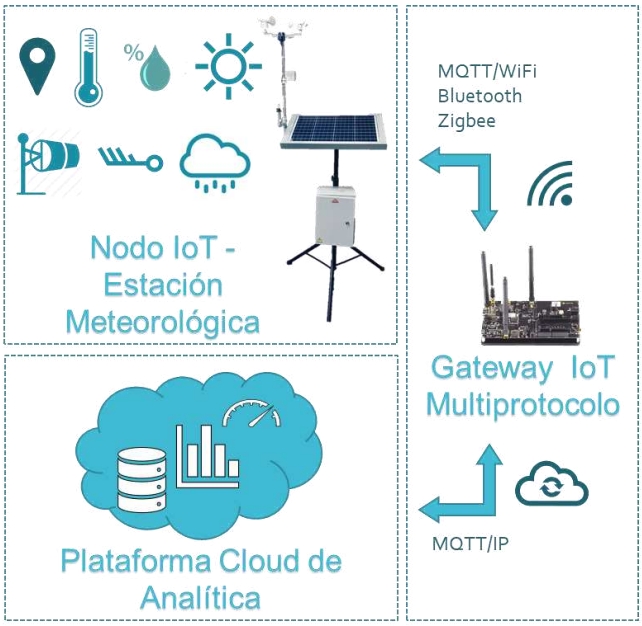


Figura 1. Arquitectura general de PIICO, descripción funcional de operación entre el nodo tipo estación meteorológica, gateway multiprotocolo IoT y la plataforma de analítica en la nube. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se hace una descripción funcional de cada uno de los componentes del proyecto:

2.1. Nodos

Los nodos de la plataforma PIICO están implementados en tarjetas Raspberry Pi 3B, las cuales recopilan de forma independiente las variables ambientales descritas con anterioridad por medio de programas escritos en lenguaje Python, para ser transmitidas al Gateway utilizando algún protocolo de comunicación, bien sea Zigbee, Wifi y/o Bluetooth. Esto se logra a partir de la ejecución del Script llamado Station.py al cual se le añaden argumentos de entrada con la variable a enviar y el protocolo a utilizar, este Script utiliza el formato definido

en otro programa llamado Json.py a fin de estructurar el mensaje a transmitir hacia el Gateway tal y como se evidencia en la Figura 3. Adicionalmente, cada nodo cuenta con actuadores para la activación de sistemas de riego y dispone de un sistema autónomo de energía conformado por una batería y un sistema de carga conectado a un panel solar, como se puede ver en la Figura 1.

2.2. Gateway

La primera versión del Gateway de la plataforma PIICO estaba implementada en una tarjeta Artik 1020, la cual se caracteriza por tener múltiples interfaces de comunicación y estar controlada por un sistema operativo basado en Fedora.

En la Figura 2 se observa que el Gateway funciona a partir de la ejecución de programas escritos en Python y en lenguaje Bash. La ejecución del script InicioAP.sh configura la tarjeta Artik 1020 como un Access Point (AP), para que por medio de NAT, ofrezca servicio de internet, el cual se recibe por su interfaz Ethernet. Posteriormente, con el fin de tener comunicación con los nodos, se habilitan los diferentes protocolos de comunicación mediante la ejecución de los scripts Server_wifi.py, Server_blue.py y Server_xbee.py, los cuales se describen a continuación: Server_wifi.py habilita la recepción de mensajes a través de protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), configura al Gateway como Bróker y define los tópicos públicos y privados para la gestión de comunicación bidireccional con los nodos a través del paradigma de publicador/suscriptor. El script Server_xbee.py configura el Gateway como coordinador de la red Zigbee, mientras que Server_blue.py lo habilita en

escucha permanente para recibir información de los nodos previamente emparejados con el Gateway a través de Bluetooth.

Para el proceso de envío y recepción de datos por medio de los protocolos de comunicación descritos anteriormente, es necesario realizar la extracción de la carga útil y la correspondiente organización del mensaje JSON estructurado en los nodos donde se genera un mensaje por cada variable sensada. En la figura 3 se encuentra un ejemplo de los datos enviados por algunos de los nodos en formato JSON.

Respecto a la transmisión realizada desde el Gateway al componente cloud, se utiliza un bróker MQTT público y seguro en internet; el protocolo MQTT se recomienda para escenarios de red en los cuales el consumo de ancho de banda debe ser reducido y donde los dispositivos involucrados en la comunicación tienen baja capacidad de procesamiento y de memoria, [20].

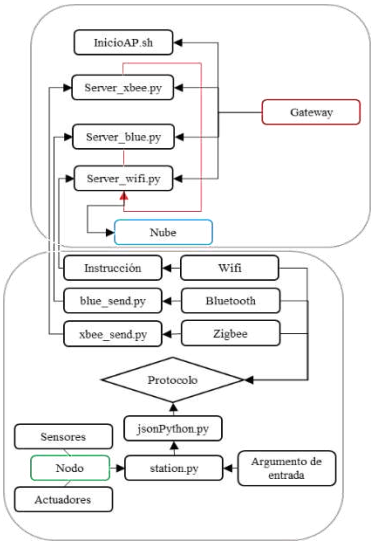


Figura 2. Diagrama de flujo de la activación de nodos y del gateway IoT PIICO. Fuente: elaboración propia.

2.3. Plataforma Cloud de analítica

El tercer componente de PIICO, es la plataforma Cloud de analítica, esta cuenta con bases de datos encargadas de guardar la información generada por los nodos IoT; de igual manera, posee un Web Service que implementa los modelos de analítica descriptiva y procesamiento de datos.

Adicionalmente, se cuenta con una herramienta de visualización de información donde se clasifica la información generada por PIICO. El módulo de analítica desarrollado soporta dos arquitecturas de comunicación, una de tipo cliente/servidor con los nodos, y otro tipo publicador/suscriptor con el Gateway, como se ve en la Figura 4, ambos procesos son gestionados a través de un bróker MQTT público [22].


```
{
        "node-id": "nodo2"
        "gps":"-"
        "protocol": "wifi"
        "date": "09/12/19-08:59:18"
        "sensor-id": "Temperature"
        "value": "19.9"
        "magnitude": "Celsius"
        "gate-id": "-"
        "network-id": "-"
}

{
        "node-id": "nodo1"
        "gps":"-"
        "protocol": "Bluetooth"
        "date": "09/12/19-08:59:18"
        "sensor-id": "Humidity"
        "value": "48.2"
        "magnitude": "percent"
        "gate-id": "-"
        "network-id": "-"
}
```


Figura 3. Ejemplo de mensaje formato JSON con información proveniente de los nodos. Fuente: elaboración propia.

En la actualidad, la plataforma PIICO cuenta con transacciones a través de un bróker público que permite la comunicación y gestión de datos de cada nodo y el componente de analítica genera gráficas por cada nodo y variable. Si bien es cierto se realiza esta tarea con los datos entregados, es conveniente que estas gráficas sean realizadas en tiempo real y de manera dinámica. Adicionalmente, y como resultado un trabajo previo, los datos almacenados en el servidor fueron generados por un simulador, el cual permitió validar una versión beta del componente de analítica desarrollado para la plataforma PIICO, [22]. Sin embargo, se requiere hacer una mayor explotación de datos e implementar varios modelos analíticos, razón por la cual, es indispensable continuar en el desarrollo de este componente de analítica, para tener la capacidad de brindar servicios personalizados.

3. Desarrollos similares en la industria de IoT

En el mercado se pueden encontrar sistemas de monitoreo de variables ambientales para escenarios similares al de agricultura asistida que se desarrolla en el proyecto PIICO, estos sistemas se caracterizan por ser compactos y porque recolectan datos de varias variables ambientales de manera simultánea. A continuación, se hace una breve comparación entre los componentes de la plataforma PIICO y algunas soluciones disponibles en el mercado de Internet de las cosas.

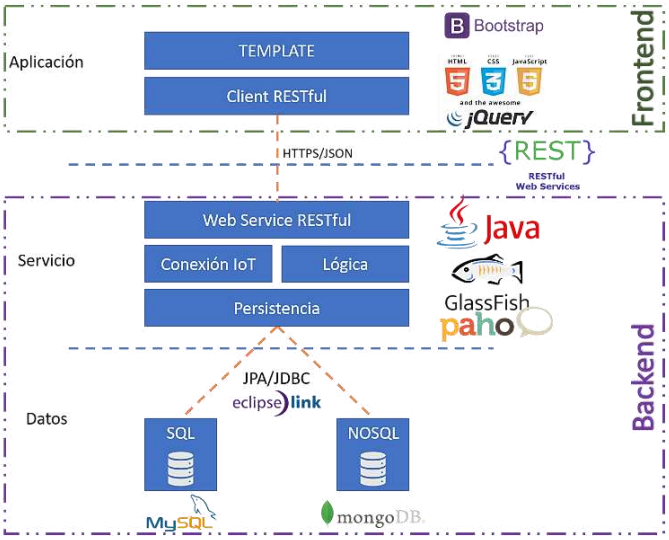


Figura 4. Arquitectura del Componente Cloud de Analítica. Fuente: elaboración propia.

3.1. Nodos

La empresa ALLMETEO ofrece una estación climática helicoidal cuyo diseño favorece el mantenimiento de los sensores, permite la recolección de datos meteorológicos y cuenta con la posibilidad de transmitir dicha información utilizando los protocolos Sigfox, LoRaWAN. NBIoT y LTE-CAT-M1, [23]. Por otro lado, la compañía inglesa LEMKEN ofrece una estación climática portátil diseñada para ser emplazada en el sitio de cultivo, se caracteriza porque en la misma estructura del sistema están ubicados los diversos sensores; sin embargo, la transmisión de datos se hace únicamente a través del protocolo SigFox, [24]. Si bien es cierto, existen desarrollos comerciales que cuentan con varias funcionalidades operativas, estas están limitadas para el desarrollo de aplicaciones o en la expansión de la red de sensores, bien sea por que son sistemas cerrados, porque existen protocolos de comunicación

propietarios o porque son plataformas de hardware cerradas. Se destaca que una de las grandes ventajas de los nodos IoT de PIICO respecto a soluciones de monitoreo ambiental, es que integran un desarrollo orientado a aplicaciones open source y cuenta con la funcionalidad para el manejo de actuadores que permiten tener sistemas de control de lazo cerrado.

3.2. Gateway

Actualmente en el mercado se encuentran disponibles una gran variedad de Gateway, en los que se destacan las prestaciones brindadas por los proveedores; es el caso de los desarrollos de la empresa NXP, los cuales brindan conectividad multiprotocolo con Zigbee, WiFi y Ethernet, [25]. Otro ejemplo es la oferta de RIGADO, llamado “Cascade IoT Gateway” que emplea protocolos Wifi, BLE y redes móviles GSM, [26]. Cada desarrollo se destaca por las múltiples interfaces de conexión. Sin embargo, son productos que están empaquetados dentro de un amplio portafolio de servicios complementarios de analítica en la nube, almacenamiento, administración, entre otros, lo cual limita en gran medida, la flexibilidad de estas plataformas al momento de realizar la implementación con dispositivos y sistemas desarrollados por terceros.

Con respecto a la plataforma del Gateway IoT de PIICO, es importante tener en cuenta que debido al cierre del proyecto Artik de Samsung y a la discontinuidad en el servicio de soporte por parte del fabricante, se hace necesario reemplazar ésta tarjeta integrada por una tarjeta que ofrezca, las prestaciones de procesamiento, almacenamiento y comunicación

multiprotocolo que se tienen con el Gateway actual, y que además, brinde flexibilidad de desarrollo de software que facilite la gestión, puesta en marcha y configuración del Gateway.

3.3. Plataforma Cloud de analítica

En la industria existen una variedad de combinaciones entre los métodos de analítica descriptiva, predictiva o prescriptiva; que permiten crear plataformas más robustas y potentes para el análisis de datos obtenidos por los dispositivos IoT.; también pueden tener todos los tipos de analítica y brindar los tipos de parametrización para que se cree una plataforma personalizada de acuerdo con la aplicación de analítica, [17]. Ejemplo de esto es Google Big Query Analytics, el cual es un componente o sistema que tiene Google Cloud Platform (GCP), que permite la creación de espacio de almacenamiento de datos obtenidos de Big Data, donde pasan por unos filtros que permiten llegar a los procesos de analítica. Dependiendo del tipo de analítica, son guardados en locaciones o Storage distinto. Google Big Query Analytics, propone un servicio para que empresas o grupos que requieran de hacer procesos de analítica, independiente del método que se quiera utilizar, siendo una herramienta versátil y potente, que brinda capacidad, velocidad, rendimiento entre otras características. Es de resaltar que Google Big Query cuenta con procesos de analítica propios, [27]. Existen otras plataformas que también están destinadas al mercado de aplicaciones IoT, tales como: Microsoft Azure IoT, ThingSpeak, Eclipse IoT, entre otros, [28]. Estas plataformas, si bien brindan suites para el almacenamiento de los datos y su posterior análisis, están condicionadas por acuerdos comerciales que impiden la distribución de los resultados, limitan

la cantidad de información, y la gestión de la red IoT. De igual manera, no permiten una aplicación concreta en agricultura inteligente y no es posible generar servicios de control de actuadores en los nodos IoT.

4. Propuestas de mejora de la plataforma PIICO

Con base en el análisis del estado actual de la plataforma PIICO y después de la identificación de las características de cada uno de los componentes que integran la plataforma, se evidencia la necesidad de desarrollar algunos componentes de software y realizar algunas mejoras al sistema, las cuales son presentadas a continuación.

La usabilidad de la plataforma se mejora con una aplicación web que permita la visualización de los datos en tiempo real, además se debe facilitar la gestión remota de los componentes de PIICO.

En la interfaz gráfica propuesta, se deben configurar parámetros como la frecuencia de lectura de los sensores y los tópicos necesarios para la comunicación bidireccional a través de MQTT, se debe facilitar la adición de nuevos nodos remotos y administrar la configuración de las redes Wifi, Zigbee y Bluetooth, necesarias para la comunicación entre el Gateway y los nodos. Adicionalmente, el componente de software debe ser optimizado para automatizar el proceso de conexión entre los nodos y el Gateway.

Cabe resaltar que debido a las prestaciones que tiene un Gateway multiprotocolo, una administración a partir de una interfaz gráfica en la web puede facilitar la adaptación de la plataforma PIICO a diversos casos de estudio o aplicaciones IOT, diferentes al contexto de

agricultura inteligente sobre el cual se está probando la plataforma. Respecto a los componentes de la plataforma PIICO, después de analizar diferentes opciones y características de componentes IoT comerciales, se identificaron varias oportunidades de mejora de los nodos IoT de la plataforma, entre las que se destaca la necesidad de rediseñar la estructura de los nodos para facilitar su transporte y despliegue, se requiere además mejorar el alcance del sistema de comunicaciones con el fin de ampliar la cobertura de la red de sensores y de los nodos. Sumado a lo anterior, es necesario llevar a cabo procesos para la integración en los componentes de la plataforma, en el caso de los nodos, se ve la posibilidad de realizar mejoras en cuanto a la estructura de los mensajes que se envían al Gateway, se deben enviar todas las variables en un solo mensaje. Respecto al componente de analítica del proyecto PIICO, se requiere un rediseño de la plataforma para orientarla hacia una herramienta de analítica descriptiva que esté integrada con el Gateway IoT y con los dispositivos conectados a los nodos IoT.

Por otra parte, teniendo en cuenta el cierre del proyecto Artik y la interrupción de soporte técnico por parte del fabricante, es necesario sustituir el Gateway. Se plantea el uso de una computadora en tarjeta (SBC por sus siglas en ingles) que se pueda usar como Gateway. Por lo tanto, se requiere un diseño y desarrollo de software para la gestión de la SBC, de tal manera que se cumplan con los requerimientos y características expuestas en previamente. Adicionalmente, se requiere una integración entre, los componentes de bases de datos, la

adquisición de datos desde el bróker público y uso del servicio WEB para realizar analítica de datos adquiridos.

Finalmente, en la revisión realizada en este artículo, se identificó que es posible encontrar muchas de las herramientas de analítica en plataformas on-premise, sin embargo, estas presentan dificultades en el momento de hacer procesos de conexión remota, ya que se tiene que crear puntos de conexión y redes acotadas para la disponibilidad de la información, razón por la cual, la idea de trabajar con una plataforma Cloud de analítica facilita la conexión, esto debido a que al escoger un tipo de protocolo de comunicación se permitirá el transporte de datos. Existen diversas plataformas Cloud de analítica que pueden ser comparadas entre sí, dependiendo de la arquitectura, las tecnologías, métodos de analítica y conectividad; ejemplo de esto es el realizar un paralelo entre los métodos de analítica, el cual influye en el tema de ecuaciones y algoritmos que pueden ser utilizados para cumplir con el tipo de analítica, ya sea descriptiva o predictiva. Al comparar las plataformas se observa que la característica más relevante para su distinción es el proceso de almacenamiento de los datos y tipo de analítica. Para este último, se puede hacer uso de bases de datos no relacionales NoSQL, que se encargan de guardar información, no en lugares específicos, sino que se almacena todo en un solo punto y se realizan filtros para encontrar la data y pasar a los algoritmos de analítica, siendo MongoDB una base de datos NoSQL con las mejores características para poner en práctica en el proyecto.

Las plataformas de analítica pueden ser aplicadas en distintos entornos, uno de los más influyentes en la industria es el marketing, que, a través de analítica, identifica cuan poderosa puede ser, ya que obtiene información relevante, acerca del gusto de los clientes y, para este caso, es de tipo descriptivo, debido a que permite analizar según lo que suceda o de la forma como interactúa el cliente. Esto puede ser una gran ventaja, dado que se tiene más control de los mercados o clientes potenciales, y puede generar mejores propuestas y tener mejor interacción con ellos, siendo uno de los muchos ejemplos en el ámbito empresarial de lo poderoso que puede ser la analítica de datos. Ahora con S-PIICO, al integrar la plataforma Cloud de analítica con los dispositivos IoT, se obtendrá un mejor control sobre las zonas agrícolas, ya que a partir de los análisis descriptivos se pueden identificar los estados de los cultivos para poder tener un mejor detalle de los que está sucediendo, permitiendo un mejor monitoreo de una manera remota y ágil para identificar problemas y darles una mejor solución.

5. Conclusiones

Se evidencia que a pesar del despliegue que tiene IoT, se requieren desarrollos de hardware/software para la integración e interoperabilidad de dispositivos, redes de comunicaciones, estándares y algoritmos de analítica de datos.

La implementación de las mejoras propuestas para la plataforma PIICO, garantizará una gestión de la plataforma más fácil y flexible. También disminuirá el tiempo necesario para despliegue de una aplicación práctica con la plataforma. Adicionalmente, los rediseños

propuestos hacen que este tipo de desarrollos mantengan su vigencia y puedan brindar aportes para la escalabilidad de aplicaciones de IoT.

Se observa la utilidad que representa tener una plataforma de analítica de datos, ya que pueden tener distintos métodos para este proceso con Big Data, como, por ejemplo, la analítica descriptiva, la cual puede proporcionar una cantidad de información valiosa para entender el estado de las fuentes de datos y este sería el método que PIICO quería implementar en su plataforma de analítica. También existen los métodos, predictivos, que pueden generar opciones para la toma de decisiones en modelos de negocio, cambios en infraestructura, entre otros. Y existen más métodos de analítica de datos dentro de las principales y más fuertes son estas dos.

Referencias

[1] R. a. markets, «Research and Markets,» 2020. [En línea]. Available: https://www.globenewswire.com/news-release/2020/03/18/2002434/0/en/IoT-in-the-Global-Retail-Market-2020-2025-Analyzed-by-Platform-Hardware-Service-Application-and-Region.html. [Último acceso: 4 7 2020].

[2] H. T. a. S. Dustdar, «Principles for Engineering IoT Cloud Systems,» *IEEE Cloud Computing,* vol. II, nº 2, pp. 68-76, 2015.

[3] A. Rahmani, N. K. Thanigaivelan, T. N. Gia, J. Granados, B. Negash, P. Liljeberg y H. Tenhunen, «Smart e-Health Gateway:,» *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 12th Annual IEEE,* pp. 826-834, 2015.

[4] P. Desai, A. Sheth y P. Anantharam, «Semantic Gateway as a Service Architecture for IoT Interoperability,» *2015 IEEE International Conference on Mobile Services,* pp. 313-319, 2015.

[5] A. A. Sánchez Martín, E. González Guerrero y L. E. Barreto Santamaría, «Prospective integration between Environmental Intelligence (AMI), Data Analytics (DA), and Internet of Things (IoT),» *2019 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI),* pp. 1-6, 2019.

[6] I. A. M. M. J.-M. R. J.-C. T. M. Berrouyne, «A Model-Driven Approach to Unravel the Interoperability Problem of the Internet of Things,» de *Barolli, L., Amato, F., Moscato, F., Enokido, T., & Takizawa, M. (Eds.). (2020). Advanced Information Networking and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing. doi:10.1007/978-3-030-44041-1* , Caserta, Italia, 2020.

[7] D. Yacchirema y C. E. Palau Salvador, «Smart IoT Gateway for Heterogeneous Devices Interoperability,» *IEEE Latin America Transactions,* vol. 14, nº 8, pp. 3900-3906, 2016.

[8] C. Dergarabedian, «La fuerte apuesta de Samsung a la Internet de las cosas para simplificar la vida cotidiana de los usuarios,» *iProfesional,* 10 Enero 2018.

[9] OpenIoT Consortium, «Open Source cloud solution for the Internet of Things,» OpenIoT, 1 Septiembre 2019. [En línea]. Available: http://www.openiot.eu/. [Último acceso: 02 Marzo 2020].

[10] E. González Guerrero, L. E. Barreto Santamaría y A. A. Sánchez Martín, «Integrated Model AmI-IoT-DA for Care of Elderly People,» de *Advances in Computing. CCC 2018*, Bogotá, 2018.

[11] N. Al-Oudat, A. Aljaafreh, M. Saleh y M. Alaqtash, «IoT-Based Home and Community Energy Management System in Jordan,» *Tafila Technical University,* vol. CLX, pp. 142-148, 2019.

[12] F. Herrera Araújo, M. A. Ardila Lara, E. Gutiérrez Gil y D. Herrera Téllez, «ODS en Colombia: Los retos para 2030,» Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD-, Bogotá, 2018.

[13] M. Unis, A. Nettsträter, F. Iml, J. Stefa, C. S. D. Suni, A. Salinas y U. Sapienza, «Internet of Things-Architecture IoT-A Final architectural reference model for the IoT,» 2013.

[14] F. Leiva, «La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista,» *VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos,* vol. 93, nº 997-1006, p. 7, 2003.

[15] F. A. Urbano Molano, «Wireless Sensor Networks Applied to Optimization in Precision Agriculture for Coffee Crops in Colombia,» *Journal de Ciencia e Ingenier´ıa,* vol. 5, nº 1, pp. 46-52, 2013.

[16] IERC, «IoT Semantic Interoperability:Research Challenges, Best,» 2011.

[17] M. MARJANI, F. NASARUDDIN, A. GANI, A. KARIM, I. A. TARGIO HASHEM, A. SIDDIQA y . I. YAQOOB, «Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges,» *IEEE Access,* vol. V, nº 2, p. 15, 2017.

[18] W. Ruíz Martínez , Y. Díaz Gutiérrez, R. Ferro Escobar y L. Pallares, «Application of the Internet of Things through a Network of Wireless Sensors ina Coffee Crop for Monitoring and Control its Environmental Variables,» *TecnoLógicas,* vol. 22, nº 46, pp. 2-17, 2019.

[19] C. A. Barry, «Choosing Qualitative Data Analysis Software: Atlas/ti and Nudist Compared,» *Sociological Research Online,* vol. III, nº 3, p. 16–28, 1998.

[20] J. Macias, H. Pinilla, W. Castellanos y J. D. Alvarado, «Sistema de monitoreo de variables ambientales usando IOT,» *Tech Fest,* 2019.

[21] J. Macías, H. Pinilla, W. Castellanos, J. D. Alvarado y A. Sánchez, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN GATEWAY IOT MULTIPROTOCOLO,» *14° CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES,* vol. 13, pp. 179-198, 2019.

[22] A. A. Sánchez Martín, L. E. Barreto Santamaría, J. J. Ochoa Ortiz y S. E. Villanueva Navarro, «EMULADOR PARA DESARROLLO DE PROYECTOS IOT Y ANALITICAS DE DATOS,» de *XII Congreso Internacional de Electrónica, Control y Telecomunicaciones*, Bogota, 2019.

[23] allmeteo, «Agro IoT Weather Sensor: AN AFFORDABLE SOLUTION FOR DISTRIBUTED WEATHER MONITORING FOR AGRICULTURE, FARMING & WINE YARDS.,» BARANI DESIGN Technologies s.r.o., 2018. [En línea]. Available: https://www.allmeteo.com/agriculture-iot-weather-station. [Último acceso: 02 03 2020].

[24] LEMKEN, «LEMKEN: The Agrovision Company,» LEMKEN , 2020. [En línea]. Available: https://smartfarming.lemken.com/en/. [Último acceso: 02 03 2020].

[25] RIGADO, «Cascade IoT Gateway: Edge Bluetooth® connectivity & secure data processing,» RIGADO, 2016-2020. [En línea]. Available: https://www.rigado.com/cascade-iot-gateway/. [Último acceso: 02 03 2020].

[26] NXP Semiconductors, «IoT Gateway Solution: Complete development platform that brings together the building blocks for secure, production-ready IoT systems,» NXP Semiconductors, 2006-2020. [En línea]. Available: https://www.nxp.com/design/designs/iot-gateway-solution:IOT-GATEWAY-SOLUTION. [Último acceso: 02 03 2020].

[27] Google, Google Big Query Analytics, United States of America : John Wiley & Sons, Inc., 2014.

[28] P. P. Ray, «A survey of IoT cloud platforms,» *Future Computing and Informatics Journal,* vol. 1, nº 1-2, pp. 35-46, 2016.

[29] J. C. Najar-Pacheco, J. A. Bohada-Jaime y W. Y. Rojas-Moreno, «Vulnerabilidades en el internet de las cosas,» *Visión Electrónica,* vol. 13, nº 2, pp. 312-321, 2019.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

DIAGNOSTIC OF THE CURRENT SITUATION OF 5G TECHNOLOGY: SOUTH AMERICA

Diagnóstico de la situación actual de la tecnología 5G: Suramérica

Miguel Ángel Mayorga Bohórquez[1], Edith Paola Estupiñán Cuesta[2], Juan Carlos Martínez Quintero[3]

Abstract

This paper presents an analysis of the current state of 5G technology deployment in South American countries. The research is carried out employing an informal survey of the current regulations in mobile technologies, to later carry out a general overview of the most relevant aspects in the 13 South American countries and French Guyana. The commercial launches of 5G in the countries of Uruguay, Surinam, and Brazil are highlighted. The 3.5 GHz and 28 GHz spectrum bands are identified as potential for 5G development, used in a total of 26 tests distributed in 9 countries, except for Guyana, Paraguay, Venezuela, and French Guiana. Likewise, the countries with the highest spectrum release rate are Brazil with 609 MHz and Peru with 554.4 MHz, while Ecuador and Bolivia are the last ones in this aspect with 290 MHz

[1] Estudiante de Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. E-mail: est.miguel.mayorga@unimilitar.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5420-3733

[2] Ingeniera en Telecomunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Magister en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Universidad Militar Nueva Granada/Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. E-mail: edith.estupinan@unimilitar.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4100-4943

[3] Ingeniero Electrónico, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. Especialista en Seguridad física e informática, Escuela de comunicaciones Militares, Colombia. Magister en Sistemas automáticos de producción, Universidad tecnológica de Pereira, Colombia. Universidad Militar Nueva Granada/Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. E-mail: juan.martinezq@unimilitar.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9893-6592

and 284 MHz respectively, except for Argentina, the telecommunications sector in South America is decentralized, which means that there are several regulatory bodies. This study was conducted to review the current state of mobile technology in South America and obtain an overview of the actions carried out in the region for the implementation of 5G technology.

Keywords: 5G Technology, 5G Testing, Mobile Broadband, Mobile Networks, Regulatory Agencies, and Spectrum.

Resumen

Este trabajo presenta un análisis del estado actual del despliegue de tecnología 5G de los países de Suramérica. La investigación se realiza por medio de un levantamiento de información de la normativa vigente en tecnologías móviles para posteriormente realizar una visión general de los aspectos más relevantes en Suramérica. Se destacan los lanzamientos comerciales del 5G de los países de Uruguay, Surinam y Brasil. Se identifican las bandas del espectro de 3,5 GHz y 28 GHz como potenciales para el desarrollo 5G, utilizadas en un total de 26 pruebas distribuidas en 9 países, exceptuando a la Guyana, Paraguay, Venezuela y la Guyana Francesa, así mismo, los países que cuentan con un mayor índice de liberación de espectro son Brasil con 609 MHz y Perú con 554,4 MHz mientras que Ecuador y Bolivia son los últimos en este aspecto con 290 MHz y 284 MHz respectivamente, a excepción de Argentina el sector de las telecomunicaciones en Suramérica es descentralizado esto quiere decir que existen varios organismos reguladores. Este estudio fue realizado con la finalidad

de revisar el estado actual de la tecnología móvil en Suramérica y obtener una visión general de las acciones llevadas a cabo en la región para la implementación de la tecnología 5G.

Palabras clave: Banda Ancha Móvil, Espectro, Organismos reguladores, Pruebas 5G, Redes Móviles y Tecnología 5G.

1. Introducción

El sector tecnológico mantiene una tendencia a evolucionar y conseguir ambientes óptimos para el usuario final, los teléfonos inteligentes, televisores, asistentes virtuales, casas inteligentes y otros dispositivos digitales generan cada vez más datos creando un entorno mucho más difícil de manejar en cuanto a cobertura y calidad de servicio, como consecuencia a ello las redes de telefonía móvil deben ser capaces de ofrecer dicha disponibilidad y generar un soporte adecuado. En cuestiones técnicas la 5G brindará facilidades en aumento de conexiones móviles con una cifra que alcanzará los 1100 millones accesos, aumento de la tasa de descarga a 10 Gbps y disminuir el retardo con valores de latencia inferiores a 1ms, [1].

Como consecuencia de esto la tecnología 5G se ha posicionado como la mejor solución de transmisión de datos de forma inalámbrica, además de poseer grandes beneficios en conectividad y velocidad de conexión esta nueva generación de red móvil trae muchos beneficios económicos, en [2] se expone que la implementación de la tecnología 5G representará una contribución al PIB de todo el continente americano de 290 billones de

dólares significando un crecimiento del 2,3% y una generación de 6,8 billones en impuestos, lo anterior presupuestado para el 2024.

En el caso puntual de Suramérica se presentan características sociales, económicas y culturales similares, pero con ciertas diferencias a nivel de políticas regulatorias y acciones tomadas para la adopción tecnológica en los países suramericanos. En cuanto al aspecto de conectividad, el informe de 5G Américas [3] presenta que para junio de 2019 en la región Latinoamérica se registraba 701 millones de accesos telefónicos los cuales el 84% tenían capacidad a banda ancha móvil, además esta cifra representa niveles de penetración móvil cercanos a 100%. Según [4] para el 2019 se contaba con un 17% de presencia de tecnología 2G, 35% en 3G y 47% para la tecnología 4G; para el año 2025 se espera un aumento de la penetración de 4G con 67% y la presencia de la tecnología 5G con 7%, mientras que las tecnologías 2G y 3G disminuirán en 5% y 21% respectivamente.

La presente investigación cuenta con un levantamiento de información hasta el día 01 de octubre de 2020. A partir de ese momento se procedió a analizar, comparar y redactar el artículo. Este estudio fue realizado con la finalidad de revisar el estado actual de la tecnología móvil en Suramérica teniendo en cuenta aspectos como la cantidad de ancho de banda asignados para tecnologías móviles, capacidad de despliegue de infraestructura y la normativa vigente. En este artículo se presenta un diagnóstico regulatorio, avances y situación actual en cada país de Suramérica referentes a la tecnología de quinta generación. En la sección 2 se presenta una descripción de la operación de 5G y sus principales regulaciones y estándares,

en la sección 3 se presenta un diagnóstico de las bandas identificadas como potenciales para la implementación 5G, en la sección 4 se muestra las principales pruebas piloto 5G realizadas hasta la fecha y análisis de resultados, para la sección 5 se presenta una recopilación de los aspectos más importantes de los 13 países constituidos políticamente en Suramérica y la dependencia de la Guyana Francesa. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas.

2. Estándares de la tecnología 5G

En un principio las especificaciones de la tecnología 5G se adecuaban en comunicaciones con conexiones cableadas de fibra óptica con unas velocidades de descarga similares a 300 Mbps en zonas de alta densidad y 1 Gbps en zonas de buena disponibilidad. En la figura 1 se muestra las formas de aplicación de la red 5G en eMBB (banda ancha móvil mejorada), URLLC (comunicación de baja latencia ultra confiable) e IoT (Internet de las cosas) las cuales se pueden admitir de forma independiente en una única infraestructura.

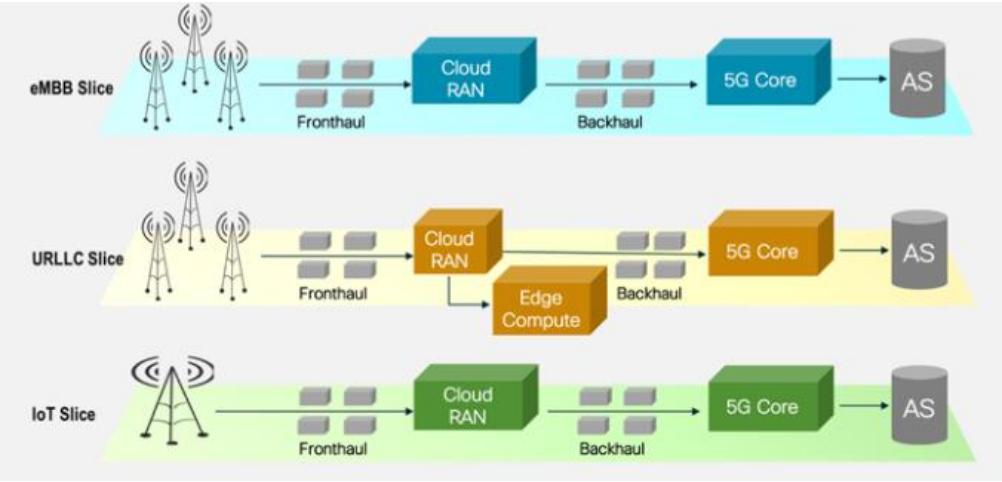


Figura 1. Arquitectura de red 5G, [5].

En este contexto se han promulgado varias especificaciones, una de ellas por parte de la 3GPP que compete una colaboración de grupos de asociaciones en el sector de las telecomunicaciones para promulgar documentos tecnológicos a las distintas versiones, tal como la norma 3GPP GSM05.05 caracterizada en gran medida por tener la modulación GMSK predomínate y por la especificación de los niveles de potencia aceptable para las estaciones móviles [6]. A finales de 2017 se entregó el primer estándar basado en 5G denominado 'Non-Stand-Alone' (NSA), aquí, se destaca el soporte que cuenta la infraestructura 4G para la implementación de 5G, por ello mismo muchas de las pruebas piloto en un inicio basaron su desarrollo en este estándar, [7].

Posteriormente desde la gestión de la 3GPP se mantuvieron los desarrollos en un estándar cuyas especificaciones no dependían de las redes LTE. En consecuencia, para el año 2019 se presenta el alcance del **Release 15** el cual cumple con la especificación de ser un estándar independiente para 5G, definiendo un nuevo sistema de radio complementado con una red central de próxima generación [8]. En julio de 2020 con la versión **5G NR Release 16**, siendo el segundo estándar de la tecnología 5G se presenta una mejora en MIMO Multiusuario (MU-MIMO) para admitir rangos más altos, admitir múltiples puntos de transmisión y recepción (multi-TRP) y una mejor gestión para mejorar la confiabilidad del enlace. Para todos los dispositivos compatibles con MIMO, **5G NR Release 16** también admite un enlace ascendente de máxima potencia para mejorar la cobertura en el borde de la celda, por otro lado, aborda

el concepto de eURLLC (Comunicación mejorada, ultra confiable y de baja latencia) la cual pretende ofrecer una confiabilidad de enlace mejor (hasta 99,9999%), [9].

3. Bandas potenciales en el desarrollo 5G

Los gobiernos alrededor de todo el mundo se encuentran en una constante movilización para desarrollar nuevas políticas que permitan afrontar esta nueva revolución tecnológica de la mejor forma y contribuir al desarrollo económico del mismo. Según la ITU, con la llegada del 5G se espera una ampliación del espectro debido a la asignación que se debe realizar para conseguir los lanzamientos [10], esto depende en gran medida de los organismos autorizados en cada país, cuya función principal es identificar las barreras en este sentido y establecer las bandas potenciales para el despliegue de la tecnología 5G.

El papel de los organismos internacionales suele ser muy importantes en términos de creación de estándares cuyo funcionamiento permita una guía para el despliegue de la tecnología, en este sentido, se destaca el papel de los organismos internacionales en términos de regulaciones y especificaciones para la tecnología 5G. Bajo esta línea se encuentra la posición de la ITU como ente principal que con el IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020) presenta los requisitos emitidos por el ITU-R (Sector de Radiocomunicaciones de la ITU) para redes, dispositivos y servicios 5G. Este organismo divide el mundo en tres regiones posicionado a Suramérica en la región 2 denominada Américas, además de la ITU se

encuentra la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones denominada por sus siglas CITEL.

Adicionalmente se destaca el papel que juegan los entes reguladores en cada país debido a que estos organismos proporcionarán el aspecto regulatorio en el despliegue de infraestructura móvil. En la tabla 1 se muestran los organismos reguladores en el sector de las TIC de cada país.

Tabla 1. Organismos reguladores

País	Organismos reguladores	Ministerio Encargado	Autoridad Reguladora	Gestión Espectro
Argentina	ENACOM - Ente Nacional de Comunicaciones	x	x	x
Bolivia	Ministerio de obras públicas, servicios y vivienda	x		
	ATT - Autoridad de Fiscalización y Control Social en Telecomunicaciones y Transporte		x	x
Brasil	MCTI - Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación	x		
	ANATEL - Agencia Nacional de Telecomunicaciones		x	x
Chile	Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones	x		
	SUBTEL - Subsecretaría de Telecomunicaciones		x	x
Colombia	MINTIC - Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones	x		
	CRC - Comunicación de Regulación de Comunicaciones		x	
	ANE - Agencia Nacional del Espectro			x
Ecuador	MINTEL - Ministerio de Telecomunicaciones y la Sociedad de la Información	x		
	ARCOTEL - Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones		x	x
Guyana	Ministerio Público de Telecomunicaciones	x		
	PUC - Comisión de Servicios Públicos		x	
	NFMU - Unidad Nacional de Gestión de Frecuencias			x
Paraguay	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones	x		
	MITIC - Ministerio de las Tecnologías de la Información y Comunicación	x		
	CONATEL - Comisión Nacional de Telecomunicaciones		x	x
Perú	MTC - Ministerio de Transporte y Comunicaciones	x		
	OSIPTEL - Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones		x	x
Surinam	Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones	x		

País	Organismos reguladores	Ministerio Encargado	Autoridad Reguladora	Gestión Espectro
	TAS - Autoridad de Telecomunicaciones de Surinam		x	x
Uruguay	DINATEL - Dirección Nacional de Telecomunicaciones	x		
	URSEC - Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones		x	
	ANTEL - Administración Nacional de Telecomunicaciones			x
Venezuela	MINCI - Ministerio del Poder Popular para la Comunicación y la Información	x		
	CONATEL - Comisión Nacional de Telecomunicaciones		x	x
Guyana Francesa	ARCEP - Autoridad Reguladora de las Comunicaciones y los Correos Electrónicos		x	
	ANFR - Agencia Nacional de Frecuencias			x

Fuente: Elaboración propia con información de reguladores

Con la llegada de 5G estos organismos son encargados de la asignación de una cantidad importante de espectro. Según un estudio de la GSMA los principales reguladores deben otorgar entre 80 a 100 MHz de espectro continuo por operador, para 5G se han determinado las bandas de espectro de 3,5 GHZ (3,3 - 3,8 GHz) y 24 GHz (24 - 86 GHz) como principales bandas de 5G. De igual forma existen otros rangos de frecuencias para 5G con 700 MHz - 1 GHz y 1 GHz - 6 GHz [11]. En la tabla 2 se presenta las asignaciones espectrales en Suramérica. Las casillas sombreadas por el color rosado especifican las tecnologías usadas sobre esa banda. Las casillas en amarillo representan una adjudicación, pero se usan para otros sistemas; se encuentran en reordenamiento, refarming o reorganización para uso IMT.

Tabla 2. Bandas espectrales asignadas, [12].

País	700 MHz	800 MHz	850 MHz	900 MHz	AWS	1,8 GHz	1,9 GHz	2,1 GHz	2,5 GHz	3,5 GHz	26 GHz	28 GHz
Argentina	4G	2G/3G	2G/3G	4G	4G		2G/3G/4G		4G			
Bolivia	4G		3G		4G		2G/3G/4G					
Brasil	4G		2G/3G	2G		3G/4G	3G	3G	4G			
Chile	4G		2G/3G	2G	3G/4G		3G		4G			
Colombia	4G	2G	2G/3G		4G		2G/3G	4G	4G			
Ecuador	4G		2G/3G		4G		2G/3G/4G					
Guyana	4G		2G/3G	2G/3G								
Paraguay	4G		2G/3G	2G/3G	4G		2G/3G/4G					
Perú	4G		2G/3G	3G/4G	4G		2G/3G	2G	4G			
Surinam	4G	2G		2G/3G		4G	2G			5G		
Uruguay	4G		2G/3G	2G	4G	2G	2G/3G/4G	3G				5G
Venezuela			3G	2G/3G	4G	4G	3G		4G			
Guyana Francesa		2G		2G/3G/4G		2G		4G	4G			

Para el caso de Brasil, ya se cuenta con despliegue 5G pero bajo el concepto de DSS que consiste en redistribuir las frecuencias de 4G a 5G, por esta razón no se especifica puntualmente el 5G para Brasil en la tabla 1. En el continente americano, CITEL en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2015 (CMR-15) propuso asignar las bandas 1435–1518 MHz y 3400–3600 MHz para la tecnología 5G, mientras que recomendó no tener en cuenta las bandas de frecuencia de 2700–2900 MHz, 3600–4200 MHz y 4500–4800 MHz, [13].

Por consiguiente, los organismos nacionales basan la identificación de las bandas potenciales en las posiciones suministradas por entes como la CITEL, bajo esta línea, los operadores basan sus desarrollos en las bandas identificadas las cuales son campo de adjudicación temporal para el desarrollo de pruebas experimentales. Según datos del informe de 5G Américas para mayo de 2020, el espectro asignado para servicios móviles en América latina

en promedio se acercaba a los 392,1 MHz, lo que representa un 30,2% respecto a la sugerencia de la ITU para el 2015, [12].

Las tablas 3, 4 y 5 presentan una recopilación de los OMR (operadores móviles con red) que por medio de las disposiciones tomadas en la normativa de cada país con la compartición de infraestructura alquilan sus equipos a los OMV (operadores móviles virtuales). Para brindar una facilidad en la compresión de los datos se divide la presentación en la tabla 3 que contiene los países con despliegues comercias de la tecnología 5G, la tabla 4 contiene los países con una adjudicación del espectro mayor al promedio de 5GAméricas y la tabla 5 se presenta los países que se encuentran por debajo de esta cifra.

En la tabla 3 se destaca la gran competencia en el mercado de Brasil que entre OMR y OMV suman un total de trece compañías, esto se ve reflejado con el hecho de que el territorio brasileño cuenta con tres operadores que prestan el servicio del 5G bajo el concepto de Dynamic Sharing Spectrum (DSS), cuyo funcionamiento se basa en redistribuir las frecuencias ya disponibles compartiendo dinámicamente el espectro según las demandas del tráfico [11]. Por otra parte, Brasil se comporta como el país que más espectro adjudica en Suramérica a la telefonía móvil.

Tabla 3. Bandas potenciales 5G en los países con despliegue * Banda usada para el despliegue, [12].

País	Operadores (OMR)	Banda Potencial 5G	Espectro Adjudicado	Operadores Virtuales (OMV)
Brasil	Claro	3,5 GHz, DSS*	609 MHz	Correios Celular Surf Telecom Brisanet Fluke Geek Cel
	Oi	3,5 GHz		
	Vivo	3,5 GHz, DSS*		
	Tim	3,5 GHz, DSS*		
	Algar	3,5 GHz		
	Sercomtel	-		
Uruguay	Antel	28 GHz*	515 MHz	No tiene
	Claro	28 GHz		
	Movistar	28 GHz y 3,5 GHz		
Surinam	Digicel	No reporta	No reporta	No tiene
	Telesur	3,5 GHz*		

Fuente: Elaboración propia con base en información de reguladores.

En cuanto a Uruguay y Surinam se marca una tendencia importante de mencionar; los operadores que ya cuentan con despliegue de 5G son de propiedad del estado. En el caso Uruguayo predomina la banda de frecuencia de 28 GHz en el despliegue, su precursor es ANTEL (Administración Nacional de Telecomunicaciones) que por medio de la Ley No. 14235 [14] busca crear un servicio público descentralizado de propiedad del estado en donde figuren funciones como prestar servicios de telecomunicaciones urbanos y a larga distancia.

Por parte de Surinam, Telesur es el proveedor de servicios de telecomunicaciones con completa propiedad del gobierno de Surinam en su despliegue fue usada la banda de frecuencia de 3,5 GHz, por medio de la Ley No. 151 del 2004 [15] esta empresa del estado

pierde su participación en los aspectos regulatorios pero se mantiene como un teleoperador en el país.

La tabla 4 muestra las bandas potenciales definidas para el despliegue de 5G, se destaca que el país con más espectro adjudicado para tecnologías de banda ancha móvil es Perú con 554,4 MHz seguido por Colombia con 492,5 MHz y la Guyana Francesa con 428,8 MHz. Para el caso del departamento de ultramar de la Guyana Francesa, aunque no se registre actividades en la tecnología 5G se posee una buena infraestructura y un buen porcentaje de cobertura de la tecnología 4G, donde el mejor posicionado en este aspecto es el operador SFR con un total de 96% de cobertura en segundo lugar se encuentra Orange con un 81% y por último Digicel con 76% [16]. Por último, Chile cuenta con una buena competitividad en el mercado con diez operadores activos, de igual forma Perú cuenta con la misma cantidad seguido por el territorio colombiano con 9 participantes.

Tabla 4. Bandas potenciales 5G en los países con mayor adjudicación de espectro, [12].

País	Operadores (OMR)	Banda Potencial 5G	Espectro Adjudicado	Operadores Virtuales (OMV)
Perú	Bitel	3,5 GHz	554,4 MHz	Incacel Dolphin Mobile Famagusta Guinea Mobile Flash Servicios Intermax
		3,5 GHz		
	Claro	3,5 GHz		
	Entel	3,5 GHz		
	Movistar	3,5 GHz		
Colombia	Partners + Avantel	-	492,5 MHz	Móvil Exito Virgin Mobile Flash Mobile HV Móvil
	Claro	28 GHz y 3,5 GHz		

País	Operadores (OMR)	Banda Potencial 5G	Espectro Adjudicado	Operadores Virtuales (OMV)
	ETB	28 GHz y 3,5 GHz		
	Movistar	28 GHz y 3,5 GHz		
	Tigo Une	28 GHz y 3,5 GHz		
Guyana Francesa	Digicel	3,5 GHz	428,8 MHz	-
	Orange	3,5 GHz		
	Outremer Telecom	3,5 GHz		
Chile	Claro	28 GHz	470 MHz	Telsur Netline Simple Virgin Mobile VTR Mundo Móvil
	Movistar	28 GHz		
	Entel	28 GHz		
	Wom	3,5 GHz		

Fuente: Elaboración propia con información de reguladores

En la tabla 5 se presentan los países con un índice de adjudicación del espectro menor al promedio anteriormente descrito, puntualmente para la telefonía móvil. En este sentido se marca una similitud en la cantidad de operadores en el mercado y el espectro adjudicado, pues además de ser los países con menor índice en este aspecto son los países que cuentan con menor participación en el mercado.

Tabla 5. Bandas potenciales 5G en los países con menor adjudicación de espectro

- No existe [12]

País	Operadores (OMR)	Banda Potencial 5G	Espectro Adjudicado	Operadores Virtuales (OMV)
Argentina	Personal	28 GHz	390 MHz	CATEL
	Claro	28 GHz		
	Movistar	28 GHz		
Paraguay	Claro	-	350 MHz	-
	Personal	-		
	Tigo	-		
	Vox	-		
Venezuela	Movilnet	-	324 MHz	-
	Digitel	-		
	Movistar	-		
Ecuador	Claro	3,5 GHz	290 MHz	Virgin Mobile
	CNT	3,5 GHz		
	Movistar	3,5 GHz		
Bolivia	Entel	3,5 GHz	284 MHz	Mio
	Tigo	3,5 GHz		
	Viva	3,5 GHz		
Guyana	GTT +	-	No reporta	-
	Digicel	-		

Fuente: Elaboración propia con información de reguladores

4. Pruebas piloto 5G en Suramérica

Para la implementación de una nueva tecnología se requiere hacer la planeación y pruebas de infraestructura y despliegue; como parte de la entrada de 5G en la región se han desarrollado ciertas pruebas piloto, estas acciones marcan un preénfasis en el despliegue final de la tecnología en cada país, además sirven para determinar el grado de impacto que puede generar esta tecnología en la infraestructura existente. A modo de aclaración, una prueba 5G se manejan en entorno de laboratorio mientras que las demostraciones 5G utilizan en muchos casos la red de los operadores y son abiertas al público para medición. La tabla 6 resume

parte de las principales características de despliegue 5G. Uruguay con la banda de 28 GHz en el año 2019, Argentina con evidencias de pruebas para esta banda del espectro al inicio del año 2017, en los casos de Bolivia y Ecuador se registran pruebas de la tecnología 5G pero no se halló antecedentes con las bandas usadas.

Tabla 6. Pruebas piloto 5G en 28 GHZ

País	Banda Frecuencia	Velocidad Alcanzada	Operador	Proveedor Tecnológico	Tipo	Fecha
Argentina	28 GHz	20 Gbps	Movistar	Ericsson	Prueba 5G	Noviembre 2017
	28 GHz	10 Gbps	Personal	Nokia	Prueba 5G	Abril 2018
	No reporta	700 Mbps	Personal	Huawei	Demo 5G	Mayo 2019
Uruguay	28 GHz	No reporta	Antel	Nokia	Despliegue 5G	Abril 2019
Bolivia	No reporta	1,8 Gbps	Entel	Huawei	Demo 5G	Septiembre 2019
Ecuador	No reporta	930 Mbps	CNT	Huawei	Prueba-5G	Julio 2019
	No reporta	1,1 Gbps	Claro	Huawei	Prueba-5G	Septiembre 2019

Fuente: Elaboración propia con base en información de reguladores.

En la tabla 7 se presentan los registros para los países que priorizaron sus desarrollos en la banda de 3,5 GHz, no obstante, se presentan algunos casos en donde no se usó este rango de frecuencias. En ese sentido Brasil se adjudica como el mayor precursor en pruebas 5G en esta banda, en total se identificaron un total de 6 pruebas exclusivamente para telefonía móvil sin contar la prueba realizada en 2016 para lo que se denominó pre-5G. En Perú predomina el año 2019 como el de mayor auge en la tecnología 5G con tres pruebas realizadas, finalmente se destaca el despliegue 5G de Surinam en 3,5 GHz y el brasileño con el 5G DSS.

Finalmente, se presentan dos casos de estudio en donde se han utilizado las dos bandas del espectro para las pruebas 5G, en la tabla 8 se resume este registro.

Tabla 7. Pruebas piloto 5G en 3,5 GHZ

País	Banda Frecuencia	Velocidad Alcanzada	Operador	Proveedor Tecnológico	Tipo	Fecha
Brasil	2,6 GHz y 1,8 GHz	682 Mbps	Claro	Ericsson	Demo Pre-5G	Septiembre 2016
	3,5 GHz	No reporta	Vivo	Huawei	Prueba 5G	Julio 2018
	3,5 GHz	338 Mbps	Oi	Huawei	Demo 5G	Marzo 2019
	3,5 GHz	1 Gbps	Tim	Huawei	Prueba 5G	Mayo 2019
	3,5 GHz	No reporta	Tim	Nokia	Prueba 5G	Mayo 2019
	3,5 GHz	No reporta	Tim	Ericsson	Prueba 5G	Mayo 2019
	3,5 GHz	1,1 Gbps	Oi	Huawei	Demo 5G	Septiembre 2019
	DSS	416 Mbps	Claro	Ericsson	Despliegue 5G DSS	Julio 2020
	DSS	No reporta	Vivo	Huawei	Despliegue 5G DSS	Julio 2020
	DSS	No reporta	TIM	Huawei, Nokia y Ericsson	Despliegue 5G DSS	Septiembre 2020
Perú	AWS y 5GHz	1 Gbps	Movistar	Ericsson	Prueba Pre-5G	Diciembre 2017
	3,5 GHz	No reporta	Entel	Huawei	Prueba-5G	Marzo 2019
	3,5 GHz	3 Gbps	Claro	Huawei	Prueba 5G	Mayo 2019
	3,5 GHz	3,3 Gbps	Claro	Huawei	Prueba-5G	Noviembre 2019
Surinam	3,5 GHz	No reporta	Telesur	Huawei	Despliegue 5G	Noviembre 2019

Fuente: Elaboración propia con base en información de reguladores.

En la tabla 8 se aíslan los casos de Chile y Colombia por la presencia de las dos bandas identificadas por la CITEL como potenciales para el uso en las pruebas 5G, adicionalmente son los países que cuentan con el mayor registro en velocidades alcanzadas, puntualmente en Colombia las velocidades medidas alcanzaron los 27 Gbps en una prueba realizada en julio de 2018, mientras que en el caso chileno se destaca una velocidad de 25,4 Gbps la cual fue medida en una prueba realizada en junio del 2018, estos dos precedentes son seguidos

por una prueba realizada en Argentina en el año 2017 con 20 Gbps. Finalmente, los países de la Guayana, Paraguay, Venezuela y la dependencia de la Guyana Francesa no cuentan con registros en pruebas 5G.

Tabla 8. Pruebas piloto 5G en 3,5 y 28 GHz

País	Banda Frecuencia	Velocidad Alcanzada	Operador	Proveedor Tecnológico	Tipo	Fecha
Chile	27 GHz	10 Gbps	Claro	Nokia	Prueba 5G	Diciembre 2017
	28 GHz	No reporta	Movistar	Nokia	Prueba 5G	Enero 2018
	28 GHz	25,4 Gbps	Entel	Ericsson	Prueba 5G	Junio 2018
	3,5 GHZ	722 Mbps	Wom	Huawei	Prueba 5G	Marzo 2019
Colombia	No reporta	640 Mbps	Tigo-UNE	Huawei	Prueba 5G	Noviembre 2017
	28 GHz	10 Gbps	Claro	Nokia	Prueba 5G	Enero 2018
	28 GHz	27 Gbps	Movistar	Ericsson	Prueba-5G	Julio 2018
	3,5 GHz	No reporta	Movistar	Huawei	Proyecto-Piloto 5G	Mayo 2020
	3,5 GHz	864Mbps	Claro	No reporta	Prueba-5G	Julio 2020

Fuente: Elaboración propia con base en información de reguladores.

5. Características principales del despliegue de 5G en Suramérica

Puntualmente en Suramérica se cuenta con un avance prometedor de la mayoría de los países constituyentes a esta zona, con ayuda de políticas y estudios se viene realizando una planificación correcta de la implementación de la nueva tecnología 5G. A continuación, se muestra una recopilación de los aspectos más importantes en materia de despliegues 5G y aspectos más destacados en la regulación con la limitación en la liberación del espectro.

5.1. Despliegue 5G

En Suramérica: Brasil, Surinam y Uruguay son los países suramericanos han evidenciado despliegues de la tecnología 5G.

- En julio de 2020 se realiza el despliegue de Claro con 5G DSS (Dynamic Spectrum Sharing) el cual consiste en redistribuir las bandas de frecuencia ya disponibles y utilizadas en la red de 4G alcanzando velocidades de 416,6 Mbps, [17].
- En Surinam el operador que lidera el mercado 5G es Telesur, la implementación se fijó en la banda de frecuencia de 3,5 GHz por su disponibilidad para operación, [18].
- En el caso uruguayo ANTEL usó la banda de frecuencia de 28 GHz en el despliegue en abril del 2019 en las ciudades de La Barra en Maldonado y Nueva Palmira en Colonia; su uso se centra en el acceso fijo inalámbrico (FWA), [19].

5.2. Características regulatorias en los países de Suramérica

En el aspecto regulatorio se mantienen algunas diferencias puntuales en los casos de estudio de las cuales se destacan:

- En Argentina en el artículo 17 de la ley No. 27078 de 2014 [20] denominado 'Mecanismos de coordinación para el despliegue de redes de telecomunicaciones' que impone el carácter federal lo que significa que cada provincia cuenta con la facultad de regular el despliegue de infraestructura y servicios de telecomunicaciones, por otro lado, en el "*Documento base sobre la identificación de desafíos y necesidades de espectro radioeléctrico en Argentina"* [21] se identifica que el esquema de licitación en las bandas 4G no se ha finalizado, es importante concluir con este esquema para poder avanzar con la tecnología 5G.
- En el caso boliviano se destaca el artículo 24 de la Ley No. 164 de 2011 [22] que exige que todos los proyectos de infraestructura que brinden servicios de energía eléctrica,

hidrocarburos y transporten deberán incluir la instalación de la fibra óptica. La implementación de la tecnología 5G atraviesa por una problemática a causa de que en el Plan Nacional de Frecuencias boliviano el rango de frecuencias de la banda 3,5 GHz se encuentran ocupadas por el satélite Tupac Katari, [23].

- En cuanto al territorio brasileño el artículo 144 en el parágrafo 3 de la Ley 13879/2019 [24] determina que la inversión se priorizará la implementación de infraestructura de red con alta capacidad de comunicación de datos en áreas sin competencia adecuada. Brasil ha tenido retrasos en el aspecto de liberación de espectro con varias fechas presupuestadas, en febrero del 2020 ANATEL aprobó licitación de las bandas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz y 26 GHz, y la inclusión de otros 100 MHz en la banda de 3,5 GHz que se espera que se realice en el año 2021, [25].
- Por medio del documento en versión de consulta pública denominado Plan Nacional 5G para Chile [26] publicado el 25 de julio de 2018, allí, se identifica como bandas prioritarias para el desarrollo de la tecnología 5G 3400 - 3800 MHz y 27,5 - 28,35 GHz. Siguiendo este lineamiento a principios de 2020 se identificó las bandas de espectro radioeléctrico de 700 MHz; AWS; 3,5 GHz y 28 GHz para iniciar una consulta pública de concurso de la licitación, [27].
- En el territorio colombiano se destaca el Plan 5G publicado en diciembre de 2019 [28] con vigencia en el año 2022 en donde se espera tener un despliegue de la tecnología. Se presenta una revisión de la normativa vigente en el sector de las TIC y el despliegue de

infraestructura, por otra parte, presenta los retos de la tecnología y cómo se llevaría a cabo la transición de 4G a 5G y la hoja de ruta de actividades para conseguir este despliegue.

- En Ecuador el proceso de consulta de las bandas de 900 MHz y AWS se llevó a cabo a finales de septiembre de 2017 y las consultas de los rangos 3,3-3,4 GHz y 3,4-,3,6 GHz se realizaron en abril de 2018, [29]. En el caso de 3,4-3,6 GHz, frecuencias ya mencionadas como potencialmente usables en la implementación de la tecnología 5G, se encuentran asignados 50 MHz al operador CNT a nivel nacional y 21,5 MHz al operador de telefonía fija Etapa, por lo que quedan disponibles 128,5 MHz.
- En el caso guyanés se destaca la flexibilidad por parte de la Comisión de Servicios Públicos (PUC) en el despliegue de infraestructura, en la parte XI de la Ley general de Telecomunicaciones [30] la cual lleva por nombre "*La demolición de las calles, la eliminación de los obstáculos y el acceso a la tierra"*, aquí, se determina que el operador tendrá derechos sobre propiedades privadas o públicas para desplegar sus redes, inclusive el ambiente de la naturaleza. La Guyana todavía se encuentra en un proceso atrasado de convergencia atrasada pues según [31], el país cuenta con aproximadamente un 2% de índice de adopción de 4G en la población.
- Paraguay no cuenta con resoluciones independientes que regulen el apartado de despliegue de infraestructura, no obstante, en el artículo 24 de la Ley de Telecomunicaciones [32] se dispone que el estado cuenta con facultad de expropiar propiedades para el despliegue de redes. El país no cuenta con procesos activos de licitaciones de las frecuencias fijadas

para la red 5G, debido a que estas frecuencias se encuentran actualmente asignadas para otros servicios y con una duración de vigencia hasta 2024, [33].

- El ambiente de la tecnología 5G en Perú se encuentra retrasado a causa de la pobre infraestructura de red que posee Perú, según el reporte de OSIPTEL [34] del abril de 2020 en lo que se refiere a infraestructura de telecomunicaciones en servicios móviles apenas hay unas 24076 antenas, las cuales son insuficientes para las tecnologías precedentes.
- En el caso de Surinam en el capítulo 3 de la Ley No. 151 del 2004 [15] se encuentra la normativa del despliegue de infraestructura, en este sentido, se destaca el otorgamiento de una concesión a satisfacción del presidente con requisitos en disposición recursos financieros, conocimientos técnicos, capacidad de organización y experiencia suficientes en materia de telecomunicaciones. No obstante, a la implementación el país tiene varios inconvenientes en cuanto a la liberalización del espectro según [35] se debe a que el gobierno no ha asignado el suficiente rango de frecuencia de espectro radioeléctrico para que los operadores sean capaces de ofrecer servicios de transmisión de banda ancha móvil de mayor velocidad y calidad.
- El año 2019, Uruguay fue punto de instalación de infraestructura y pruebas en general para garantizar un correcto despliegue de 5G, a su vez verificó los límites de radiación impuestos por la OMS y por la misma normativa uruguaya en donde el resultado en general fue satisfactorio, [19].

- Para el despliegue de infraestructura en Venezuela se cuenta con la regulación impuesta en el título III de la Ley Orgánica de Telecomunicaciones [36], el estado actual del desarrollo 5G evidencia un retraso, más que todo por la penetración actual de la tecnología 4G, según [37] esta cifra es la misma que el resto de los países alcanzó en el 2016.
- Finalmente se presenta la Guyana Francesa, que con la Autoridad Reguladora de las Comunicaciones y los Correos (ARCEP) con 'La regulación de ARCEP al servicio de los territorios conectados' [38], informa el lanzamiento de una consulta pública a finales del 2019, para reunir las opiniones de los interesados sobre la asignación de frecuencias en la banda 700 MHz en las dependencias de Reunión y Mayotte y en la banda 3,4 – 3,8 GHz en la isla de la Reunión (otro territorio de ultramar), en este sentido la Guyana Francesa queda afuera de este proceso y se encuentra en espera.

6. Conclusiones

Una vez realizado el diagnóstico se identifica que la mayoría de los países están encaminados a la implementación de la tecnología 5G, unos en mayor medida que otros, tanto el sector público como el privado han mantenido una línea de acciones a tal punto que ya existen tres países en la región con despliegues formales. Brasil, Uruguay y Surinam ya cuentan con despliegues en 5G, por su parte Guyana, Paraguay y Venezuela no cuentan con un gran avance en el desarrollo de 5G principalmente en términos de infraestructura.

La importancia de aspectos como adjudicación de espectro, pruebas 5G y políticas de estado afectan el despliegue en cada país y definen su ritmo de avance. Para la adjudicación de espectro se destaca Brasil, Uruguay y Perú por encima de 550 MHz, mientras que en implementación de políticas orientadas a 5G Colombia y Brasil son de los pocos países en implementar estas medidas con el Plan 5G: Colombia y la Estrategia Brasileña de Redes de Quinta Generación (5G). En términos de pruebas de despliegue 5G; Guyana, Paraguay, Venezuela y la Guyana Francesa no se documentan aun pruebas experimentales.

Reconocimientos

Este trabajo fue realizado gracias a la Universidad Militar Nueva Granada, al interior del grupo de investigación GISSIC semillero MAXWELL y avalado por la vicerrectoría de investigaciones.

Referencias

[1] K. Husenovic, I. Bedi, and S. Maddens, Sentando las bases para la 5G: Oportunidades y desafíos. ITU, 2018 [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.5G_01-2018-PDF-S.pdf

[2] GSMA, “Study on Socio-Economic Benefits of 5G Services Provided in mmWave Bands.” Reportes GSMA, 2018 [Online]. Available: https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/10/mmWave-5G-benefits.pdf.

[3] 5G Américas, Identificación de habilitadores para redes 4G y 5G en América Latina. 2020 [Online]. Available: https://brechacero.com/wp-content/uploads/2020/04/WP-Identificaci%C3%B3n-de-habilitadores-para-la-implementaci%C3%B3n-de-redes-4G-y-5G-en-Am%C3%A9rica-Latina.pdf

[4] GSMA, The Mobile Economy. GSM Association, 2020 [Online]. Available: https://www.gsma.com/mobileeconomy/wpcontent/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf

[5] N. Vyakaranam and S. Dilip Krishna, “5G: Network As A Service - How 5G enables the telecom operators to lease out their network,” 22-Mar-2018. [Online]. Available: https://netmanias.com/en/?m=view&id=blog&no=13311. [Accessed: 20-Nov-2020]

[6] J. C. Martínez, J de J. Rugeles y E. P. Estupiñán. “Análisis de ocupación espectral banda GSM 850 en

Bogotá”. Visión Electrónica, algo más que un estado sólido, Vol. 12, No. 1, 5-13, enero-junio 2018.

https://doi.org/10.14483/22484728.14801

[7] Ericsson, “5G architecture next mobile technology | Whitepaper,” 01-Jan-2017. [Online]. Available: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-systems--enabling-the-transformation-of-industry-and-society. [Accessed: 18-Nov-2020]

[8] H. Ekström, “Non-standalone and Standalone: two paths to 5G,” 2019. [Online]. Available: https://www.ericsson.com/en/blog/2019/7/standalone-and-non-standalone-5g-nr-two-5g tracks. [Accessed: 16-Oct-2020]

[9] 3 GPP, “Release 15 Description,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2019 [Online] Available:https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3389

[10] L. Casaccia, “Propelling 5G forward: A closer look at 3GPP Release 16.” 07-Jul-2020 [Online]. Available: https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/07/07/propelling-5g-forward-closer-look-3gpp-release-16. [Accessed: 12-Oct-2020]

[11] M. Clark, C. Vanoli, and A. Smith, Abrir sendas hacia 5G. ITU News Magazine, 2017 [Online]. Available: https://www.itu.int/en/itunews/Documents/2017/2017-02/2017_ITUNews02-es.pdf

[12] GSMA, “Espectro 5G Postura de la GSMA sobre política pública,” GSMA, 2018 [Online]. Available: https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2019/03/5G-Spectrum-Positions-SPA.pdf. [Accessed: 05-Oct-2020]

[13] 5G Américas, Análisis de las recomendaciones de espectro de la UIT en América Latina. White Papers 5G Américas, 2019, p. 6-21 [Online]. Available: https://brechacero.com/wp-content/uploads/2019/08/ES-Analisis-de-las-Recomendaciones-de-Espectro-de-la-UIT-en-America-Latina-2019-vf.pdf

[14] 5G Américas, Espectro para 5G: Banda 3,5 GHZ en América Latina. 2019 [Online]. Available: https://brechacero.com/wp-content/uploads/2019/06/3.5-GHz-esp-ok.pdf

[15] Poder Legislativo, "Ley No. 14.235," Centro De Información Oficial, Ago 3, 1974.

[16] Council of State, "ACT of 2004 No.151," Official Gazette of the Republic of Suriname, 2004.

[17] QoSi, “Etude de la qualité d’expérience des opérateurs mobiles en Guyane Francaise,” Publicaciones QoSi, Francia, 2019 [Online]. Available: https://www.5gmark.com/news/2019/Barometre_4Gmark_Guyane_2019.pdf. [Accessed: 17-Jul-2020]

[18] F. Staff. (Jul 8,). Claro, de Carlos Slim, iniciará la carrera del 5G en Brasil. Available: https://www.forbes.com.mx/tecnologia-claro-slim-5g-brasil/.

[19] Telesur. (s.f.). 5G - Beyond Connectivity. Available: https://www.telesur.sr/5g/.

[20] NOKIA. (Apr 10,). ANTEL and Nokia make the first 5G call on a commercial network in Latin America. Available: https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2019/04/10/antel-and-nokia-make-the-first-5g-call-on-a-commercial-network-in-latin-america/.

[21] ENACOM, "LEY ARGENTINA DIGITAL," Boletín Oficial De La Republica De Argentina, Dec 19, 2014.

[22] Secretaría de Tecnologías de la Información, "Documento base sobre la identificación de desafíos y necesidades de Espectro Radioeléctrico en Argentina," Boletin Oficial De La Republica De Argentina, pp. 1-36, 2019.

[23] Asamblea Legislativa Plurinacional, "Ley General de Telecomunicaciones, Tecnologías de la Información y Comunicación" Gaceta Oficial De Bolivia, Ago 8, 2011.

[24] Agencia Boliviana Espacial, "Satélite TUPAC KATARI," 2019.

[25] Poder Legislativo, "Ley No. 13.879," Diario Oficial De La Unión, vol. 1, Oct 4, 2019.

[26] ANATEL, “Anatel aprova consulta pública para implementar o 5G,” 06-Feb-2020. [Online]. Available: https://www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article/171-manchete/2491-anatel-aprova-consulta-publica-para-licitar-faixas-de-frequencias-para-o-5g. [Accessed: 20-May-2020]

[27] SUBTEL, "CONSULTA PÚBLICA SOBRE PLAN NACIONAL 5G PARA CHILE," 2018.

[28] SUBTEL. (Jan 14,). Consulta Pública 5G: Gobierno licitará cuatro bandas para generar mayor competencia y eficiencia espectral en el mercado móvil. Available: https://www.subtel.gob.cl/consulta-publica-5g-gobierno-licitara-cuatro-bandas-para-generar-mayor-competencia-y-eficiencia-espectral-en-el-mercado-movil/.

[29] MINTIC, Plan 5G Colombia. Colombia: Planes Nacionales del MINTIC, 2019.

[30] 5G Américas, “Temas en Regulación de Telecomunicaciones: Ecuador,” Publicaciones 5G Américas, 2019 [Online]. Available: https://brechacero.com/white-papers/. [Accessed: 26-Jul-2020]

[31] PUC, "ACT NO. 18- TELECOMMUNICATIONS ACT," The Official Gazette, Ago 5, 2016.

[32] F. D'Almeida and D. Margot, La Evolución De Las Telecomunicaciones Móviles En América Latina Y El Caribe. (Publicaciones BID ed.) 20182.

[33] Poder Legislativo, "LEY No. 642 DE TELECOMUNICACIONES," Gaceta Oficial De La República Del Paraguay, 1995.

[34] J. M. Perrotta, "Conatel pone fecha al 5G en Paraguay para después de 2024," TeleSemana.Com, Jun 11, 2020. Available: http://www.telesemana.com/blog/2020/06/11/conatel-pone-fecha-al-5g-en-paraguay-para-despues-de-2024/.

[35] OSIPTEL, "Reporte estadístico" Publicaciones OSIPTEL, Perú, Abril. 2020.

[36] J. O. Prats Cabrera and P. Puig Gabarró, La gobernanza de las telecomunicaciones: Hacia la economía digital. 2017, pp. 49–51 [Online]. Available: https://publications.iadb.org/es/node/14083

[37] LEY ORGÁNICA DE TELECOMUNICACIONES, "LEY ORGÁNICA DE TELECOMUNICACIONES," Gaceta Oficial De Venezuela, Feb 7, 2011.

[38] N. Larocca, "Venezuela presenta una penetración 4G que la región alcanzó en 2016," Mar 1, 2019. Available: http://www.telesemana.com/blog/2019/03/01/venezuela-presenta-una-penetracion-4g-que-la-region-alcanzo-en-2016/.

[39] ARCEP, La régulation de l’Arcep au service des territoires connectés. 2020 [Online]. Available: https://www.arcep.fr/collectivites/larcep-et-les-territoires.htm

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

DESIGN OF A BIOMIMETIC WATER FILTER OF KERATIN NANOFIBERS

Diseño de filtro de agua biomimético de nanofibras de Queratina

Luisa Fernanda Mahecha Mora[1], Nicolás Felipe Conde González[2]

Abstract

Water quality is of vital importance for human consumption, so treatment plants play a very important role when purifying water. It is increasingly essential to ensure that the sustainable development goals are met, as stated in the sixth goal: “ensure the availability of clean water and sanitation for all”, but this does not happen in some countries of the world; In Colombia, only 60% of the population has access to drinking water. Due to this, the problem of access to drinking water was analyzed in a municipality in Colombia called Icononzo, Tolima. This place has a rustic and old treatment plant where due to the poverty of the place, they do not have the necessary equipment and the maintenance that the plant requires periodically is not carried out, that is why the filters are worn and are not the most Optimal, impurities are filtered that make the water unusable for human consumption, only for sanitary use, it is a problem that affects the health, the economy of the inhabitants and their agriculture due to the quality of

[1] Tecnóloga en Electrónica, Estudiante de Ingeniería en Control y Automatización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
[2] Tecnólogo en Electrónica, Estudiante de Ingeniería en Control y Automatización Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. https://orcid.org/0000-0001-5452-6866

irrigation. Therefore, it is proposed to develop a biomimetic filter based on the filtration method used by the whale. This mammal has keratin baleen inside its mouth that allows it to filter its food; HDPE (High Density Polyethylene) recycled plastic will be used in the filter housing, and the remains of feathers, nails and hooves will be used to obtain the keratin, thus contributing to the circular economy in the region. By implementing this filtration method, it would help to improve the quality of life of the Icononzo population.

Keywords: Biomimetic, HDPE, keratin, filter, water.

Resumen

La calidad del agua es de vital importancia para el consumo humano, por lo que las plantas de tratamiento juegan un papel muy importante al momento de purificar agua. Cada vez es más esencial garantizar que se cumplan los objetivos de desarrollo sostenible, tal como indica el sexto objetivo: “garantizar la disponibilidad de agua limpia y saneamiento para todos”, pero esto no sucede en algunos países del mundo; en Colombia tan solo el 60% de la población cuenta con acceso a agua potable, debido a esto, se analizó la problemática del acceso a agua potable en un municipio de Colombia llamado Icononzo, Tolima. Este lugar cuenta con una planta de tratamiento rústica y antigua donde debido a la pobreza del lugar, no tienen el equipo necesario y no se realiza el mantenimiento que la planta requiere periódicamente, es por esto que los filtros se encuentran desgastados y no son los más óptimos, se filtran impurezas que hacen que el agua no se pueda utilizar para el consumo humano, solo para uso sanitario, es

un problema que afecta la salud, la economía de los habitantes y su agricultura debido a la calidad del riego. Por lo tanto, se plantea desarrollar un filtro biomimético basado en el método de filtración que utiliza la ballena, este mamífero tiene en el interior de su boca barbas de queratina que permiten filtrar su alimento; en la carcasa del filtro se utilizará plástico reciclado HDPE (Polietileno de Alta Densidad), y para la obtención de la queratina se utilizará restos de plumas, uñas y pezuñas, contribuyendo así a la economía circular en la región. Al implementar este método de filtración, se ayudaría a mejorar la calidad de vida de la población de Icononzo.

Palabras clave: Biomimético, HDPE, queratina, filtro, agua.

1. Introducción

La pureza del agua es fundamental para la sustentabilidad de la vida humana, en algunos países como Colombia el control y tratamiento de aguas es un problema en gran parte de los municipios debido a que estos no cuentan con herramientas confiables para realizar el control al momento de purificar.

Un caso particular es el municipio de Icononzo, Tolima, Colombia, un lugar que cuenta con 10.801 habitantes según un censo realizado en 2017 de los cuales 6.568 viven en condiciones de pobreza extrema, donde no todas las personas pueden contar con agua potable o tratada de forma correcta todos los días para preparar sus alimentos, por lo que comprar agua en botellas para el consumo diario es fundamental para mantener la salud, [1], figura 1.



Figura 15: Mapa Icononzo, Tolima, [2].

Según el índice de Riesgo de la Calidad de Agua para el consumo Humano (IRCA), se determinó que el agua que viene de este municipio tiene un alto nivel de contaminación.

En este municipio existe un acueducto urbano que cuenta con dos desarenadores uno junto a la bocatoma y otro cerca de la planta de tratamiento de agua potable, un gran problema radica en que no se tiene control sobre la velocidad del agua que entra a los desarenadores, por la alta velocidad y cantidad de agua que se somete al proceso, la cual no tiene el tiempo necesario para realizar el recorrido que requieren los floculadores, sedimentadores y filtros, malgastando así los recursos, lo que conlleva a que el agua que estas personas obtienen en

el servicio público es solo apta para usos sanitario, el suministro viene de la quebrada Juan López que presenta deterioro ocasionado por la tala del bosque y la expansión ganadera, [3]. La estructura cuenta con deterioro por el tiempo por lo que requiere mantenimiento para evitar la generación de algas las cuales contaminen el agua.

Los filtros presentan pérdida del material filtrante y cementación debido a que se utilizan por fuera de los ciclos de vida útil.

1.1. Condiciones socioeconómicas

Icononzo es un municipio agrícola por excelencia. Basa su economía en el cultivo del café, cultivo de frutales, principalmente el banano que genera ingresos permanentes a los agricultores, el sector agrícola contribuye con un 7% en el PIB de la actividad económica colombiana. Además, se sabe que el 50 % del agua extraída pertenece al regadío, y debido a la mala calidad del agua, hay sequedad en las plantas por los altos niveles de salinidad, y la inestabilidad de los suelos debido a reducción de la infiltración del agua causado por la alta cantidad de sodio, [4].

Al mejorar la calidad del agua se conseguirá reducir el impacto ambiental en las superficies cultivadas, que son un 37 % de la superficie total colombiana.

En tanto a nivel humano el uso de agua residual con contaminantes provoca una serie de enfermedades como infecciones parasíticas, víricas o bacterianas que son unas de las causas más relevantes de defunción. *"Han sido años de sufrimiento y la mala calidad del agua que*

hemos consumido durante muchos años fue la culpable de las diarreas y la desnutrición en buena parte de la población infantil", señala Alfonso Aldana, presidente de la asociación de juntas comunales de Icononzo.

En cuanto a las condiciones climáticas en Icononzo, los veranos son cortos y calientes; los inviernos son cortos, cómodos y húmedos y está nublado durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 16 °C a 28 °C y rara vez baja a menos de 14 °C o sube a más de 30 °C, figura 2.

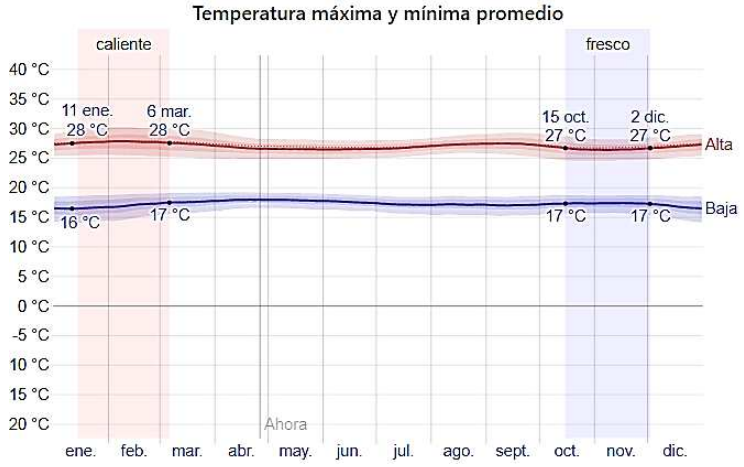


Figura 2. Temperatura anual de Icononzo, [5].

La precipitación de lluvia acumulada durante un período móvil de 31 días centrado alrededor de cada día del año. Icononzo tiene una variación extremada de lluvia mensual por estación. Llueve durante el año en Icononzo. La mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 26 de abril, con una acumulación total promedio de 182 milímetros.

La fecha aproximada con la menor cantidad de lluvia es el 13 de enero, con una acumulación total promedio de 42 milímetros, [5], figura 3.

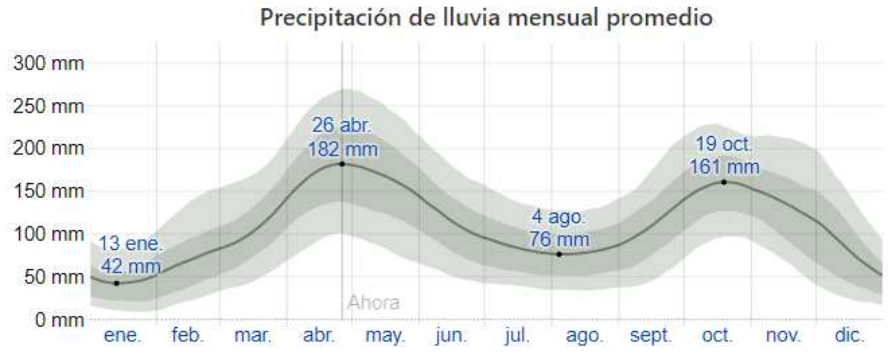


Figura 3. Precipitación de lluvia anual, [5].

2. Estado del Arte

Existen diversos sistemas de filtrado utilizados actualmente para purificar agua, los cuales se observan a continuación:

2.1. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un método de purificación del agua que utiliza una membrana semipermeable para purificar el agua mediante la aplicación de una presión (presión osmótica). El resultado es que la disolución es retenida del lado presurizado de la membrana y el solvente puro puede pasar al otro lado. Para lograr la “selectividad”, esta membrana no debe dejar pasar iones o moléculas grandes a través de sus poros (o agujeros), pero debe dejar pasar libremente componentes más pequeños de la solución (como las moléculas solventes). La ósmosis

inversa puede eliminar muchos tipos de elementos suspendidos en el agua, incluyendo bacterias, figura 4.

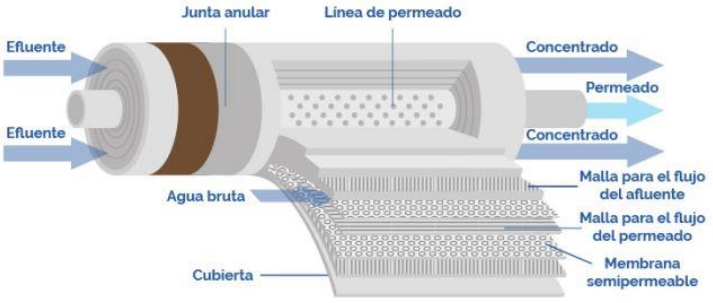


Figura 4. Ósmosis inversa, [6].

2.2. Filtros a presión

Los filtros a presión se utilizan a veces cuando es necesario mantener una carga de presión para evitar la necesidad de impulsar el agua al sistema mediante bombeo. El lecho de filtración se encierra en una carcasa cilíndrica. Pueden fabricarse filtros a presión pequeños, capaces de tratar hasta unos 15 m3 /h, de plásticos reforzados con vidrio. Los filtros a presión más grandes, de hasta 4 m de diámetro, se hacen de acero con un recubrimiento especial. Se necesitan instalaciones para descolmatar el filtro y retirar el lodo diluido.

2.3. Filtros lentos de arena

Los filtros lentos de arena son habitualmente depósitos que contienen arena (con partículas de tamaño efectivo de 0,15 a 0,3 mm) hasta una profundidad de 0,5 a 1,5 m. En estos filtros, en

los que el agua bruta fluye hacia abajo, la turbidez y los microorganismos se eliminan principalmente en los primeros centímetros de la arena.

3. Solución del problema

Las soluciones pensadas para mejorar el sistema de tratamiento son dos.

En primer lugar, realizar un sistema de control que disminuya la velocidad de entrada del flujo de agua a los desarenadores. Se descarta esta opción por lo costoso que supone la implantación del sistema, además de ser una vía que no corresponde a los objetivos de este proyecto al no poder basarse en la naturaleza.

En segundo lugar, según el análisis de las condiciones de la planta de tratamiento que se encuentra en Icononzo, se observa que se requiere mejorar el método de filtrado utilizado ya que el utilizado presenta deterioro, además por las condiciones económicas de la región, no permite cambiarse en los tiempos de vida útil, por lo que implementar un filtro que se pueda fabricar con materiales de la región ayudaría a esta comunidad a mejorar la calidad del agua que consumen a diario.

4. ¿cómo soluciona la naturaleza este problema?

4.1. Descripción del proceso biológico

En la naturaleza se puede observar como de forma natural algunos animales poseen particularidades que les permiten obtener su alimento, más concretamente, animales como las

ballenas barbadas. Estas poseen unas “barbas” de unos hilos de queratina que cuelgan de la parte superior de sus bocas.

Dichos hilos están compuestos esencialmente de queratina, ver Figura 5 (el mismo material que compone las plumas, las uñas o el pelo), las cuales funcionan como filtro; al momento de abrir su boca y entrar agua, la lengua y la garganta hacen que el agua que entra vuelva a salir colándose entre las barbas y logrando que el alimento quede atrapado permitiendo así alimentar la ballena, [7].



Figura 5: Barbas de queratina, filtrado de ballenas, [8].

5. Implementación de la solución

Para solucionar el problema de filtrado de agua en el municipio de Icononzo, se propone realizar filtros de microfibras de queratina insolubles para la planta de tratamiento de aguas del municipio, estas microfibras realizarán una labor similar a las barbas de la ballena para filtrar el agua y obtener alimento.

5.1. Fabricación de componentes del filtro

5.1.1. Filtro de queratina

El proceso de fabricación se describe a continuación [9]:

Recogida de plumas y pezuñas procedente de residuos ganaderos.

5.1.2. Triturado e hidrólisis:

En esta primera etapa se procede a triturar las plumas con la utilización de una trituradora industrial, y una vez triturada, se añaden sulfuro sódico y agua para realizar la hidrólisis durante un día empleando un agitador neumático.

5.1.3. Oxidación y ajuste de ph a un valor ácido:

Se procede al vaciado del líquido del tanque por su base. El líquido pasa a un tanque de oxidación y ajuste de pH al cual se añade agua o cualquier otro producto oxidante, agitando la mezcla durante 50 minutos. Después se añade ácido sulfúrico para conseguir un PH ácido.

5.1.4. Decantaciones y lavados:

En el mismo tanque de oxidación se deja reposar la mezcla 3 horas. A continuación, se recogen los sólidos generados aspirando el agua con una bomba peristáltica.

Se procede a ajustar el PH a un valor neutro usando hidróxido de sodio. A continuación, se procede a un lavado añadiendo agua.

Tras esto se llevan a cabo una segunda decantación, un segundo lavado y una tercera decantación.

5.1.5. Polimerización:

El objetivo de esta fase es conseguir unas fibras mayores y más resistentes añadiendo ácido adípico durante 24 horas aproximadamente a una temperatura entre 30ºC y 80ºC.

Las microfibras de queratina insolubles obtenidas poseen propiedades de resistencia y elasticidad incrementadas, apropiadas para su uso en biomateriales como el filtro de agua que se va a diseñar, lo que permite garantizar que cumpla su función ante la fuerza de corrientes de agua mayores a 24.43 L/s, figura 6.

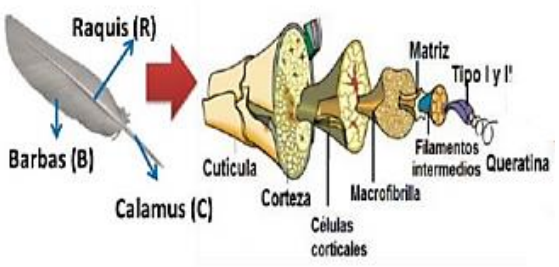


Figura 6: Composición estructural de las plumas, [10].

5.2. Carcasa de plástico

Después de obtener las microfibras de queratina, se utilizará plástico reciclado HDPE (se recicla de materiales como tubos, botellas de detergentes, botes de aceite, etc. [11]), para construir las carcasas que tendrán el soporte de la malla y con ello, construir los filtros de bajo coste que se utilizarán en la planta de tratamiento.

Esta carcasa tendrá una forma hidrodinámica similar a la de un pez, y contará con una serie de nervios que servirán como un “prefiltro” para eliminar los contaminantes de mayor tamaño antes de que lleguen al filtro principal de queratina.

5.3. Modelo del diseño propuesto

La solución propuesta se muestra en la figuras 7 y 8, modelado 3D del filtro propuesto:

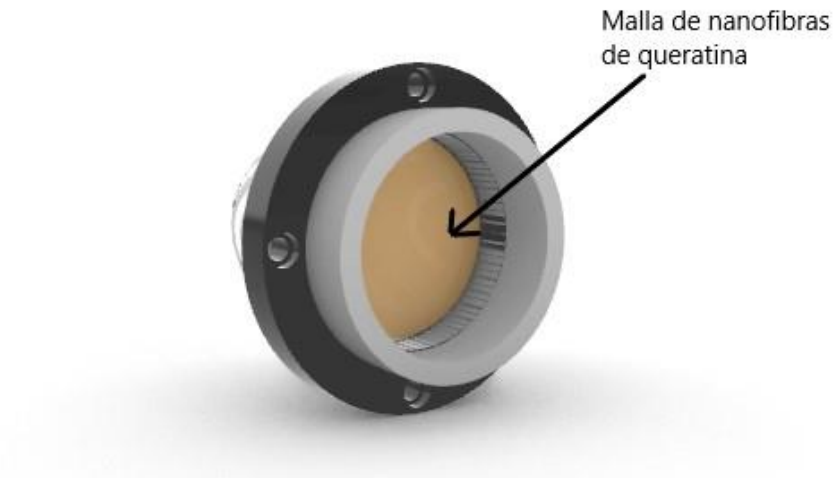


Figura 7. Modelado parte posterior, filtro de queratina. Fuente: elaboración propia.

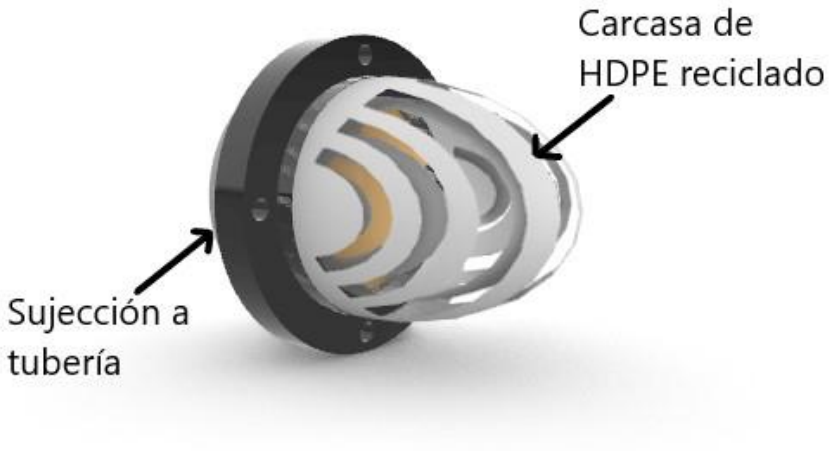


Figura 8: Modelado parte anterior donde se ve el prefiltro de polietileno. Fuente: elaboración propia.

5.4. Instalación y mantenimiento

El filtro se instalará en la tubería mediante el uso de bridas como se ve en el boceto adjunto (Figura 9), junto con unos filtros de estanqueidad en las uniones para evitar pérdidas.

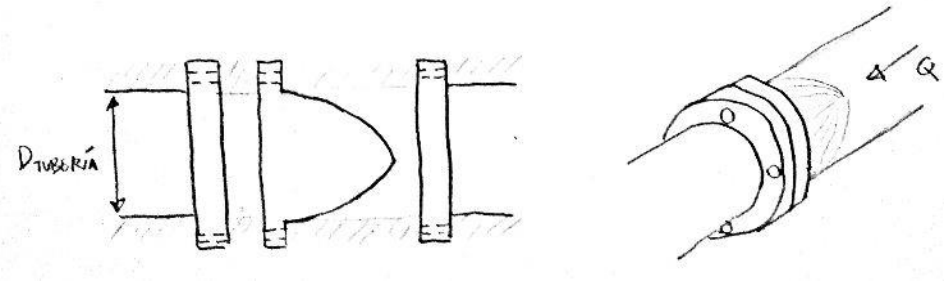


Figura 9: Boceto de instalación del filtro en tubería. Fuente: elaboración propia.

Las pérdidas de presión admisibles con un filtro limpio son de orden 1 a 3 mca. (metro de columna de agua), efectuándose la limpieza cuando estas pérdidas alcancen los 4 o 5 mca. Para facilitar el mantenimiento, se planea utilizar tuberías en paralelo con válvulas de paso en

cada una, por lo que mientras una está trabajando, la otra puede estar en mantenimiento, figura 10.

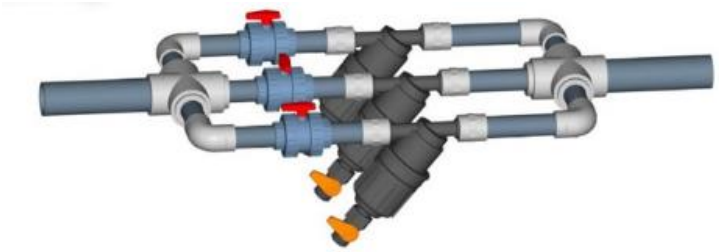


Figura 10. Tubería en paralelo facilita el mantenimiento, [12].

6. Conclusiones

Implementar filtros para purificar agua como el propuesto contribuye a la economía circular de la región además de contribuir al sexto objetivo de desarrollo sostenible (Agua Limpia y Saneamiento para todos).

Se observó el comportamiento de alimentación de las ballenas barbadas como inspiración para dar una solución al problema de filtrado para purificar agua.

Implementar soluciones como la propuesta motiva la economía circular de la región, generación empleo y buen manejo de desperdicios.

Como trabajo futuro se planea presentar la propuesta ante la gobernación del departamento del Tolima y alcaldía del municipio de Icononzo, buscando los recursos y el espacio necesarios para poder fabricar los componentes del filtro, con ello, desarrollar el laboratorio de pruebas y

finalmente implementar el filtro en las tuberías de abastecimiento de agua potable en el municipio.

Referencias.

[1] J. E. Garcia Orjuela, “Descripcion planta de tratamiento de agua - Icononzo, Tolima,” *J. Chem. Inf. Model.*, 2014.

[2] Gobernación del Tolima, “Estadísticas 2011-2014,” *BMC Public Health*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2017.

[3] J. E. Garcia Orjuela, “Propuesta de reducción de cargas contaminantes en el municipio de Icononzo, Tolima.” 2018.

[4] Gobernación del Tolima, “Municipio de Icononzo,” 2019. [Online]. Available: https://www.tolima.gov.co/publicaciones/21123/municipio-de-icononzo/. [Accessed: 26-Apr-2020].

[5] “Clima promedio en Icononzo, Colombia, durante todo el año - Weather Spark.” [Online]. Available: https://es.weatherspark.com/y/23362/Clima-promedio-en-Icononzo-Colombia-durante-todo-el-año. [Accessed: 26-Apr-2020].

[6] “Ósmosis Inversa | SEFILTRA | Expertos en purificación de fluidos.” [Online]. Available: https://www.sefiltra.com/productos/osmosis-inversa/. [Accessed: 21-Nov-2020].

[7] S. L. Sanderson, E. Roberts, J. Lineburg, and H. Brooks, “Fish mouths as engineering structures for vortical cross-step filtration,” *Nat. Commun.*, vol. 7, Mar. 2016.

[8] “Las barbas de las ballenas.” [Online]. Available: https://universomarino.com/2011/02/04/las-barbas-de-las-ballenas/. [Accessed: 26-Apr-2020].

[9] "'PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE M ICROPIBRAS DE QUERATINA A PARTIR DE RESIDUOS GANADEROS' DESCRIPCIÓN Objeto de la Invención," Jul. 2006.

[10] R. D. E. Estudios and E. N. Psicolox, "Plumas: Implicancia ambiental y uso en la industria agropecuaria," vol. 21, no. 3, pp. 225–237, 2013.

[11] I. E. Roca Girón, "Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 12 Suppl 1, no. 9, pp. 1–29, 2005.

[12] "Filtración (II): selección del equipo de filtrado | iAgua." [Online]. Available: https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/filtracion-ii-seleccion-equipo-filtrado. [Accessed: 26-Apr-2020].

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

5G COVERAGE STUDY WITH ICS TELECOM

Analysis of losses due to climatological factors in 5G technology for the metropolitan zones of the city of Bogotá D.C.

ESTUDIO DE COBERTURA EN 5G CON ICS TELECOM

Análisis de pérdidas por factores climatológicos en tecnología 5G para las zonas metropolitanas de la ciudad de Bogotá D.C

Oswaldo Pérez Murillo[1], Ingrid Patricia Páez Parra[2]

Abstract

In this research project is has been made a study and later coverage analysis for a cellular telecommunication network in 5G technology a metropolitan scenario of Bogota city, Colombia. It starts, with an explanation of what is 5G and what is expected of this technology. With this preamble, it's establish the parameters of simulation for 5G technology, defining the frequency 3 GHz until 100 GHz, what it entails the use of millimeter waves. For the base stations in the simulations, it was made given two operators of the five existing in the country (operators X and Y). The scenario was chosen with the purpose of study the case most presented in the moment of develop and design of cellular telecommunication system as are the systems without line of sight (NLOS) which is observed on the Universidad Nacional de Colombia facilities, where are wide green zones and buildings between 4 and 10 floors. In agreement to the results it's

[1] Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Correo: osperezm@unal.edu.co

Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9524-7676

[2] Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Correo: ippaezp@unal.edu.co

evidence that the free space losses of signal high signal loss due to the to the multiple obstacles with they encounter. In the simulations were taken into account the climatological effects as rain and fog that increase the signal loss.

Keywords: Millimeter waves, 5G, Coverage study, Telecommunications, Cellular networks, 5G Path loss.

Resumen

En este proyecto de investigación se realizó un estudio y el posterior análisis de cobertura para una red en tecnología 5G en un escenario metropolitano de la ciudad de Bogotá, Colombia. Se inicia, con una explicación de qué es 5G y qué se espera de esta tecnología. Con este preámbulo se establecieron los parámetros de simulación para la tecnología 5G, definiendo las frecuencias de 3 GHz hasta los 100 GHz, lo que conlleva al uso de ondas milimétricas. Para la ubicación de las estaciones base para las simulaciones, se realizaron teniendo en cuenta dos operadores de los cinco existentes en el país (operadores X y Y).

El escenario fue elegido con el propósito de estudiar el caso más presentado en el momento de desarrollo y diseño del sistema de telecomunicaciones celulares como son los sistemas sin línea de visión (NLOS) que se observa en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia, donde se encuentran zonas verdes amplias y edificios entre 4 y 10 pisos.

De acuerdo con los resultados obtenidos se evidencia que la perdida de señal en el espacio libre es elevada debido a los múltiples obstáculos con los que se encuentra. En las simulaciones

se tuvieron en cuenta los efectos climatológicos como la lluvia y la niebla que incrementan las pérdidas de la señal.

Palabras clave: Ondas milimétricas, 5G, Estudio de cobertura, Telecomunicaciones, Redes celulares, Pérdida de señal 5G.

1. Introducción

En la actualidad las redes celulares existentes como 2G, 3G y 4G, están llegando prácticamente a su límite; esto debido en gran parte a la masificación de lo que se denominan Internet de las cosas (IoT): automatización industrial, domótica, implementación de ciudades inteligentes, industria 4.0, etc.

Para el año 2020, esto generará que los dispositivos conectados quintupliquen los que estaban para el año 2010 de 12,5 billones a 50 billones de usuarios a nivel mundial, por ende, la generación de datos también se incrementara en relación de 1 a 10 lo cual quiere decir sí en el año 2010 se generaban aproximadamente 2,4 exabytes (EB) de datos, para el 2020 se generarán aproximadamente 24,3 EB, [1].

En Colombia, la situación es similar, los boletines trimestrales de las TIC generados por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones muestran el crecimiento de los servicios de telecomunicaciones celulares a nivel nacional para todos los operadores de aproximadamente 5 millones de usuarios pasando de 60.7 millones de usuarios en el tercer

trimestre del año 2017 a 68.5 millones de usuarios para el segundo trimestre del año 2019, lo cual indica que aproximadamente un ciudadano colombiano cuenta con entre 1 y 3 servicios de telecomunicaciones celulares, por ende, el crecimiento que se ha y se estima tener puede dejar la infraestructura de telecomunicaciones deficiente en relación con la demanda creciente lo que representara problemas inminentes de congestión, [2].

Por otro lado, el acceso a internet a través de los servicios de telecomunicaciones celulares ha crecido en el mismo lapso de tiempo se ha incrementado un 20% aproximadamente; siendo los servicios de telecomunicaciones celulares en tecnología 4G los de más demanda aumentando los accesos a internet hasta en un 95%, debido a la velocidad de transferencia de información comparada con las demás tecnologías existentes [2]; esto denota la congestión actual de los servicios de telecomunicaciones celulares en esta tecnología donde la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) muestra los problemas de cobertura que tiene el servicio en tecnología 4G el cual solamente tiene una cobertura del 62%, [3].

Las redes 5G entran a suplir la demanda que surgirán en el futuro aportando una mejora en la latencia y ampliando el ancho de banda que llegaría a variar de 0,7 gigahertz (GHz) a aproximadamente 7 GHz [1], dependiendo de la frecuencia de trabajo de 3 GHz hasta 100 GHz, [4]. Todo esto llegará a ser posible con la adecuada utilización del espectro radioeléctrico y la ubicación de las estaciones base, entre otras variables que se deben tener en cuenta para maximizar la propagación de la señal en un espacio libre, [5].

La señal en altas frecuencias, son nombradas como ondas milimétricas, son bastantes susceptibles al medio ambiente en el que se propaga, por lo cual los escenarios del presente proyecto proponen un clima cambiante característico de la ciudad de Bogotá lo que supone un reto para 5G. Cabe recordar que 5G tiene propuestas varias soluciones para la propagación de la señal en entornos adversos con el fin de garantizar tanto cobertura como ancho de banda a los usuarios que en tecnologías anteriores no se podían implementar.

Las características del escenario seleccionado presentan diferentes aspectos cuenta con zonas verdes con amplios, altos y frondosos árboles, con algunos edificios altos dentro del complejo distanciados entre sí. Donde se observarán diversos factores adversos para la propagación y el análisis de señales; la reflexión, dispersión, refracción y difracción producidas por la señal en el momento de encontrarse con un obstáculo tienden a producir efectos de perdida de potencia de la señal que varían de un material a otro; por lo cual las pérdidas de este escenario no son iguales a las de otro.

Los resultados obtenidos de este trabajo sirven como referente a los diferentes operadores de servicios de telecomunicaciones celulares, las entidades del sector de las telecomunicaciones, entes regulatorios, entre otros, tanto en Colombia como en el mundo, para el diseño y adaptación de las nuevas redes en tecnología 5G, evidenciando la importancia de considerar un entorno específico donde se desea brindar servicio, la definición de la mejor frecuencia para un entorno especifico.

El trabajo está dividido en cuatro secciones, la primera sección se muestra la introducción y fundamentos del proyecto; En la sección 2 se indica la metodología de simulación, en la sección 3 se presentan y analizan los resultados de las simulaciones y en la última parte se presentan las conclusiones.

2. Metodología de simulación

2.1. Estudios similares previos (antecedentes)

Para definir los parámetros de simulación, se analizaron los proyectos similares realizados para escenarios macro urbanos (UMa), micro urbanos (UMi) y zonas interiores (InH), basados en mediciones experimentales en entidades educativas y entidades del sector de las telecomunicaciones, para frecuencias de 5 a 100 GHz los resultados se muestra la tabla 1, [6]:

Tabla 1. Resultados de experimentos en 5G a nivel mundial. Datos obtenidos de [6].

Frecuencia (GHz)	Escenario	Entidad	Tipo de mediciones		País y Año del estudio
			Propagación	Multitrayecto	
10	UMa	Universidad de Aalborg	X		Dinamarca (2015)
	UMi	Berlín HHI	X		Alemania (2016)
14	UMi	BUPT	X	X	China (2015)
15	InH	Ericsson	X		Suecia (2015)
18	UMa	Universidad de Aalborg	X		Dinamarca (2015)
19,85	InH	NTT DOCOMO	X	X	Japón (2015)
20	InH	BUPT	X	X	China (2015)
23	InH	BUPT	X	X	China (2015)
26	InH	BUPT	X	X	China (2015)
26,4	UMa	NTT DOCOMO	X		Japón (2015)
	UMi	NTT DOCOMO	X		Japón (2015)

Frecuencia (GHz)	Escenario	Entidad	Tipo de mediciones		País y Año del estudio
			Propagación	Multitrayecto	
28	UMa	NYU	X	X	Estados Unidos (2012)
		Universidad de Aalborg	X		Dinamarca (2015)
		Ericsson	X		Suecia (2015)
		ETRI Corea		X	Corea del Sur (2015)
		Samsung & KAIST	X		Corea del Sur (2015)
	UMi	NYU	X	X	Estados Unidos (2012)
		Universidad Aalto	X	X	Finlandia (2016)
		Berlín HHI	X		Alemania (2016)
		Nokia	X		Finlandia (2015)
		Huawei	X		China (2015)
	InH	NYU	X	X	Estados Unidos (2014)
		Universidad Aalto	X	X	Finlandia (2016)
		ETRI Corea	X	X	Corea del Sur (2015)
		Samsung & KAIST	X	X	Corea del Sur (2015)
		Huawei	X		China (2015)
		BUPT	X	X	China (2015)
29	UMi	Qualcomm	X		Estados Unidos (2016)
	InH	Qualcomm	X		Estados Unidos (2016)
30	UMi	Universidad de Durham	X	X	Reino Unido (2016)
	InH	Universidad de Durham	X	X	Reino Unido (2016)
37,1	UMa	NTT DOCOMO	X		Japón (2015)
38	UMa	Universidad de Austin	X		Estados Unidos (2011)
		ETRI Corea		X	Corea del Sur (2015)
	InH	ETRI Corea	X	X	Corea del Sur (2015)
41,5	UMi	Berlín HHI	X		Alemania (2016)
58,6	InH	Ericsson	X		Suecia (2015)
	UMa	Universidad de Austin	X	X	Estados Unidos

Frecuencia (GHz)	Escenario	Entidad	Tipo de mediciones		País y Año del estudio
			Propagación	Multitrayecto	
					(2011)
	UMi	Universidad de Durham	X	X	Reino Unido (2016)
	InH	Universidad de Bristol	X	X	Reino Unido (2016)
		Universidad de Durham	X	X	Reino Unido (2016)
60		Universidad L'Aquila	X		Italia (2012)
61	UMi	Qualcomm	X		Estados Unidos (2016)
	InH	Qualcomm	X		Estados Unidos (2016)
63	UMi	Universidad Aalto	X	X	Finlandia (2015)
	InH	Universidad Aalto	X	X	Finlandia (2015)
73	UMa	NYU	X	X	Estados Unidos (2013)
	UMi	NYU	X	X	Estados Unidos (2013)
		Huawei	X		China (2015)
	InH	NYU	X	X	Estados Unidos (2014)
		Huawei	X		China (2015)
82	InH	CEA		X	Francia (2016)
82,5	UMi	Berlín HHI	X		Alemania (2016)
83,5	UMi	Universidad Aalto	X		Finlandia (2010)

A nivel de Colombia, en el 2018, se encontraron estudios con tecnología 5G en la zona de La Candelaria en la ciudad de Bogotá, Figura 1, se realizaron las simulaciones basadas con ICS Telecom (herramienta ofimática para el desarrollo y análisis de redes de telecomunicaciones) con una frecuencia de 28, 38, 60 y 73 GHz, con arreglos de antenas MIMO y Massive MIMO

con el fin de analizar la propagación y cobertura de la señal; donde se observan potencias entre -80 dBm y -126 dBm para las frecuencias mencionadas. También, para los estudios realizados en las simulaciones en 28 Ghz se realizaron pruebas de throughput (tasa promedio de éxito para la entrega de datos) para datos entre 32 y 135 Kbps y observaron una tasa de éxito entre el 93.23% y el 74.26% para arreglos de antenas de 64x64 y 128x128 respectivamente, [7], [8].



Figura 1. Estudio de cobertura de una red 5G en el área de la candelaria [7], [8].

2.2. Software de simulación

Para el desarrollo de las simulaciones se utilizará ICS Telecom que es un software de diseño de redes pago. Cuenta con una amplia gama de modelos de propagación dependiendo la frecuencia y el entorno en que se trabaje y lo que se quiera obtener de las simulaciones. Estos

modelos van desde los empíricos hasta los modelos determinísticos; incluso modelos de entorno climatológico. También modela sistemas de cobertura en interiores; lo que significa que puede mostrar los niveles de señal y penetración de la misma en entornos interiores como habitaciones de casas, oficinas de edificios, entre otros, [1].

Por otra parte, es necesario elegir entre cartografía digital de 50, 15 o 5 metros dependiendo de la resolución que se quiere dar a las simulaciones por lo cual para áreas metropolitanas, y en especial para proyectos en tecnología 5G, se debe usar la resolución más alta posible (5 metros) con el fin de que el análisis sea lo más relacionado a la realidad; las otra resoluciones de 50 y 15 metros son utilizadas para proyectos rurales donde no es necesario demasiada resolución por las condiciones del terreno y entornos urbanos mucho más pequeños como municipios, [9].

2.3. Escenario de estudio

Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá). Este escenario cuenta con diferentes características para la propagación de las señales, desde el punto de vista de la ingeniería de telecomunicaciones, dentro de los cuales tenemos zonas boscosas frondosas con árboles de gran tamaño en altura y envergadura, estas zonas están ubicadas en varios puntos dentro de la universidad. También, tenemos zonas abiertas tanto verdes como en concreto, Figura 2. Es el escenario perfecto para analizar señales electromagnéticas para sistemas NLOS (sin línea de vista); donde ninguna estación base tiene la posibilidad de tener una línea de visión directa.



Figura 2. Ubicación de las estaciones base, [10].

2.4. Parámetros de simulación

La herramienta de simulación ICS Telecom cuenta con la caracterización para simular la transmisión 5G dentro de sus opciones de configuración. En la Tabla 2 se presentan los principales parámetros de simulación.

Tabla 2. Parámetros de simulación de las estaciones base.

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	10 W

Ganancia de antena	23 dBi
Arreglo de antenas	4x4
Frecuencia de trabajo	3-100 GHz
Modulación	64 QAM

Fuente: elaboración propia.

También, se puede elegir el modelo de simulación para los cálculos escogiendo el modelo determinístico ITU – R 525/526 [11] ajustado con el modelo de geometría de difracción y el modelo de atenuación de subtrayectoria Delta Bullington. También, tenemos los cálculos de propagación referidos a los efectos de gases con la norma ITU – R 676, los efectos de la niebla con la norma ITU – R 840, y los efectos de la lluvia con la norma ITU – R 838/530. Para Bogotá entre los parámetros necesarios tenemos la temperatura, que se registra con una máxima medida de 19.9, una mínima medida de 17,8 y una media de 14,9 grados centígrados, la presión atmosférica, tenemos un máximo de 752,1 hPa, un mínimo de 751,1 hPa y una media de 751, 6 hPa, las precipitaciones tenemos, un máximo de 129 mm, un mínimo de 39 mm y en promedio de 89 mm [12], la humedad del aire se compone del valor del vapor (Humedad absoluta) que normalmente es 12 g/m3 y el agua (Humedad relativa) que normalmente se ubica en 0,025, [13].

Para la ubicación de las estaciones base se utilizó los mapas de cobertura de la red móvil 4G

existente de dos operadores de telecomunicaciones móviles (Operador X y Operador Y) [14]. Para el resto de la configuración de las estaciones base (altura, sectorización, etc.) se utilizó la recomendación ITU-R M.2412-0, [15].

2.5. Procedimiento de simulación

Después de ubicar los puntos de estaciones base en la cartografía digital de Bogotá, se procede a configurar los parámetros de las estaciones base primero con una frecuencia de 3, 10, 22, 32, 47, 60, 72, 82 y 100 GHz, Figura 3 y 4. Se realizan simulaciones de cobertura del nivel de potencia recibida a partir de las cuales se obtienen los resultados para su análisis en el área de estudio con las configuraciones establecidas para un día soleado y un día con lluvia moderada.

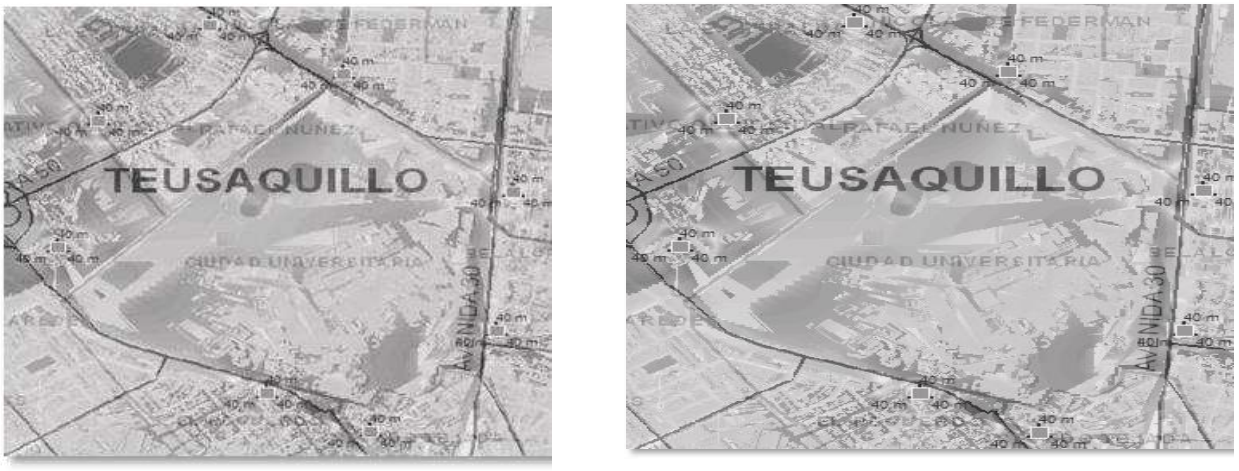


Figura 3. Muestras de simulaciones a 3 GHz (Izquierda día soleado, Derecha día con lluvia). Fuente: elaboración propia.

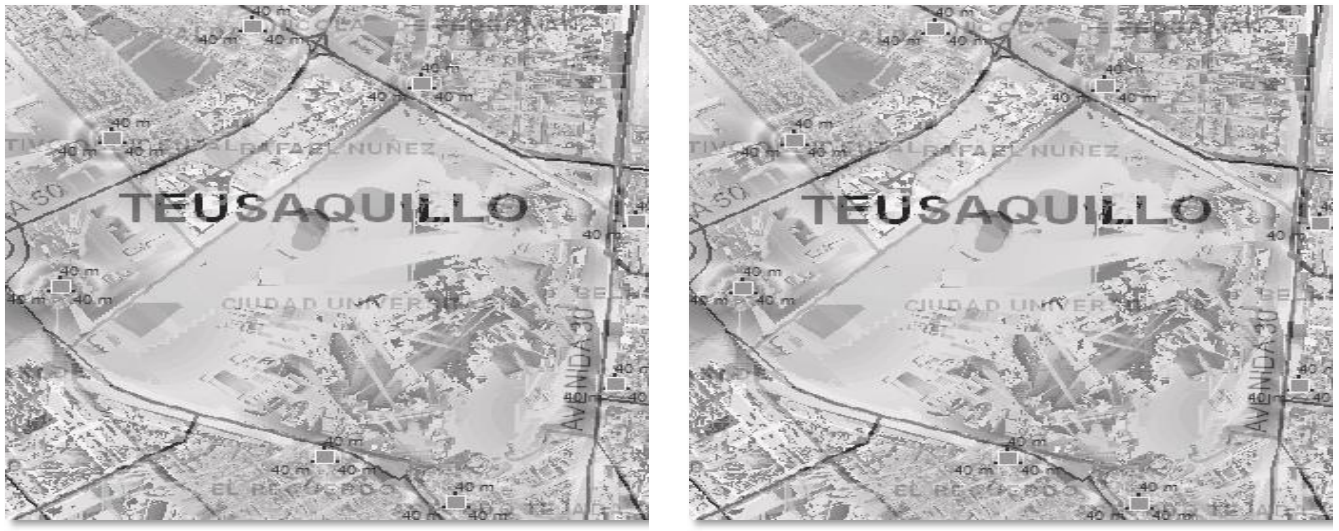


Figura 4. Muestras de simulaciones a 100 GHz (Izquierda día soleado, Derecha día con lluvia). Fuente: elaboración propia.

3. Resultados de las simulaciones

Para realizar el análisis de los resultados se establecieron puntos de medición de señal; la cobertura está dada por diferentes estaciones situadas en diferentes puntos y el sistema de radiación de las estaciones base hasta los usuarios es un sistema NLOS, como se mencionó anteriormente; se necesitará varios puntos (Figura 5) de medida distribuidos en los puntos cardinales y uno central con lo cual se pretende analizar la mayoría del área.



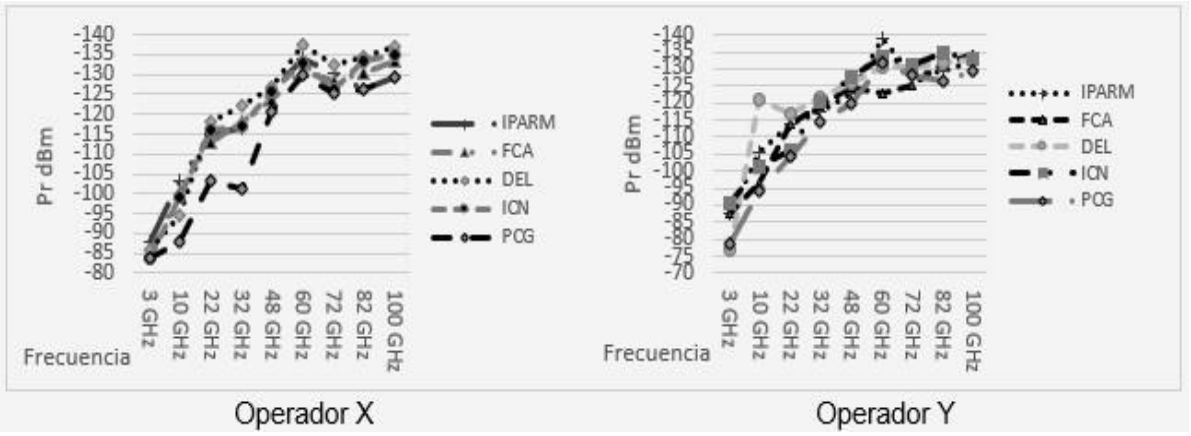
Figura 5. Ubicación de puntos de medición, [10].

3.1. Análisis de los resultados

Para el análisis de los resultados ICS Telecom utiliza la ecuación de Friis tomado la potencia en el aire dependiendo de la distancia. Aunque, sumado a esto también analiza la dispersión generada por los obstáculos. Se determina que las señales por encima de -150 dBm estaría en un rango de cobertura de baja cobertura vista por los usuarios (teniendo en cuenta la potencia de la estación receptora entre 1 W) con un nivel entre 90-100 dBm, esto sujeto a la difracción y reflexión de los elementos cercanos, [16].

3.2. Análisis de los resultados

Se estableció cuál es la estación que brinda la mejor cobertura en los puntos establecidos para realizar las mediciones. Partiendo de este análisis podemos establecer como es la perdida de potencia desde una frecuencia de 3 GHz hasta 100 GHz en los diferentes puntos demedición para el escenario tanto para el operador X y Y, lo cual se muestra en la figura 6.



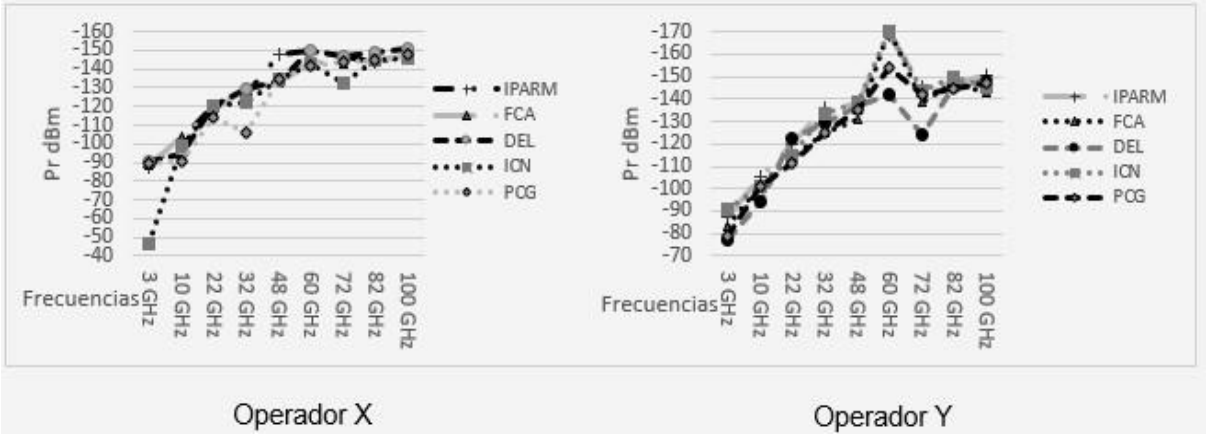


Figura 6. Análisis de resultados para el operador X y Y (arriba día soleado, abajo día con lluvia). Fuente: elaboración propia.

Una de las principales desventajas de las redes móviles de tecnología 5G es la gran pérdida de potencia cuando no se tiene línea de vista. Este es el escenario más propenso cuando se diseñan redes móviles debido a que no se tiene un conocimiento previo de donde está ubicado específicamente el usuario y peor aun cuando no se conocen los obstáculos que existen entre el Tx y el Rx. Esto se puede comprender con los resultados obtenidos, en el escenario de la Universidad Nacional, donde las estaciones nunca tienen línea de vista directa por los obstáculos en el trayecto lo cual debilita la señal ocasionando un desvanecimiento que se ve reflejado en el nivel de señal recibido y/o captado en las diferentes zonas.

Para el análisis, en el operador X las perdidas por espacio libre son aproximadamente de 40 dBm desde los 3 GHz hasta los 60 GHz, pero después de los 60 GHz la potencia de la señal tiende a estabilizarse en niveles entre los -125 y -140 dBm; mientras que para el operador Y tenemos una perdía de señal de aproximadamente 45 dBm para una frecuencia entre 3 y 60 GHz, pero igualmente, se estabiliza la potencia después de 60 GHz entre -120 y -135 dBm.

La lluvia es uno de los factores climatológicos con mayores pérdidas lo cual es más significativo en los sistemas NLOS. Con el operador X podemos observar que, entre 3 GHz y 48 GHz tiene una atenuación de 35 dBm, pero en comparación con el caso anterior donde se observa las pérdidas de señal en el espacio libre, se aprecia que las pérdidas para cada punto de medición

tienen una variación de 10 dBm en 3 GHz y nuevamente a partir de 48 GHz hasta 100 GHz. Como ejemplo, la potencia a 3 GHz en el caso anterior está en -80 dBm, en este caso tenemos

-90 dBm. Las pérdidas se estabilizan a 48 GHz con potencias entre -140 y -150 dBm, exceptuando los casos donde se observó una ganancia punto de medida 4 en el Instituto de Ciencias Naturales, que debido al entorno del punto se generan reflexiones de la señal obteniendo ganancias para una potencia de -46 dBm aproximadamente, lo cual se puede observar en la Figura 6.

Para el caso con el operador Y se tiene un comportamiento parecido al anterior, donde se tiene una pérdida de señal de 50 dBm para una frecuencia entre 3 GHz y 48 GHz, pero hay perdidas excesivas debido al canal de absorción de oxígeno en la frecuencia de 60 GHz con potencias entre -140 y -170 dBm donde la conexión con el Rx seria nula, después de los 60 GHz su superan las pérdidas provocadas por el canal de absorción y la potencia se estabiliza en -150 dBm aproximadamente; lo cual se puede observar en la Figura 6.

4. Conclusiones

Los resultados presentados establecen que se tiene una potencia de -83,76 dBm y -103,76 dBm para una frecuencia entre 3 GHz hasta 22 GHz lo que demuestra una pérdida de potencia de la señal de 24,1% para estas frecuencias; pero de 22 GHz hasta 100 GHz se tiene que la potencia de la señal es de -103,22 dBm y -135,22 dBm, respectivamente, donde las pérdidas son más elevadas y alcanzan el 31,06%. En consecuencia, 5G en el escenario estudiado

pierde entre 3GHz y 100 GHz un 61,43% de la potencia de la señal en el espacio libre.

Los factores climatológicos como la lluvia indican una perdida adicional para 3 GHz es del 7,16% mientras que para una frecuencia de 100 GHz la perdida es de 9,61 %, verificando que a mayor frecuencia la lluvia provoca mayor atenuación.

Con base a lo relacionado con las simulaciones, se logra observar que los escenarios NLOS, que de los cuáles serán los más comunes cuando llegue el momento del despliegue, llegan hacer el gran reto para poder brindar una cobertura de buen nivel a los usuarios donde se puede apreciar que cualquier obstáculo genera pérdidas especialmente en frecuencias por encima de los 30 GHz donde la señal electromagnética es poco afectada por interferencias y puede llegar a tener un gran ancho de banda pero posterior a esto la señal sufre más desvanecimiento en su trayectoria lo que acorta su distancia de transmisión; sumado a esto las señales en altas frecuencias, o mejor en frecuencias milimétricas, no lograrían tener la suficiente potencia para proyectarse a través de obstáculos como paredes, vidrios y otros materiales que comúnmente se encuentran en cualquier entorno metropolitano.

Referencias

[1] ATDI, «5G: A revolution in evolution, even in 2017,» de RadioExpo, 2017.

[2] MinTic, «Boletin trimestral de las Tic: Cifras Segundo Trimestre de 2019,» Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones , 2020.

[3] CRC, «Reporte de industria sector TIC 2016,» Comisión de regulación de las comunicaciones, 2017.

[4] Gupta , A., & Jha , R., «A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,» IEEE Access, pp. 1206-1032, 2015.

[5] K. E. Requena, D. M. Rozo y J. E. Arévalo, «Radiopropagation simulations comparison in millimeter waves frequencies for fifth generation (5G) mobile networks,» Actas de Ingeniería, pp. 97-105, 2017.

[6] A. Durán Barrado, «Estudio y caracterización del canal y de la propagación en ondas milimétricas, orientada a su utilización en redes de comunicaciones móviles 5g.,» ETSIT UPM, 2017.

[7] K. E. REQUENA Barrera y D. M. Rozo Moreno, «Análisis de desempeño de la propagación de señales en redes móviles de quinta generación (5g) en bandas de frecuencias de ondas milimétricas (mmwaves) empleando la herramienta de simulación ics telecom,» FUAC, 2017.

[8] J. E. Arévalo Peña & R. A. González Bustamante, «Radiopropagation Performance Analysis Simulations of Massive MIMO Configurations in 28 GHz,» CEUR-WS, p. 4, 2018.

[9] P. Missud, «Extrayendo Clutter de imagenes Multiespectrales de Landsat 8,» ATDI, 2013.

[10] Google, «Google Maps,» Google, 01 07 2018. [En línea]. Available: https://www.google.com/maps. [Último acceso: 21 10 2020].

[11] ITU, «Recomendación UIT-R P.526,» ITU, 2018.

[12] IDEAM, «ideam.gov.co,» 31 05 2002. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-14-201801-I!!PDF-S.pdf..

[Último acceso: 21 10 2020].

[13] M. Montoya Rendon, P. Zapata Saldarriaga & M. Correa Ochoa, «Contaminación ambiental por PM10 dentro y fuera del domicilio y capacidad respiratoria en Puerto Nare, Colombia,» salud pública, pp. 113-115, 2013.

[14] CRC, «Áreas de cobertura del servicio,» Comisión de Regulación de Comunicaciones, 20 03 2009. [En línea]. Available: https://www.crcom.gov.co/es/pagina/reas-de-cobertura-del-servicio.. [Último acceso: 21 10 2020].

[15] ITU, «Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020,» ITU, 2017.

[16] ITU, «UIT-R M.1073-1,» ITU, 1997.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

MATHWEB, WEB PLATFORM FOR THE TEACHING OF MATHEMATICS IN SECONDARY BASIC. PRELIMINARY RESULTS

MATHWEB, plataforma web para la enseñanza de la matemática en básica secundaria. Resultados preliminares

Leonardo Gonzalez Gutierrez[1], Julio César Caicedo Eraso[2]

Abstract

The students of basic secondary education require a platform that provides them with more interactive learning of mathematics. MathWeb Education arises because of the low performance of mathematics in the country's educational institutions and also because of the low results in the ICFES tests in the area of mathematics. There is a need to move from a traditional model of teaching mathematics to the use of TICS with a different learning methodology. Brunner's learning methodology is incorporated into the platform, student learning is guided, dynamic and tests their knowledge. The objective is to socialize preliminary results based on the market study carried out in the participation of the phase discovery of digital business in person of apps.co at the end of 2019, the approach of the students' problem

[1] Student, Universidad de Caldas, Colombia. Student, Systems and Computer Engineering: Universidad de Caldas, Colombia. E-mail: leonardo.1701716481@ucaldas.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1837-4225

[2] Doctoral degree, Universidad de Caldas, Colombia. Associate profesor, Engineering Faculty: Universidad de Caldas, Colombia. E-mail: julioc.caicedo@ucaldas.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4073-9152

in learning mathematics was validated, thus obtaining a value proposition for our project and development of a small prototype as a platform.

Keywords: mathematics, students, web platform, learning, educational institutions, methodology.

Resumen

Los estudiantes de básica secundaria requieren de una plataforma que les brinde aprendizaje de las matemáticas de forma más interactiva; MathWeb Education surge, entonces, como una respuesta al bajo desempeño de ellos en esta área en las instituciones educativas del país y también por sus bajos resultados arrojados en las pruebas ICFES. Lo anterior indica que se necesita pasar de un modelo tradicional de enseñanza de las matemáticas al uso de las TICS con una alternativa diferente en la metodología de aprendizaje, es así que se incorpora la metodología de aprendizaje de Brunner en la plataforma. El aprendizaje del estudiante es guiado, dinámico y pone a prueba permanentemente su conocimiento. Teniendo como objetivo socializar los resultados preliminares de la plataforma, con base al estudio de mercado realizado en la participación de la convocatoria Fase Descubrimiento de negocios digitales presencial de apps.co a finales del 2019, se valida el planteamiento del problema de los estudiantes en el aprendizaje de las matemáticas, obteniéndose una propuesta de valor para el proyecto y desarrollo de prototipos iniciales como plataforma escalable.

Palabras clave: Matemáticas, Estudiantes, Plataforma Web, Aprendizaje, Instituciones Educativas, metodología.

1. Introducción

Actualmente, se presenta un déficit en el aprendizaje de las matemáticas en estudiantes de básica secundaria debido, entre otras causas, al el poco personal capacitado, así como al escaso material didáctico para que los alumnos tengan un aprendizaje más productivo a nivel nacional. En Colombia, por ejemplo, los porcentajes de rendimiento en el examen nacional ICFES son bajos ya que el aprendizaje se realiza mediante procedimientos mecánicos que no se relacionan con la aplicación de estos temas en la vida cotidiana.

De otro lado, los estudiantes que habitan en áreas rurales tienen poco material para que aprendan las matemáticas de forma más práctica y con personal capacitado para esta área, presentándose un reflejo más del gran problema mundial donde alumnos no están recibiendo los conocimientos mínimos en la lectura, [9]. MathWeb tiene como objetivo llegar a todos aquellos alumnos que requieren del aprendizaje de forma más dinámica e interactiva con el mundo real y que puedan disfrutar, en el transcurso de su aprendizaje o refuerzo, de las matemáticas.

2. Planteamiento del problema

Actualmente, en Colombia se presenta un déficit en el aprendizaje de las matemáticas en las instituciones educativas del país debido a, entre otros factores, la existencia de poco personal idóneo para enseñar, así como el inadecuado material didáctico para que esta materia deje ser exclusivamente teórica, ha incidido para que los estudiantes graduados de colegios no quieran acceder a una carrera relacionada con ellas, [8]. A lo anterior hay que adicionarle que los resultados de las pruebas ICFES, en matemáticas, son los más bajos pues el aprendizaje realizado por medio de procedimientos mecánicos no tiene relación con la aplicación de esta materia en la vida cotidiana (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados en la prueba de matemática en Caldas periodo 2019-4, [4].

Nivel de agregación	Promedio	Desviación
Colombia	51 •	12 •
ET	50	12
Oficiales urbanos ET	51 •	11 •
Oficiales rurales ET	46 ▲	10 ▲
Privados ET	55 ▼	14 ▼
GC 1 ET	45 ▲	10 ▲
GC 2 ET	48 •	11 •
GC 3 ET	54 ▼	11 •
GC 4 ET	66 ▼	9 ▲

En el anterior sentido, a nivel internacional, según la UNESCO …*617 millones de niños y adolescentes no están recibiendo conocimientos mínimos en lectura y matemática,* [9]. Sin embargo, la mayoría de los estudiantes que tienen problemas en el aprendizaje están asistiendo a clases, por lo cual los indicadores a mejorar para elevar la calidad institucional de la educación son diversos y requieren investigarse en regiones, edades y géneros indicados en las figuras 2, 3, y 4.

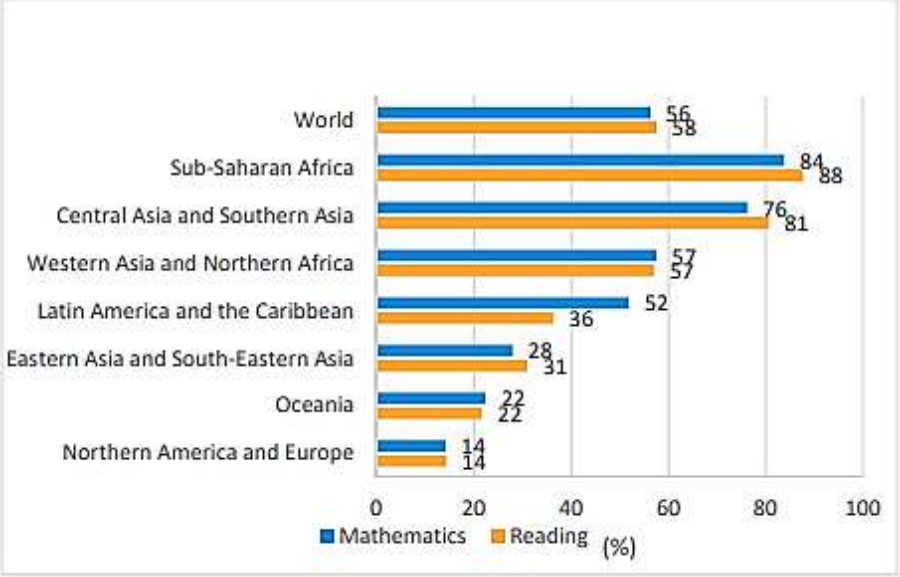
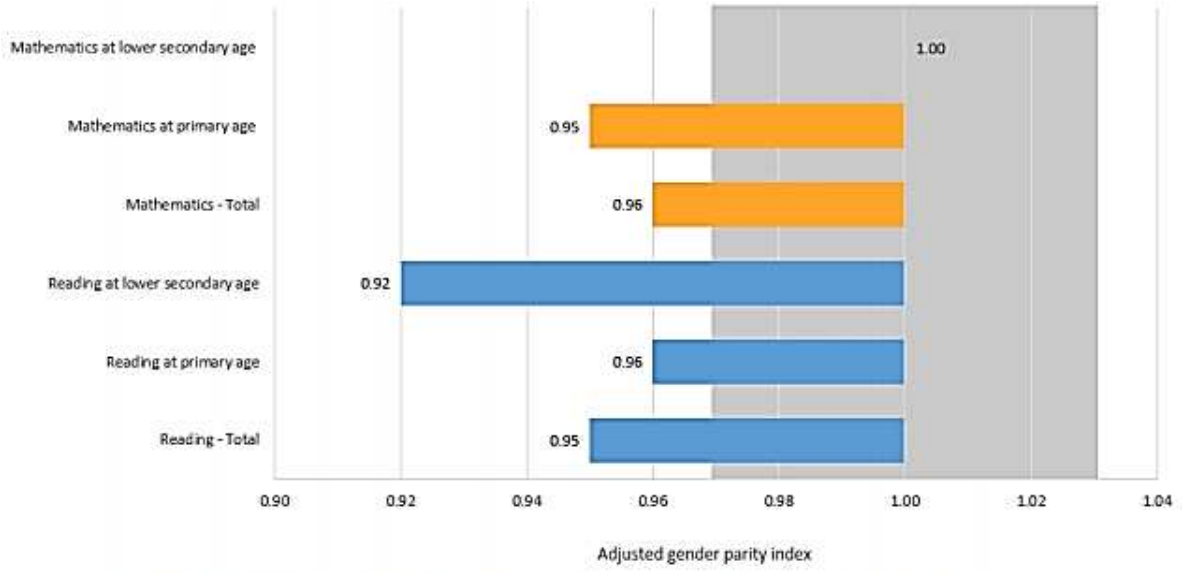
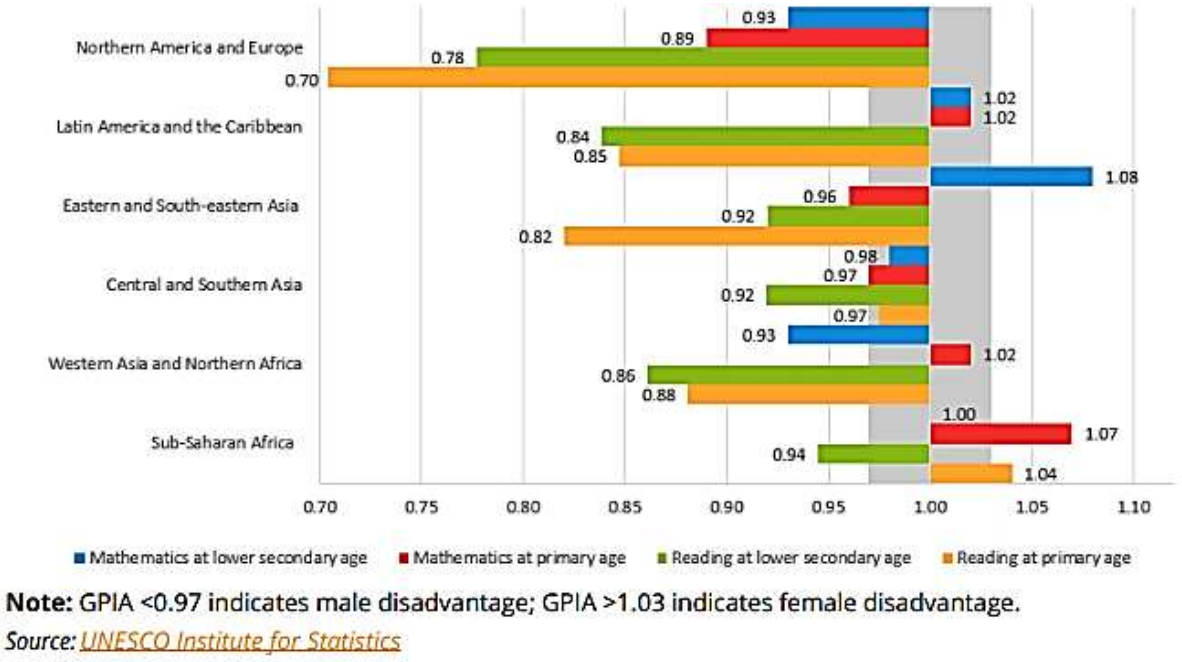


Figura 2. Proporción de niños y adolescentes que no logran el mínimo nivel de competencia en matemáticas y lectura, por objetivos de desarrollo sostenible por región, UNESCO,2017.



Note: GPIA <0.97 indicates male disadvantage; GPIA >1.03 indicates female disadvantage.
Source: UNESCO Institute for Statistics

Figura 3. Índice de paridad de género ajustado para niños y adolescentes que no logran el mínimo nivel de competencia en matemáticas y lectura, por nivel y dominio de aprendizaje, [9].



Note: GPIA <0.97 indicates male disadvantage; GPIA >1.03 indicates female disadvantage.
Source: UNESCO Institute for Statistics

Figura 4. Índice de paridad de género ajustado para niños y adolescentes que no logran el mínimo nivel de competencia en matemáticas y lectura, por objetivos de desarrollo sostenible por región [9].

Lo expuesto, justifica que, desde un modelo basado en redes sociales, que actualmente tienen un uso masivo especialmente por parte de los jóvenes, [7], se hayan desarrollado varias plataformas o redes, la mayoría para interacción de tipo netamente social (figura 5); y algunas de estas redes se usan para establecer redes de conocimiento, negociación e interacción científica.

Por consiguiente, las redes sociales tienen un propósito diferente al del aprendizaje, lo que implica que es importante elaborar redes específicas para la interacción entre personas que decidan usarlas para mejorar su aprendizaje construyendo una comunidad en un tema en particular.

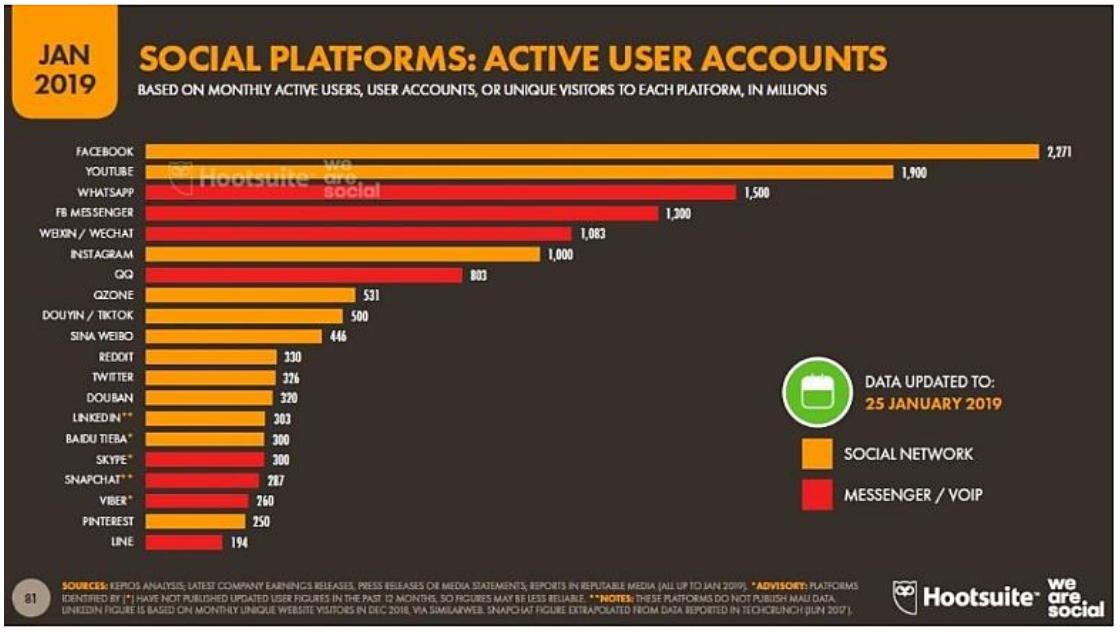


Figura 5. Plataformas sociales con cuentas activas, [5].

Desde la anterior perspectiva, el presente artículo se orienta al desarrollo e implementación de una herramienta tecnológica para apoyar los procesos de aprendizaje de las matemáticas por medio de una plataforma web.

Específicamente orientada para:

1. Diseñar una herramienta para evaluar el aprendizaje de las matemáticas educación básica secundaria.

2. Implementar aplicativo web de interacción social para el aprendizaje y apoyo de las matemáticas

3. Evaluar las diferencias en el aprendizaje de un tema específico de las matemáticas entre herramienta desarrollada y método tradicional.

2. Materiales y Metodología.

La metodología para el aprendizaje de las matemáticas que se llevará a cabo en el proyecto

se basa en la teoría del aprendizaje de Brunner en donde se considera que el alumno aprende de manera guiada, …*Por lo tanto, la labor del profesor no es explicar uno contenidos acabados, con un principio y un final muy claros, sino que debe proporcionar el material adecuado para estimular a sus alumnos mediante estrategias de observación, comparación, análisis de semejanzas y diferencias,* [6].

Igualmente, se basa en la Teoría de redes sociales de Charles Kudashin como aquella es propicia para describir y explicar las interacciones entre grupos de personas, instituciones, entidades o cualquier otra entidad; en tal sentido, las personas tienen una mayor probabilidad de conocerse, [2].

En consecuencia, la metodología general del proyecto se fundamenta bajo el modelo de levantamiento de requisitos, análisis, diseño, desarrollo e implementación, pruebas de desarrollo y validación piloto para el software.

La metodología idónea para el desarrollo del software es SCRUM. En SCRUM el equipo monitoriza el avance del proyecto y da prioridades al desarrollo principal de la plataforma web para su funcionalidad, [3].

En cuanto a la metodología de trabajo con las TIC, se permite llevar acabo la evaluación de la plataforma ya que actualmente las personas pueden acceder con más facilidad a un computador o celular [1]; el desarrollo de la herramienta permite comparar el resultado de utilizar la plataforma y el modelo tradicional de enseñanza.

Para realizar las pruebas piloto, se tomarán grupos de estudiantes de diferentes instituciones educativas que no hayan visto un tema en específico de las matemáticas, asignándose una parte de la muestra de estudiantes en la utilización de la plataforma, y el resto recibirán clase magistral para que al final ver completamente el tema; luego se realiza una evaluación verificando qué tan eficaz y eficiente es la plataforma.

La aplicación se pondrá en funcionamiento a público general para que puedan solicitar tutorías por profesores inscritos a MathWeb Education y capacitados para dar clases en temas

específicos donde el tutor dará monitorias, y finalmente se tendrá una calificación por parte del usuario que solicitó el servicio.

3. Resultados

MathWeb estuvo en la fase Descubrimiento de negocios digitales en acompañamiento de Apps.co del Ministerio de las TICS, la de Caldas y el SENA-Manizales SBDC Centro de Desarrollo Empresarial a finales del 2019. Allí se hizo un estudio de mercado que tuvo como objetivo llegar a todos aquellos estudiantes de básica secundaria que necesitan reforzar o están interesados en las matemáticas, hacer parte de una red social y contar con tutores con la competencia de metodología de enseñanza de aprendizaje guiado.

A continuación, se presenta los resultados de la encuesta en donde participaron 28 estudiantes de colegios privados, públicos de básica secundaria y estudiantes de primer semestre de universidad (Fig. 6).

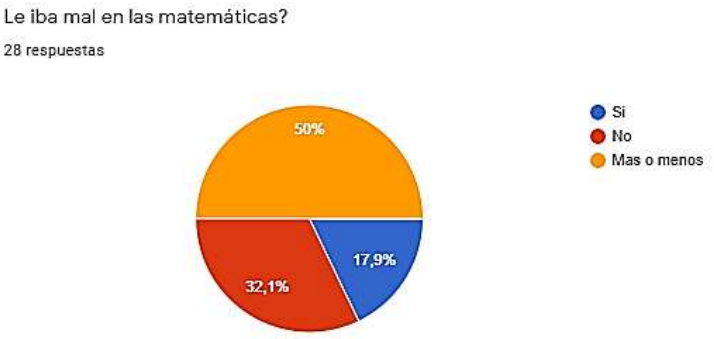


Figura 6. Respuesta porcentual de estudiantes con déficit en el aprendizaje de las matemáticas. Fuente: elaboración propia.

Se obtuvieron los siguientes resultados con base al análisis de mercado objetivo y a la aplicación con 28 estudiantes.

- Causas del bajo rendimiento del estudiante en matemáticas: metodología del profesor, no las entienden, las consideran complejas, muchos ejercicios por resolver.
- *Consecuencias:* bajas notas en las matemáticas en el colegio, desmotivación y frustración al no entenderlas.
- *Deficiencia en las soluciones actuales:* metodología de enseñanza tradicional, material no personalizado para los estudiantes, videos muy extensos, documentos extensos y falta de tutores disponibles.

Por otro lado, se hizo una encuesta a estudiantes de la región de Caldas obtuvimos los siguientes resultados de actividades de validación para funcionalidades a incorporar en la plataforma (Figura 7).

En cuanto a la propuesta de valor, los estudiantes que acceden al servicio de tutorías podrán mejorar su rendimiento en un tema en específico de las matemáticas un 90% con base a la metodología de aprendizaje Brunner actualmente validada, siempre cumpla con las responsabilidades asignadas por MathWeb Education y el tutor.

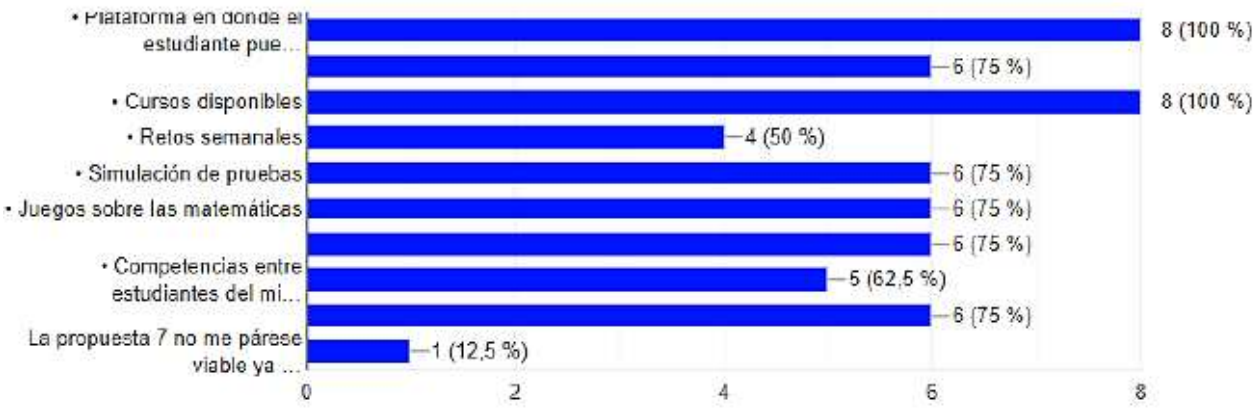


Figura 7. Funcionalidades a incorporar en la plataforma web. Fuente: elaboración propia

En términos de impacto, se espera una plataforma web agradable que brinde apoyo a los estudiantes en el área de las matemáticas, tengan un aprendizaje dinámico y aplicativo en donde se podrá evaluar el aprendizaje, tener monitorias y también pertenecer a la comunidad el cual podrá: compartir u obtener material de apoyo en su aprendizaje, postear y pertenecer a grupos específicos que se concentran en un área de estudio de las matemáticas.

4. Conclusiones

El estudio acerca del déficit en el aprendizaje de matemáticas se llega a la conclusión de que se necesita de un modelo tradicional de enseña a otro modelo de aprendizaje en donde el estudiante puede aprender de forma guiada y descubriendo el por qué del estudio de las matemáticas. Actualmente con el avance de la tecnología y al acceso a esta podemos hacer uso de la TICS para brindar el apoyo a estudiantes que se encuentren en zonas distantes y

utilizando la metodología de aprendizaje de Brunner, desarrollando una plataforma dinámica el cual podrá hacer uso profesores y estudiantes de zonas rurales y urbanas, para el apoyo en el aprendizaje de las matemáticas en básica secundaria.

Referencias

[1] Camino L. García. (2016). Enseñar con TIC: Nuevas y renovadas metodologías para la enseñanza superior. © 2016, CINEP/IPC. pp 26-27

[2] Charles Kadushin. (diciembre 2013). Comprender las redes sociales. Teorías, conceptos y hallazgos. Primera Edición. Moltalbán, 8. 28014 Madrid. pp. 93-95.

[3] Roger S. Pressman. (2010). Ingeniería del Software Un enfoque práctico. **Vol. 3**, Séptima Edición. pp. 70 Sitios web

[4] ICFES. (2019) Resultados de las pruebas ICFES. http://www2.icfesinteractivo.gov.co/resultadossaber2016web/pages/publicacionResultados/agregados/saber11/agregadosSecretarias.jsf#Noback button

[5] Juan Carlos Mejía Llanos (21 de marzo, 2019) Estadísticas de redes sociales 2019: USUARIOS DE FACEBOOK, TWITTER, INSTAGRAM, YOUTUBE, LINKEDIN, WHATSAPP Y OTROS. https://www.juancmejia.com/marketing-digital/estadisticas-de-redessocialesusuarios-de-facebook-instagram-linkedin-twitter-whatsapp-y-otrosinfografia/#Informe_detallado_usuarios_redes_sociales_WeAreSocial_y_Hootsuite (5 de mayo de 2019)

[6] Psicología-Onlie (20 de agosto 2018) Teorías del aprendizaje según Brunner. https://www.psicologia-online.com/teorias-del-aprendizaje-segun-bruner-2605.html

[7] Revista Médica Clínica Las Condes (enero-febrero, 2015) Impacto de las redes sociales e internet en la adolescencia: aspectos positivos y negativos. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0716864015000048#bib0005

[8] TeleMedellin (28 de septiembre, 2018) Preocupación por déficit de ingenieros en Colombia. https://telemedellin.tv/deficit-ingenieros-colombia/284852/

[9] UNESCO (21 de septiembre, 2017) SERVICIO DE PRENSA: 617 millones de niños y adolescentes no están recibiendo conocimientos mínimos en lectura y matemática. http://www.unesco.org/new/es/mediaservices/singleview/news/617_million_children_and_adolescents_not_getting_the_minimum/

[10] Walter, L., Gallegos, Arias, & Huerta, Adriana Oblitas. (2014). Aprendizaje por descubrimiento vs. Aprendizaje significativo: Un experimento en el curso de historia de la psicología. Boletim - Academia Paulista de Psicologia, 34(87), 455-471. http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415711X2014000200010&lng=pt&tlng=es.Artículos

[11] L. A. Luengas, G. Sánchez, y S. M. Cárdenas, “Nuevas herramientas pedagógicas: laboratorio virtual", Visión Electrónica, vol. 9, no. 2, pp. 277-284, 2015. https://doi.org/10.14483/22484728.11034

[12] M. Vergel Ortega, O. L. Rincón Leal, y L. A. Jaimes Contreras, “Prototipos electrónicos en el desarrollo de pensamientos formales", Visión Electrónica, vol. 9, no. 2, pp. 182-193, 2015. https://doi.org/10.14483/22484728.11026

[13] J. F. Pastrán Beltrán y F. Pinzón Herrera, “Software libre: una estrategia para aprender a factorizar ", Visión Electrónica, vol. 9, no. 1, pp. 139-148, 2015. https://doi.org/10.14483/22484728.11024

[14] R. López Gonzalez, “Genealogía de cambio conceptual en la enseñanza de la ciencia", Visión Electrónica, vol. 1, no. 1, pp. 88-92, 2008. https://doi.org/10.14483/22484728.255

[15] F. P. Rodriguez, A. R. Torres, y H. Vacca, “Estudio con análisis por elementos finitos de sistemas análogos circuitales en física", Visión Electrónica, vol. 6, no. 1, pp. 98-103, 2012. https://doi.org/10.14483/22484728.3750

[16] R. Lopez, “La propedéutica y el discurso sobre las tecnologías", Visión Electrónica, vol. 7, no. 1, pp. 178-187, 2013. https://doi.org/10.14483/22484728.4399

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

BUSINESS ARCHITECTURE: KEY PILLAR OF IT TRANSFORMATION TO FACE THE CHALLENGES OF COVID-19 IN COLOMBIA

Arquitectura empresarial: eje fundamental para transformación de TI para enfrentar los retos propuestos por covid-19 en colombia

Roberto Ferro Escobar[1], Héctor Albeiro Dussan Montoya [2], Kevin David Garzon Quintero [3]

Abstract

This article aims to show the advantages of implementing a Business Architecture model and each of its phases within organizations in Colombia that must be digitally transformed, in addition to showing a vision for the migration of certain work activities to the field of virtuality. It is also important to highlight the alignment of business objectives to the implementation of the Business Architecture model, evidencing characteristics, advantages and limitations in logistics when establishing monitoring and control strategies in identifying the population most vulnerable to contracting the COVID-19 that has shown a stronger devastating aspect in the second wave than in the first.

[1] PhD. En Ingeniería Informática, Universidad Pontificia de Salamanca campus Madrid; MSc. En Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Colombia. Ing. Electrónico Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Profesor: Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Colombia. E-mail: ferro.roberto@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8978-538X

[2] Ing. Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia. Esp. Gerencia Finaciera, Universidad la Gran Colombia, Colombia. hadussanm@correo.udistrital.edu.co.

[3] Ing. Industrial, Facultad de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia. E-mail: kdgarzonq@correo.udistrital.edu.co

Keywords: SMEs, Enterprise Architecture, Virtual Innovation, Virtual Management, Remote Access, IPC, Inflation

Resumen

Este articulo pretende demostrar las ventajas de implementar un modelo de Arquitectura Empresarial y cada una de sus fases dentro de las organizaciones en Colombia que deben ser transformadas digitalmente, además de exhibir una visión para la migración de ciertas actividades laborales al campo de la virtualidad. También es importante destacar la alineación de los objetivos de negocio a la implementación del modelo de Arquitectura Empresarial, evidenciando características, ventajas y limitantes en materia de logística a la hora de establecer estrategias de monitoreo y control en la identificación de la población más vulnerable a contraer el COVID- 19, enfermedad que ha mostrado un aspecto devastador más fuerte en la segunda ola que en la primera.

Palabras clave: PYMES, Arquitectura Empresarial, Innovación virtual, Gestión virtual, Acceso Remoto, IPC, Inflación

1. Introducción

Este documento es un análisis que evidencia la importancia y la necesidad de replantear los modelos de negocio de las Empresas Colombianas a través del uso de las TI -*Tecnologías de Información*-, permitiendo la migración de procesos y servicios al campo virtual como actividades financieras, comerciales y educativas, entre otras.

Este periodo de pandemia ha generado un reto masivo en el mundo entero, por tanto, se deben establecer metodologías, buenas prácticas Empresariales que promuevan la implementación y aprovechamiento de TI articuladas en la Arquitectura Empresarial y que se alinien con los objetivos de negocio de las Empresas existentes en Colombia, las cuales, en su mayoría, corresponden a la clasificación de PYMES y MYPYMES.

Según el DANE -*Departamento Administrativo Nacional de Estadística*- las micro, pequeñas y medianas empresas en Colombia representan el alrededor del 80 % del empleo del país y el 90 % del sector productivo nacional, viéndose la mayoría directamente afectadas por la disminución de la actividad productiva como consecuencia del inicio del aislamiento obligatorio desde el 23 de Marzo 2020 hasta el 13 de Abril extendiéndose en primera instancia hasta el 27 de abril del mismo año, un desafío para las Empresas al no tener diseñado planes de contingencia que les posibilite enfrentar dicho cambio tan abrupto.

La necesidad de implementar un modelo de Arquitectura Empresarial es de vital importancia para toda organización, pues facilita la transformación de sus actividades sin perder ningún lineamiento con sus objetivos de negocio, que en el presente actual deben ajustarse a un modelo virtual. En Colombia actualmente se ha liderado la implementación de la Arquitectura Empresarial bajo el liderazgo del MINTIC, quien ha establecido normativas para que las organizaciones nacionales se acojan a sus lineamientos y puedan desempeñar una transformación de su negocio bajo la guía del ministerio. el marco de preocupación para el país

es de evitar que la economía nacional se vea afectada y por ende no sufra una desaceleración provocando un aumento en ciertos indicadores como lo son la inflación, IPC, los que a su vez encarecen recursos de uso diario.

La gestión que el gobierno ha desarrollado desde el inicio del aislamiento obligatorio se ha visto concentrada en la creación de una aplicación llamada *CoronApp* en donde se hace una gestión parametrizada con la información de síntomas y signos de alarma reportados y georeferenciado por los ciudadanos, el Gobierno puede tener un panorama nacional en tiempo real sobre la generación de síntomas y lugares específicos que puedan ser motivo de alarma sobre la propagación del virus. En esta aplicación los datos suministrados a la app son monitoreados en tiempo real por el Centro de Operaciones de Emergencias del Instituto Nacional de Salud, quien con esta información podrá actuar rápidamente y dar apoyo en coordinación con las autoridades locales departamentales y nacionales. Con datos de su estado de salud, las entidades pueden anticipar acciones, fortalecer su entendimiento sobre el virus, gestionar mejor los posibles casos de Coronavirus y alertar cuando sea necesario, por medio de notificaciones vía texto a grupos específicos de la población, articulando con la línea de emergencia 123.

2. Arquitectura empresarial

A. Definición de AE:

Es una práctica estratégica que consiste en analizar integralmente las entidades desde diferentes perspectivas o dimensiones, con el propósito de obtener, diagnosticar y evaluar su estado actual y establecer la transformación necesaria que le permita evolucionar desde el estado actual hasta la arquitectura empresarial objetivo. El objetivo es generar valor a través de las Tecnologías de la Información para que facilite el cumplimiento de los objetivos misionales de la institución y del sector o territorio al que pertenecen, generando beneficios al negocio u organización. Una arquitectura se descompone en varias estructuras o dimensiones para facilitar su estudio. Para el Marco de Referencia establecido para el Estado Colombiano, la Arquitectura Empresarial está constituida por dos grandes elementos: La arquitectura de negocio o misional y la arquitectura de TI. Esta integración de elementos debe ser entendida como la forma de alinear los diferentes componentes de la entidad desde la estrategia, procesos, planes, programas, proyectos y personas, con los componentes de la arquitectura de TI, representada en los 6 dominios de: Estrategia de TI, Gobierno de TI, Información, Sistemas de Información, Servicios Tecnológicos y Uso y Apropiación, para que, en conjunto, maximicen su aporte a los objetivos institucionales y en consecuencia su aporte al país sea mayor (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2016).

Es importante, entonces, definir etapas primordiales en la implementación de cualquier tipo de Arquitectura Empresarial, las cuales deben estar orientadas al direccionamiento del objetivo de negocio. Para el caso de Colombia, el MINTIC desarrolló un marco de referencia de arquitectura organizacional que consta de una Arquitectura de Negocio y Arquitectura de TI, con la idea de integrar el modelo de negocio, la misión, la gestión estratégica y el modelamiento de procesos y procedimientos dentro de las organizaciones por medio de la implementación de la tecnología realizando un análisis de la importancia dentro del ser de la compañía evaluando qué aspectos de la tecnología deben ser mejorados, eliminados o implementados, con la idea de dar cumplimiento y satisfacer los objetivos estratégicos de la organización.

La Arquitectura Empresarial se desarrolla mediante un ciclo de mejora continua, es decir, los cambios efectuados se realizan de forma gradual llevando a la empresa desde una situación inicial identificada en el diagnóstico (as-is) hasta una situación futura (to-be) parametrizada dentro del Marco de Referencia de la AE.

B. Beneficios de implementar Arquitectura Empresarial, figura 1**.**

- La Arquitectura Empresarial permite alinear los procesos y elementos organizacionales conectados a sistemas de TI mediante un plan estratégico.
- Encamina todo recurso al cumplimiento de los objetivos de negocio de las organizaciones pues garantiza que todos los proyectos se alinean con las políticas y principios de la compañía para satisfacer las necesidades del negocio.

- Promueve la reducción de costos del desempeño de la compañía referentes a la operación, soporte y actualización de las TI, reduciendo el riesgo de todos los proyectos asociados a las TI.
- La visión estratégica de la compañía obtiene un mejor desarrollo al verse gestionada por medio del rol de las TIC para brindar soporte a los procesos de negocio siendo alcanzados de una forma más eficiente.
- Permite que la organización se adapte de una forma más ágil a los cambios acelerados del entorno y nuevas tecnologías, para mejorar los tiempos de respuesta y crecimiento organizacional.
- Minimiza la dualidad de tareas y responsabilidades ya que establece un marco en el cual se determinan los alcances jerárquicos de los colabores y stakeholders.
- Mejora la toma de decisiones dentro de las organizaciones pues orienta de una manera organizada el interés de satisfacción y cumplimiento de los objetivos de negocio.
- Los cambios se pueden realizar de forma gradual conforme a la necesidad del negocio desde el modelo de negocio actual direccionado por el marco de referencia mediante un ciclo de mejora continua.



Figura 1. Beneficios de la Arquitectura Empresarial alineados con las TI. Fuente: MINTIC.

3. Arquitectura empresarial y los objetivos de negocio

3.1. Marco de referencia

Las entidades nacionales y territoriales deben entender y adoptar el Marco de Referencia para la gestión de TI de Colombia (MINTIC, nd), para facilitar el proceso, es recomendable que las entidades sigan los siguientes cuatro pasos:

1. Preparación: Para este paso es necesario entender el contexto del marco de referencia, con la finalidad de realizar un diagnóstico frente al marco que sirva para preparar a la Organización y su plan de acción.

2. Estrategia de ejercicios de Arquitectura Empresarial (AE): En este paso se indica la forma en que los ejercicios de AE cubrirán las necesidades de la empresa, definiendo la situación actual tecnológica de la empresa, determinando de forma eficiente la capacidad de TI a mejorar y/o implementar.

3. Definición de un ejercicio de AE: es importante planear detalladamente el ejercicio de Arquitectura Empresarial (AE), definiendo la necesidad, el alcance, los recursos, el equipo requerido, los resultados, el cubrimiento organizacional, gobierno del proyecto, el plazo o tiempo y el cronograma para cada actividad consolidado en un entregable para la organización.

4. Ejecución del ejercicio de AE: Los pasos anteriores permiten definir la situación actual (As - Is) de la empresa para proyectar la situación objetivo (To - Be) a la que apunta la empresa, en punto se puede saber que tanta es la brecha para pasar de una situación a otra es decir que tanto nos alejamos del objetivo, dicha evaluación permite formular el mapa de ruta que debe seguir la empresa.

Vale la pena resaltar que estos pasos se pueden repetir mediante un ciclo de mejora continua que permite realizar ajustes según la necesidad y desarrollo tecnológico, permitiendo no solo que las organizaciones modifiquen su modelo de negocio sino también que se puedan adaptarse al entorno por medio del uso de las TI en este sentido flexibiliza los procesos y servicios mediante su aprovechamiento, siendo transformador y desarrollador del trabajo

convencional facilitando la transición del trabajo presencial al trabajo virtual para muchas actividades.

¿Cómo alinear los objetivos de negocio con la Arquitectura Empresarial?

Es importante saber que la Arquitectura Empresarial establece una descripción de la gestión estratégica de la compañía, desglosa una minuciosa caracterización de la empresa, de la estructura funcional y operativa. Esto permite que se establezcan parámetros de integración de acuerdo a lo que la compañía requiera en su funcionamiento; es fundamental destacar que áreas de la organización están estructuras eficientemente, cuales presentan oportunidades de mejora y cuáles deben ser reemplazadas. Teniendo una visión clara de lo que se desea hacer ahora surge una incógnita acerca de cómo alinear estos objetivos descritos previamente a la Arquitectura Empresarial, pues para ello debemos tener claro lo que la Arquitectura Empresarial nos ofrece y es una visión sistemática, una mejora continua estableciendo una evaluación integral de todos los impactos que pueden generar los cambios, modificaciones o reemplazos imprescindibles de aspectos importantes para los objetivos de negocio de la compañía.

La Arquitectura Empresarial permite o facilita la inteligencia de negocios, la cual es un factor clave para el buen aprovechamiento de la tecnología organizacional, en donde las organizaciones pueden considerar el uso de una Arquitectura Empresarial, específicamente la orientada a servicios, para integrar la inteligencia de negocios (BI) con los sistemas

operacionales, con previa identificación de la necesidad. Una alternativa importante es desarrollar una buena gestión

Orientada a la articulación de las tecnologías de la información integrando sistemáticamente procesos, métodos y herramientas con el fin de desarrollar un marco de referencia ajustado a la capacidad tecnológica de la compañía que le permite satisfacer todas las necesidades de negocio que le permita ser competitiva en las altas exigencias de su entorno.

A continuación, se puede ver cómo en [8] se enuncian diferentes aspectos involucrados en la caracterización y modelamiento de un marco de referencia necesario para dimensionar las principales necesidades de satisfacción de los objetivos de negocio adyacentes a la organización, figura 2.



Figura 2. Articulación de la AE con sus elementos asociados, [9].

De otro lado, hay que tener en claro que la Arquitectura Empresarial comprende un sinnúmero de aspectos relevantes como lo son los datos, información, procesos, aplicaciones, tecnología y el factor humano, esenciales para establecer mediciones mediante la creación de indicadores que permitan evaluar el nivel de cumplimiento, la efectividad organizacional y la estructuración estratégica que encaminan a desarrollar una adecuada ejecución estratégica que involucre la alineación de los valores organizacionales, objetivos estratégicos, la misión y visión organizacional. Con todo esto podemos decir que el tratamiento de la información contribuye a la creación de conocimiento que permite mejorar continuamente los procesos mediante la utilización de aplicaciones y tecnología. Todo esto siendo gestionado por el factor humano, el cual favorece a mejorar en gran medida la toma de decisiones dentro de la compañía cumpliendo con los tiempos establecidos para el alcance de los objetivos establecidos.

3.2. Necesidad de Implementar AE en tiempos de pandemia

La Arquitectura Empresarial ofrece una estrategia extensa la cual asegura una alineación de la misión y visión del negocio expuesto por los líderes de la compañía, teniendo en claro que servirá como soporte arquitectónico en la medida en que se vaya evolucionando y alcanzando los objetivos. Así pues, la Arquitectura Empresarial incluye componentes de carácter tangible e intangible que delimitan la visión, la misión, estrategia de negocio, el gobierno, TI, los datos y la información organizacional.

Además de esto podemos afirmar que la Arquitectura Empresarial tiene un alcance que incluye a las PYMES que en el caso de Colombia abarcan casi el 80% de las organizaciones, las cuales se están viendo afectadas negativamente con el cese de la economía a causa de la pandemia originada en Wuhan, China. A pesar de lo ocurrido ninguna organización de nuestro país estableció en su matriz de riesgo una posible afectación de estas características; sin embargo la Arquitectura Empresarial tiene un gran campo de aplicación que permite ser incorporada en cualquier tipo de organización, sin importar el sector económico al cual pertenezca, por lo que las medidas de diagnóstico y herramientas utilizadas para la gestión de la Arquitectura Empresarial varía de acuerdo a las características organizacionales, pero su punto de partida es general y muy similar.

No es de desconocimiento que el pueblo colombiano ha sufrido los impactos negativos en la economía, educación, salud, área productiva y el campo financiero, esto seguido por la carencia de un ente controlador que involucre objetivamente todos los diferentes recursos que posibiliten una excelente gestión, reestructuración y migración de algunos sectores económicos mediante una participación remotamente virtual.

lo anteriormente mencionado se ha venido desarrollo previamente al anuncio del aislamiento preventivo en donde el MINTIC en su versión 2.2 de octubre de 2019 actualiza las directrices del Gobierno Digital, el cual había articulado desde el 2016. Esta recopilación de políticas y lineamientos invita en su mayor medida a las PYMES a revisar el marco de referencia y alinear

sus objetivos de negocio con la Arquitectura Empresarial, la cual tiene un alto impacto en el mejoramiento continuo de los procesos y disminución de tiempos en cuanto al cumplimiento y alcance de los objetivos. Para ello se requiere de recurso humano, financiero y tecnológico que al largo plazo mostraran las ventajas de haber implementado dicho marco de referencia; sin embargo, es recomendable realizar la migración en proyectos pequeños para conseguir victorias tempranas y se fortalezca la confianza de las altas directivas con estos procesos (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2016)

En las últimas semanas algunas organizaciones han optado por desarrollar alternativas que les permita continuar desarrollando sus actividades comerciales mediante el teletrabajo sin dejar de ofrecer sus servicios a sus diferentes clientes. Aunque esta estrategia es fundamental, algunas organizaciones no cuentan con un repositorio de almacenamiento de la información, el factor humano en su mayoría no cuenta con la capacidad tecnológica en su hogar para asumir la prestación del servicio, en algunos casos no existe compatibilidad ni la configuración adecuada pues el proveedor del servicio de red difiere según sea la zona de donde se efectúe la tarea.

Los sectores altamente impactados que requieren de la mano de obra como lo es el sector productivo se ven limitados frente a la implementación de la AE, ya que la utilización del factor tecnológico es limitada, respecto a las medidas de confinamiento se ha reducido el número de trabajadores que permiten la recolección de la cosecha para la distribución interna a los

diferentes consumidores. Sin embargo, las medidas gubernamentales han establecido estrategias que no permitan que la economía se vea estancada.

La buena gestión de la Arquitectura Empresarial permitirá tener una visión más amplia frente a la hora de tomar decisiones precisas y puntuales cuando sea requerido, por lo cual es netamente necesario tener a la mano una política y gobierno corporativa estructurada que permita articular una buena gestión de las tecnologías de la información, fundamentales para dar un manejo, acceso y aseguramiento del conocimiento generado dentro de una organización. Referente al manejo del confinamiento obligatorio, el análisis del crecimiento de la curva de contagio, análisis de la población vulnerable al contagio y mortalidad frente a la infección; El gobierno ha creado portales web para ofrecer ayudas a la población vulnerable que carece de servicio de salud, de obtención de víveres. Además, ha colaborado con la expansión de comunicados nacionales, para que la comunidad tenga claro cómo debe actuar frente a los riesgos de desplazamiento en esta época de aislamiento. Actualmente el país enfrenta una digitalización inminente de los procesos puesto que estos se hacen cada vez más complejos, por lo cual se vuelve estrictamente necesario contar con un modelo de Arquitectura Empresarial, pues coexisten diferentes tecnologías, las cuales deben estar enlazadas a las políticas del negocio cada vez más complejas en términos de capacidad y cobertura.

De otra parte, en la última década, el proceso de digitalización se ha acelerado demasiado en el sector público, pero se han tomado soluciones de corto plazo en donde se tiene una

problemática y se desarrolla una manera de gestionarla en el ahora, pero no se piensa de forma sinérgica en donde el Estado no le ve la importancia suficiente para aumentar la capacidad de los sistemas de información, tecnologías de información y los canales de distribución de la misma. Por tal motivo es de vital importancia que las instituciones gubernamentales diseñen un modelo arquitectónico presente y proyecten un modelamiento a futuro que les permita alcanzar los objetivos inicialmente diseñados, permitiendo así que exista una sincronización con el proceso de digitalización de sus procesos, reducción de costos, realización de iniciativas congruentes y dimensionamiento de proyectos asociados al plan estratégico de la entidad gubernamental.

3.5. Análisis de brechas

El gobierno actualmente no tiene un plan de contingencia establecido que le permita mitigar el avance de la curva de contagio, pues inicialmente desconocía el impacto del inicio de la pandemia en China, es de aclarar que por cada día que se mantuvo el aeropuerto internacional EL DORADO abierto se dio paso a que los casos de infectados por el COVID-19 aumentara de forma exponencial, lo cual se veía reflejado en un conflicto de intereses entre mantener a flote el flujo normal de pasajeros sin ningún tipo de control de bioseguridad, lo cual evidencia una mala gestión y una necesidad inminente de implementar Arquitectura Empresarial.

N°	PAIS	CASOS
1	USA	856.209
2	Spain	213.024
3	Italy	189.973
4	France	157.135
5	Germany	151.285
6	United Kingdom	139.246
7	Turkey	101.790
8	Iran	87.026
9	China	83.878
10	Russia	62.773
11	Brazil	46.701
12	Belgium	42.797
13	Canada	42.560
14	Netherlands	35.921
15	Switzerland	28.496
16	Portugal	22.353
17	India	21.797
18	Peru	20.914
19	Sweden	16.755
20	Ireland	16.671

Figura 3. Ranking de Mundial, Países con mayores casos de COVID-19. Fuente: "Dashboard Coronavirus COVID-19 (Mobile)," n.d.

Según la segmentación de casos confirmados de COVID-19 en todo el mundo podemos evidenciar cuales tomaron medidas inmediatas y mitigaron la propagación del virus, en la Figura 3 puede evidenciarse algunos de los países que se negaron a tomar medidas restrictivas a la hora de proteger a la población contra la propagación del virus.

Países como USA, Italia y España tuvieron un incremento exponencial y abismal de los casos de infectados con el virus pues los gobiernos no tomaron medidas correspondientes a causa de un desconocimiento de cómo proceder ante dicha problemática; sin embargo, hay que tener en claro que también existe un componente cultural, pues la población que atiende a las

exigencias del gobierno en estos casos puede mantenerse al margen del contagio y coadyuvar a que la curva de infección no sobrepase la capacidad del sistema de salud de cada país afectado. el actuar tarde en este tipo de situaciones acarrea problemas sanitarios ya que requiere que se obtengan recursos necesarios para la identificación de los posibles casos de infección, cuarentenas preventivas, aislamientos de los casos confirmados, equipos médicos, recurso humano, desarrollo de vacunas y medicamentos para los tratamientos de la población afectada. A pesar de esto existen gobiernos que han actuado a tiempo y han identificado los principales focos de infección restringiéndolos inmediatamente. a continuación, presentamos qué países actualmente presentan una de las más pequeñas tasa de infectados de COVID-19, figura 4.

Al realizar un contraste entre las dos posturas surge la pregunta

¿Qué influye a que una nación sea más eficiente que otra en cuanto a la toma de decisiones y acción preventiva?, esto tiene que ver en mayor medida con el estructuramiento gubernamental que va orientado a la implementación de la Arquitectura Empresarial y el uso de las tecnologías de información que permiten a cualquier estado adaptarse ágilmente a cualquier tipo de problemática a la cual se enfrente en determinado momento, en este caso la amenaza de una pandemia. Para dar un enfoque más real a nuestro país, es importante establecer el “AS IS” que afronta hoy en día y que le faltaría implementar y articular a la gestión

gubernamental y sistemática pues de esta manera se podría tratar sin importar el carácter todo tipo de problemática.

N°	PAIS	CASOS
86	Guinea	862
87	Cyprus	795
88	Latvia	778
89	Andorra	723
90	Diamond Princess	712
91	Lebanon	688
92	Costa Rica	681
93	Bolivia	672
94	Albania	663
95	Niger	662
96	Kyrgyzstan	631
97	Burkina Faso	609
98	Uruguay	549
99	Honduras	519
100	Kosovo	510
101	San Marino	501
102	West Bank and Gaza	480
103	Senegal	479
104	Malta	445
105	Jordan	437
106	Taiwan*	427

Figura 4. Ranking de Mundial, Países con menores casos de COVID-19. Fuente: "Dashboard Coronavirus COVID-19 (Mobile)," n.d.

Como se observa en la figura 4, países como Taiwán, Malta y Jordania presente un bajo número de infectados por COVID- 19, debido a estrategias implementadas oportunamente cómo reducir inmediatamente los vuelos, creación de comandos centrales para el control de epidemia. Taiwán estableció diferentes agencias de investigación y del gobierno desde la última pandemia de SARS en donde se mantiene atento a diferentes casos de posibles brotes de casos. Todo esto debido a sistemas de rastreo en donde pueden determinar los lugares

visitados por los infectados y realizar proyecciones y análisis estadísticos sobre los posibles casos y la velocidad de propagación. pero ¿Cómo es posible todo esto?, es muy sencillo de responder, las tecnologías de información, capacidad tecnología y sincronización de los entes gubernamental en el tratamiento de una problemática. Así de esta manera le fue posible a este país de menos de 26 millones de habitantes controlar la propagación del virus.

En el caso de Colombia es importante debatir ciertos aspectos más profundos que dificultan la realización de inversiones en sectores del gobierno como lo son la ciencia y tecnología, educación y la salud, áreas supremamente importantes para que una nación pueda tener herramientas para afrontar problemáticas de gran envergadura, como la que estamos viviendo actualmente. Uno de los aspectos primordiales es el componente socio-cultural en donde la ciudadanía va a atender a las medidas establecidas únicamente cuando se ofrecen políticas de protección para acatar posibles cuarentenas, aislamiento de infectados y el aislamiento generalizado. Una iniciativa que el país podría incluir en sus políticas de gobierno sería la de subir del 0,2% al 1,5% del PIB, según lo expone el Banco Mundial en sus políticas de inversión (“Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB) | Data,” n.d.).

A continuación, figura 5, se contrastará el crecimiento anual del PIB por oferta para el segundo trimestre del año 2018 con el del año 2019:



Figura 5. Crecimiento Anual PIB 2019 vs PIB 2018 expresado en porcentaje. Fuente: "PIB-real segundo trimestre de 2019 y revisión de pronósticos," n.d.

Según datos del DANE el sector de las comunicaciones tuvo un crecimiento del 4,2% lo cual muestra que se viene incentivando este sector; desafortunadamente no es suficiente y el país requiere que se establezcan modificaciones en el plan de gobierno, puesto que traería muchos beneficios para el fortalecimiento de un sector que está afrontando una transformación digital. En caso de que no se reúnan los recursos necesarios para dar inicio a tal iniciativa, el país podría quedar menos competitivo frente a otras naciones de la región.

En resumen, respecto a lo anteriormente mencionado Colombia debe estructurar sus tecnologías de información enfocándose en crear sistemas de información que tengan una capacidad, acorde a las actividades gubernamentales, en donde debe gestionar la creación de equipos investigativos orientados a monitorear y dar seguimiento a los impactos actuales de

esta pandemia y a otras futuras, que procuren mitigar en mayor medida el incremento de casos; para ello es importante que incorpore en su estructura de gobierno la Arquitectura Empresarial ligada al fortalecimiento de las TIC.

Para que Colombia pueda afrontar de forma ágil y eficiente una posterior pandemia debe tener claro que sus entes de control deben estar articulados de forma sistemática para actuar oportunamente ante la aparición de casos de infectados, sugerir el aislamiento preventivo y el aislamiento social. Un caso particular en el territorio nacional fue el desinterés para actuar de forma inmediata ante la crisis sanitaria pues surgieron preguntas como: ¿Por qué no se cerró el aeropuerto EL DORADO apenas se supo de la expansión de los casos de infección en países europeos?, ¿Cuántos pasajeros transitan diariamente y de donde provienen? Estas dos interrogantes podrían haber ayudado a identificar qué medidas tomar ante la amenaza de infección; sin embargo, hay intereses gubernamentales que no permitían tomar cartas en el asunto, por amenazas de desaceleración de la economía, la cual era la mayor prioridad antes que resguardar al ciudadano.

Según la última actualización del portal de la Aero civil, en Colombia transitaron entre salidas y llegadas alrededor de 75.556.950 en el año 2019 de los cuales 34.975.000 corresponden al tráfico de pasajeros de El DORADO cerca del 46,29% del total. Para evaluar el impacto de cerrar EL DORADO de inmediato podríamos decir que la operación aérea se vería reducida inmediatamente a la mitad pues en términos más simples estarían transitando 95.821

pasajeros diariamente, provenientes del tráfico nacional en su mayoría y del tráfico internacional de destinos como Madrid un gran centro de acople entre Europa oriental y América, Miami y Alemania. Estas cifras dan a entender que la dilatación de tomar una decisión prematura de suspender las actividades aeronáuticas afectaría directamente este sector, por lo cual se trataba de evitar realizar el cierre indefinido de las centrales aeroportuarias nacionales. Estas lecciones aprendidas permitirán identificar la necesidad de implementar un gobierno sistemático en el cual se establezca de forma incluyente a la ciudadanía, proyectando el impacto a largo plazo de dar inicio a cualquier medida frente a este tipo de eventualidades.

4. Problemas logísticos para la implementación de ae

A. Desarrollo de APP´s para el monitoreo y gestionamiento del COVID-19.

Apenas se dio a conocer la identificación del primer infectado de COVID-19 el día 7 de marzo aproximadamente el Gobierno propone la creación de una aplicación gratuita en donde los ciudadanos podían descargarla desde su teléfono móvil para resolver un sencillo test acerca de los síntomas que podrían desarrollar a diario, si desarrollan una actividad de alto riesgo y alta exposición al virus del SARS-2. Actualmente, a través de la CORONAPP –figura 6- se han registrado más de 2 millones de usuarios que han colaborado con el reporte diario de su condición, además de incluir a su núcleo familiar y la identificación de posibles casos que puedan estar a su alrededor.

B. En dicho portal se da explicación muy detallada de cómo gestionar toda la información pertinente acerca del virus COVID-19. Además de todo esto hay que tener en claro que el Instituto Nacional de Salud, el Ministerio de Salud y el MinTIC unieron fuerzas para el desarrollo de dicha aplicación que, a pesar de ser un gran avance para mitigar la expansión de casos, se queda corta porque existen factores de cobertura, capacidad y conocimiento por parte de la población que dificulta la plena socialización de esta herramienta tecnológica a toda la población colombiana. Un factor importante para tener en cuenta es que no toda la población colombiana tiene acceso a Internet, aún menos poseen un dispositivo móvil, computador portátil o computador de escritorio.

Es importante identificar que oportunidades de mejora se pueden dar a conocer en cuanto al impacto de una mala gestión referente a la recolección de información puesto que una precaria identificación de casos de infectados pueda ayudar a dimensionar un crecimiento irreal de la curva de contagio, conteo de casos activos, muertes a causa de esta enfermedad, en donde la segmentación de la información posibilitará toma de decisiones alejadas del impacto real de dicha eventualidad.

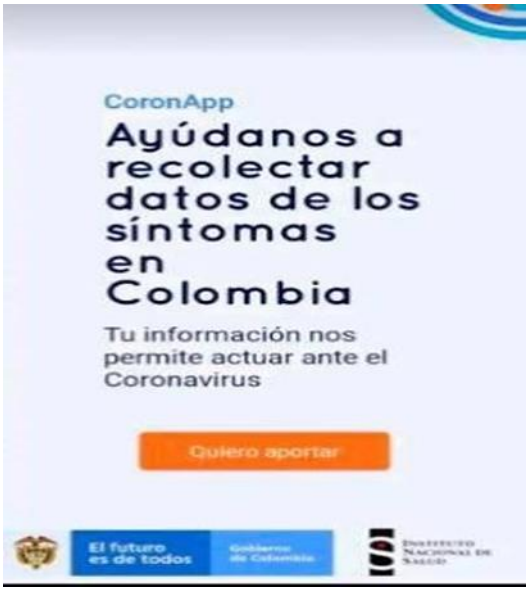


Figura 6. CoronApp. Fuente: "CoronApp, la aplicación para que conocer la evolución del coronavirus - Rumble," n.d.

Frente a esta problemática se debe establecer un modelo de gestión sistemática que oriente a tomar decisiones adjuntas a herramientas de un buen liderazgo incluyendo a la ciudadanía dando una buena gestión de los recursos mediante el diseño estratégico que permita recolectar de forma efectiva toda la información concerniente a este tipo de eventualidades que se están atravesando actualmente; sin embargo para llevar a cabo esta iniciativa el país debe identificar las limitantes que impidan el desarrollo y establecimiento del modelo de Gestión Sistemática, para ello en la Figura 7 se puede evidenciar la relación entre cada uno de los interesados para establecer los alcances de responsabilidad entre cada una de las instancias.

Todo esto debe estar comandado bajo el concepto de gobernanza siendo esta es clave para obtener una transformación institucional en donde los diferentes actores se encuentren eficientemente articulados, mediante un marco estratégico que conlleve a estimular el crecimiento económico con la inclusión social, entre los cuales encontramos al Estado, el mercado y la sociedad civil. Al lograr una buena articulación se puede lograr una transformación y crecimiento en diferentes campos que permita establecer el mejor desempeño del modelo sistemático.

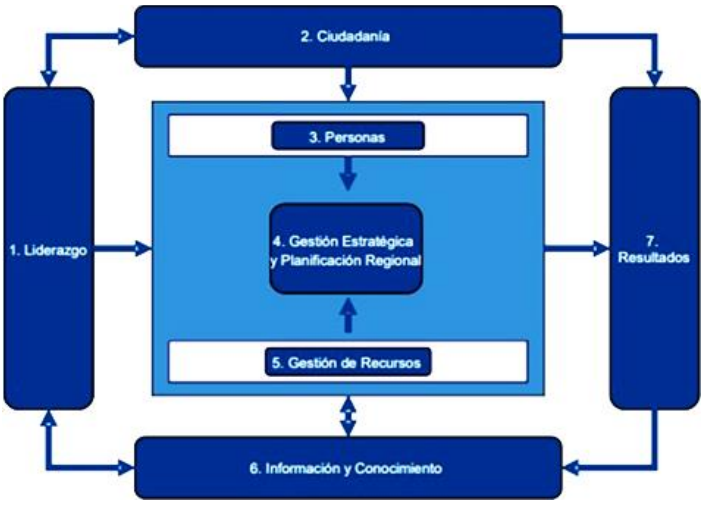


Figura 7. Diagrama de Modelo de Gestión. Fuente:Gobernanza Territorial , 2013.

C. Oportunidades de mejora en el manejo de las TIC

- Como primera medida Colombia debe asegurar que toda la población tenga acceso a la internet.

- Que la infraestructura tecnológica permita un uso constante de la red en donde los ciudadanos de bajos recursos puedan verse beneficiados.

- Diseño de estrategias en donde toda la población sea incluida en el manejo de las TIC dentro de sus actividades diarias.

Según la ministra de las TIC Sylvia Constaín en una entrevista dada el 28 de octubre del 2018 menciona la siguiente aclaración

"El sector de las tecnologías y las comunicaciones avanza a pasos agigantados en el mundo, pero en Colombia parece retroceder cada vez más. Si no hay cómo conectarse al ciberespacio, al cual están conectados empresas, gobiernos, autos, hospitales, y casi todo lo que hoy existe, de nada servirá la inteligencia artificial, el 'big data', o los nuevos servicios de entretenimiento como Netflix. "

Se ve que, aunque se incentiva la implementación de fibra óptica en todos los estratos, el 20% el estrato 1 tiene acceso directo y el estrato 6 está alrededor del 99,8%

D. Población vulnerable a contraer el COVID-19

En referencia a la implementación de la Arquitectura Empresarial, muchos estudios convergen en que uno de los principales problemas es la resistencia al cambio, esto supone un reto para las partes interesadas el plantearse modificar su modelo de negocio en torno a las TI, esta resistencia al cambio se puede propiciar por diferentes causas como:

- Falta de Conocimiento y Capacitaciones en herramientas TI.
- No se evidencia la necesidad de implementación.
- No se quiere abandonar la zona de Confort en la que se encuentra la Empresa
- Supone grandes inversiones y/o gastos relacionados
- No se cuenta con el tiempo y/o disposición.

Entre tanto el Gobierno Colombiano debe asegurar que las medidas que se tomen respondan de forma ágil para frenar el crecimiento exponencial de infectados, mediante estrategias que involucren a la ciudadanía dando pautas de cuidados personales que reduzcan la probabilidad de adquirir la enfermedad.

Se pueden relacionar más causas e inclusive se pueden presentar simultáneamente otras asociadas con la resistencia al cambio, es importante generar escenarios en donde se pueda brindar una mayor información acerca de Arquitectura Empresarial y el Marco de Referencia MINTIC, incentivos para su aplicación y se identifiquen los beneficios en su implementación.

Colombia en sus últimas dos décadas ha realizado inversiones significativas en Infraestructura y tecnologías de información, según el PND (2012 - 2020) los recursos proyectados para inversión hasta el año 2020 llegarán a los $112 billones, figura 8. Esta cifra estaría dividida en los sectores de vivienda, ciudad y desarrollo territorial ($16.6 billones, 15% del total), inversión

en tecnologías de información y comunicación (TIC, $9.9 billones, 9%), transporte urbano ($8.4 billones, 8%), minas y energía ($13.7 billones, 12%) y transporte ($63.7 billones, 57%).

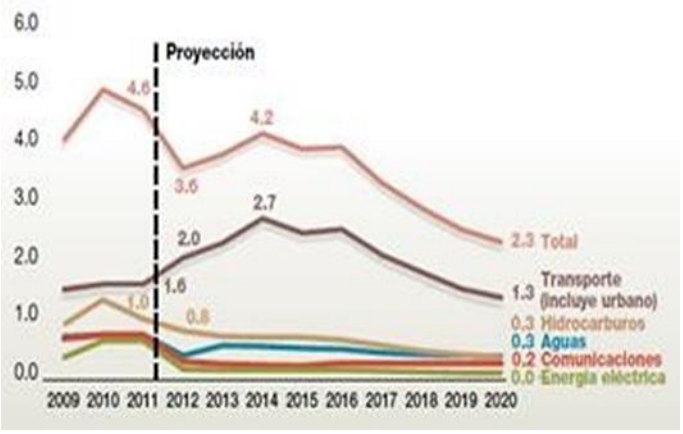


Figura 8. Inversión en Infraestructura. Fuente: Clavijo & Vera, 2013.

Por otro lado, el PND (2018 - 2022) en su meta 16 se planea duplicar la inversión pública y privada en ciencia y tecnología al 1,5% del PIB (PND, 2018), al analizar las proyecciones de inversión en infraestructura del 2009 al 2020 y compararlo con el PND de la actual presidencia Iván Duque 2018 a 2022, se evidencia un aumento en inversión para las comunicaciones de 1,3 % del PIB.

Como propuesta dentro de las implementaciones más oportunas de Arquitectura organizacional debe incluirse al gobierno liderado por el presidente para la toma de decisiones, figura 9.

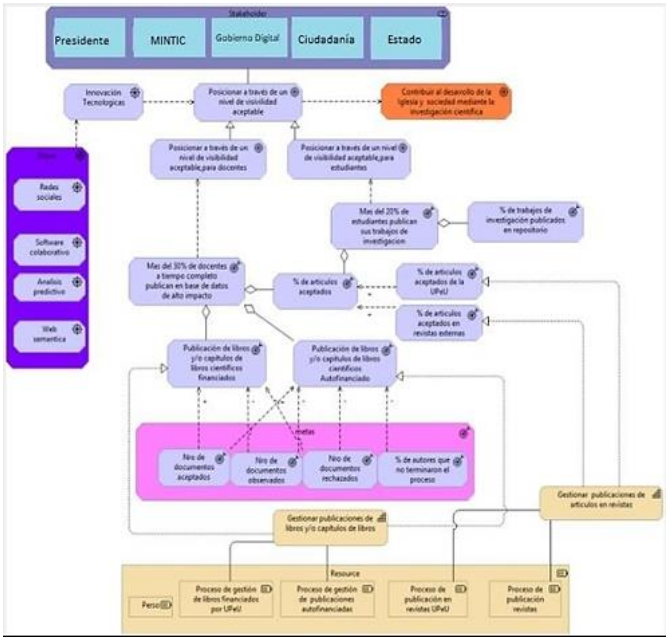


Figura 9 Versión modificada de. Diagrama de vista motivacional derivado de la necesidad de generar un modelo de arquitectura empresarial relacionado al tema de publicaciones científica. Fuente: Saboya, Loaiza, & Lévano, 2018.

También se debe articular a las instituciones y a la ciudadanía en la realización de estas actividades, para este fin se propone un modelo de integración entre las partes interesadas y el gobierno sistemático, cada vez que se desee producir conocimiento, figura 10.

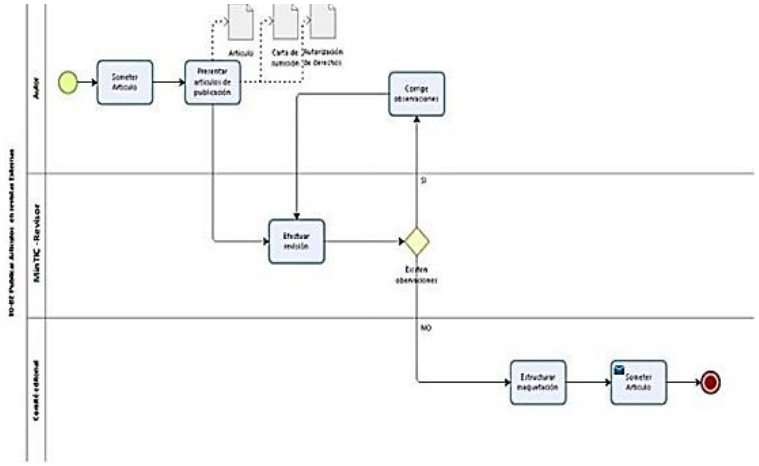


Figura 10. Versión modificada de Modelo Propuesto To-Be. Fuente: Saboya, Loaiza, & Lévano, 2018.

5. Conclusiones

Es necesario que las empresas adopten modelos de negocios más flexibles, que articulen con las Tecnologías de Información y Comunicación debido al constante cambio del mercado a raíz de su dinámica y de externalidades como el COVID-19, se observa que las empresas han podido seguir trabajando gracias a los desarrollos de grandes compañías de Internet como Amazon, Google, Microsoft y Cisco que permiten usar sus aplicaciones y desarrollos para que las personas puedan comunicarse, compartir documentos y lograr cumplir con los objetivos empresariales, algunas pequeñas empresas han tenido sendas crisis al no contar con un modelo de transformación digital. Aunque se evidencia un aumento en la inversión en el sector de las comunicaciones *proyectado vs actual*, Colombia tiene aún que hacer más esfuerzos en invertir no solo en este sector de *Comunicaciones* sino también en innovación y desarrollo

generando un mayor estudio e investigación que conduzcan a un mejor aprovechamiento de las TIC en el campo empresarial, gracias a la Arquitectura empresarial y sus fases es posible realizar los análisis de brechas para pasar de un estado As-Is a un To-Be, donde se realice la transformación digital teniendo en cuenta todos los aspectos que se requieren.

La Arquitectura Empresarial es una guía metodológica que permite la articulación de no solo los procesos del negocio de una empresa si no también los nuevos procesos referentes a la mitigación y reducción de los posibles casos de contagio del virus, suministrando a la organización canales de comunicación apropiados para afrontar los retos que trae consigo, esta a su vez permite la adaptación y flexibilidad de los procesos empresariales en función de las TI y virtualización de los mismos.

Referencias

[1] Arquitectura, L., Negocios, A. De, & Salimbeni, S. (2017). La Arquitectura Empresarial y el Análisis de Negocios.

[2] Basyarudin. (2018). Диф нарушениямиNo Title. Высшей Нервной Деятельности, 2, 227–249.

[3] Clavijo, S., & Vera, A. (2013). Inversion en infraestructura.7–14.

[4] CoronApp, la aplicación para que conocer la evolución del coronavirus - Rumble. (n.d.). Retrieved May 8, 2020, from https://rumble.com/embed/ubedx.v6h0k3/?rel=0

[5] Dashboard Coronavirus COVID-19 (Mobile). (n.d.). Retrieved May 8, 2020, from https://www.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/85320e2ea5424dfaaa75ae62e5c06e61

[6] Dussan, H., & Garzon, K. (2017). DIAGNÓSTICO PARA LA CREACIÓN DE UN MODELO BAJO LA ARQUITECTURA ORGANIZACIONAL TOGAF APLICADO EN LAS DEPENDENCIAS TIC DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS. 1–126.

[7] Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB) | Data. (n.d.). etrieved May 8, 2020, from https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?name_desc=false&view=map

[8] Gobernanza Territorial, Identificación De Fortalezas, Áreas De. (2013).

[9] González Campo, C. H., & Lozano Oviedo, J. (2020). Propuesta para la definición de la arquitectura empresarial. Dimensión Empresarial, 18((1)). https://doi.org/10.15665/dem.v18i(1).2109 Palacios-Urgilés, F. G., & Campoverde-Molina, M. A. (2019).

[10] Análisis de la arquitectura empresarial como oportunidad de mejora en las microempresas de la ciudad de Cuenca. Dominio de Las Ciencias, 5(3), 487. https://doi.org/10.23857/dc.v5i3.949

[11] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2016). G . GEN . 03 . Guía General de un Proceso de Arquitectura Empresarial. 1–41.

Retrieved from http://www.mintic.gov.co/arquitecturati/630/articles- 9435_Guia_Proceso.pdf

[12] PIB-real segundo trimestre de 2019 y revisión de pronósticos. (n.d.). Retrieved May 8, 2020, from https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo- 500041/pib-real-segundo-trimestre-de-2019-y-revision- de-pronosticos-2900103 PND. (2018). Bases del Plan Nacional de Desarrollo.

Retrieved from

https://id.presidencia.gov.co/especiales/190523-PlanNacionalDesarrollo/documentos/BasesPND2018- 2022.pdf

[13] Presupuesto y estados financieros. (n.d.). Retrieved May 10, 2020, from https://www.dane.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/tramites/transparencia-y-acceso-a-la- informacion-publica/presupuesto-general- asignado#presupuesto-general

[14] Saboya, N., Loaiza, O., & Lévano, D. (2018). Diseño de un modelo de arquitectura empresarial para publicaciones científicas basado en adm - Togaf 9.0. Retrieved May 10, 2020, from https://www.redalyc.org/jatsRepo/4676/467655911004/ html/index.html

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

MACHINE LEARNING TO DATA CLEANING

Machine learning a la limpieza de datos

Juan Carlos Amézquita T.[1], Hermes Javier Eslava Blanco[2].

Abstract

Nowadays, information is one of the main assets of the companies and government entities; it facilitates decision-making and the determination of policies. However, their results are not always satisfied with this practice due to the low-quality information. Data sets with duplicate, inconsistent, incomplete, outdated, and imprecise are the most common causes that affect the quality of the information and therefore the results of its analysis. Cleaning data becomes fundamental for those reasons, but at the same time cumbersome, this process must be carried out before doing any analysis on a certain set of data. This article aims to give an overview of how machine-learning techniques may be used to simplify the task of cleaning data in different dimensions like accuracy, completeness, and object identification. The study case is a data set from a government entity of a program focused on needs in early childhood.

[1] MSc. En Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Especialista en Telecomunicaciones móviles, Ingeniero en Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Gestor Línea de Electrónica y Telecomunicaciones SENA. Grupo de investigación AGORA del Tecnoparque SENA nodo Bogotá.

[2] Lic. en Electrónica Universidad Pedagógica Nacional, Colombia; Esp. Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Esp. Instrumentación Electrónica Universidad Santo Tomas, Colombia; MSc. Ingeniería de Telecomunicaciones Universidad Nacional de Colombia, Colombia; PhD. Ingeniería de Sistemas y Computación Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Profesor: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: hjeslavab@udistrital.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2630-0023

Keywords: data cleaning, machine learning, quality.

Resumen

Hoy en día, la información es uno de los principales activos de las empresas y entidades gubernamentales; facilita la toma de decisiones y la determinación de políticas. Sin embargo, sus resultados no siempre quedan satisfechos con esta práctica debido a la baja calidad de la información. Los conjuntos de datos con duplicados, inconsistentes, incompletos, desactualizados e imprecisos son las causas más comunes que afectan la calidad de la información y por lo tanto los resultados de su análisis. La limpieza de datos se vuelve fundamental por esas razones, pero al mismo tiempo engorroso, luego este proceso debe llevarse a cabo antes de realizar cualquier análisis sobre un determinado conjunto de datos. Este artículo tiene como objetivo brindar una descripción general de cómo se pueden usar las técnicas de aprendizaje automático para simplificar la tarea de limpiar datos en diferentes dimensiones como precisión, integridad e identificación de objetos. El caso de estudio es un conjunto de datos de una entidad gubernamental de un programa centrado en las necesidades de la primera infancia.

Palabras clave: limpieza de datos, aprendizaje automático, calidad.

1. Introducción

Actualmente, la información es considerada como un activo para las compañías, en una era donde casi todas las decisiones estratégicas del negocio son basadas en la información

recolectada. Originalmente los datos pueden estar incompletos y contener inconsistencias como datos faltantes y/o incompletos, imprecisos, no actualizados, inconsistentes entre otros, estas deficiencias en la calidad de la información pueden impactar seriamente la eficiencia y la efectividad de las organizaciones y los negocios, [1]. Las anomalías pueden ser causadas por muchos factores que pueden ser técnicos como por ejemplo las deficiencias en los sistemas de procesamiento de la información o humanos que varían desde errores en los procedimientos de manejo de la información hasta fallas por falta de atención de las personas que manipulan los datos. El término anomalía se describe como cualquier distorsión de los datos resultado del proceso de recolección, [2].

La relevancia de calidad de la información es cada día más evidente debido a su impacto en la toma de decisiones y algunos procesos operacionales es por esto que también su importancia ha sido reconocida por organizaciones internacionales como el sistema estadístico europeo [3] que tiene como misión proveer a Europa con datos y estadística de alta calidad. La calidad de los datos también puede ayudar a construir y mantener relaciones con los clientes que impulsen el crecimiento empresarial real, inmediatamente después de uno de los períodos más accidentados en la calidad de los datos, se ha visto un aumento de las regulaciones, un mayor reconocimiento estratégico del valor de los datos comerciales verificados, [4]. Según [5] la mala calidad de los datos tiene un costo de 3 Trillones de dólares por año. Estos costos incluyen el esfuerzo humano y los recursos desperdiciados, el fraude no detectado o las

sanciones por cumplimiento, y los costos indirectos que van desde la pérdida de clientes hasta la disminución del valor de la marca, [6]. Cómo se observa la calidad de la información tiene un impacto económico y se evidencia en como la calidad de los datos se ha convertido en un tema estratégico crítico para las empresas por dos razones, de acuerdo a [7] la primera, por una ola de nuevas y estrictas regulaciones de privacidad de datos, la segunda, en un entorno empresarial cada vez más impulsado por los datos, no se puede competir de forma eficaz sin datos de alta calidad. No menos importante una mala calidad de los datos también puede llevar a situaciones críticas como lo expone [8] en el cual se plantea la teoría que uno de los factores que conllevo también a la explosión del transbordador *Challenger* fueron los problemas en la calidad de los datos de sus sistemas.

Los datos son recolectados para diferentes propósitos y existe la necesidad de identificar y extraer datos relevantes para propósitos analíticos. En el caso particular para aplicaciones de machine learning cada modelo tiene requerimientos específicos de como la data debe ser presentada para su análisis [2], por esta razón la preparación de los datos es una actividad crítica en los ejercicios de machine learning y por lo general es el proceso que más toma tiempo, según [9] los científicos de datos gastan el 60% de su tiempo realizando esta actividad. Un artículo de new york times [10] menciona como el campo conocido como big data es el eslogan que representa la abundancia de datos de muchas fuentes como la web, sensores, teléfonos inteligentes y bases de datos corporativas y de estas fuentes se pueden extraer y

descubrir información con software inteligente, su promesa es una toma de decisiones más acertada y basadas en datos de todos los campos. Esta es la razón por la cual el científico de datos es la carrera candente en estos tiempos. Sin embargo, todavía se requiere demasiado trabajo artesanal, lo que los científicos de datos denominan *trabajo de conserje de datos*. Los científicos de datos, según entrevistas y estimaciones de expertos, pasan del 50 al 80 por ciento de su tiempo atascados en esta labor de recopilar y preparar datos digitales rebeldes, antes de que puedan ser explorados en busca de información útil.

La calidad de la información es un tema complejo, el termino calidad es definido en [11] como la totalidad de las características de un producto que influyen en su capacidad para satisfacer necesidades declaradas o implícitas. Para la información sus características de calidad esta distribuidas en varias dimensiones, de acuerdo a [12] las dimensiones son exactitud, confiabilidad, la puntualidad que se refiere a la demora entre un cambio del estado del mundo real y la modificación resultante del estado del sistema de información, completitud y consistencia. El aspecto de las dimensiones de la calidad de la información también es un tema de investigación ya que para otros autores existen muchas más dimensiones que afectan la calidad, en el apartado dos de este artículo se presentan otras dimensiones.

Debido a que la calidad de la información tiene varias dimensiones de evaluación lograr un nivel adecuado de calidad de la información es una tarea compleja y además es un área

multidisciplinaria de investigación que ha sido abordada desde la estadística, la administración y las ciencias de la computación, [1].

En este trabajo se pretende abordar el problema desde la perspectiva de la computación mediante la evaluación de diferentes técnicas de machine learning que permitan limpiar y mejorar la calidad de datos, haciendo de esta una tarea más sencilla de ejecutar. Las dimensiones sobre las cuales se realiza el proceso de experimentación en la búsqueda de mejorar la calidad de la información mediante procesos de limpieza de datos con machine learning son: completitud, consistencia y la anomalía de duplicidad. En este último se realiza un análisis más profundo del concepto de duplicidad no viéndolo como un problema netamente de repetición de un registro en una misma tabla si no desde la perspectiva de identificación de objetos bajo el marco de las reglas de negocio que se aplican sobre el conjunto de datos.

2. Calidad de datos

En esta sección se describen las actividades y procesos que intervienen en la limpieza de los datos. Cuando los datos contienen ruido u otras anomalías, es deseable identificar y remover los valores atípicos y otros datos sospechosos o tomar otras medidas para remediar este problema. La limpieza de datos es definida como el proceso de detectar y corregir o remover registros corruptos o imprecisos de un conjunto de datos, tabla o base de datos, [2].

A. Dimensiones de la calidad de la Información

El modelo de calidad de producto de datos definido en [13] menciona más de 10 dimensiones de la calidad de los datos en este apartado se expondrán las más relevantes. La exactitud, que se define como el grado en el que los datos representan correctamente el verdadero valor del atributo deseado de un concepto o evento en un contexto de uso específico, completitud, que es el grado en el que los datos asociados con una entidad tienen valores para todos los atributos esperados e instancias de entidades relacionadas y la coherencia que es el grado en el que los datos están libres de contradicción y son coherentes con otros datos, credibilidad como el grado en el que los datos tienen atributos que se consideran ciertos y creíbles, actualidad grado en el que los datos poseen atributos que tienen la edad correcta, y la confidencialidad definida como el grado en el que los datos tienen atributos que aseguran que los datos son sólo accedidos e interpretados por usuarios autorizados.

B. Actividades de la calidad de la Información

Las actividades para la calidad de la información de acuerdo [14] son la nueva adquisición de información el cual es un proceso de adquisición de información realizado con el objetivo de actualizarla, la estandarización (o normalización) es la modificación de información con nueva información de acuerdo con los formatos estándar o de referencia definidos, identificación del objeto (o vinculación de registros, coincidencia de registros, resolución de entidades), dada una o más fuentes de información, tiene el propósito de identificar aquellos registros en las diferentes fuentes que representan el mismo objeto del mundo real, la confiabilidad de la fuente

tiene el objetivo de calificar las fuentes sobre la base de la calidad de información que proporcionan a otras fuentes en un contexto abierto o cooperativo, la composición de la calidad define un álgebra para componer la calidad de la información, localización de errores (o detección de errores), dada una o más fuentes de información y un conjunto de reglas semánticas especificadas en ellos, encuentra registros que no respetan tales reglas, corrección de errores, dada una o más fuentes de información, un conjunto de reglas y un conjunto de errores identificados en los registros, se corrigen valores erróneos en los registros para respetar el conjunto general de reglas.

C. Identificación de objetos

La identificación de objetos es una de las actividades más importantes y extensamente investigada en la calidad de datos sobre todo en el contexto del big data, de acuerdo a [15] existen varias categorías de técnicas para la identificación de objetos como técnicas probabilísticas, técnicas empíricas y técnicas basadas en conocimiento. Dentro de las técnicas basadas en conocimiento, se destacan Intelliclean, expuesto en [16] es un enfoque basado en reglas extraídas del conocimiento del experto de un dominio; la principal idea de intelliclean es explotar un conjunto de reglas para la identificación de objetos. Las reglas de identificación de duplicados especifican las condiciones en las cuales dos objetos pueden ser clasificados como duplicados. Atlas, es una técnica que define [16] como métodos de aprendizaje para decisiones, en intelliclean las reglas son extraídas por expertos en el conocimiento del dominio,

pero no especifica procesos de aprendizaje. En la técnica Atlas las reglas sobre información estructural pueden ser obtenidas del análisis de las tuplas de entrada, se extrae el conocimiento de acuerdo con las recurrentes similitudes entre los atributos de los objetos a ser comparados y finalmente las reglas pueden ser obtenidas a través de un conjunto de datos de entrenamiento con o sin la participación de un experto del dominio.

3. Trabajos relacionados.

Hace unos años el tema de la calidad de los datos era poco importante sin embargo hoy en día es todo un tema de investigación debido a la relevancia que han tomado los datos en muchos procesos y tendencias como los son el Big data y el internet de las cosas. La calidad de la información se ha abordado desde diferentes perspectivas y ciencias que intentan desarrollar modelos, metodologías y crear nomas que permitan estandarizar y mejorar la calidad de la información. En [7] se exponen las mejores prácticas para la calidad de datos dentro de las cuales están implementar una arquitectura de APIs lo cual permita una eficiente integración de los diferentes sistemas de información, se debe verificar la información en el punto de entrada, adicionar valor a los datos mediante el uso de herramientas de visualización, implementar una estrategia de gobierno de datos y prever situaciones que puedan impactar la calidad de los datos. Según [17] las nuevas técnicas para detectar anomalías en big data se basan en motores que obtiene su poder de un componente predictivo y uno de investigación. Motores diseñados para detectar eventos en la infraestructura operativa y de aplicaciones de

una empresa, clasificarlos como conocidos o desconocidos, motores que no necesitan saber nada sobre la naturaleza de los datos, el motor simplemente analiza un conjunto de datos que contiene muchos eventos y firmas, lo compara con sus datos de referencia y determina si las variaciones indicarían una anomalía real, de lo contrario, incluso actualizará su línea de base para permitir la variación.

Dentro de las tendencias para la calidad de datos que expone [4] para el año 2020 se encuentran validaciones como un servicio en la cual se pueda acceder a bases de datos de referencia que permitan aumentar las capacidades de las empresas, la implementación de machine learning para la detección de información o transacciones fraudulentas.

Son muchas las iniciativas que están surgiendo para abordar el tema de calidad de la información y varias de estas se están abordando desde machine learning, el trabajo expuesto en [18] plantea el uso de una aplicación de machine learning para limpieza de datos, este es uno de los trabajos que aborda el problema de la limpieza de los datos desde el punto de vista computacional mediante la implementación de algoritmos no supervisados e intenta demostrar que la limpieza de los datos no siempre tiene que ser un trabajo tedioso. El problema de este trabajo consiste en clasificar cientos de artículos que están en formatos HTML y PDF dependiendo de la calidad de su texto. En la revisión de uno de los artículos se identifica texto que no representa palabras por supresión de espacios y/o por la omisión de algunos caracteres o adición de caracteres inadecuados para la formación de la palabra. Estos errores hacen que

el texto pierda calidad semántica y hace que el documento pierda sentido. El experimento expuesto en este trabajo utiliza algoritmos en Python para el conteo e identicación de las palabras lo cual hace parte del preprocesamiento de la información, posteriormente se utiliza el algoritmo de machine learning no supervisado K-means para la clasificación de los artículos. Este algoritmo clasifica los artículos de acuerdo con el número de palabras identificadas y no identificadas, los artículos con un mayor de número de palabras no identificadas serán agrupados en un clúster y estos artículos corresponderán a los artículos de baja calidad debido a su poca interpretabilidad. Autores en [19] proponen un esquema de evaluación rápida de la calidad de la información en big data aplicando estrategias de muestreo en grandes conjuntos de datos. Generando conjuntos de datos más pequeños que sean una muestra representativa de la población se puede realizar una rápida evaluación de la calidad. El trabajo en [20] presenta una iniciativa para tratar la calidad de datos en la actividad de identificación de objetos mediante el desarrollo de un framework que permite identificar y corregir errores en los datos. El framework identifica y une datos relacionados, después los clasifica mediante un proceso de limpieza de datos. El segundo aporte de este trabajo es el desarrollo de un algoritmo que genera metadata estructural y descriptiva como el tipo de datos.

Para finalizar no solo están surgiendo iniciativas privadas también existen iniciativas públicas que tratan el problema de la calidad de los datos como el reciente trabajo desarrollado por de la unidad de científicos de datos del departamento nacional de planeación (DNP) del gobierno

de Colombia, mediante la creación de la librería leíla [21] en el lenguaje Python cuyo objetivo principal es ser una herramienta que facilite la verificación de contenido de bases de datos y dé métricas de calidad para que los usuarios puedan decidir si sus bases de datos necesitan modificarse para ser utilizadas en los proyectos.

4. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un conjunto de datos de una entidad estatal con más de 27 millones de registros y la metodología para su desarrollo está basada en los procesos para la limpieza de datos que expone [22] y comprende las siguientes fases:

A. Fase I Selección de la infraestructura

Para el procesamiento de los datos se utilizaron dos infraestructuras para las diferentes etapas de la ejecución del proyecto. Colaboratory o colab es una herramienta de Google que permite ejecutar instrucciones en lenguaje Python desde el navegador [23], esta herramienta se utilizó para realizar análisis de archivos de hasta cuatro millones de registros. Para archivos con una cantidad registros superior se utilizó Azure HDInsight el cual es un servicio de análisis de código abierto y totalmente administrado en la nube para empresa [24]. Técnicamente Azure HDInsight es una distribución de nube de componentes de Hadoop, esta herramienta hace que sea fácil, rápido y rentable procesar grandes cantidades de datos. Puede usar las plataformas de código abierto más conocidas como o Hadoop, Spark, Hive, LLAP, Kafka, Storm y R entre otros.

B. Fase II Exploración de los datos

Los registros u observaciones efectuadas proporcionan una serie de datos que necesariamente deben ser ordenados y presentados de manera inteligente, la estadística descriptiva desarrolla un conjunto de técnicas cuya finalidad es presentar y reducir los diferentes datos observados [25] con el fin de caracterizar el conjunto de datos mediante medidas de resumen, tablas o gráficos y hacer una evaluación previa de la calidad de los datos. Es importante resaltar que en esta fase se realiza el preprocesamiento de los datos, este preprocesamiento consiste en el manejo de datos nulos, duplicados y normalización de los datos. Para esta investigación se utilizaron los siguientes archivos suministrados por el experto del dominio los cuales se describen de forma general con el propósito de contextualizar al lector de los problemas de calidad de datos existentes en las diferentes dimensiones.

1) Archivo Beneficiarios

Este archivo contiene el detalle de los beneficiarios que hacen parte del programa que maneja la entidad estatal tiene un tamaño de 7.7 Gigas y 4’656.697 registros. Es uno de los archivos de mayor relevancia ya que contiene información descriptiva del beneficiario, de los contratistas prestadores del servicio y recursos financieros asignados. En la dimensión de completitud el archivo presenta 302’364.060 de datos nulos que representan un 35.097 % del total de datos. En esta primera inspección no se identificaron registros duplicados en el archivo. Sin embargo, teniendo en cuenta la cantidad de columnas que presenta el archivo es de 185

se procede a realizar un análisis más profundo de los datos duplicados. Para determinar si realmente corresponde a un dato duplicado se debe hacer uso de las técnicas de identificación de objetos tratando al beneficiario ya no como un simple registro sino como un objeto del mundo real que está compuesto de atributos que le dan características espaciales y temporales.

2) Archivo Salud

Este archivo está enfocado en dar un mayor detalle de los beneficiarios en cuanto al estado de salud y seguimiento nutricional, el archivo tiene un tamaño de 2,3 Gigas y un total de 2’673.386 registros. En la dimensión de completitud el archivo presenta 69’143.474 datos nulos que representan un 29,72 % del total de datos. La figura 1 muestra la distribución de los datos por región del atributo peso. Revisando este gráfico es posible afirmar que se presentan dos situaciones que afectan la calidad de la información, la primera se aprecia una cantidad considerable de datos atípicos que producen un detrimento en la calidad de los datos en la dimensión de consistencia, y la segunda es la presencia de datos nulos para el peso y talla lo cual afecta la calidad en la dimensión de completitud. Una medición preliminar de la calidad de la información en la dimensión de consistencia validando las restricciones de intrarelación con respecto al peso, en el cual se establece como restricción la inconsistencia que ocasiona el encontrar niños o madres gestantes con un peso superior a 150 kg, se obtienen 31 registros incoherentes. Este mismo ejercicio se realizó para talla y la edad cuya restricción de integridad

se estableció con tallas superiores a 200 cm y edades superiores a 60 años e iguales a cero teniendo en cuenta que la población a la cual está dirigido el programa son madres en gestación y niños. El resultado fue obtener 0 datos inconsistentes para la evaluación de la talla y 40.631 datos inconsistentes para la evaluación de la edad.

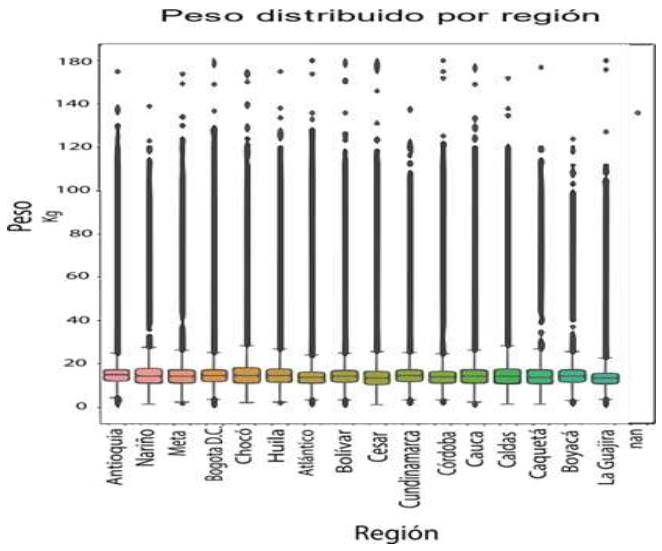


Fig. 1. Distribución del peso de beneficiarios por región. Fuente: elaboración propia.

C. Fase III Identificación de anomalías.

Esta fase tiene como objetivo la identificación de las anomalías presentes en la información que afectan su calidad y sobre las cuales es posible realizar la experimentación con los diferentes algoritmos y modelos de machine learning para mejorarla. Dentro de las anomalías identificadas en el análisis descriptivo del conjunto de datos y tratadas con técnicas de machine learning se encuentran datos faltantes como los son el atributo peso y talla para algunos

registros del archivo beneficiarios, datos incoherentes como niños de 5 años con peso superior a los 20 kg y datos duplicados en el contexto de identificación de objetos dentro de los que se identificaron casos en los que un mismo beneficiarios se encontraba recibiendo la misma atención en un mismo instante de tiempo en diferentes locación geográfica.

D. Fase IV Experimentación

Se realiza la experimentación sobre una muestra representativa del conjunto de datos con los diferentes algoritmos de machine learning para las dimensiones de completitud y consistencia y la actividad de identificación de objetos.

1) Dimensión de completitud.

La dimensión de completitud según [26] es el grado en que los valores están presentes en una recopilación de datos. En todos los archivos suministrados se identificaron en promedio un 30% de datos faltantes. Sin embargo, no todos los datos faltantes representan una deficiencia en la calidad de la información ya que un dato faltante puede tener varias representaciones, que el dato exista, pero no se conozca, que podría existir, pero actualmente no es conocido y que no exista. Para el caso de estudio se identificaron atributos nulos de los cuales se tiene seguridad de su existencia, pero no de su valor, como lo son el peso y la talla de los niños en el archivo salud, estos atributos presentan 80.950 registros nulos y es en estos precisamente sobre los cuales se aplicarán técnicas de machine learning para estimar su valor y de esta manera mejorar la calidad de la información en la dimensión de completitud. Existen varias

formas de reemplazar un dato nulo, la más común es reemplazarlo por el promedio. No obstante, para este caso no aplica esta solución ya que el promedio de la talla es de 96,25 cm y el peso es 18,69 kg, este reemplazo puede causar incoherencias en la información teniendo en cuenta que los promedios de peso y talla pueden ser inadecuados para la edad de algunos niños y de esta forma afectar la calidad de la información en otra dimensión. Es por esta razón, que se decide aplicar técnicas de machine learning a este problema de calidad debido que los algoritmos utilizados permiten la predicción de una variable dependiente con mayor precisión utilizando múltiples variables independientes como parámetros de entrada. El procedimiento para realizar la experimentación se expone en el diagrama de la figura 2.

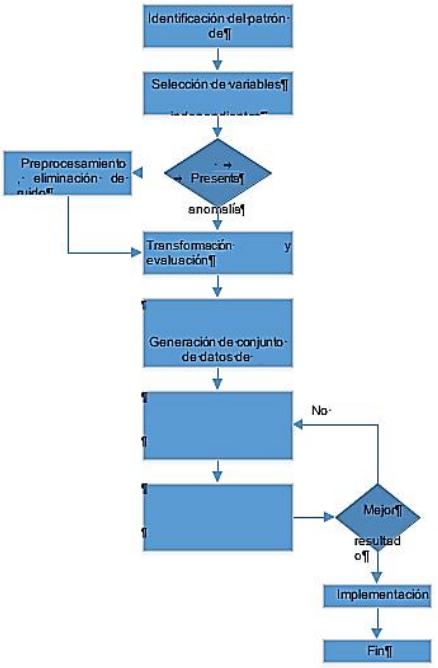


Fig. 2. Diagrama proceso predicción atributo peso. Fuente: elaboración propia.

Para la identificación del patrón de comportamiento de la variable se toma como referencia la figura 3, esta actividad sirve de herramienta para intuir que modelo de regresión puede ser el óptimo para resolver el problema. La selección de variables es una actividad importante en la creación de un modelo de machine learning, identificar las variables correctas puede ayudar a ahorrar tiempo y reducir problemas de espacio [27]. Para la predicción del peso se seleccionan las siguientes variables independientes las cuales según [28] tienen incidencia en su valor y hacen parte del conjunto de datos; edad, región, sexo, grupo étnico, régimen de seguridad social el cual sirve para inferir la situación socio económica de un beneficiario lo cual tiene un impacto en el peso.

En el preprocesamiento se identifica que algunas de las variables independientes seleccionadas presentan ruido como datos atípicos, datos nulos, y valores no normalizados por lo cual se realiza un preprocesamiento como se indica en [29] de las variables dependientes e independientes seleccionadas con el fin de corregir estas anomalías. Las actividades realizadas son filtración de datos para eliminación de datos atípicos, eliminación y/o reemplazo de datos nulos, y normalización de valores.

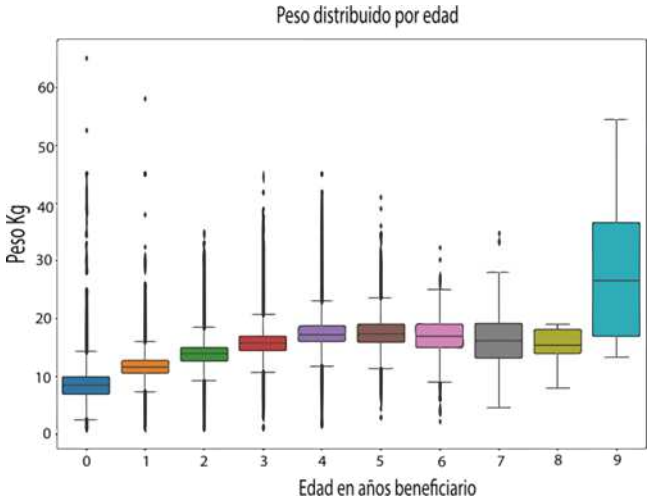


Fig. 3. Patrón de peso niños entre los 0 y 9 años. Fuente: elaboración propia.

Transformación y evaluación de variables independientes, existen variables independientes cualitativas y cuantitativas, sin embargo, para que un modelo de machine learning pueda ser entrenado con variables cualitativas estas deben ser transformadas con el fin que puedan ser interpretadas por el algoritmo. El resultado de la transformación es la representación de las variables cualitativas región, sexo, y grupo étnico en 47 columnas de datos binarios y teniendo en cuenta que este archivo tiene más de dos millones de registros el costo de procesamiento del modelo se incrementa por lo cual se hace necesario utilizar una técnica de reducción de variables. Para este caso se utilizó Linear Discriminant Analysis (LDA) la cual es una técnica de aprendizaje supervisado que genera una proyección lineal que maximiza la separación de la cantidad de clases [30]. Para la generación de conjunto de entrenamiento y prueba, contando con un conjunto de datos normalizado de 989.687 filas x 47 columnas se procede a dividirlo de la siguiente forma 80% para el conjunto de entrenamiento y 20% para el conjunto

de evaluación utilizando la librería sklearn.model_selection en Python. Finalmente se realiza el entrenamiento del modelo para mejorar la calidad de la información en la dimensión de completitud, específicamente para predecir el peso y la talla de los datos nulos de estos atributos en el archivo salud con diferentes técnicas de machine learning detalladas en los resultados.

2) Dimensión de consistencia.

En el análisis descriptivo se identificaron ciertos datos incoherentes en el archivo salud; incoherencias de los valores del peso y talla con respeto a la edad o a los patrones de referencia establecidos por la OMS (Organización Mundial de la salud). El primer proceso de limpieza de datos es el filtro de los datos atípicos por variable. Sin embargo, este proceso es insuficiente para la detección de todos los datos incoherentes ya que un beneficiario puede tener un peso dentro del promedio para la edad, pero no para su talla o puede estar por fuera de los patrones que establece la OMS para su edad. Esto implica un análisis más profundo en el cual se debe tratar al beneficiario como un objeto del mundo real compuesto por atributos de peso, talla, sexo y edad. Es en este punto en el cual las técnicas de machine learning se convierten en una herramienta poderosa para realizar este análisis, permitiendo la identificación y agrupamiento de estos datos incoherentes mediante un proceso de clasificación. El proceso de experimentación es muy similar al utilizado en el problema para la predicción del peso la variación se presenta en la selección de variables independientes, las

cuales fueron seleccionas con base en las características de los patrones reconocidos por la OMS, en estos patrones se tienen en cuenta atributos como el peso, talla, edad, y sexo. Teniendo en cuenta que este es un problema de clasificación se utilizan técnicas de machine learning supervisadas y se debe generar un conjunto de entrenamiento y pruebas con etiquetas. El conjunto de entrenamiento y prueba se creó con 51.981 registros con las etiquetas expuestas en la tabla 4 y con base en los patrones de crecimiento para niños y niñas reconocidos por la OMS.

3) Identificación de objetos.

En el análisis descriptivo del archivo beneficiario en primera instancia no se identificaron duplicados, no obstante, esta revisión de datos duplicados se hace compleja debido a que el archivo cuenta con más de cien columnas o atributos para su revisión. Realizando un filtro del archivo beneficiarios y tomando como llave primaria el documento del beneficiario se identificaron las situaciones expuestas en la tabla 1 que violan las reglas de negocio, para efectos de su interpretación se entiende por región y municipio una ubicación geográfica en la cual se prestan los servicios de la entidad estatal.

Este es un problema que puede ser abordado desde la perspectiva de identificación de objetos, en el campo de big data la identificación de objetos consiste en encontrar objetos que pueden ser idénticos o similares pero con diferentes etiquetas o nombres que provienen de diferentes fuentes [20], para este caso el objetivo es identificar un objeto que puede ser similar o idéntico

en diferentes contextos de lugar, tiempo y acción validando contra una serie de reglas definidas por el experto del dominio que su presencia no represente una duplicidad de los datos o una inconsistencia lo que para [15] representa utilizar las técnicas basadas en conocimiento. El procedimiento consta básicamente de tres actividades, generar un conjunto de reglas para la identificación de objetos, crear un conjunto de datos para el entrenamiento del modelo a partir de estas reglas e implementar un algoritmo de clasificación.

Con el fin de obtener una mejor respuesta en la clasificación de los datos se aborda este problema desde cuatro perspectivas de forma independiente, la evaluación del servicio en donde se utilizan los clasificadores SDP, SFEP Y OK, la evaluación de la región que utiliza los clasificadores RDP y OK, la evaluación del municipio con los clasificadores MDP y OK y la evaluación del documento utilizando los clasificadores DOCDUP y OK.

5. Resultados

Los resultados se componen de la evaluación de los diferentes modelos y los resultados de la implementación del modelo de mejor desempeño, se exponen de acuerdo con cada problemática abordada.

1) Dimensión de completitud.

Para la evaluación del modelo se utilizaron los valores del error cuadrático medio (ECM) y el coeficiente de determinación $R2$, los cuales fueron calculados mediante el uso de la librería

meansquarederror de skylearn.metrics. La tabla 2 muestra el consolidado de los resultados obtenidos en los diferentes modelos.

Tabla 1. Etiquetas clasificación IMC conjunto de entrenamiento. Fuente: elaboración propia.

SDP	servicio duplicado en un mismo periodo para un mismo beneficiario.
SFEP	Servicio fuera de excepción, prestado en un mismo periodo de tiempo para un mismo beneficiario.
RDP	Beneficiario atendido en dos regiones diferentes en un mismo periodo de tiempo.
MDP	Beneficiario atendido en dos municipios en un mismo periodo de tiempo.
DOCDUP	Beneficiario con diferentes atributos, pero con igual número de identificación.
OK	Beneficiario sin novedad.

Tabla 2. Evaluación de los modelos de regresión. Fuente: elaboración propia.

Modelo	ECM	R^2
Regresión lineal múltiple.	0,94	0,91
Regresión Polinomial.	0,57	0,94
SVM Regresión	0,68	0,93
Árboles de decisión (Regresión)	0,68	0,93
Random Forest (Regresión)	0,68	0,93

Se realizó la implementación del modelo de regresión lineal multivariable con el cual se calculó el peso de 66.086 beneficiarios, este mismo procedimiento se utilizó para predecir la talla de esta misma cantidad de beneficiarios. En total se calcularon 132.172 registros mejorando la calidad de la información en un 0.19 % de los datos nulos.

2) Dimensión de consistencia.

Se evaluaron las características de exactitud, precisión, sensibilidad, valor F1, y matriz de confusión para cada uno de los modelos experimentados. El comparativo se expone en la tabla 3.

Tabla 3. Evaluación de los modelos de clasificación. Fuente: elaboración propia.

Modelo	Exactitud	Precisión	Sensibilidad	F1
Regresión Logística	0.959	0.958	0.959	0.958
KNN	0.957	0.957	0.957	0.957
SVM Clasificador	0.719	0.691	0.719	0.665
Kernel SVM	0.719	0.691	0.719	0.665
Naïve Bayes	0.640	0.570	0.640	0.581
Árboles de decisión	0.996	0.996	0.996	0.996
Random Forest	0.995	0.995	0.995	0.995

Se realiza la implementación del modelo con la técnica de árboles de decisión el cual fue el que mostró mejores resultados. Los resultados de la implementación para la clasificación de 2’318.518 del archivo salud se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de clasificación modelo árboles de decisión. Fuente: elaboración propia.

Código	Clasificación	Número de Registros
0	Bajo	170.044
1	Normal	1.173.922
2	Alto	711.714
3	Atípico Alto	220.923
4	Atípico Bajo	40.916
5	Inconsistente	999

3) Identificación de objetos.

Se evaluaron las siguientes características de cada uno de los modelos exactitud, precisión, sensiidad, valor de exactitud F1 este último según [31] se usa ampliamente en la mayoría de las áreas de aplicación del aprendizaje automático, no solo en el escenario binario, sino también en casos multiclase donde pueden emplear el procedimiento de promediado micro / macro F1, por otra parte k-fold es la técnica de validación cruzada con el fin de garantizar una independencia de las particiones que se realicen para entrenamiento y prueba.

Debido a que los experimentos realizados en los diferentes enfoques mostraron resultados similares se expone los resultados de uno de ellos. La tabla 5 muestra el comparativo de los

resultados obtenidos para cada modelo experimentado con el enfoque de evaluación del servicio.

Tabla 5. Evaluación de los modelos de clasificación enfoque servicio. Fuente: elaboración propia.

IT	Clasificación	Enfoque Servicio	Enfoque Región	Enfoque Municipio	Enfoque Documento
0	OK	380.555	462.990	450.039	471.647
1	SDP	59.508	0	0	0
2	SFEP	32.182	0	0	0
3	RDP	0	9255	0	0
4	MDP	0	0	22.206	0
5	DOCDUP	0	0	0	598

Se realiza la implementación del modelo que utiliza la técnica de Random Forest para todos los enfoques, teniendo en cuenta que fue el mejor modelo que realizó la predicción de los datos que violan las reglas establecidas para la identificación de objetos. La tabla 6 muestra los resultados de la implementación.

Tabla 6. Resultados de clasificación modelo árboles de decisión. Fuente: elaboración propia.

Modelo	Exactitud	Precisión	Sensibilidad	k-Fold
Red Neuronal	0.53	0.28	0.53	NA
Arboles de decisión	0.82	0.60	0.60	0.85
Random Forest	0.86	0.69	0.52	0.86

6. Conclusiones

Con los resultados de esta investigación se evidencia que con el uso de machine learning se pueden realizar procesos de limpieza de datos en diferentes dimensiones que afectan la calidad de la información, para este caso se mejoró la calidad en las dimensiones de completitud, consistencia e identificación de objetos.

La calidad de la información es un factor fundamental para obtener buenos resultados de los diferentes análisis que se realicen sobre un conjunto de datos. Por esta razón, los procesos de limpieza de datos se convierten en una actividad prioritaria que se debe realizar como parte del preprocesamiento de los datos y con este trabajo se concluye que es posible minimizar los esfuerzos de esta actividad. El uso de machine learning y la construcción de pipelines permite la automatización de este proceso y el ahorro en tiempo para la ejecución de esta tarea. Demostrando así, que es una herramienta útil en el contexto de big data para la limpieza de datos en grandes volúmenes de información.

Finalmente, la técnica de árboles de decisión y random forest resultaron ser las más eficientes para los problemas de clasificación. Aunque las redes neuronales pueden mejorar con la adición de capas esto representa más recursos de procesamiento y por tanto se debe considerar la relación costo- beneficio.

Referencias

[1] Carlo Batini y Monica Scannapieco, DATA AND INFORMATION QUALITY, I. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[2] C. Sammut y G. I. Webb, Eds., Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining. Boston, MA: Springer US, 2017.

[3] «Who we are - Eurostat». https://ec.europa.eu/eurostat/about/who-we-are (accedido ago. 23, 2020).

[4] B. G. Grow y 2020 January 24, «Data Quality Predictions for 2020», Transforming Data with Intelligence. https://tdwi.org/articles/2020/01/24/diq-all-data-quality-predictions-for-2020.aspx (accedido ago. 21, 2020).

[5] T. C. Redman, «Bad Data Costs the U.S. $3 Trillion Per Year», Harvard Business Review, sep. 22, 2016.

[6] B. G. Grow y 2018 July 6, «Reducing the Impact of Bad Data on Your Business», Transforming Data with Intelligence. https://tdwi.org/articles/2018/07/06/diq-all-reducing-the-impact-of-bad- data.aspx (accedido ago. 21, 2020).

[7] B. G. Grow y 2019 May 3, «Data Quality Best Practices for Today's Data- Driven Organization», Transforming Data with Intelligence. https://tdwi.org/articles/2019/05/03/diq-all-data-quality-best-practices-for- data-driven-organizations.aspx (accedido ago. 23, 2020).

[8] C. W. Fisher y B. R. Kingma, «Criticality of data quality as exemplified in two disasters», Inf. Manage., vol. 39, n.o 2, pp. 109-116, dic. 2001, doi: 10.1016/S0378-7206(01)00083-0.

[9] crodwflower, «2016 DATA SCIENCE REPORT», 2016.

[10] S. Lohr, «For Big-Data Scientists, 'Janitor Work' Is Key Hurdle to Insights», The New York Times, ago. 17, 2014.

[11] «ISO 9000:2015(en), Quality management systems — Fundamentals and vocabulary». https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:45481:en (accedido ago. 23, 2020).

[12] C. Batini y M. Scannapieco, «Data Quality Dimensions», en Data and Information Quality, Springer, Cham, 2016, pp. 21-51.

[13] «NORMAS ISO 25000». https://iso25000.com/index.php/normas-iso-25000 (accedido mar. 23, 2019).

[14] C. Batini y M. Scannapieco, «Activities for Information Quality», en Data and Information Quality, Springer, Cham, 2016, pp. 155-175.

[15] C. Batini y M. Scannapieco, «Object Identification», en Data and Information Quality, Springer, Cham, 2016, pp. 177-215.

[16] Tejada S, Knoblock C, Minton S, Learning object identification rules for information integration. 2001.

[17] 2014 January 21, «New Techniques Detect Anomalies in Big Data», Transforming Data with Intelligence. https://tdwi.org/articles/2014/01/21/detecting-big-data-anomalies.aspx (accedido ago. 26, 2020).

[18] J. Taylor, «Clean your data with unsupervised machine learning», Towards Data Science, dic. 01, 2018. https://towardsdatascience.com/clean-your- data-with-unsupervised-machine-learning-8491af733595 (accedido mar. 17, 2019).

[19] I. Taleb, H. T. E. Kassabi, M. A. Serhani, R. Dssouli, y C. Bouhaddioui,

«Big Data Quality: A Quality Dimensions Evaluation», en 2016 Intl IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress (UIC/ATC/ScalCom/CBDCom/IoP/SmartWorld), jul. 2016, pp. 759-765, doi: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCom-IoP-SmartWorld.2016.0122.

[20] H. Liu, T. K. A. Kumar, y J. P. Thomas, «Cleaning Framework for Big Data

- Object Identification and Linkage», en 2015 IEEE International Congress on Big Data, jun. 2015, pp. 215-221, doi: 10.1109/BigDataCongress.2015.38.

[21] «LEILA - Librería de calidad de datos — documentación de LEILA - 0.1». https://ucd-dnp.github.io/leila/ (accedido ago. 27, 2020).

[22] H. Müller y J.-C. Freytag, «Problems, Methods, and Challenges in Comprehensive Data Cleansing», p. 23.

[23] «Google Colaboratory».

https://colab.research.google.com/notebooks/welcome.ipynb?hl=es-419 (accedido jun. 29, 2020).

[24] hrasheed-msft, «¿Qué es Azure HDInsight?» https://docs.microsoft.com/es-es/azure/hdinsight/hdinsight-overview (accedido abr. 27, 2020).

[25] S. F. Fernández, J. M. C. Sánchez, A. Córdoba, y A. C. Largo, Estadística Descriptiva. ESIC Editorial, 2002.

[26] F. Sidi, P. H. Shariat Panahy, L. S. Affendey, M. A. Jabar, H. Ibrahim, y A. Mustapha, «Data quality: A survey of data quality dimensions», en 2012 International Conference on Information

Retrieval Knowledge Management, mar. 2012, pp. 300-304, doi: 10.1109/InfRKM.2012.6204995.

[27] J. Wang, C. Zhang, X. Wu, H. Qi and J. Wang, «SVM-OD: A New SVM Algorithm for Outlier Detection - Google Académico», presentado en Proc. ICDM'03 Workshop Foundations and New Directions of Data Mining, 2003, Accedido: ago. 24, 2020. [En línea]. Disponible en: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=SVM-OD%3A+A+New+SVM+Algorithm+for+Outlier+Detection&btnG=.

[28] «Factores que afectan el peso y la salud | NIDDK», National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la- salud/control-de-peso/informacion-sobre-sobrepeso-obesidad- adultos/factores-afectan (accedido may 16, 2020).

[29] Lean Yu, Shouyang Wang, y K. K. Lai, «An integrated data preparation scheme for neural network data analysis», IEEE Trans. Knowl. Data Eng., vol. 18, n.o 2, pp. 217-230, feb. 2006, doi: 10.1109/TKDE.2006.22.

[30] Sumithra V.S,Subu Surendran, «A Review of Various Linear and Non Linear Dimensionality Reduction Techniques», Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol., vol. 6.

[31] D. Chicco y G. Jurman, «The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation», BMC Genomics, vol. 21, n.o 1, p. 6, ene. 2020, doi: 10.1186/s12864-019-6413-7.



CONGRESO INTERNACIONAL
DE ELECTRÓNICA, CONTROL
Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

KRUMBEIN ROUNDNESS INDEX USING KOHONEN SELF-ORGANIZING MAPS

Índice de Redondez de Krumbein mediante Mapas Autoorganizativos de Kohonen

Juan Sebastian Useche Castelblanco[1], Oscar Javier Reyes Ortiz[2], Marcela Mejía[3]

Abstract

Within the areas of knowledge that engineering encompasses, the application of artificial intelligence and digital image processing has made it possible to automate processes that were traditionally carried out manually. In the area of pavements, different digital tools have been implemented for the parameterization of the type of rock fragments used for the construction of roads and highways. These tools improve the design process of pavement structures, which, under the current context, pavements are essential for the transport of essential goods and the economic recovery of a region. In this work, an algorithm is implemented through the analysis of images and neural networks to determine the Krumbein roundness index of the aggregate in

[1] Ingeniero en mecatrónica, magister en ingeniería, estudiante doctoral en ciencias aplicadas e Investigador, Universidad Militar Nueva Granda, Colombia. E-mail: u7700125@unimilitar.edu.co.
[2] Ingeniero civil y magister en ingeniería, Universidad de los Andes, Colombia. Doctor en ingeniería civil, Universidad Politécnica de Cataluña, España. Profesor titular / Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. E-mail: oscar.reyes@unimilitar.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2001-2450
[3] Ingeniera electrónica, Universidad Santo Tomas, Colombia. Magister en teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Doctora en ingeniería, Universidad de los Andes, Colombia. Doctora en telemática, Universidad Politécnica de Cataluña, España. Profesor titular / Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. E-mail: angela.mejia@unimilitar.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2531-1257

flexible pavements. To generate a tool that allows automating a process that conventionally involves the displacement and work time of an engineer for the development of the mixture design.

Keywords: Image analysis, Flexible Pavement, SOM, Krumbein

Resumen

Dentro de las áreas de conocimiento que abarca la ingeniería, la aplicación de inteligencia artificial y procesamiento digital de imágenes ha permitido automatizar procesos que tradicionalmente se realizaban de forma manual. En el área de pavimentos, diferentes herramientas digitales se han implementado para la parametrización del tipo de fragmentos de roca que se utiliza para la construcción de vías y carreteras, ayudando en el mejoramiento del proceso de diseño de estas estructuras, las cuales, bajo el contexto actual son fundamentales para el trasporte de mercancías esenciales y para la recuperación económica de una región. De esta forma en este trabajo se implementa un algoritmo mediante el análisis de imágenes y redes neuronales para la determinación del índice de redondez de Krumbein del agregado en pavimentos flexibles. Lo anterior con el objetivo de generar una herramienta que permita automatizar un proceso que convencionalmente implica el desplazamiento y tiempo de trabajo de un ingeniero para el desarrollo del diseño de la mezcla.

Palabras clave: Análisis de imágenes, Pavimentos flexibles, SOM, Krumbein.

1. Introducción

Las carreteras y vías son parte central en el crecimiento económico y social de un país, siendo eje fundamental sobre todo bajo condiciones especiales como la del COVID – 19. Estas estructuras permiten el trasporte de mercancías que suplen las necesidades básicas de las regiones, teniendo un impacto no solo a nivel social, si no también colaborando en la recuperación económica de las empresas, [1], [2]. El mejorar los procesos de diseño de un pavimento inciden en el desarrollo de estructuras más duraderas y agilizar los procesos de construcción, [3].

Una estructura de pavimento está compuesta por agregados pétreos (fragmentos de roca) y por un ligante (cemento para pavimentos rígidos y asfalto para pavimentos flexibles). Las propiedades físicas de estos materiales se relacionan directamente con el comportamiento y desempeño que podría llegar a tener una de estas estructuras [4]. Para la evaluación de este comportamiento se realizan una serie de ensayos de laboratorio y en diversos estudios se aplica una descripción del material pétreo que compone la mezcla para parametrizar su posible respuesta y desempeño, [5].

Diferentes trabajos han demostrado la relación que existe entre la morfología del agregado y el comportamiento mecánico de un pavimento, [6]. En donde el tipo de geometría puede incrementar la resistencia de la estructura ante deformaciones o las irregularidades en la superficie influyen en la resistencia de la estructura al agrietamiento, [7], [8]. De forma

convencional la parametrización de la forma de los fragmentos de roca se realiza mediante inspección manual y tomando longitudes del agregado en el sitio de acopio, [9].

También existen diferentes cartillas graficas que permiten realizar una clasificación del agregado de una forma más ágil, ya que la medición manual de longitudes de los agregados requiere mayor tiempo. Krumbein presenta un gráfico para agregados que establece el índice de redondez de la partícula mediante la comparación visual entre el fragmento de roca y las imágenes (Figura 1) [10]. Dentro del grafico se observa que se presentan 9 grupos con 9 agregados cada uno. Cada grupo representa un índice de redondez desde 0.1 (agregado angular) hasta 0.9 (agregado redondo).

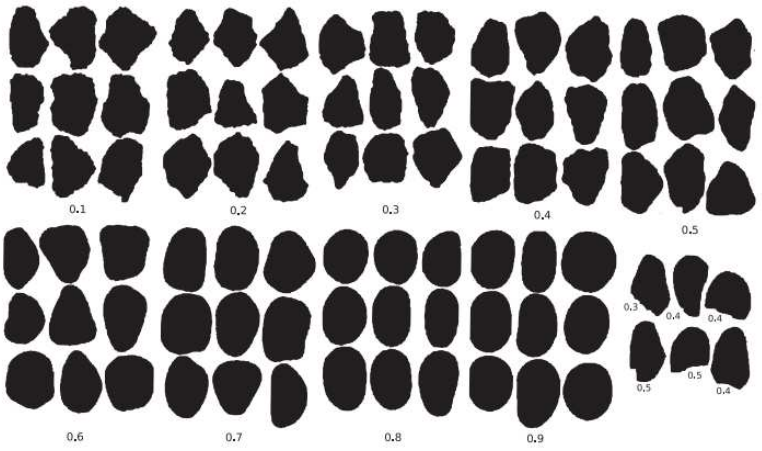


Figura 116. Redondez de Krumbein, [10].

Con la aparición de los sistemas digitales estos procesos de medición y comparación que se realizaban de forma manual han migrado mediante la implementación de algoritmos computacionales, inteligencia artificial y procesamiento de imágenes a sistemas que permiten

obtener resultados más fácilmente [11]. Dentro del contexto actual la implementación de estas tecnologías ayuda a evitar el desplazamiento y estancia del ingeniero en sitio por un mayor periodo de tiempo. Existen diferentes trabajos realizados en la descripción del tipo de agregado mediante herramientas digitales como el desarrollado por Lili Pei et *al* en [12] donde aplicando bosques aleatorios realiza la clasificación de los agregados teniendo en cuenta 6 clases dentro de las que se encuentran fragmentos angulares, cúbicos, elongados, rugosos, rugosos alargados e irregulares. El sistema tiene una exactitud de 0,74 en promedio. Otro trabajo realizado es el realizado por Khalid et *al* en [13] donde implementa un sistema de visión de máquina para determinar el índice de elongación de los agregados. La aplicación tiene un error máximo del 10% en comparación con las mediciones manuales. Para finalizar los autores Joonyoung Kim et *al.* Implementan una herramienta de trabajo con imágenes que realiza la medición de la angularidad, redondez, índice de forma y esfericidad mediante la aplicación de expresiones matemáticas y mediciones digitales, [14].

De acuerdo con lo revisado, actualmente los algoritmos se han desarrollado profundamente en la medición y parametrización de diferentes características del agregado, pero dentro de estas no se evidencia la aplicación de algoritmos computacionales para la determinación del índice de Krumbein. De esta forma dentro de este trabajo se presenta la implementación de un sistema basado en redes neuronales que acopla un mapa autoorganizativo de Kohonen y una red multicapa para la determinación del índice de redondez de Krumbein. Esto con el objetivo

de aportar en el desarrollo de sistemas de inspección del agregado que permitan una parametrización en la descripción del fragmento de roca que se utiliza para la construcción de carreteras, permitiendo agilizar los procesos de diseño y disminuyendo el tiempo del ingeniero en sitio.

2. Métodos y materiales

En la Figura 2 se presenta el esquema del trabajo realizado, inicia con el proceso de adquisición de la imagen del pavimento flexible y termina con la validación del modelo de predicción del índice de redondez de Krumbein.

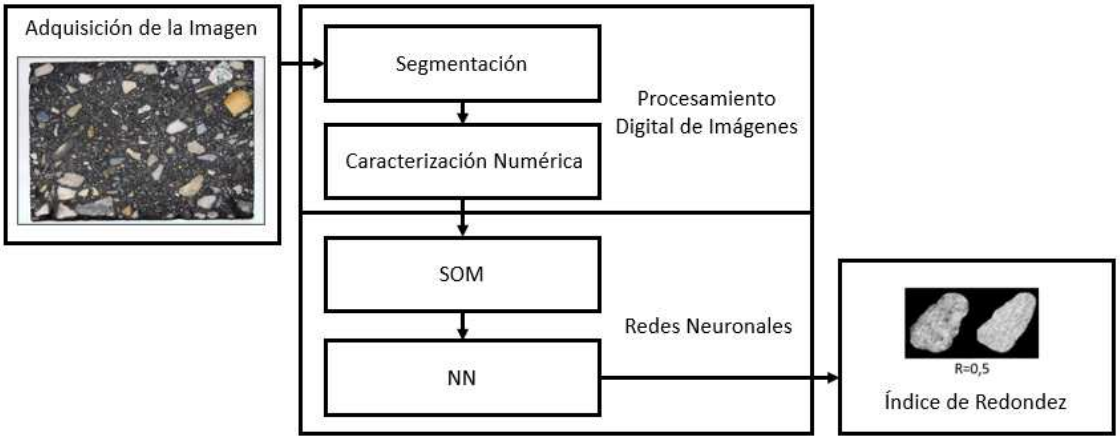


Figura 2. Modelo de trabajo. Fuente: elaboración propia.

2.1. Adquisición

La adquisición de la imagen es realizada con una cámara convencional de 18 mega pixeles ubicada a 20 centímetros de la muestra e iluminada con luz led blanca. En la Figura 3Figura

317 se observa el protocolo de adquisición de la imagen y la captura de dos mezclas asfálticas de diferentes características.

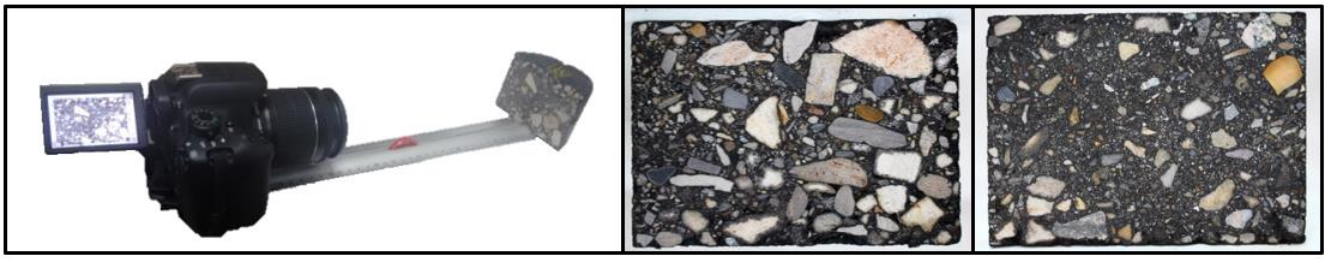


Figura 317. Captura de imágenes. Fuente: elaboración propia.

La imagen capturada con la cámara es una imagen a color RGB. Para poder realizar la identificación del agregado se debe realizar la segmentación e individualización de las partículas. Para la separación de los fragmentos de roca en necesario tener en cuenta que este tipo de materiales presentan dos particularidades. El primero, es la tonalidad oscura que presentan algunos agregados que pueden confundirse con el asfalto (fondo). Por otro lado, las el pavimento flexible en su fabricación pasa por un proceso de compactación por el cual los bordes entre agregados no están claramente definidos [15]. En la Figura 4 se observan los diferentes casos.

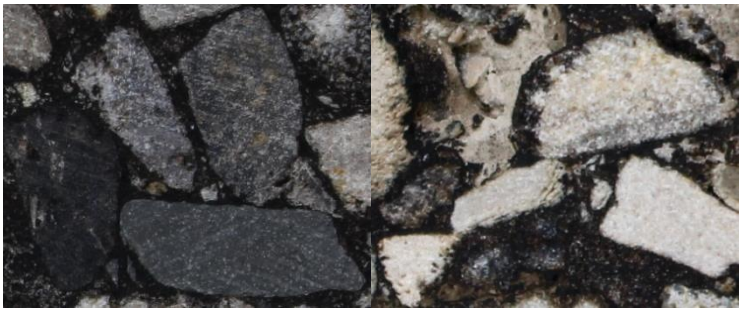


Figura 4. Puntos Críticos. Fuente: elaboración propia.

2.2. Segmentación

La segmentación del agregado se realiza de acuerdo con lo presentando en [15] en donde por medio de diferentes técnicas de procesamiento de imágenes se abordan los puntos críticos y se obtiene una segmentación con un porcentaje de error inferior al 4% en comparación con la curva de diseño en laboratorio que se realiza de la mezcla. El modelo de segmentación del agregado contempla una etapa de binarización de la imagen centrada en la aplicación del método Otsu. Lo anterior con el objetivo de realizar la binarización del agregado teniendo en cuenta las diferentes intensidades que se presentan a lo largo de la imagen como consecuencia de la diversidad de los diferentes tipos de agregados y de perturbaciones externas que se presentan al momento de la captura de la fotografía [16][17]. De esta forma en la Figura 5 se presenta un ejemplo de la binarización del agregado.



Figura 5. Mezcla asfáltica binarizada. Fuente: elaboración propia.

Para la separación del material se aplica la operación morfológica de Opening verificando que el tamaño de la estructura de la convolución sobre la imagen no realice una modificación por encima del 95% con respecto al material original [18]. Esto con el objetivo de evitar una modificación excesiva del agregado que interfiera dentro del modelo de predicción del índice. Un ejemplo de lo anterior se observa en la Figura 6, en donde previamente se aplicó una función para el llenado de huecos presentes en la binarización provenientes de los poros de los fragmentos de roca.

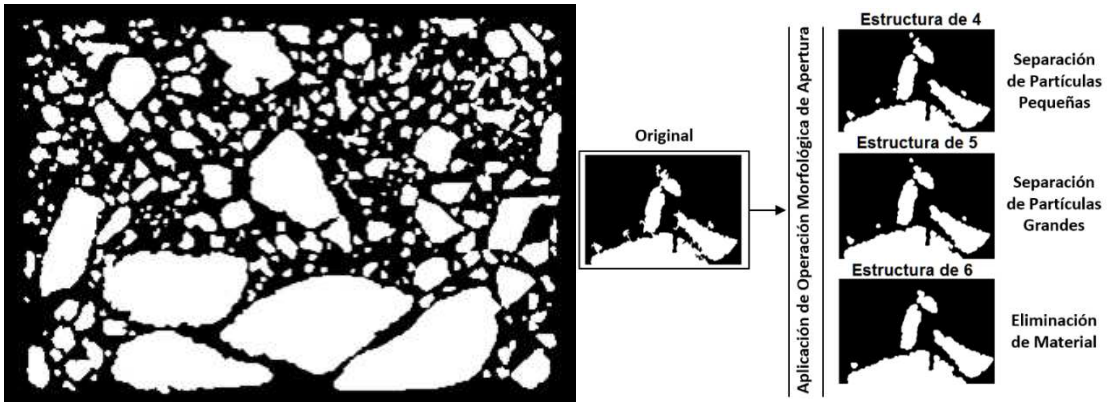


Figura 618. Llenado de partículas y morfologías. Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo y la obtención de los parámetros de caracterización del agregado detectado dentro de la foto, se realiza un proceso de individualización de las partículas. Para esto se localizan los objetos y se extraen los agregados creando imágenes nuevas por cada fragmento de roca como se ilustra en la Figura 7. La separación se realiza tanto en blanco y negro como a color.

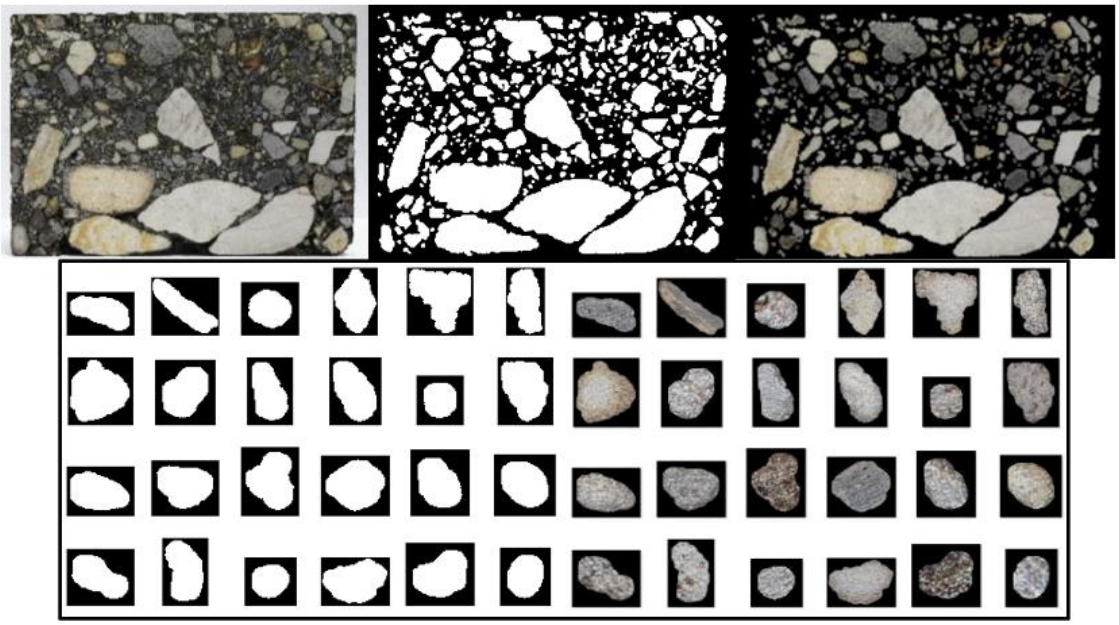


Figura 7. Fragmentos de Roca Individualizados. Fuente: elaboración propia.

Ya que dentro de la cartilla grafica de Krumbein se presentan 9 grupos diferentes dentro de los cuales cada grupo tiene 9 patrones de agregado. El implementar un algoritmo como una red neuronal convolucional no es eficiente ya que la morfología del agregado tiene una alta variabilidad y la cantidad de imágenes necesarias para poder aplicar un clasificador de 9 etiquetas es elevada [19]. De esta forma la solución propuesta es realizar una caracterización numérica de cada uno de los agregados propuestos por Krumbein, con la cual un algoritmo como los mapas autoorganizativos de Kohonen pueden realizar una parametrización de las

regiones dentro de las cuales los fragmentos de roca muestren características similares y se pueda realizar una mejor clasificación.

2.3. Caracterización numérica (CN)

Las diferentes expresiones matemáticas para el cálculo de los parámetros utilizados para la caracterización numérica de los agregados de Krumbein y los agregados de validación del modelo se muestran en la Tabla 1. Estos parámetros están orientados a realizar una parametrización de cada una de las partículas en función de la forma general del agregado y la forma del elemento en sus bordes, estos valores se denominan parámetros de primer y segundo orden (Figura 8), [20], [14].

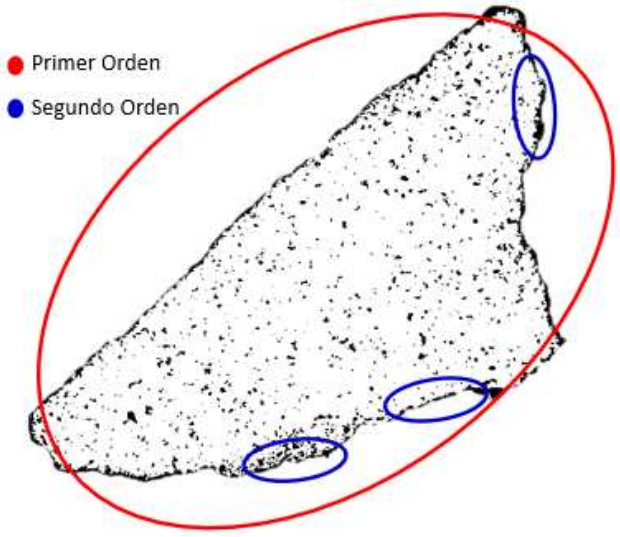


Figura 8. Descripción de agregados. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Funciones de descripción, [7],[21].

Orden	Parámetro	Ecuación	Parámetros	Año	Autor
Primer	Circularidad	$C = \frac{P^2}{4\pi A}$ (2)	A área, P perímetro del agregado.	1998	Janoo
Primer	Rectangularidad	$Re = \frac{A}{A_r}$ (23)	A área de partícula, A_r área de rectángulo enmarcado	1999	Kwan
Segundo	Convexidad	$\mathrm{Co} = 1 - \frac{Ac}{\mathrm{A}}$ (3)	Ac área convexa de la partícula, A área de partícula.	2000	Mora
Segundo	Índice de forma	$RA = \frac{M_a}{m_a}$ (44)	M_a eje mayor, m_a eje menor de la partícula.	2001	Masad

Aplicando las ecuaciones anteriores sobre los agregados individualizados se calculan los parámetros numéricos de caracterización. Para la obtención de los valores, primero se realiza la medición de diámetros, ejes y polígonos, para aplicar posteriormente las ecuaciones. En la Figura 9 se ilustra la medición para diferentes partículas.

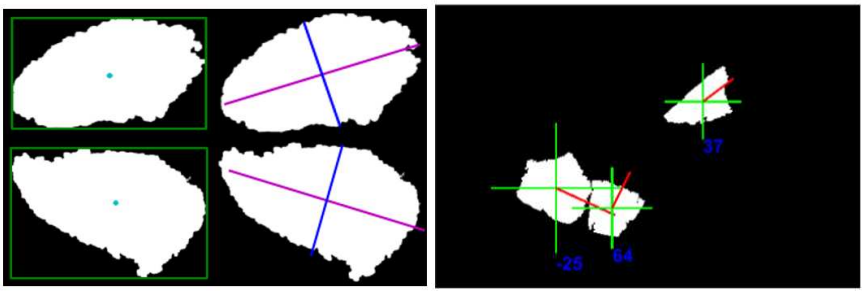


Figura 9. Medición de parámetros. Fuente: elaboración propia.

El algoritmo se aplica para cada uno de los agregados y genera una tabla con los valores para cada partícula. En la Figura 10 se presenta el resultado para agregados de diferentes características. De esta forma estos cuatro valores son lo que presenta cada partícula en la entrada del modelo, luego de realizar su estandarización utilizando su media y desviación estándar.

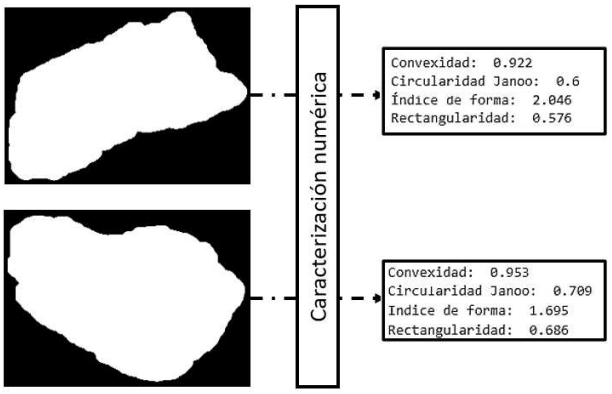


Figura 10. Resultado de la caracterización numérica. Fuente: elaboración propia.

Con la caracterización numérica de cada uno de los agregados en la siguiente sección se genera el clasificador con el cual se automatizará el proceso de determinación del índice de

redondez de Krumbein, que de forma convencional se realiza comparando de forma visual el agregado versus las imágenes de cada uno de los 9 grupos de la cartilla grafica. Dentro de la solución se plantea un clasificador mediante mapas autoorganizativos, que en la salida se acopla con una red neuronal multicapa. Lo anterior con el objetivo de poder crear regiones de para cada índice mediante el algoritmo no supervisado y luego con el resultado hacer la clasificación supervisada del índice. El desarrollo del modelo se presenta a continuación.

2.4. Clasificador SOM – MPL

Para la generación automática del índice de redondez de Krumbein se implementa un mapa autoorganizativo de Kohonen (SOM). Estos mapas son estructuras de redes neuronales que se conectan en forma de plana [22], permitiendo crear cortezas neuronales artificiales como la que se muestra en la Figura 11.

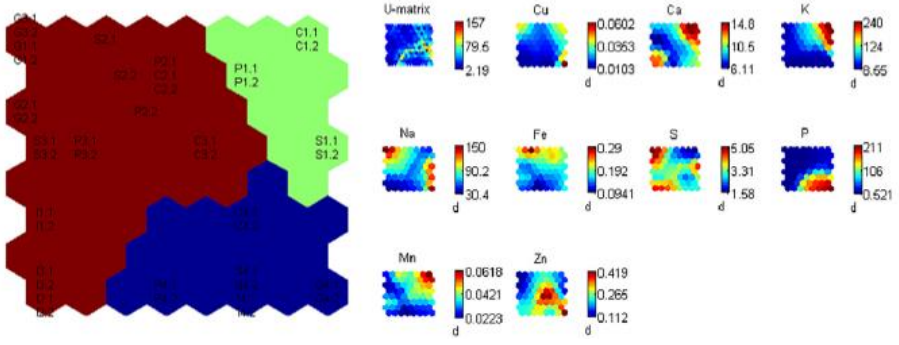


Figura 11. Mapas autoorganizativos de Kohonen, [22].

Estas cortezas tienen la capacidad de generar zonas de activación de acuerdo con estímulos externos o datos con los que fueron entrenados. Para este caso los valores de entrenamiento

son el resultado de la aplicación de la caracterización numérica para cada uno de los 81 agregados diseñados por Krumbein. Para la predicción del índice de redondez de cada uno de los agregados se acopla al SOM una red neuronal MLP que tiene como función interpretar el mapa de activación y dar una respuesta (Rango de 0.1 a 0.9). Se implementa el SOM con el objetivo de que se creen zonas de activación flexibles que permitan la posterior clasificación de agregados desconocidos. El esquema del sistema se presenta en la Figura 12.

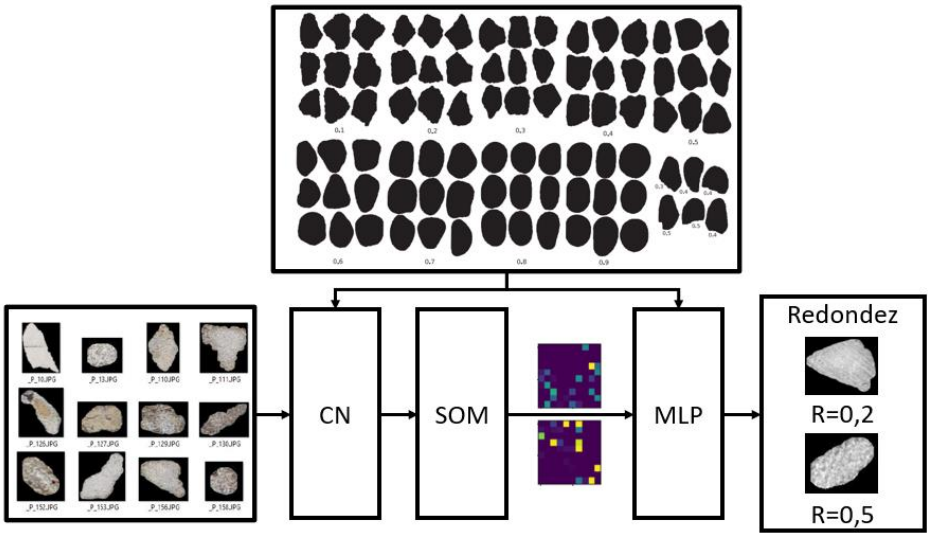


Figura 12. Modelo para índice de redondez. Fuente: elaboración propia.

De esta forma dentro de la corteza neuronal artificial generada se delimitan 9 regiones en donde se ubican los diferentes grupos propuestos por Krumbein. Se observa como los agregados de Krumbein quedan distribuidos en la Figura 13 con una corteza de 100 neuronas.

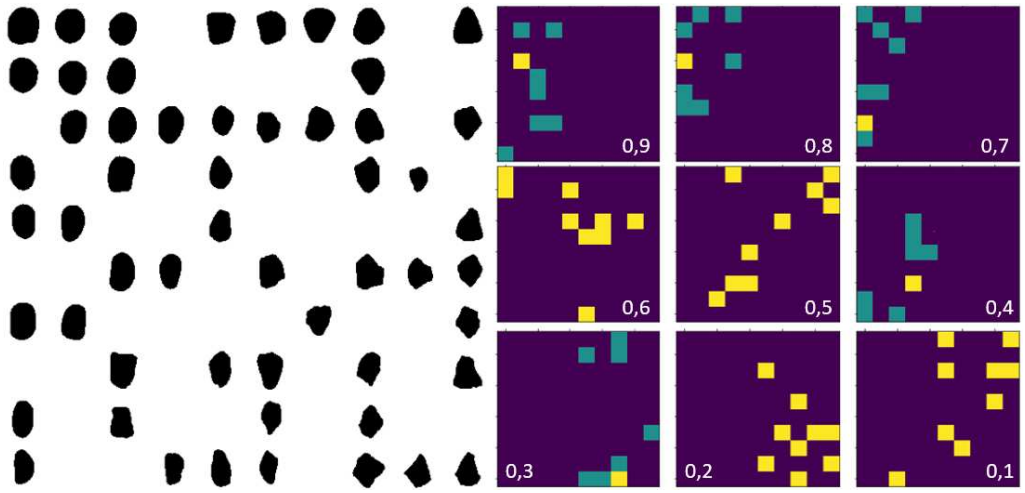


Figura 13. Mapa de activación. Fuente: elaboración propia.

Una vez con el entrenamiento del mapa se genera el entrenamiento de la capa MLP con una capa de entrada de 100 neuronas y una salida de 9 (una por cada índice de redondez). De esta forma el sistema tiene la capacidad de establecer el parámetro de redondez de acuerdo con el grafico de Krumbein para los diferentes agregados de entrada. Todos los hiperparámetros de los modelos son sintonizados mediante el método de Random Search con el fin de poder obtener la mejor configuración, [23].

3. Resultados

En la Figura 14 se presenta la respuesta y el mapa de activación para 30 agregados segmentados de la imagen de un pavimento flexible.

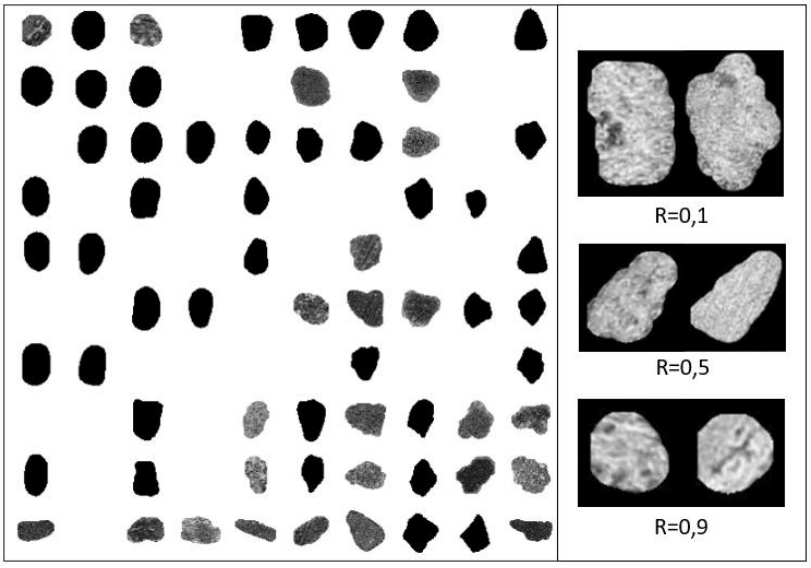


Figura 14. Respuesta del modelo. Fuente: elaboración propia.

Se debe resaltar que la respuesta del modelo es en función de un sistema entrenado con tan solo 9 imágenes por tipo de clase. Para la validación del sistema se determinaron las diferentes métricas de clasificación para los 81 datos de entrenamiento y los 80 agregados segmentados de una imagen de pavimento flexible y clasificados visualmente por un experto, los resultados obtenido se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Métricas del modelo. Fuente: elaboración propia.

Krumbein	Precision	Recall	F1 - Score	N. Muestras	
0,1	1,0	1,0	1,0	9	Datos de Entrenamiento
0,2	1,0	1,0	1,0	9	
0,3	1,0	1,0	1,0	9	
0,4	1,0	1,0	1,0	9	
0,5	1,0	1,0	1,0	9	
0,6	1,0	1,0	1,0	9	

0,7	1,0	1,0	1,0	9	
0,8	0,9	1,0	0,95	9	
0,9	1,0	0,89	0,94	9	
Accuracy			0,99	81	
Krumbein	**Precisión**	**Recall**	**F1 - score**	**N. Muestras**	**Datos de Validación**
0,1	1,0	0,91	0,95	11	
0,2	1,0	0,82	0,9	33	
0,3	1,0	1,0	1,0	5	
0,4	0,7	1,0	0,82	7	
0,5	0,85	0,85	0,8	2	
0,6	0,33	1,0	0,5	1	
0,7	1,0	1,0	1,0	5	
0,8	0,5	1,0	0,67	2	
0,9	1,0	1,0	1,0	3	
Accuracy			0,89	80	

Dentro de los resultados con los datos de entrenamiento de la tabla anterior se encuentra que el sistema tiene la capacidad de demarcar completamente las regiones de activación creadas con el SOM. Este resultado es necesario ya que, al tener únicamente 9 elementos para el entrenamiento de 9 clases, los mapas de activación para cada uno de los índices de Krumbein deben delimitarse completamente para que no exista un traslape entre las fronteras de decisión.

Los resultados de los datos de validación muestran una caracterización clara de la mezcla que es lo que se busca cuando se implementan este tipo de herramientas. Estos valores de prueba fueron tomados de una fotográfica capturada de un espécimen de pavimento flexible, los resultados muestran que ese pavimento tiene una concentración de agregado altamente

angular (índices entre 0.1 – 0.3). No se esperaba tener una distribución uniforme dentro de las clases ya que se están validando 80 agregados de una única muestra y el agregado con el cual fue fabricada proviene de una misma parte. De esta forma es evidente que este agregado comparta características morfológicas muy similares debido a su mismo origen.

Analizando los resultados de validación los índices en donde se tiene más de 5 partículas por clase muestran un F1-Score por encima de 0.8. De igual forma tomando la media del Accuracy se obtiene un resultado de 0.89 al comparar la clasificación automática versus la realizada visualmente por el experto, mostrando un elevado porcentaje de efectividad del método. Mediante estos resultados se comprueba preliminarmente el funcionamiento de la herramienta, en donde es necesario realizar un mayor número de segmentaciones manuales en mezclas de pavimento flexible fabricados con agregados de un punto de extracción que brinde una morfología más redonda para poder tener una clara distribución dentro de todas las clases.

4. Conclusiones

El modelo desarrollado presenta un buen desempeño dentro de la clasificación de agregados angulares con una exactitud de 0,88, es decir con un índice de redondez de Krumbein entre 0,1 y 0,5. Como trabajo futuro se está determinando la capacidad del modelo presentado al incluir agregados con características morfológicas más redondas. Lo anterior con el objetivo de tener un numero de partículas representativas dentro de todas las clases.

La implementación de mapas autoorganizativos de Kohonen enlazados con una estructura de redes neuronales multicapa, permitió desarrollar un sistema supervisado con la capacidad de poder determinar el índice de redondez de Krumbein, el cual es un factor de descripción del tipo de agregado de un pavimento. Por medio de esta herramienta es posible disminuir el tiempo de diseño de las estructuras al hacer automático un procedimiento que tradicionalmente se realiza de forma manual al tomar agregado por agregado y compararlo con un patrón gráfico. Generar este tipo de herramientas con imágenes bajo el contexto actual permite reducir la manipulación de los materiales y el tiempo en los laboratorios de diseño.

Agradecimientos

Este producto es derivado del proyecto de alto impacto IMP-ING-2931 financiado por la vicerrectoría de investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, a la cual los autores agradecen.

Referencias

[1] C. Katrakazas, E. Michelaraki, M. Sekadakis, and G. Yannis, “A descriptive analysis of the effect of the COVID-19 pandemic on driving behavior and road safety,” *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 7, 2020, doi: 10.1016/j.trip.2020.100186.

[2] P. Pereira and J. Pais, “Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.*, vol. 4, no. 4, pp. 316–346, 2017, doi: 10.1016/j.jtte.2017.06.001.

[3] A. P. Singh, A. Sharma, R. Mishra, M. Wagle, and A. K. Sarkar, “Pavement condition assessment using soft computing techniques,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 2018.

[4] Z. Zhang, Q. Liu, Q. Wu, H. Xu, P. Liu, and M. Oeser, “Damage evolution of asphalt mixture under freeze-thaw cyclic loading from a mechanical perspective,” *Int. J. Fatigue*, vol. 142, no. June 2020, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105923.

[5] K. B. Bai Kamara, E. Ganjian, and M. Khorami, “The effect of quarry waste dust and reclaimed asphalt filler in hydraulically bound mixtures containing plasterboard gypsum and GGBS,” *J. Clean. Prod.*, vol. 279, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123584.

[6] D. M. Kusumawardani and Y. D. Wong, “The influence of aggregate shape properties on aggregate packing in porous asphalt mixture (PAM),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 255, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119379.

[7] T. M. Al Rousan, “Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system,” Texas A&M University, 2004.

[8] C. García-González, J. Yepes, and M. A. Franesqui, “Geomechanical characterization of volcanic aggregates for paving construction applications and correlation with the rock properties,” *Transp. Geotech.*, vol. 24, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100383.

[9] J. Hu and P. Stroeven, “Shape characterization of concrete aggregate,” *Image Anal. Stereol.*, vol. 25, no. 1, pp. 43–53, 2006, doi: 10.5566/ias.v25.p43-53.

[10] T. Roussillon, H. Piégay, I. Sivignon, L. Tougne, and F. Lavigne, “Automatic computation of pebble roundness using digital imagery and discrete geometry,” *Comput. Geosci.*, vol. 35, no. 10, pp. 1992–2000, 2009, doi: 10.1016/j.cageo.2009.01.013.

[11] J. Zhang, X. Yang, W. Li, S. Zhang, and Y. Jia, “Automatic detection of moisture damages in asphalt pavements from GPR data with deep CNN and IRS method,” *Autom. Constr.*, vol. 113, no. September 2019, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103119.

[12] L. Pei *et al.*, “Pavement aggregate shape classification based on extreme gradient boosting,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119356.

[13] K. A. Ghuzlan, M. T. Obaidat, and M. M. Alawneh, “Cellular-phone-based computer vision system to extract shape properties of coarse aggregate for asphalt mixtures,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 767–776, 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.02.003.

[14] J. Kim, B. S. Park, S. I. Woo, and Y. T. Choi, “Evaluation of ballasted-track condition based on aggregate-shape characterization,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 232, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117082.

[15] O. J. Reyes-ortiz, M. Mejía, and J. S. Useche-Castelblanco, “Aggregate segmentation of asphaltic mixes using digital image,” *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 67, no. 2, pp. 279–287, 2019.

[16] S. M. E. Harb, N. Ashidi, M. Isa, and S. A. Salamah, “Improved image magnification algorithm based on Otsu,” *Comput. Electr. Eng. J.*, vol. 46, pp. 338–355, 2015.

[17] J. V. C. I. R, C. Sha, J. Hou, and H. Cui, “A robust 2D Otsu ’ s thresholding method in image segmentation q,” *J. Vis. Commun. Image R. J.*, vol. 41, pp. 339–351, 2016.

[18] O. J. Reyes-Ortiz, M. Mejia, and J. S. Useche-Castelblanco, “Digital image analysis applied in asphalt mixtures for sieve size curve reconstruction and aggregate distribution homogeneity,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s42947-020-0315-6.

[19] S. Yu, S. Jia, and C. Xu, “Convolutional neural networks for hyperspectral image classification,” *Neurocomputing*, vol. 219, pp. 88–98, 2017.

[20] V. C. Janoo, “Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials,” 1998.

[21] E. Masad, T. M. Al Rousan, J. Button, and D. Little, *Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity*. United States of America, 2007.

[22] E. dos S. Silva *et al.*, “Evaluation of macro and micronutrient elements content from soft drinks using principal component analysis and Kohonen self-organizing maps,” *Food Chem.*, vol. 273, no. May 2018, pp. 9–14, 2019, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.06.021.

[23] B. Yang, S. Yang, J. Zhang, and D. Li, “Optimizing random searches on three-dimensional lattices,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 501, pp. 120–125, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.PHYSA.2018.02.100.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

TELEMATIC ARTIFICIAL VISION PROTOTYPE FOR RECOGNITION OF CHARACTERISTICS IN PEOPLE AND VEHICLES

Prototipo telemático de visión artificial para el reconocimiento de características en personas y vehículos

Fanny Suárez Mosquera[1], Cristian Dangelis Ballén Martínez[2], Gerardo Alberto Castang Montiel[3]

Abstract

In a world increasingly connected with technology and with the growing need for security in all aspects of life, this project arises where the problem of security in educational establishments will be addressed, but it can be used in many areas, such as in hospitals, parking lots, securities transporters, airports, etc. This prototype aims to recognize patterns (Vehicle Plates) and characteristics (Facial Patterns), one of the main premises of the current project was the use of free software, to create a successful and easy-to-use solution.

Keywords: Arduino, Artificial, Characteristics, Facial, Ocr, Prototype, License plate, Recognition.

[1] Ingeniería en Telemática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Current position: Organization, Bogotá. E-mail: fsuarezm@correo.udistrital.edu.co.
[2]Ingeniería en Telemática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Current position: Organization, Bogotá. E-mail: cdballenm@correo.udistrital.edu.co.
[3] Ingeniería Electrónica, Universidad Autónoma De Colombia, Bogotá. Maestría en Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Current position: Profesor Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E: mail: gacastangm@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9788-5121

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

Resumen

En un mundo cada vez más conectado con la tecnología y con la creciente necesidad de seguridad en todos los aspectos de la vida, surge este proyecto donde se abordará el problema de seguridad en los establecimientos educativos, pero que puede ser utilizado en muchos ámbitos, como en hospitales, parqueaderos, transportadoras de valores, aeropuertos, entidades militares, entre otros. Este prototipo tiene como objetivo el reconocimiento de patrones (Placas Vehiculares) y de características (Patrones Faciales), una de las premisas principales del actual proyecto fue la utilización de software libre, para crear una solución acertada y de fácil utilización.

Palabras clave:

Arduino, Artificial, Características, Ocr, Placas, Prototipo, Reconocimiento, Facial, Vehículos.

1. Introducción

El prototipo descrito fue creado para brindar una solución acertada y fácil con la cual, los distintos planteles educativos puedan tener el conocimiento de los diferentes conductores y vehículos que prestan el servicio de ruta escolar, brindando una herramienta de validación que puede llegar a ser integrada con los sistema de registro de la secretaría de movilidad, dentro del cual se hacen el reconocimiento de patrones faciales y características todo esto apoyado

en software libre como lo es la librería Open Alpr y Face recognition, esta última a través de vectores de características de 128 puntos , que hacen una representación del rostro para su posterior comparación. Permitiendo de esta manera que la solución sea de fácil uso y de bajo costo de implementación, además de que puede ser usada en un sinnúmero de escenarios lo que la convierte en altamente escalable. Potenciando la centralización de los datos al usar una base de datos distribuida, generando una alta disponibilidad y un mayor nivel de seguridad.

2. Fase de análisis

Dentro de esta fase se realiza el análisis de la arquitectura de hardware y software que se va a utilizar, la definición de los alcances y limitaciones de este para su posterior implementación.

El objetivo aquí es Diseñar un prototipo de visión artificial para el reconocimiento facial de los conductores y placas de las rutas escolares para el ingreso y/o salida de la institución

Para el mejor entendimiento y conocimiento del proyecto se van a resaltar los términos más relevantes de este proyecto dentro de los cuales se encuentran:

OPEN ALPR

OpenALPR es una biblioteca de código abierto utilizada en el reconocimiento automático de patrones de matrículas vehiculares escrita en C ++ con enlaces en C #, Java, Node.js, Go y Python. La biblioteca analiza imágenes y secuencias de video para identificar los patrones de matrículas.

OPENCV

OpenCV es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel. Contiene más de 500 funciones que abarcan una gran gama de áreas en el proceso de visión, como reconocimiento de objetos (reconocimiento facial), calibración de cámaras, visión estéreo y visión robótica.

RSTP (Real Time Streaming Protocol)

RTSP es un protocolo no orientado a conexión, en lugar de esto el servidor mantiene una sesión asociada a un identificador, en la mayoría de los casos RTSP usa TCP para datos de control del reproductor y UDP para los datos de audio y vídeo, figura 1.

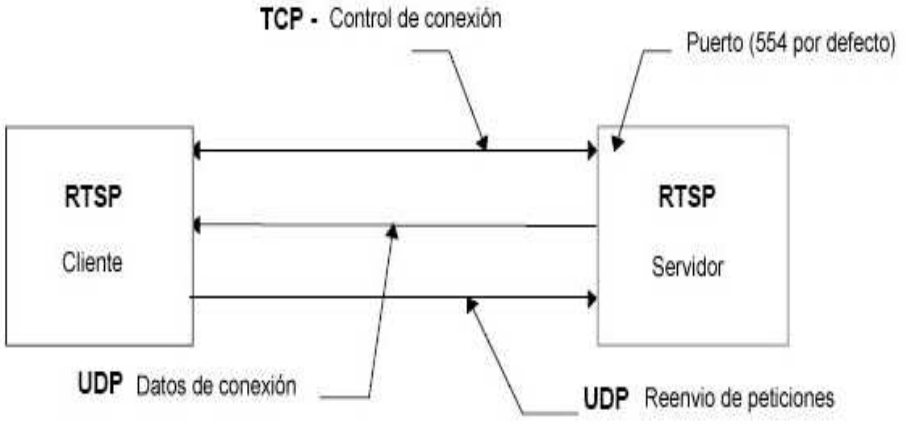


Figura. 1. Comunicación RTSP [1]

[1] Fuente:https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_transmisi%C3%B3n_en_tiempo_real

3. Fase de diseño

En esta etapa de la metodología se desarrolla el reconocimiento de los actores involucrados con el sistema y como es la interacción de estos con el prototipo, además de relacionar el modelo de hardware y software del sistema, para este se divide en el componente de Software y Componente de Hardware.

3.1 Modelo de hardware

Dentro de este proyecto este ítem específicamente es altamente escalable y configurable, ya que dentro de este prototipo se encontró la necesidad de construir un componente de hardware, que permitiera al conductor solicitar el ingreso a la institución, que iniciará el circuito de validaciones del prototipo telemático (cámara IP y los servicios rest de reconocimiento facial y de matrícula).

Este componente, está constituido de un circuito con una tarjeta Arduino, una protoboard y un pulsador, pero dada la capacidad y la interacción que este puede tener con el sistema, podría ser fácilmente adaptable a sistemas de Sensores, talanqueras, puertas automáticas, registradoras y demás dispositivos de acceso.

3.2 Modelo de software

Como se indicó anteriormente este prototipo manejó dos frentes entre ellos; el de software que será la interacción del sistema con el usuario final, este componente es el más importante del

proyecto, el sistema posee componentes de interfaz gráfica donde se visualizarán los módulos de administración y los de configuración, además de ver las alertas con cada uno de los distintos ingresos que ocurren.

Este se desarrolló con tecnologías libres y código abierto como lo es Python, Java, JSF, se usó lenguajes de Programación Java, además de usar herramientas de libre distribución para su desarrollo como NetBeans, notepad ++, Visual Studio Code, y motor de Base de datos Mysql, Maria DB.

3.2.1 Modelo base de datos

El modelamiento de la base de datos es tal vez el punto, más importante en el desarrollo del software, ya que es a partir de este diseño que se inicia la planeación del resto del sistema y de su interacción, además de manejar la base de datos Distribuida, para mantener los estándares de confiabilidad y de disponibilidad requeridos para el correcto funcionamiento. Para este proceso se usó el motor de Base de datos MARIA DB, con licencia GPL, en la cual se realizó la configuración para poder establecer la base de Datos distribuida.

3.2.2 Actores del sistema

Para este sistema se definieron las interacciones de los usuarios, pero como se ha indicado anteriormente las especificaciones pueden cambiar de acuerdo al entorno que se vaya a utilizar, ya sea con la separación Hardware /Software o el conjunto de los dos. Se definieron en este apartado los siguientes actores:

Tabla 1.Definición actores del sistema.

Actor	**Descripción**
Administrador	Actor encargado de la administración de alertas, personal y vehículos autorizados para el ingreso a la institución.
Vigilante	Actor que recibe las notificaciones de un ingreso no autorizado a la institución, persona encargada de conceder o denegar el ingreso y/o salida de la institución
Conductor	Actor que interactúa con el sistema a través de la placa Arduino, para este prototipo.

Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Arquitectura

En todo proyecto es indispensable pensar en una buena arquitectura, porque esta nos define una ruta por la cual vamos a empezar a construir nuestro sistema. La forma en la cual van a interactuar los componentes con otros sistemas y así conseguir el objetivo principal que es tener un prototipo funcional, listo para su implementación.

3.2.3.1 Reconocimiento de matrículas con openalpr

Se utilizó OpenALPR, que es una biblioteca que ayuda al reconocimiento automático de matrículas, esta es de código abierto. La cual opera de la siguiente manera para el flujo de video:

1. El flujo de imágenes se extraerá constantemente de la cámara IP en formato MJPEG a través de RTSP que normalmente se hace sobre un formato de video, dentro del cual si la placa se puede visualizar OpenALPR comenzará la validación de esta.

2. El agente iniciara el proceso automáticamente y alpr procesa el flujo lo más rápido posible mientras busca imágenes de placa.

3. Cuando se detectan una o más placas, la información se escribirá en una cola de beanstalkd local (nombre del tubo "alprd") como datos JSON.

4. Opcionalmente, alpr también guardará la imagen en una ubicación configurable como un jpeg.

5. Alpr también ejecutará un proceso separado que vaciará la cola beanstalkd y cargará los datos al servidor a través de HTTP.

Se presenta a continuación la Figura 2, donde se describe el funcionamiento de la librería descrita.

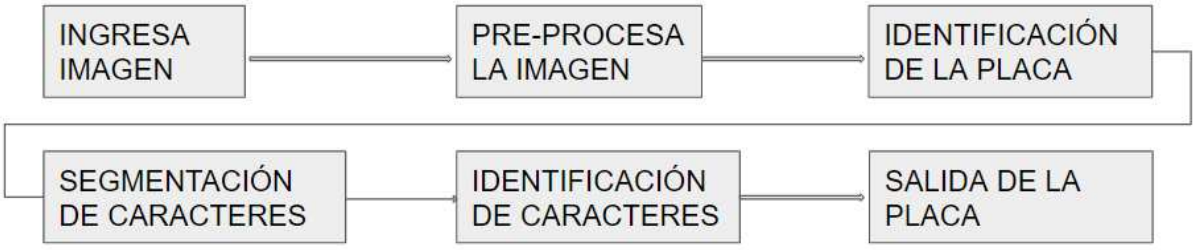


Figura 2. Funcionamiento OpenALPR. Fuente: elaboración propia.

Esta biblioteca trabaja con Tesseract y OpenCV para el reconocimiento de caracteres, a partir de la versión 4, Tesseract para reconocer una imagen que contiene un solo carácter, utiliza una red neuronal convolucional (CNN). Para el caso de texto de longitud variable lo resuelven

usando RNN y LSTM (Memoria a largo plazo) que es reconocimiento basado en aprendizaje, figura 3.

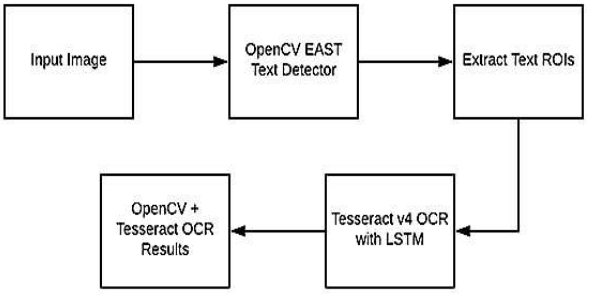


Figura 3 Pipeline Opencv[1]

La operación de OpenAlpr con un circuito de imágenes es la siguiente:

1. Para comenzar, aplicaremos el detector de texto EAST (Efficient and Accurate Scene Text Detector) de OpenCV para detectar la presencia de texto en una imagen. El detector de texto EAST con ayuda de una red neuronal nos dará las coordenadas del cuadro delimitador (x, y) del ROÍ de texto.
2. Se extrae cada uno de estos ROÍ y luego los pasaremos al algoritmo de reconocimiento de texto de aprendizaje profundo LSTM de Tesseract v4.
3. La salida del LSTM que nos dará los resultados.

[1] **Fuente:** https://www.pyimagesearch.com/2018/09/17/

3.2.3.2 Reconocimiento de rostros con face recognition

Para esta implementación se usó Face recognition, esta librería construida en python a partir del kit de herramientas Dlib hecho en C++ contiene algoritmos de aprendizaje profundo, el cual permite modelar abstracciones brindando resultados más exactos, alcanzando el modelo una exactitud hasta del 98,39%.

Algunas de las técnicas y algoritmos utilizadas por Dlib son:

- Algoritmos de aprendizaje profundo (LSTM).
- Algoritmos numéricos de propósito general optimizados L-BFGS, Levenberg-Marquardt, BOBYQA entre otros.
- Algoritmos de inferencia de modelos gráficos, con ayuda de las cadenas de Marvok, Redes bayesianas dentro del muestreo de Gibbs.
- Procesamiento de imágenes con ayuda de los algoritmos SURF, HOG y FHOG.

Existen diferentes métodos para la comparación de los rostros, como por ejemplo la cascada, que analiza cientos de pequeños patrones y características que deben coincidir, similar a como ocurre con la detección de una huella, pero este método no es apropiado para el presente proyecto debido a su imposibilidad de detección de rostros perfilados o bajo oclusión.

Otros, como el utilizado en el presente proyecto, basados en el aprendizaje métrico profundo, se apoyan en vectores de características de 128 puntos, que hacen una representación del rostro, que es similar a lo que se ve en la figura 4.

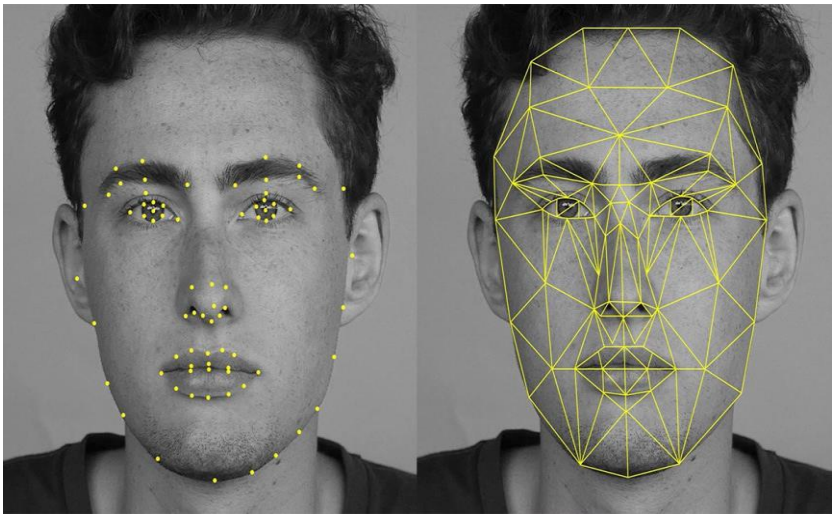


Figura 4. Vector de puntos[1]

Con la información presentada, se logra identificar el rostro por medio de los siguientes pasos, figura 5:

1. El modelo de detección de rostros detecta la posición donde se encuentra el rostro dentro de la imagen.

2. Alimentamos el modelo de incrustación para obtener un vector de características del rostro de tamaño 128.

3. Ahora compara este vector con los de sus “amigos” y encuentra el más similar.

[1] **Fuente:** https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS0M

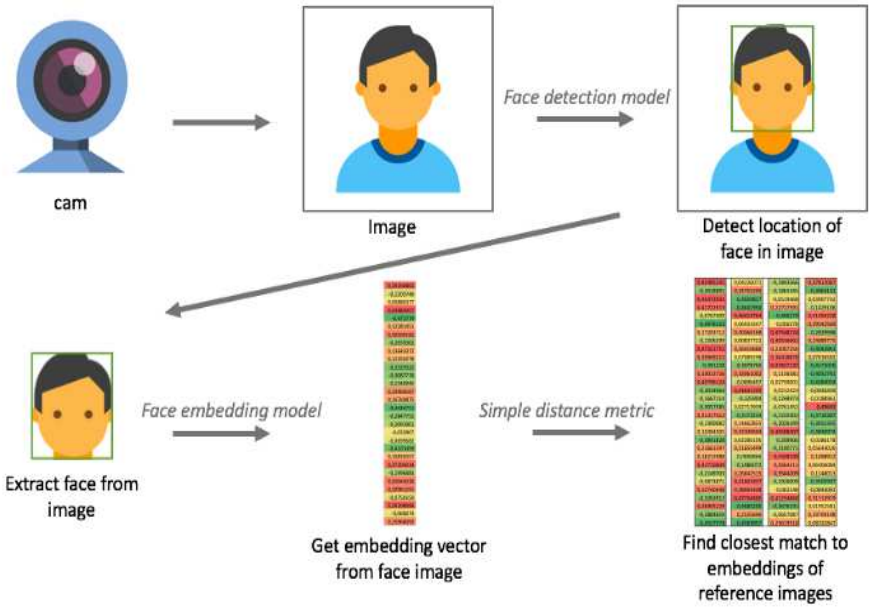


Figura 5. Ciclo de reconocimiento[1]

Los algoritmos pueden llegar a tener una exactitud cercana del 99.38% con el umbral de distancia entre puntos correcto.

4. Fase implementación

En esta etapa del proceso es donde se puso en funcionamiento las acciones para que el prototipo concluya de manera satisfactoria, donde se definió la infraestructura para su funcionamiento, que presenta a continuación en la figura. 6

[1] **Fuente:** https://miro.medium.com/max/700/1*R-ObQiGjDK4Njd5tSQEz5g.png

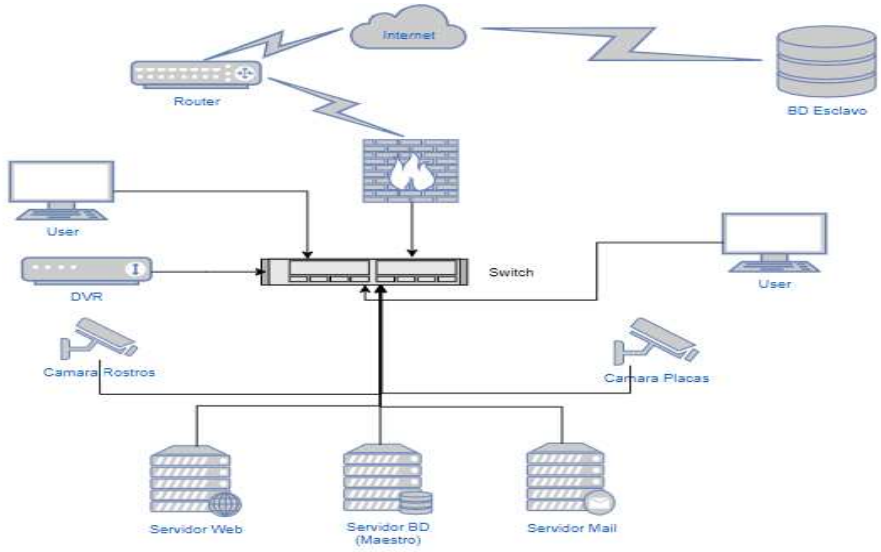


Figura. 6. Implementación. Fuente: elaboración propia.

El prototipo, figura 7, posee un frente de software que se divide en varios componentes que interoperan entre sí, ellos son:

1. **Wiring de Arduino:** Este código está guardado en el microcontrolador de Arduino para realizar el inicio de la petición y comenzar todo el proceso. Que puede ser reemplazado por el componente de acceso que la aplicación requiera.
2. **Código Python:** Es el backend de la aplicación, en él se encuentra el procesamiento de las imágenes y comparación de estas.
3. **Código Java:** Se considera el FrontEnd del sistema telemático, ya que proporciona una interfaz amigable a los actores Administrador y Vigilante que componen el sistema.

Para tener una visión mejor del funcionamiento del sistema, validamos el siguiente diagrama

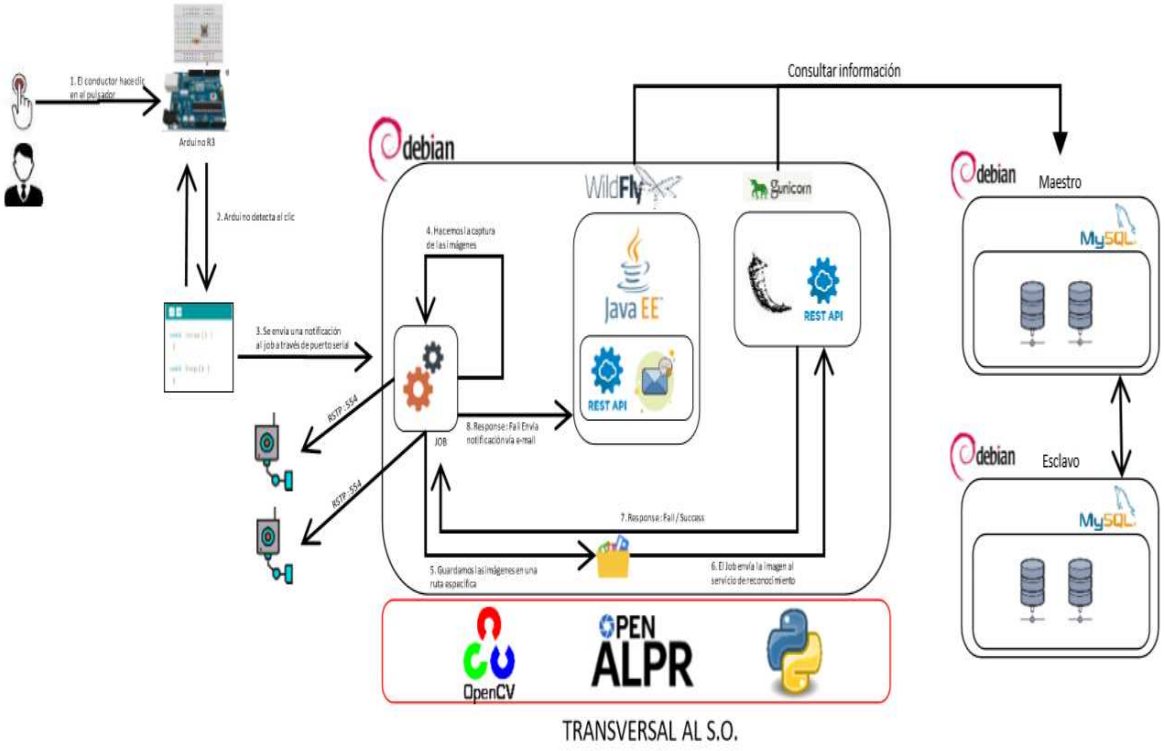


Figura 7. Visión general del prototipo. Fuente: elaboración propia.

Para comprender un poco más, el diagrama anterior nos describe las tecnologías usadas y el flujo de la información.

1. Para el caso del prototipo utilizamos un Arduino y un pulsador que va a ser presionado por una persona para comenzar el flujo, el cual podría ser reemplazado por una barra de acceso o un sensor de movimiento.

2. El algoritmo de la placa Arduino procesa el mensaje enviado a través de puerto serial y envía una alerta al JOB (Tarea automática)

3. Realiza la captura del rostro y de la placa del vehículo y se guarda en una carpeta.

4. El JOB (Tarea programada) envía las imágenes en base64 al servicio de reconocimiento para ser analizadas.

5. El servicio genera una respuesta informando si el reconocimiento fue satisfactorio o erróneo al JOB

6. Si todo fue satisfactorio se da el acceso correspondiente, de lo contrario envía un mail a una cuenta configurada previamente indicando que hubo un acceso no autorizado.

4.1 Integración hardware / software

Después de realizar el diseño, en esta fase se procede a hacer que los dos componentes interactúen entre sí y den vida al producto final, para ello se definieron los siguientes elementos para el funcionamiento:

1. Modelo de hardware (Componente de acceso, cámaras)

2. Job y servicios Web (Comunicador entre la base de datos y la aplicación, es quien inserta las notificaciones y quien valida los distintos rostros y placas)

3. Aplicación Web (JEE)

5 Fase de pruebas

La eficiencia de un proyecto es definida por el ciclo de pruebas, por este motivo, las actividades realizadas durante esta fase, busca identificar los logros y limitaciones obtenidos en el proyecto, como se describe a continuación. Lo que se debe tener para esta fase es un vehículo y una persona los cuales va a realizar la simulación de ingreso a la institución. La primera imagen es la captura del vehículo para obtener las placas, figura 8.



Figura 8. Placa Vehículo[1]

Al analizar la imagen con el sistema de reconocimiento obtenemos los siguientes resultados.

[1] **Fuente** : https://carros.tucarro.com.co/

```
plate0: 10 results
    - UGU286      confidence: 94.1289
    - UGU2B6      confidence: 85.1463
    - U6U286      confidence: 84.3539
    - UGUZ86      confidence: 83.4433
    - UG0286      confidence: 81.8547
    - UGD286      confidence: 81.659
    - 0GU286      confidence: 81.6427
    - DGU286      confidence: 81.6177
    - OGU286      confidence: 81.5763
    - UGO286      confidence: 81.4162
```

Figura 9. Identificación placas vehiculares. Fuente: elaboración propia.

Una lista de 10 posibles placas, y un porcentaje de asertividad, la cantidad de resultados es parametrizable, podemos obtener desde 10 resultados hasta 50. El porcentaje nos indica que caracteres tienen más similitud a la imagen de la placa vehicular así, logrando obtener la placa correcta.

En cuanto al reconocimiento facial, lo primero que se debe tener al momento de iniciar, son las imágenes con los rostros de las personas que se desea identificar, lo ideal es obtener los dos perfiles de la persona y una foto de frente con el fin de asegurar mayor asertividad en el reconocimiento, con esto, el algoritmo es capaz de reconocer si el rostro que analizará posteriormente es de la persona deseada como se ve en la Figura 10.



Figura 10. Identificación Facial. Fuente: elaboración propia.

Existen algunos lineamientos que se deben tener en cuenta para el correcto funcionamiento, como la distancia luminosidad, resolución de la cámara y la cantidad de rostros que pueden aparecer en la imagen. El algoritmo se encarga de hacer la comparación con las imágenes previamente guardadas con la imagen tomada para la posterior identificación.

Como se ve en la figura 11, el algoritmo de validación regresa un vector con la respuesta del análisis hecho, En esta fase se realizaron las pruebas de reconocimiento tomando como referencia las imágenes guardadas previamente en el caso de los rostros y validando la secuencia de caracteres para las placas , donde se pasó por cada uno de los pasos descritos en la Figura 7, retornando las validaciones posteriores de haber tomado las dos fotos respectivamente, si las validaciones son verdaderas se dará ingreso a la institución de lo contrario se realiza la notificación al sistema.

```
import face_recognition

picture_of_me = face_recognition.load_image_file("me.jpg")
my_face_encoding = face_recognition.face_encodings(picture_of_me)[0]

unknown_picture = face_recognition.load_image_file("unknown.jpg")
unknown_face_encoding = face_recognition.face_encodings(unknown_picture)[0]

results = face_recognition.compare_faces([my_face_encoding], unknown_face_encoding)

if results[0] == True:
    print("It's a picture of me!")
else:
    print("It's not a picture of me!")
```

Figura 11. Algoritmo Face Recognition[1]

[1] **Fuente**: https://github.com/openalpr/openalpr

6. Fase de cierre

Durante el proceso del presente proyecto la etapa de cierre fue una de las más importantes, ya que en esta se evidencio el resultado final, además de verificar el cumplimiento de los objetivos y los balances de las pruebas.

Dentro de las cuales salieron las siguientes consideraciones: Los niveles de asertividad del prototipo puede variar, dependiendo de las condiciones de distancia, comparativo (Imágenes que se cargan previamente para la validación del rostro), luminosidad. Esto se puede deducir ya que en las pruebas realizadas cuando no se contaban con las condiciones indicadas los niveles de asertividad bajaban, cuando el patrón del cual se iba a realizar la comparación no era el indicado podríamos negar una entrada del conductor cuando en realidad sí lo era. Cuando las placas contaban con alguna obstrucción o un carácter que el sistema podría confundir, la efectividad del sistema se veía alterada, por lo que era de vital importancia encontrar las condiciones para que el sistema tuviera la mayor efectividad posible.

Dentro de las pruebas realizadas se obtuvieron algunas pruebas fallidas al momento de reconocer los rostros en escenarios como : imágenes precargadas de no muy buena calidad y en ángulos incorrectos, al momento de tomar la foto para la comparación hubiera ruido (otro rostro cercano) , para las placas cuando esta posea algún elemento que pudiera hacer cambiar uno o varios caracteres (como los tornillos cerca de una letra o número).Para las pruebas

nocturnas se evidencio que la aplicación es bastante efectiva y que se debían de garantizar las mismas condiciones anteriormente descritas.

Por esta razón se evidencia que el nivel de efectividad del prototipo es aceptable y que fácilmente puede ser incluido en escenarios más robustos, sacando provecho de su versatilidad.

Para el caso de las placas se encontró que el prototipo puede ser altamente adaptativo ya que OCR no solo reconoce el modelo de las placas que se maneja como estándar en Colombia, sino que también reconoce las parametrizadas en el sistema, [1].

6.1 Trabajos actuales

Para tener un panorama más completo de lo potente de la herramienta Open ALPR la cual utiliza OpenCv, se investigó y se evidencia que estas librerías tienen un uso bastante amplio desde la implementación de reconocimiento de rostros en los principales aeropuertos, hasta ser una solución para la óptima clasificación de frutas con altos estándares de calidad, a continuación, se describen los escenarios.

- **Aeropuertos**

En los grandes aeropuertos de todo el mundo ya la opción más cercana y casi inminente es la validación de los rostros de los pasajeros que ingresan a ellos diariamente, como el aeropuerto de Dulles Washington, donde se implantó el sistema de reconocimiento Facial para el

embarque y desembarque de pasajeros, donde se utilizan técnicas de aprendizaje y reconocimiento profundo que son las mismas de la librería Opencv.

Este sistema es altamente efectivo ya que 3 días después de su implantación y puesta en funcionamiento, el sistema detectó a una persona que portaba un pasaporte falso [2], dejando en evidencia la alta efectividad del reconocimiento y la urgencia con la que los aeropuertos deberían implementar estos sistemas para el reforzamiento de la seguridad dentro de los mismos.

- **Clasificación de frutas**

Las aplicaciones que se han implementado usando esta librería y variaciones de otras para complementarlas son a disposición de la imaginación y los escenarios que se presenten, por ejemplo, se ha usado esta librería para la clasificación de frutas como el mango Tommy [3], el café, donde se hacen comparaciones con el ideal y se verifica cuales cumplen con los estándares.

6.2. Trabajos futuros

Esta aplicación es altamente escalable y modular para poder ser usada en otros trabajos, donde se puede integrar de manera sencilla, en esta versión usada en el proyecto o en su forma paga la librería Open Alpr ya que esta versión implementa reconocimientos de patrones mucho más profundo llegando incluso a detectar placas de varios países, color, marca de vehículo y modelo, en cuanto a Face recognition puede ser integrada fácilmente.

Aplicaciones de entornos y Salidas seguros:

Al poder crear un reconocimiento facial las bases policiales integradas con las soluciones de Distribución de las bases de datos le brindarán una potente herramienta para ingreso a escuelas de artillería, cárceles, aeropuertos, además de la utilización de OpenCv que detectan los vehículos de los mismos y podría hacerse frente a una comparación doble, detección de prófugos de la justicia o requeridos por la ley.

Aplicaciones Comunes:

OpenAlpr podría ser usada en centros comerciales para identificación de la placa, en transportadora de valores, tripulantes de los vehículos encargados de transportar el dinero y para la validación del camión en el que se transportan, en hospitales para identificación de ambulancias y personal, en los bancos y prácticamente en todos los lados donde se necesite verificación continua de patrones y características en personas y objetos.

7. Conclusiones

Como resultado de la presente investigación y posterior implementación del prototipo descrito, es posible concluir que el software y las librerías bajo licencia Open Source permiten crear soluciones que facilitan algunos de los desafíos del mundo moderno.

Dentro del presente proyecto los resultados obtenidos en la fase de pruebas fue excelente, teniendo en cuenta que para los reconocimientos de rostros solo un par de ellas fallaron y fue porque se encontraba un doble rostro en el ángulo de la cámara, para el de las placas los

resultados fueron precisos, pero se evidenciaron escenarios donde las placas con algunos caracteres como los B,O,I,D,Q,Z pueden ser confundidos por 8,0,1,0,0,2 respectivamente , por eso fue necesario ajustar el formato del país y poder obtener los ángulos correctos.

La implementación de tecnología como la descrita anteriormente con reconocimiento de patrones, permiten una infinidad de aplicaciones en contextos diferentes, desde la selección de frutas, objetos, hasta aplicaciones como las que estamos visualizando en la actualidad (toma de la temperatura corporal), validaciones en centros comerciales, aeropuertos, hoteles de los rostros para identificación de pasaportes, check in entre otros.

Referencias

[1] Diego Heras, “Clasificador de imágenes de frutas basado en inteligencia artificial”, *Killkana Técnica,* Vol. 1, no. 2, pp. 21-30, 2017.

[2]SicTransCore Latinoamérica, *Sic TransCore Sistemas de Identificación y control vehicular*, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.sictranscore.com/

[3] V. M. Arévalo, J. González, G. Ambrosio, La Librería De Visión Artificial Opencv Aplicación A La Docencia E Investigación, Dep.Sis. y Aut. Universidad de Málaga, España. [Online]. Disponible en: http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/arevalo2004lva1.pdf

[4] Bastián Nicolás Carvajal Ahumada, *Reconocimiento Fotográfico De Patentes*, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica De Valparaíso, Valparaíso, Ciudad de Chile, 2018.

[5] Guerra Monterroza, E. J. (2008). Reconocimiento de primitivas 3D, usando autocorrelación y ANFIS. Visión electrónica, 1(1), 56-61. https://doi.org/10.14483/22484728.251

[6] Giraldo Ramos, F. N., Gonzalez, F., & Camargo Casallas, E. (2011). "Algoritmos de procesamiento de imágenes satelitales con transformada Hough. Visión electrónica, 5(2), 26-41. https://doi.org/10.14483/22484728.3568

[7] Jiménez Moreno, R., Martínez Baquero, J. E., & Rodríguez Umaña, L. A. (2018). Sistema automático de clasificación de peces. Visión electrónica, 12(2), 258-264. https://doi.org/10.14483/22484728.14265



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

FARAWAY AGRICULTURE: REMOTES TECHNOLOGIES FOR PROCESSES SUPERVISION

Agricultura Distante: Tecnologías Remotas para supervisión de procesos

Fabián Camilo Castañeda Árias[1], Kristel Solange Novoa Roldán[2]

Abstract

A great technological advance has been achieving to know immediately values of critical industrial processes, regardless of distances or geographical factors where they are located; Such is the case of agriculture, a vital industry during this 2020 pandemic. Although much of the world was not prepared to face this "new reality" where distancing and remote communication prevail, many sectors had already been working with the premise of monitoring their behavior. This article presents a remote crop monitoring project, by means of IoT (Internet of Things) platforms at a workstation distant from the user, with automation devices that allow the display and adjustment of critical variables for the process. The information generated is sent through IoT protocols to a command station where the end user can monitor immediate

[1] Ing. En Control, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. E-mail: fccastannedaa@correo.udistrital.edu.co.

[2] Ingeniera en Control, Especialista en comunicaciones Industriales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Docente: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail: ksnovoar@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2951-676X

changes in the development of the crop, and thus take actions to mitigate effects on the quality of the final product, obtaining a practical way to monitor changes in main variables, allowing better ways to control processes and their results.

Keywords: Agro-tech, communication, distancing, IoT, platform, remote, supervision.

Resumen

Un gran avance tecnológico ha sido poder conocer con inmediatez los valores de procesos críticos industriales, sin importar distancias o factores geográficos dónde se localizan; tal es el caso de la agricultura, industria vital durante esta pandemia del 2020. Si bien buena parte del mundo no estuvo preparada para enfrentar esta “nueva realidad” donde priman el distanciamiento y la comunicación remota, muchos sectores ya venían trabajando con la premisa de supervisar el comportamiento de estos. Este artículo da a conocer un proyecto de monitoreo de un cultivo remoto, por medio de plataformas IoT (*Internet de las Cosas*) en una estación de trabajo distante al usuario, con dispositivos de automatización que permiten mostrar y ajustar variables críticas para el proceso. La información generada se envía por medio de protocolos IoT a una estación de mando donde usuario final puede vigilar cambios inmediatos en el desarrollo del cultivo, y así tomar acciones para mitigar afectaciones en la calidad del producto final, obteniendo una manera práctica de hacer seguimiento a cambios en variables principales, permitiendo mejores formas de controlar procesos y sus resultados.

Palabras clave: Agro-tech, comunicación, distanciamiento, IoT, plataforma, remota, supervisión.

1. Introducción

Durante el siglo XX se han desarrollado numerosas técnicas para optimizar procesos en los ámbitos productivos, comerciales y de servicios, incluyendo estrategias para la supervisión y el seguimiento de plantas que se encuentran en locaciones remotas, tales como los cultivos de producción para alimentos y materias primas. Una de estas técnicas aplicada principalmente en la industria manufacturera es el sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), el cual es definido por Daneels y Salter [1], como una arquitectura de sistemas de control articulados con un software que se instala en una unidad de control, que interactúa con elementos de "control distribuido" localizados en la planta a intervenir (ej. cultivos) [2], y que permite tener de forma casi inmediata la información sobre variables críticas, su estado, errores, y acciones a tomar en caso que éstas se hallen desviadas de sus valores normales de trabajo.

Colombia es un país con una gran biodiversidad de plantas, en dónde existe la creciente necesidad de optimizar todo el proceso productivo, en especial debido al brote del COVID-19, que ha impedido desplazamientos hacia los campos de trabajo, y es allí donde toma relevancia el *Internet de las cosas* (*Internet Of Things*) o IoT, pudiendo tomarse como evolución del SCADA, traída por el auge de la conectividad, la rapidez del crecimiento del internet, la

necesidad de tener la mayor información disponible sobre los procesos y lo práctico de enviar y tener alojada dicha información en una nube informática [3], [4], que tienen como características: la gran distancia que puede separar al usuario de la ubicación, el difícil acceso geográfico, la complejidad del cultivo para tender buses de comunicación, la necesidad de escalabilidad que permita aumentar las variables a supervisar y tener más datos para tomar decisiones o llevar indicadores, y evitar tener que dirigirse a zonas apartadas o con riesgo epidémico latente.

Actualmente se ha logrado un grado de madurez en implementaciones de plataformas del IoT concierne (Microsoft Azure®, Amazon AWS®, ThingsBoard® ,) las cuales no se limitan a una única aplicación, sino que permiten personalizar las opciones que ofrecen tanto a desarrolladores como a clientes; estas deben ofrecer de forma balanceada “habilitación de aplicaciones, agregación de datos y almacenamiento, y gestión de la conectividad” [5] ;existen comercialmente soluciones industriales aplicadas: el producto con su interfaz, hardware y conectividad a nubes [6]–[8] , y otras discretas hechas a medida o basadas en proyectos [9]–[11] , exponiendo que en el campo del Agro-Tech se tiene una nueva ventaja, acelerada en gran parte por el brote del COVID-19 y todas las restricciones y condiciones que nos han puesto [12]. Este articulo propone una solución para monitoreo de una variable crítica en un cultivo, la presión de agua de riego: se describen el sistema y las partes que lo componen (breve repaso teórico, descripción de la solución y sus partes, interacción entre elementos),

seguido por una explicación de la plataforma y de los nodos de automatización e IoT utilizados, y finalmente pruebas realizadas a la solución y conclusiones de la misma. El diseño presentado consta de 3 componentes básicos: la sensórica puesta en campo, el nodo de adquisición de información (implementado en un *Controlador Lógico Programable* PLC) y el soporte de conectividad web.

2. Materiales y Metodología

2.1. Esquema de implementación

En la Figura 1 se representa la arquitectura en general usada para aplicaciones agroindustriales.

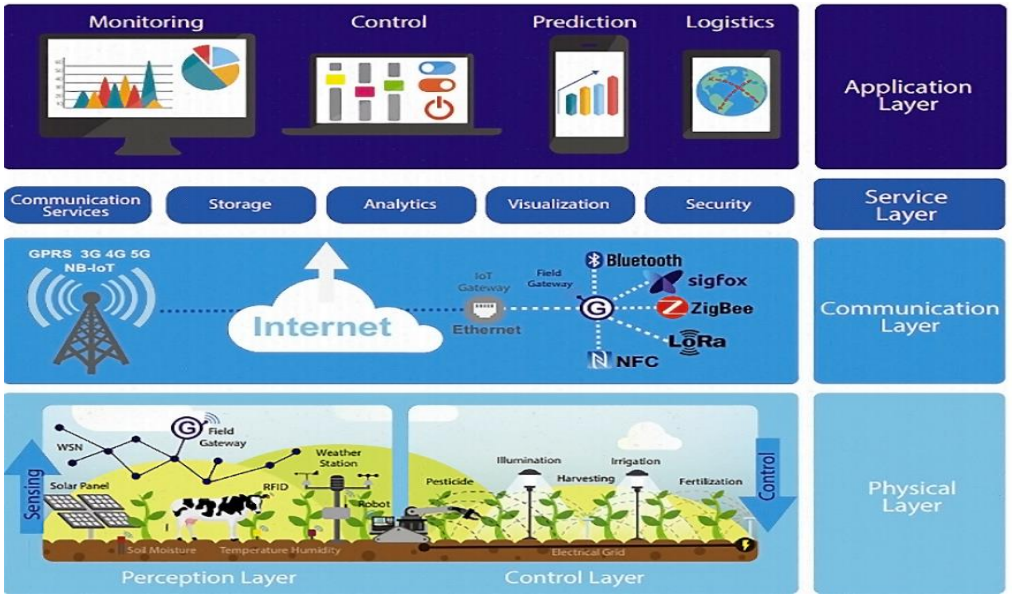


Figura 1. Diseño de red para aplicaciones agro-tech. Fuente: J. Talavera y asc. Pp. 294, [13]

La capa física corresponde al cultivo remoto, y las variables críticas monitoreadas se relacionan con la irrigación del mismo. La capa de comunicación se establece con una plataforma IoT en nube para permitir la interacción remota; la capa de servicio se encuentra embebida en la misma de aplicación por medio del conjunto PLC + *dashboard* que presenta las variables.

El esquema de la solución organizado por conformación consta de un componente de hardware: los equipos instalados en campo para la adquisición de señales, la supervisión y la comunicación de las variables; y otro de software: el programa de captura de información y la interfaz del usuario final.

2.2. Componentes de Planta

La irrigación del cultivo es el sistema a controlar dentro de la planta remota, el cual se muestra interconectado esquemáticamente en la figura 2. Éste se conforma de tres partes: 1) el hardware y los equipos, los cuales comprenden los actuadores como el variador de frecuencia, controlador PLC para accionar equipos, leer datos de variables, establecer comunicación, llevar registros, etc. Y las estaciones de trabajo en computador tanto local como de forma remota; 2) el software utilizado, tanto en la conectividad, como el usado para indicar las variables del proceso; y 3) la plataforma del IoT como soporte web tecnológico.

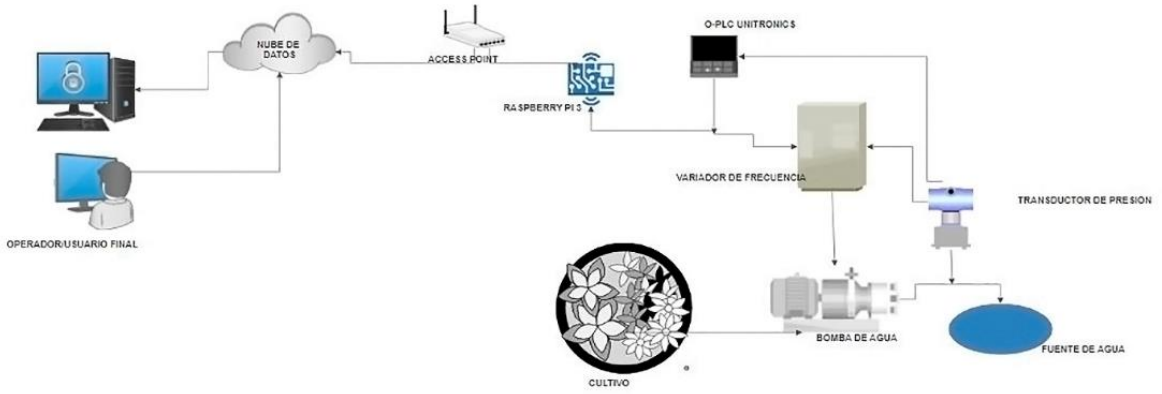


Figura 2. Estructura general de planta física. Fuente: elaboración propia

No está en el alcance del artículo el dimensionamiento de equipos, ya que se aborda sólo el enfoque del control. La bomba es manejada por un variador de frecuencia (VDF) proporcionado para manejar el motor de la bomba centrífuga, el cual también es de alimentación trifásica, éste VDF cuenta con protocolo de comunicación integrado MODBUS RTU, aunque no se limita a este bus de campo ya que puede aplicarse otro dependiendo de la topología. Se optó por un equipo con bus de comunicación MODBUS-RTU RS485 que es de los más empleados en la industria por su sencillez de implementación y robustez de capa física.

La bomba de agua es tipo centrífuga, en la cual el agua de riego alcanza su presión de trabajo según la velocidad a la que el motor haga girar su impulsor y para ello se sirve del variador de frecuencia.

En esta aplicación el VDF integra un modo para controlar la presión por medio de un lazo de control PI (control Proporcional-Integral) usando un transductor de presión, figura 3, con

tensión de alimentación que viene del propio variador (voltaje de trabajo oscila entre 10-30 VDC) con salida de señal a 4-20 mA proporcional a la presión máxima del transductor. El PLC empleado es de tipo OPLC (*Operator Panel* + PLC), que permite optimizar la tarea de monitoreo al no requerir de un computador en sitio, y establece comunicación con el VDF (Modbus RS485) y con el sistema de monitoreo por medio de ETHERNET.



Figura 3. Transductor de presión. Fuente: [14]

Se pueden integrar transductores que brinden datos adicionales sobre variables críticas para el proceso: humedad del suelo, temperaturas, etc. Dejando como punto clave de la supervisión de variables, determinar cuáles son aquellas fundamentales para el proceso. Ahora, para el desarrollo de la parte de interfaz, se tuvieron en cuenta las necesidades particulares para la aplicación:

- Visualizar valores actuales de presión de trabajo, *set-point* de presión, estado de la bomba de agua: corriente de motor, si está en marcha o en paro el motor, o si presenta alguna falla durante su funcionamiento.
- La interfaz gráfica debe ser ligera, de tal forma que al implementar el *dashboard* o panel de instrumentos, la cantidad de datos transferida no colapse la comunicación entre servidor y cliente.
- Dar al sistema de cultivo remoto (planta, bombas de agua, entre otros) comandos de marcha y paro, ajuste de *set-point* de presión de bomba hidráulica que permita mantener un flujo de agua constante y óptimo según el requerimiento de agua de la plantación.

El resultado final de la interfaz se observa en la figura 4: a la izquierda la pantalla de uso en el OPLC y a la derecha el *dashboard* o panel de control visto del lado del usuario final.



Figura 4. Interfaz HMI: Local en cultivo-Remota en sitio de usuario final. Fuente: elaboración propia.

2.3. Desarrollo de la aplicación

Luego de establecer los lineamientos requeridos para la aplicación, se procedió con la programación de los componentes del sistema, según el esquema de interconectividad planeado en la figura 5 y donde se ubican los bloques principales del sistema:

- La sensórica en campo, consta de los sensores de presión, (opcionalmente de humedad y temperatura en suelo) y su cableado al PLC principal.
- El nodo de adquisición de información, compuesto por el PLC y las interfaces local y remota de supervisión.
- El soporte de conectividad web, que se compone por la plataforma de conexión a IoT implementada en Raspberry Pi, la conexión a internet (sea por cable o tipo Wireless) junto con el *dashboard* y la integración entre estos por medio de la herramienta *Node-RED.*

2.3.1. La programación de conectividad web

El desarrollo de la conectividad se basó en combinación de varias plataformas, que interactúan entre sí para hacer puente entre la planta física y el punto del usuario final.

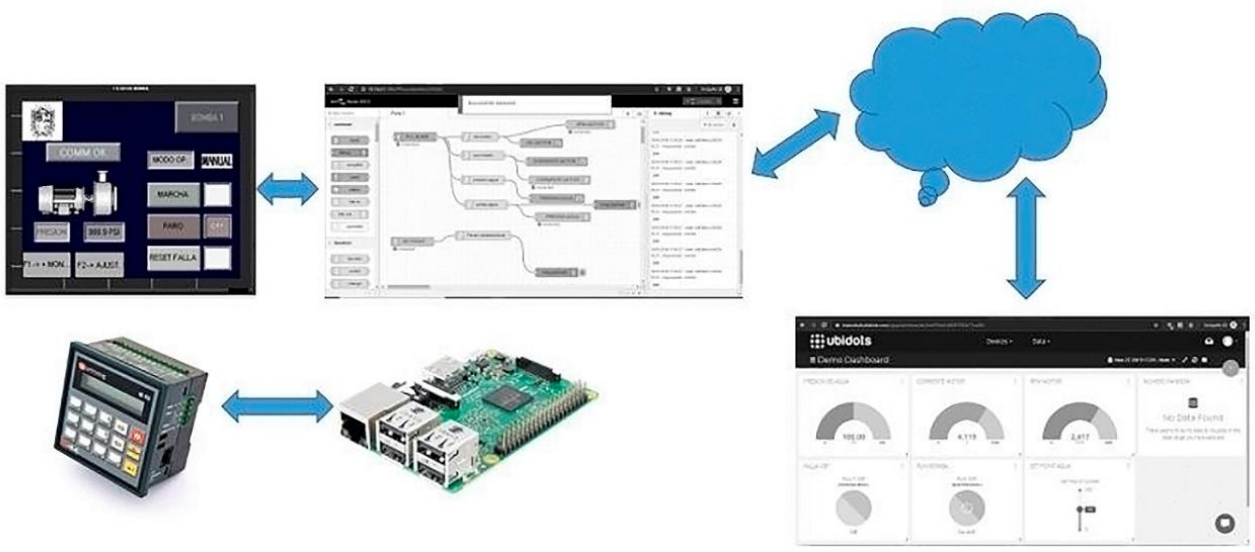


Figura 5. Flujo de información desde PLC hasta dashboard. Fuente: elaboración propia.

- El OPLC cuenta con comunicación MODBUS-TCP por medio de puerto Ethernet instalado adicional, que permite implementar un nodo esclavo con el mismo PLC, lo cual transmite la información a la plataforma de integración de forma directa y simplificada. También es posible la conexión con un servidor-cliente OPC *third-party*. El sistema Node-RED por medio del flujo *node-red-contrib-modbustcp (node)* se establece como cliente al PLC esclavo en red.
- La plataforma *Node-RED,* mostrada en figura 6, conecta las variables leídas en MODBUS TCP usando la función FC3 (READ HOLDING REGISTER), desde el cultivo remoto hacia el *web dashboard*, la interfaz visible donde las variables se presentan de forma gráfica y numérica, enlazando los valores trasladados desde el nodo de trabajo en el cultivo remoto. Se presenta esta forma en el desarrollo, ya que industrialmente existen plataformas que permiten,

según el nivel de criticidad, ancho de banda de comunicación, nivel en campo de implementación, seguridad de datos, aplicarse en mayor o menor medida, como el sistema embebido *Iot Particle Boron*, [15] que incluye conectividad e incluso su propia plataforma *web dashboard*.

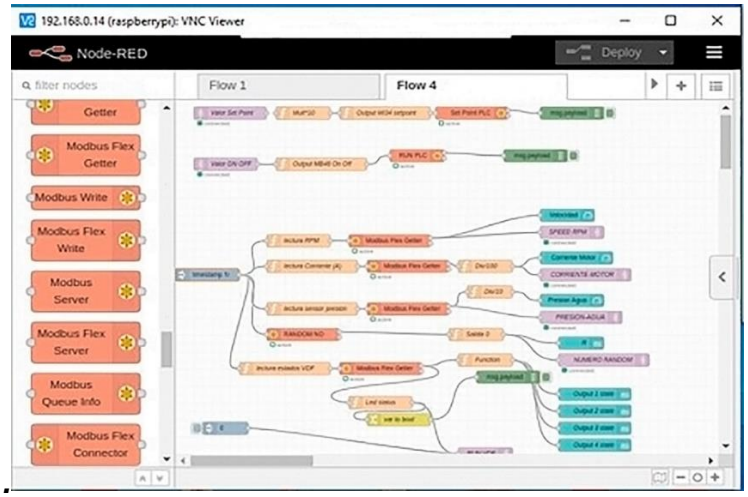


Figura 6. Sistema de flujos Node-RED para comunicación TCP. Fuente: elaboración propia

- Los datos van de la aplicación en *Node-RED* alojada en el Raspberry PI hacia el *dashboard* programado en Ubidots, que es una plataforma tipo cloud-web, que permite el enlace de la información y su visualización de forma amigable al usuario final, quien tiene la información a la mano y puede tomar decisiones sobre el estado de la(s) variable(s) críticas que afecten el proceso.

- El OPLC se programa con software propio, *Unitronics Visilogic* el cual se descarga de la página web del fabricante y es de uso gratuito. El lenguaje en que se programa es tipo *Ladder* que está normalizado en el estándar IEC61131-3.

2.3.2. Plataforma Web de presentación

La plataforma en que se visualizan y operan los datos para el usuario final se construye con herramienta Ubidots, que muestra medidores (*gauges*) de las variables desde el cultivo remoto usando cadenas MQTT (*MQ Telemetry Transport*), viniendo desde el cultivo hacia el OPLC, concentrando las señales y datos tomados de los elementos (actuadores-variadores, sensores, etc.) y transmitiéndolos hacia la nube. Si bien se usó Ubidots como *dashboard* por su simplicidad y facilidad de conectividad, cualquier otra plataforma se puede usar para esta finalidad; incluso la misma herramienta *Node-RED* permite esto también por medio de la función *node-red-dashboard* para generar una interfaz de Usuario (UI). El nivel de acceso es parte fundamental de la seguridad, por lo que la plataforma también permite ingreso por medio de autenticación, para evitar posibles interferencias en el manejo del proceso.

3. Pruebas y Resultados

Para probar el resultado de la solución propuesta, se monta un banco de prueba como se ve en figura 7 con la implementación a realizar en campo tal como se haría en una aplicación real.



Figura 7. Esquema de montaje prototipo funcional. Fuente: elaboración propia.

A la izquierda está el punto de acceso inalámbrico (*Wireless Access Point*) que en efectos prácticos hace el puente de la aplicación al internet, lo que permite el acceso desde la interfaz web por medio de la nube IoT de Ubidots, para tener lectura de datos y comandos de marcha/paro del equipo. Cabe destacar que las locaciones del prototipo enseñado y del control son distintas, no en el mismo recinto, pero sí en la misma ciudad, con 5 km aprox. De distancia entre ellos.

Si bien no se cuenta con VDF disponible para realizar simulación física, se revisa que los comandos de RUN/STOP sean llevados por la trama MODBUS RTU correctamente.

También se hacen simulaciones usando el *dashboard* tanto en PC como en móvil, y usando conexión a internet tanto en modo fijo (conexión local por cables) como por datos celulares

(modos 3G/4G) para confirmar la respuesta, latencia y modos de visualización en las pantallas usadas para monitoreo. En la figura 8 se muestran las visualizaciones obtenidas finales para cada plataforma usada; donde se aprecian los medidores de las variables: velocidad y corriente de motor, presión de agua y estado marcha/paro de bomba eléctrica.

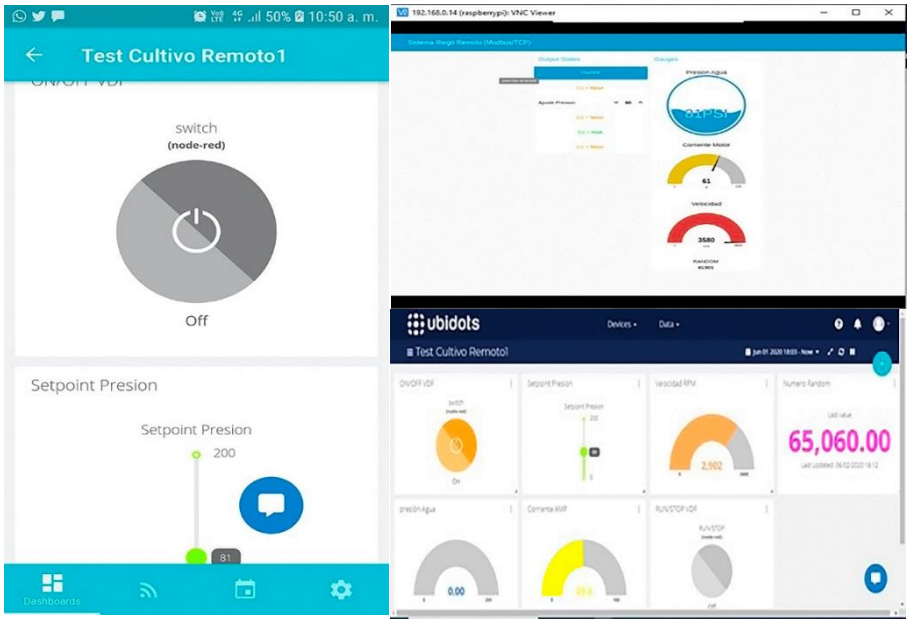


Figura 8. Interfaces dashboard de control: móvil –Raspberry-PC. Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos luego de varias pruebas ejecutadas tanto local como con conexión remota (internet fijo y datos 3G/4G) se resumen en las tablas siguientes: Tabla No. 1 para hardware y No. 2 para software respectivamente, ya que cada parte a evaluar tiene implicaciones propias por su naturaleza (componente físico, desarrollo de programa).

Tabla 1. Indicadores de funcionalidad hardware. Fuente: elaboración propia.

ELEMENTO	CARACTERÍSTICA	OBSERVACIÓN
Sensórica y actuadores en campo	Las variables físicas críticas en el desarrollo del cultivo: caudal de riego constante, presión del agua de riego, temperatura del ambiente, humedad del cultivo, etc. Son acordes con la pertinencia de mantener las óptimas condiciones de supervivencia del cultivo, que las plantas no se deterioren por exceso o defecto de las condiciones requeridas de supervivencia. Se implementan sensores en campo que tengan salidas estándar análogas (4-20 mA) y que los actuadores (VDF) permitan la integración de estos.	El estándar de facto para conectar señales análogas es lazo cerrado de corriente (4-20 mA), pero también puede haber otras variantes, tales como 0-10 VDC, 0-20 mA, etc. Es fundamental que los actuadores y controladores tengan capacidad de aceptar estas señales con dichas otras formas.
Elemento de control y adquisición de datos	Toda la sensórica y actuadores instalados se comunican con el PLC que posee buses de campo para comunicación tanto con el actuador VDF (por medio de protocolo MODBUS RS-485, el cual recibe valor de set-point para el lazo de control PI integrado según requerimiento de irrigación) como de transmisión de información por medio de la conectividad web a través de interfaz ETHERNET. La modularidad y escalabilidad de este hardware de control permite flexibilidad por tener I/O análogas y digitales y los ya mencionados protocolos de comunicación.	El PLC como hardware de nodo central, debe soportar condiciones de humedad, calor y vibración intensos por estar en un ambiente no cerrado. Un cerramiento (gabinete) adecuado para intemperie es lo mínimo requerido para alojar el PLC.
Comunicación de elementos en campo	En el cultivo remoto los sensores de presión, humedad, temperatura se conectan al PLC nodo por medio de lazos de corriente 4-20 mA (estándar de facto) y adicional, el VDF integra un controlador PI (proporcional-integral) propio para el lazo de control cerrado que simplifica la manuntención de la presión de irrigación. Los instrumentos no dependen de un bus de campo propio, lo que permite mantener confiabilidad y flexibilidad para cambio o mejoras continuas. La comunicación MODBUS 485 se establece con velocidad de 19200 bps con lo que se tienen bajos retardos en comunicar comandos al actuador.	El muestreo de las señales análogas para este PLC se tasa en 100 ms por canal, a una resolución aprox. De 12 bit, lo que permite lecturas y respuestas casi inmediatas, aunque el tiempo de muestreo se incrementa conforme se usen más canales análogos para toma de información. La velocidad de comunicación puede ajustarse tanto en VDF como en PLC si la interferencia por cableado distorsiona la transmisión de datos.

Tabla 2. Indicadores de funcionalidad software. Fuente: elaboración propia.

ELEMENTO	CARACTERÍSTICA	OBSERVACIÓN
Desempeño de redes – Internet	Es muy variable la velocidad de comunicación de la información que sale del cultivo remoto hacia la nube de integración de datos del IoT. Si bien la Raspberry PI 3B tiene puerto Ethernet para velocidad de hasta 100 Mbps, el cuello de botella se presenta en el acceso a internet (nube de data). Por tratarse de cultivos en locaciones remotas se usan módems con conectividad red móvil (4G) que permiten velocidades de transmisión de 16,6 Mbps en promedio. La cantidad de datos es baja (tramas de señales de 28 MB/s) lo que permite una velocidad y respuesta satisfactorias para el requerimiento de tiempos de respuesta y visualización.	La baja latencia viene dada por la cantidad de información a transmitir; a mayor complejidad de datos mayor será la cantidad de ancho de banda que se debe tener disponible.
Facilidad de interacción con plataforma Web	La interfaz de supervisión y visualización se diseñó para ser lo más sencilla y práctica posible: permitiendo verificar los valores de las variables importantes de presión, temperatura, estado de actuador VDF (corriente, voltaje motor, presión de trabajo, fallas del equipo si se presentan, etc.) comandar la velocidad y la presión de trabajo desde la estación de mando usuario final hacia el PLC del cultivo remoto. En el lado del cultivo, el PLC cuenta con una HMI propia que permite visualizar en campo también los estados del VDF y valores de proceso de irrigación, si bien se da prioridad al uso de la interfaz remota.	El uso del *dashboard* de Ubidots simplifica la tarea de presentar y tomar la información y comandos para ambos lados del proceso, pero se pueden contemplar más opciones que se acomoden a los requerimientos de cada situación.
Configuraciones de controles	El control de la presión de riego se implementa de manera local por medio de un controlador lazo cerrado PI (proporcional-integral) que permite programar las variables propias de dicho lazo: Kp (constante sin unidad de medida) y Ti (en segundos) (en los equipos VDF que poseen controlador de lazo cerrado se programa el tiempo integral Ti y no la constante Ki como se aplica en teoría de control). Valores típicos usados en estas aplicaciones: Kp=5.0 y Ti= 1 s. No obstante la sintonización de este lazo de	El usuario de forma remota puede dar comandos de arranque y paro de la bomba hidráulica, ajuste de valores de set-point presión y límite de velocidad, y visualización de la respuesta de variables análogas.

	control se hace una sola vez para el proceso y raramente debe ser ajustada, el control se enfoca más en visualizar variables de funcionamiento del VDF y de aquellas que infieren en el desarrollo de las plantas del cultivo (presión de agua, temperatura, humedad, etc.)	

4. Conclusiones

La implementación de la solución propuesta para monitoreo de variables críticas en un cultivo remoto se realizó de manera satisfactoria, pudiendo visualizar los valores inmediatos de la irrigación en el mismo, con tiempos de respuesta correctos. Mejorando la velocidad de conexión a internet se pueden alcanzar velocidades de respuesta mayores que permitan una intervención del usuario final más apropiada.

La latencia en la respuesta de proceso del variador de frecuencia es un factor que retrasa la llegada de la información al usuario final, ya que este actuador al ejecutar el lazo de control de presión de agua junto con sus demás procesos es un factor a tener en cuenta para la implementación de futuros desarrollos; bien sea con equipos con mejores tiempos de proceso, o llevando los lazos de control al PLC instalado.

El proceso de articulación de la información entre la planta remota y el usuario final fue complejo, dado que la forma de llevar las variables del proceso desde el mismo hacia la nube

de datos depende en gran medida de si se hará una implementación desde cero, o con equipos de control ya operativos: si se puede acceder a la programación del PLC conviene usar comunicación directa con protocolo embebido en modo cliente-servidor. Si no se puede variar la programación, usar arquitecturas tipo OPC (*Open platform connectivity*) es lo más práctico.

Si bien el proyecto expuesto cumple con lo solicitado por el cliente, queda como base para mejoras posibles a futuro teniendo en cuenta los retos que este tipo de arquitecturas representa en la agricultura inteligente: “el hardware, el ‘cerebro’, el mantenimiento y la movilidad” [7], o tomando como base un proyecto ofrecido por la plataforma IoT ThingsBoard® diseñado especialmente para aplicaciones de agricultura inteligente, [16].

La pandemia del COVID-19 ocurrida en este año 2020 nos dio importantes lecciones sobre el uso de soluciones robustas que permitan minimizar desplazamientos a locaciones remotas y/o de complejo acceso, y la importancia del IoT en el futuro del crecimiento sostenible y la manutención de recursos y procesos fundamentales para la humanidad, sin importar su progreso económico o social, [17].

Reconocimientos

Los autores reconocen el apoyo brindado por el Grupo de Investigación ROMA de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por permitir el desarrollo de este proyecto que involucra tecnologías IoT para ser exploradas y aplicadas en ámbitos industriales, sus aportes e ideas para la construcción del mismo.

Además, un reconocimiento póstumo al profesor Alfredo Chacón por sus aportes durante la etapa inicial de esta idea, su dedicación y empeño con sus estudiantes en proyectos de aplicaciones industriales.

También se agradece el apoyo de Manuel A. Machado quién con sus aportes y empeño permitieron llevar a buen término este escrito. Manuel Machado es candidato a PhD En la Universidad Nacional de Colombia.

Referencias

[1] A. Daneels and W. Salter, “WHAT IS SCADA?,” in *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, 1999, pp. 339–343, Accessed: Sep. 20, 2019. [Online]. Available: http://cds.cern.ch/record/532624/files/mc1i01.pdf.

[2] Wikipedia, “Distributed control system,” 2019.

https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_control_system (accessed Sep. 29, 2019).

[3] R. Hunzinger, *Scada fundamentals and applications in the IoT*, 1st ed. Wiley Telecom, 2017.

[4] S. Ray, Y. Jin, and A. Raychowdhury, “The Changing Computing Paradigm with Internet of Things: A Tutorial Introduction,” *IEEE Des. Test*, vol. 33, no. 2, pp. 76–96, 2016, doi: 10.1109/MDAT.2016.2526612.

[5] A. Bhatia, Z. Yusuf, D. Ritter, and N. Hunke, “Who Will Win the IoT Platform Wars?,” *BCG Perspect.*, p. 6, 2017, [Online]. Available: https://image-src.bcg.com/Images/BCG-Who-Will-Win-the-IoT-Platform-Wars-June-2017_2_tcm58-162424.pdf.

[6] L. Doron and Netafim, “The core results of the FIGARO project: the Platform,” in *International FIGARO Conference, 19 September 2016, Brussels, Belgium*, 2016, [Online]. Available: http://www.figaro-irrigation.net/fileadmin/user_upload/figaro/docs/Lior_2_NET_FIGARO_project_summary.pdf.

[7] A. (Eastern P. Chalimov, “IoT in Agriculture: 5 Technology Use Cases for Smart Farming (and 4 Challenges to Consider),” 2018. https://easternpeak.com/blog/iot-in-agriculture-5-technology-use-cases-for-smart-farming-and-4-challenges-to-consider/ (accessed Mar. 21, 2020).

[8] L. Xiamen Ursalink Technology Co., “IoT-based Smart Irrigation,” 2019. https://www.ursalink.com/en/solution/agriculture/smart-irrigation (accessed May 30, 2020).

[9] O. Pandithurai, S. Aishwarya, B. Aparna, and K. Kavitha, “Agro-tech: A digital model for monitoring soil and crops using internet of things (IOT),” *ICONSTEM 2017 - Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Sci. Technol. Eng. Manag.*, vol. 2018-Janua, pp. 342–346, 2018, doi: 10.1109/ICONSTEM.2017.8261306.

[10] A. N. Nassar A.S., Montasser A.H., “Smart Aquaponics System for Industrial Internet of Things (IIoT),” *Proc. Int. Conf. Adv. Intell. Syst. Informatics*, vol. 639, no. 1, pp. 855–864, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-64861-3.

[11] R. Nageswara Rao and B. Sridhar, “IoT based smart crop-field monitoring and automation irrigation system,” *Proc. 2nd Int. Conf. Inven. Syst. Control. ICISC 2018*, no. Icisc, pp. 478–483, 2018, doi: 10.1109/ICISC.2018.8399118.

[12] S. Bakalis *et al.*, “Perspectives from CO+RE: How COVID-19 changed our food systems and food security paradigms,” *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 3, pp. 166–172, 2020, doi: 10.1016/j.crfs.2020.05.003.

[13] J. M. Talavera *et al.*, “Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 142, no. 118, pp. 283–297, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.09.015.

[14]Wikipedia, “Druckschalter,” *Wikipedia*, 2013.

https://de.wikipedia.org/wiki/Druckschalter#/media/Datei:Druckschalter_PSD_30.jpg (accessed Jun. 30, 2020).

[15] P. IoT, “PARTICLE IoT-BORON,” 2019. https://docs.particle.io/datasheets/cellular/boron-datasheet/ (accessed Oct. 19, 2019).

[16] The ThingsBoard Authors, “Smart farming and smart agriculture solutions,” *ThingsBoard.io*, 2020. https://thingsboard.io/smart-farming/ (accessed Jun. 20, 2020).

[17] A. Joseph Fernando, “How Africa Is Promoting Agricultural Innovations and Technologies amidst the COVID-19 Pandemic,” *Mol. Plant*, vol. 13, no. 10, pp. 1345–1346, 2020, doi: 10.1016/j.molp.2020.08.003.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

ANALYSIS OF TEMPERATURE CONTROL EFFECT IN FLUIDIZED BED COFFEE ROASTER

Análisis del efecto del control de la temperatura en una tostadora de café de lecho fluido

Diego Campo-Ceballos[1], Kevin Barco [2], Hector Dorado[3], Carlos Gavíria López[4]

Abstract

One of the main sources of economic income in Colombia's agricultural sector is the marketing of coffee with a high contribution to the country's economy. However, trends in coffee industry 4.0 show that the coffee roasting process is where more value aggregation is presented and at the same time is one of the most complex because multiple factors are involved such as grain moisture, volume, variety and heat and mass transfer variables. The main objective of this work was to design and implement a fluidized bed system for the study of the effect of temperature control on the physical properties of roasted coffee from Cauca-Colombia. The development of the work was addressed in 4 sequential phases: CAD design, Digital manufacture, temperature

[1] Ingeniero Físico-Unicauca-Colombia. MSc. sistemas mecatrónicos - UnB-Brasil. PhD (c) Ciencias de la electrónica–Unicauca–Colombia.Profesor asociado Unicomfacauca. Grupo GISI dcampo@unicomfacauca.edu.co, dcampo@unicauca.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7458-5820
[2] Ingeniería Mecatrónica- Unicomfacauca-Colombia. Grupo GISI E-mail: kevinbarnco@unicomfacauca.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4005-9157
[3] Ingeniería Mecatrónica- Unicomfacauca-colombia. Grupo GISI E-mail: hectordorado@unicomfacauca.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4163-5470
Ingeniero Electrónico-Unicauca. PhD Automatización Avanzada y Robótica- UPC-España. Profesor Titular FIET-Unicauca-Colombia. E-mail: cgaviria@unicauca.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9773-7660

control design and the systems analysis. The proposed fluid bed system features a control system for the RoR (rate of rise) that can be adjusted between 3 to 20°C/min, and provide a prediction in the events of the standard roasting profile (Turning Point, Yellow, First Crack, Development time, Second Crack, Drop).

Keywords: CAD Design, Coffee Industry 4.0, Digital Control, Fluidized Bed, SCAA.

Resumen

Una de las principales fuentes de ingresos en el sector agropecuario de Colombia es la comercialización del café con un alto aporte a la economía del país. Sin embargo, las tendencias de la industria 4.0 del café muestran que el proceso del tostado es donde más agregación de valor existe, pero es uno de los más complejos. Aquí, intervienen factores variables como por ejemplo la humedad del grano, el volumen, la variedad, y las relacionadas con transferencia de calor y masa. El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un sistema de lecho fluido para el estudio del efecto del control de temperatura sobre las propiedades físicas del café tostado del Cauca-Colombia. El trabajo se abordó en 4 fases secuenciales. Diseño CAD, Fabricación digital, Control de temperatura y el análisis del sistema. El tostador integra un sistema de control para el RoR (rate of rise) que puede ser ajustado entre 3 a 20 °C/min, y proporciona un seguimiento a los eventos de la curva de tostado (retorno, amarillamiento, primer Crack, desarrollo, Segundo Crack, descarga).

Palabras clave: Control digital, Diseño CAD, Industria del café 4.0, Lecho fluido, SCAA

1. Introducción

En Colombia y en países tropicales de América latina una gran parte de su economía depende del café [1]. Alrededor del 30 % de café arábico lavado en el mundo es producido por Colombia, y es el mayor productor de café de calidad a nivel mundial por sus condiciones ambientales, el sistema de gestión y la calidad, hacen parte de los elementos diferenciales del café colombiano [2]. De acuerdo con los reportes de los años 2007-2013, Colombia cuenta con 13 departamentos con una tendencia de estabilidad de producción de café dando como cuarto productor al departamento del Cauca, [3].

El café químicamente se compone de agua y materia seca. La materia seca de los granos del café almendra está constituida por minerales y por sustancias orgánicas que son los carbohidratos, lípidos, proteínas, alcaloides, como la cafeína y la trigonelina, así como, por ácidos carboxílicos, fenólicos, y por compuestos volátiles que dan el aroma a la almendra. [4].

En el tueste se manejan dos variables: la temperatura y el tiempo. De acuerdo con estas dos variables se pueden obtener varios tipos de tueste con el mismo café, además de graficar las curvas de tueste que nos pueden predecir las cualidades de un café en la taza. Es necesario tomar en cuenta que, para elaborar una curva o perfil de tueste, se debe anotar las temperaturas registradas en intervalos fijos de tiempo hasta llegar a obtener el producto final,

acompañado de otros datos como: origen, densidad, tipo de café, porcentaje de humedad, peso inicial, peso final, [5].

Los tostadores mecánicos fueron introducidos a mediados de 1900, en los Estados Unidos de América y en Alemania. La diferencia entre un equipo y otro, es la forma en la cual se suministra la energía para iniciar la tostación (conducción, convección y radiación) y las capacidades de tostón van de los cincuenta Gramos hasta las cuatro toneladas por hora, [6]. En la industria actualmente existen diversos equipos que permiten realizar el tostado, estos equipos se clasifican de acuerdo a su principio mecánico de funcionamiento. En el tostador de tambor horizontal rotatorio el café es tostado en un recipiente cilíndrico rotatorio, el cual mediante inducción calienta el grano de café. La tostadora de Café (QUANTIK) es un claro ejemplo de las soluciones que da el mercado en cuanto a tostadores de café se trata en Colombia. Está especialmente diseñada para laboratorios de control de calidad de Café, [7]. En segunda instancia el tostador de tambor vertical estático cuenta con un sistema de tostado para este tipo de máquinas es rotar unas aspas que agitan el grano de café, montados sobre un eje vertical con rotación continua, [8]. Teniendo en cuenta estos factores, para el tostador de lecho fluido Los granos de café son calentados, y levitados por un flujo de aire a temperaturas elevadas. El calentamiento y el enfriamiento se realizan en la misma cámara. Presentan la mejor transferencia de calor puesto que los granos están en contacto directo con el aire caliente. Este tipo de tostadores en los últimos años vienen siendo motivo de estudio, [9]. El

objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un sistema de lecho fluido para el estudio del efecto del control de temperatura sobre las propiedades físicas del café tostado del Cauca-Colombia, [10]. El control automático integrado a la fabricación digital ha desempeñado un papel importante en el avance tecnológico de la industria del café y la fabricación de nuevos productos, [11]. En el diseño del control se encuentran diferentes configuraciones en la dinámica lineal del controlador, por lo que comúnmente es representado mediante diagrama de bloques. El controlador PID aportó una señal al proceso con una combinación proporcional, integral y derivada de la señal de actuación permitiendo el análisis y seguimiento de muestras de café tostado, [12].

2. Materiales y métodos

Para llevar a cabo el desarrollo del trabajo se implementó la metodología de diseño mecatrónico bajo la norma VDI 2206 formulada por la sociedad de ingeniería alemana, mediante esta metodología se plantea el desarrollo de dispositivos con un ciclo de retroalimentación que permita comprobar el correcto funcionamiento de los dispositivos desarrollados, se basa en el diseño del sistema mediante el uso de herramientas CAD: fase 1. Diseño, fase 2. Simulación, que permitan reducir los errores y costos en el proceso de construcción. Fase 3: Teniendo en cuenta el efecto de rebote en la trasferencia de calor [13], se diseñó un sistema de acumulación de aire para mantener la presión y velocidad, todo esto

diseñado y simulado mediante herramientas de diseño CAD y validado de forma experimental como se puede apreciar en la figura 1 y 2. Para determinar la velocidad de fluido se utilizó la ecuación (1).

$$V = \frac{M}{A} \qquad (1)$$

Donde V es la velocidad fluido,
M el caudal dato del fabricante en $\frac{m^3}{s}$
y (A) el area de los conductos.

Sustituyendo los valores reales, se obtuvo la velocidad es igual a 37,5 m/s. En tanto la simulación arrojó una velocidad de 40 m/s y un comportamiento lineal, como se observa en la figura 2.

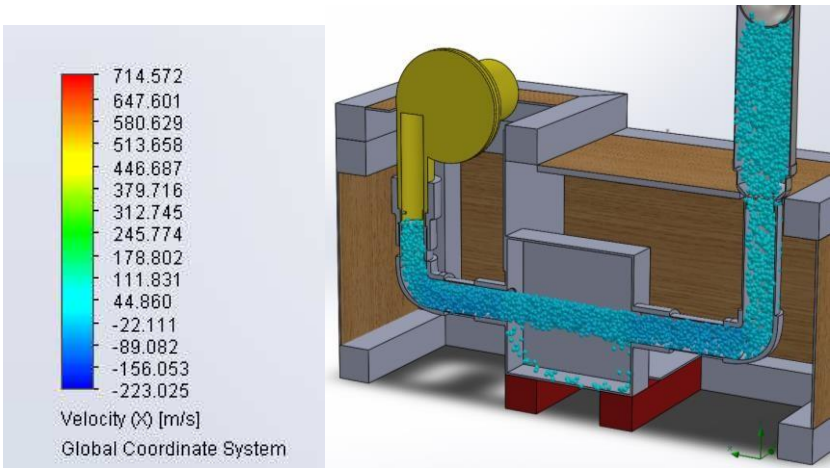


Figura 1. Velocidad del fluido dentro de la recamara y conductos. Fuente: elaboración propia.

El proceso de la validación de los resultados simulados se realizó construyendo el sistema de ductos para el fluido previamente diseñado en el software CAD tomando la medida de la

altura alcanzada por las partículas dentro del recipiente de lecho fluido. Teniendo una fuente de fluido estable, la siguiente fase fue la implementación del sistema calefactor al interior de la estructura diseña para la circulación del fluido de aire caliente, el circuito de comunicación, recepción de datos y la construcción del recipiente de lecho fluido.



Figura 2. Elemento generador de calor y recipiente de tostado. . Fuente: elaboración propia.

Con el recipiente de lecho fluido construido, el circuito de censado y comunicación el elemento calefactor debidamente posicionado es necesario realizar la interfaz adquisición de datos y la implementación de los protocolos de comunicación. Para el diseño de la interfaz de adquisición y envió de datos se utilizó el software industrial LabVIEW 2017, como se observa en la figura 3.



Figura 3. Interfaz gráfica en el software LABVIEW. . Fuente: elaboración propia.

Con la interfaz desarrollada es posible realizar la adquisición de los datos de la planta de forma que sea posible efectuar el proceso de identificación o modelo matemático y diseño de controlador de temperatura, gracias a los datos obtenidos por medio de la interfaz se obtienen las curvas de tostado.

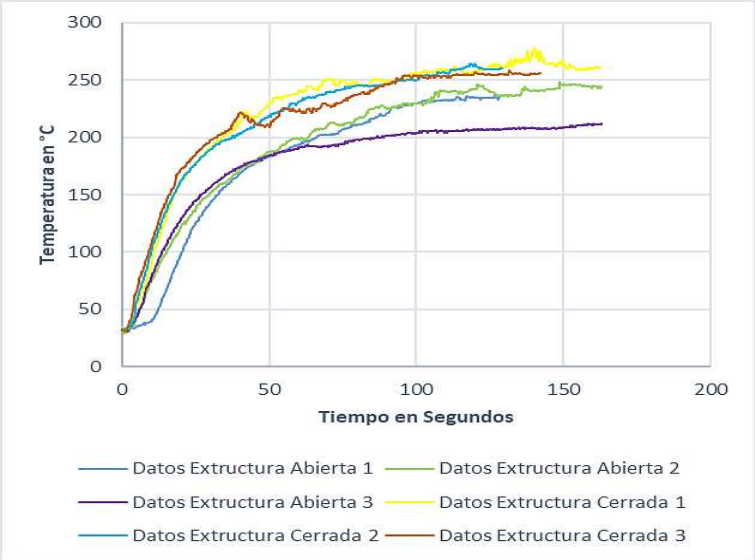


Figura 4. comportamiento de la planta, fuente propia

Con los datos de curvas de la figura 4 fue posible realizar el proceso de identificación del

modelo matemático que rige al dispositivo y de esta forma desarrollar un controlador de temperatura. Con el objetivo de realizar un proceso de identificación con el mayor nivel de precisión se utilizó el software matemático de MatLab® para este proceso, figura 5.

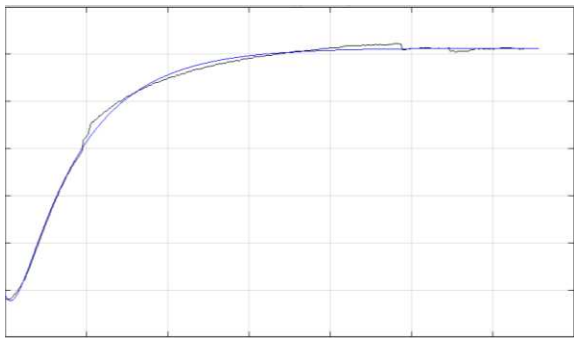


Figura 5. Modelo de planta y Datos recolectados. Fuente: elaboración propia.

La función de transferencia presentada en la ecuación (2), tuvo una precisión del 95.6% respecto a los datos muestreados, debido a la precisión que ofrece este modelo matemático se tomó la decisión de implementar un primer controlador, plantear la opción de agregar un cero o un polo más para aumentar la precisión del modelo matemático.

$$G(s) = \frac{0.05038}{s^2 + 0.8884s + 0.04765} \qquad (2)$$

Con la función de transferencia identificada matemáticamente se procedió a trasladarla al espacio discreto mediante la transformada z en la ecuación (3)

$$G(z^{-1}) = \frac{-0.1075z^{-1} + 0.5742z^{-2}}{1 - 1.3799z^{-1} + 0.4113z^{-2}} \quad (3)$$

Luego procede a la realización del controlador, para determinar el modelo del control, se toma como referencia las fórmulas matemáticas que rigen al diseño de control PID RST (4).

$$H(s) = \frac{Ge^{-Tts}}{T2s + 1} \; o \; H(s) = \frac{W0^2 e^{-Tts}}{s^2 + 2\zeta W0s + W0^2} \quad (4)$$

Donde ζ es el coeficiente de amortiguamiento que rige a la señal de respuesta del sistema de control, $W0$ hace referencia a la frecuencia natural con la que se va a comportar el control, Ts se refiere al tiempo de muestreo de la variable a controlar, T es un tiempo de retardo, T2 es una constante de tiempo. De acuerdo con los criterios de diseño para un controlador PID RST se obtiene la ecuación (5)

$$H(s) = \frac{1.1219}{s^2 + 4.2389s + 1.1219} \quad (5)$$

Con la ecuación (5) se procedió a trasladarse al espacio discreto, por lo que al igual que la función de trasferencia de la planta también se hace el mismo procedimiento, en la ecuación (6) muestra la nueva ecuación.

$$H(z^{-1}) = \frac{-1.5668\, z^{-1} + 0.739\, z^{-2}}{1 - 0.772\, z^{-1} + 0.0144z^{-2}} \quad (6)$$

con la ecuación (3) y ecuación (6) finalmente encontradas, se procede a relacionarlas mediante la ecuación (7), la cual permite trasladar la transformada z en el espacio de

estados, con el fin de que un microprocesador pueda interpretar la información matemática trasferida.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s1^{l} \\ r0 \\ r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.7103 & 0.9721 & -0.0159 & 0 & 0 \\ 5.1168 & 2.3143 & 1.3154 & -0.0215 & 0 \\ 1.7677 & 1.0158 & -0.0166 & 1.3535 & 0.0221 \\ -0.0333 & -0.0189 & 0 & 0 & 1.3532 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1.3799 \\ 0.4113 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ s1^{l} \\ r0 \\ r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.3624 \\ 2.4643 \\ 0.3592 \\ -0.0071 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Con el resultado de la ecuación (8) se procedió con el cálculo de los polinomios RST que serán implementados en lazo cerrado con la planta para validar el funcionamiento del control, mediante Simulink herramienta de MatLab®, inicialmente se comprobara el funcionamiento del controlador igualando los polinomios R=T aplicando una entrada escalón (ver figura 6).

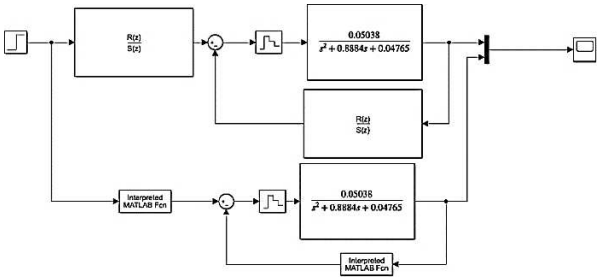


Figura 6. Diagrama de bloques para la simulación de controlador comparado con la realización del controlador. Fuente: elaboración propia.

La simulación de la realización del controlador contrastada con el controlador en forma de polinomios se puede apreciar en la figura 7, donde las respuestas están paralelas y muy

cercanas (<5%), garantizando así que el controlador programado en el microcontrolador tendrá el comportamiento de respuesta graficada en simulación.

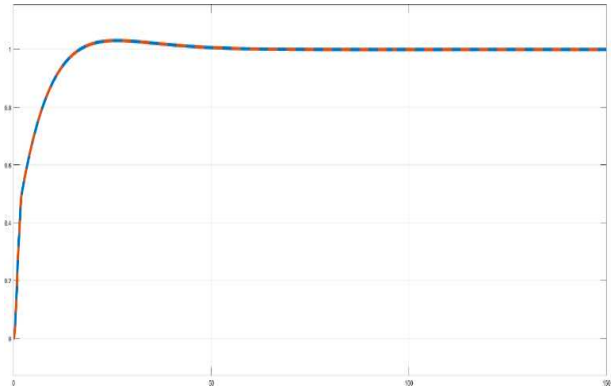


Figura 7. Respuesta del controlador programado comparado con el controlador en forma de polinomios. Fuente: elaboración propia.

Una vez se ha validado el correcto funcionamiento del controlador mediante las ecuaciones en el espacio de estados se procedió a realizar la programación en el microcontrolador para estudiar comportamiento del control de temperatura mediante los datos recolectados por medio de la interfaz gráfica obteniendo los resultados de la gráfica.

3. Resultados y discusión

Con el control incorporado al sistema de lecho fluido, se tomaron 6 muestras de café tostado para validar el comportamiento del controlador anteriormente diseñado. Se hicieron 6 tostados de café con un perfil de tueste programado, se realizaron con el fin de validar el comportamiento del controlador, la estabilidad y capacidad de poder seguir una curva programada. En la figura 8, se presentan los resultados de las 6 muestras tostadas. Con los datos registrados por medio de la interfaz gráfica el primer paso es identificar si se

pueden aplicar métodos estadísticos descriptivos de acuerdo a la normalidad de los mismos, la identificación del tipo de datos se realizó por medio del Software IBM SPSS gracias al cual se pudo encontrar por una parte las siguientes graficas que representan el porcentaje de precisión segundo a segundo dentro de un procesos de tostado y por otra se definió que los datos no son normalizados por medio de la prueba de Kolmogorov Smirnov por lo cual es necesario realizar un análisis no paramétrico de tipo Kruskal Wallis.

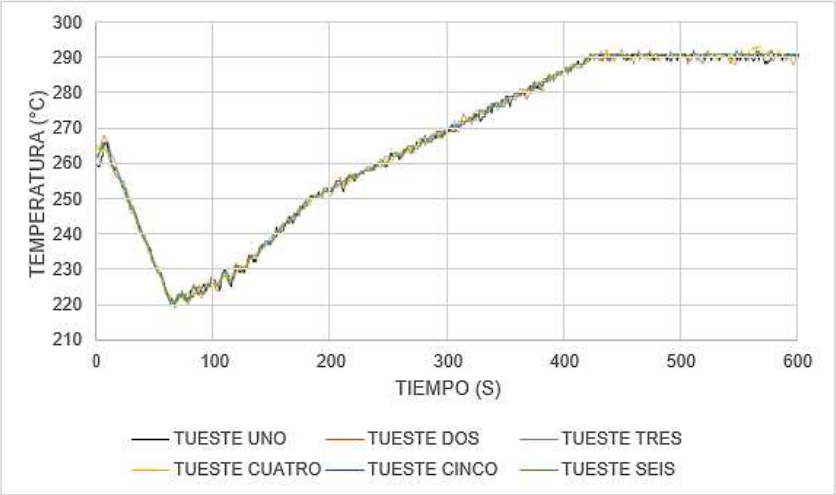


Figura 8. comparación control de temperatura del tostado de muestras. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Prueba normalización de datos

DATOS	Kolmogorov-Smirnov[a]		
	Estadístico	Gl	Sig.
CURVA1	,189	601	,000
CURVA2	,208	601	,000
CURVA3	,207	601	,000

CURVA4	,204	601	,000
CURVA5	,244	601	,000
CURVA6	,201	601	,000

Fuente: elaboración propia.

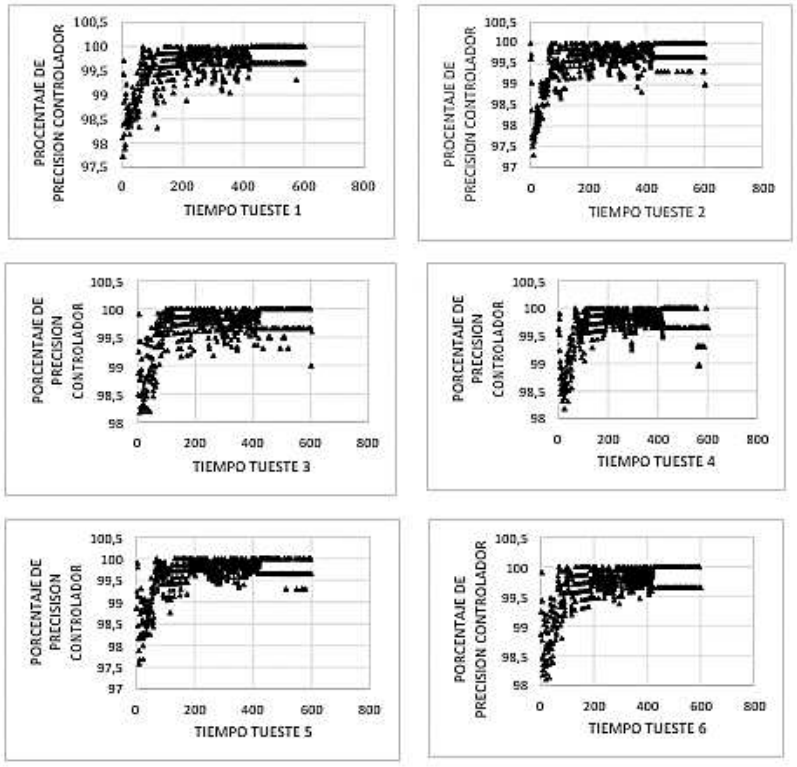


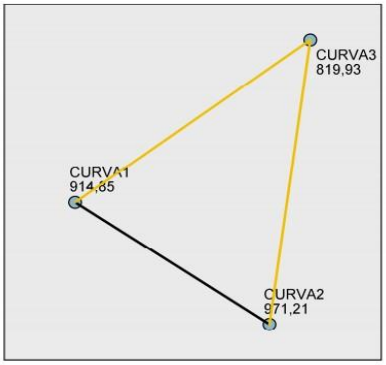
Figura 9. Precisión del controlador. Fuente: elaboración propia.

En los grupos de la figura 9, es posible observar como el nivel mínimo de precisión de del 97,5% con un tiempo de muestreo de un segundo, sin embargo para poder determinar la similitud entre las distintas curvas es necesario implementar el análisis Kruskal Wallis que permite realizar la comparación de grupos de datos no normalizados y poder obtener un punto de vista más preciso acerca del funcionamiento del controlador, para facilitar la

comprensión de las comparaciones se dividieron las muestras en dos grupos obteniendo así los resultados de la figura 10 y figura 11. En la figura 10, se puede apreciar que existe un mayor nivel de diferencia de las curvas 1 y 2 respecto a la curva 3 con el estadístico de contraste más alto siendo así que el nivel de significancia es menor a 0,05 margen de error para aceptar la hipótesis de que existe una diferencia significativa entre las diferentes curvas de tostado, [14].

Por otra parte, en la figura 11 se puede apreciar que existe un mayor nivel de diferencia del tueste 4 respecto al tueste 5 con el estadístico de contraste más alto siendo así que el nivel de significancia es menor a 0,05 margen de error para aceptar la hipótesis de que existe una diferencia significativa entre estas dos curvas. El sistema proporciona un control sobre la tasa de aumento de temperatura de 3 a 20 °C/min

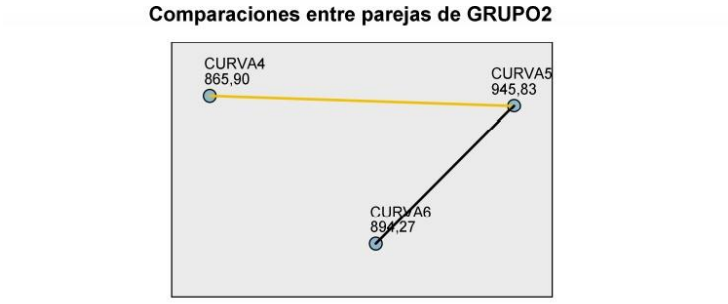
Comparaciones entre parejas de GRUPO



Cada nodo muestra el rango promedio de muestras …

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
CURVA3-CURVA1	94,921	29,866	3,178	,001	,004
CURVA3-CURVA2	151,281	29,866	5,065	,000	,000
CURVA1-CURVA2	-56,360	29,866	-1,887	,059	,177

Figura 10. Análisis comparativo Kruskal Wallis curvas 1 al 3. Fuente (IBM SPSS)



Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
CURVA4-CURVA6	-28,375	29,858	-,950	,342	1,000
CURVA4-CURVA5	-79,937	29,858	-2,677	,007	,022
CURVA6-CURVA5	51,562	29,858	1,727	,084	,253

Figura 11. Análisis comparativo Kruskal Wallis tuestes 4 al 6. Fuente (IBM SPSS).

4. Conclusiones

La implementación del método ingenieril para el diseño mecánico del sistema de lecho fluido, mediante software CAD permitió analizar parámetros físicos importantes en el sistema como lo fue el flujo de aire y transferencia de energía de tal forma que fue posible conocer un comportamiento aproximado real validado posteriormente mediante pruebas experimentales además realizar las modificaciones pertinentes para optimizar la cantidad de energía y recursos necesarios.

En los procesos de control la precisión y calidad del tostador cubre el rango de 3 a 20 °C/min, lo cual cobra un alto grado de importancia puesto que la precisión y velocidad de respuesta del controlador se ven afectado por estas variables. Sin embargo, mediante técnicas de control digital implementado en este trabajo fue posible refinar el funcionamiento

de los controladores para obtener un funcionamiento óptimo aun con el uso de sensores y actuadores de nivel básico, lo cual plantea una ventaja para poder ofrecer productos con un sistema de control tanto para el tostador experto como para los pequeños caficultores que permitan la formación en el procesamiento y obtención de cafés especiales y así aprovechar del valor agregado de este proceso para aumentar los beneficios y mejorar las condiciónes de vida de sus familias.

Se hizo evidente la necesidad de desarrollar un método de análisis estadístico que tenga en cuenta el error acumulativo presente por la baja precisión del sensor de temperatura implementado, puesto que los principios de funcionamiento del tostador no se acoplan a los métodos existentes o cual impide realizar estudios que permitan evaluar de forma óptima el funcionamiento del controlador.

Reconocimientos

Los autores agradecen al parque tecnológico de innovación del café - TECNiCAFÉ, al Tecnoparque SENA, nodo Popayán, el doctorado en Ciencias de la Electrónica - Unicauca y a la Corporación Universitaria Comfacauca – Unicomfacauca.

Referencias

[1] E. Vargas, A. Guillermo Correa, P. C. souza, N. Rodrigues de Baptestini, F. Machado Zaidan y I. Ramos, "Avaliação da homogeneidade da expansão dos grãos de café torrados" de *VIII Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, novembro 2013.

[2] Giraldo Cerón, A. F. "Tan cerca y tan lejos de la agricultura 4.0 en Colombia". Revista Universidad EAFIT, 55(175), 78-85.2020

[3] O. L. Ocampo López y L. M. Álvarez Herrera, «Tendencia de la producción y el consumo del café en Colombia,» *Apuntes del CENES,* vol. 36, nº 64, pp. 139-165, julio -diciembre 2017.

[4] G. I. Puerta Quintero, Investigador Científico III y Centro Nacional de Investigaciones,

«COMPOSICIÓN QUÍMICA DE UNA TAZA DE CAFÉ,» Ciencia, tecnología e innovación para la caficultura colombiana, MANIZALES , 2011.

[5] Samodro, Bayu, et al. "Maintaining the Quality and Aroma of Coffee with Fuzzy Logic Coffee Roasting Machine." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 426. No. 1. IOP Publishing, 2020.

[6] Fadri, R. A., et al. "Review of coffee roasting process and formation of acrylamide related to health." Journal of Applied Agricultural Science and Technology 3.1 (2019): 129-145.

[7] Botero Lopez, Santiago, and Muhammad Salman Chaudhry. "Designing an Efficient Supply Chain for Specialty Coffee from Caldas-Colombia." (2020).

[8] Suarez-Peña, Javier Andrés, et al. "Machine Learning for Cup Coffee Quality Prediction from Green and Roasted Coffee Beans Features." Workshop on Engineering Applications. Springer, Cham, 2020.

[9] Putra, Satya Andika, Umi Hanifah, and Mirwan Ardiansyah Karim. "Theoretical study of fluidization and heat transfer on fluidized bed coffee roaster." AIP Conference Proceedings. Vol. 2097. No. 1. AIP Publishing LLC, 2019.

[10] Benitez O, Campo-Ceballos D, «Evaluación de la calidad el café tostado utilizando herramientas de procesamiento digital de imágenes», ACCB, vol. 1, n.º 30, pp. 32-43, dic. 2018..

[11] Meana, Vanessa Rose L., Nazer Sarapeo P. Kimkiman, and Alvin C. Dulay. "Design, Fabrication, and Performance Evaluation of a Batch-Type Fluidized Bed Coffee Roaster for Small-Scale Coffee Growers." Mountain Journal of Science and Interdisciplinary Research (formerly Benguet State University Research Journal) 79.2 (2019): 90-97..

[12] Buesaquillo Imbaquingo, Luis Darío. Sistema de control para mejorar el desempeño de una máquina tostadora de café. BS thesis. 2019.

[13] Abdul. Ghani, Nur Hamizah, et al. "Development of a novel 2D single coffee bean model and comparison with a 3D model under varying heating profiles." Journal of Food Process Engineering 42.4 (2019):

[14] Campo Ceballos D, et al. "Herramientas de cv para evaluar el color y matiz del café tostado: el color del café tostado y su relación con las propiedades organolépticas". EAE. 68 páginas. 2018

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

AUTOMATED TECHNOLOGIES IMPLEMENTED IN THE FMS HAS200

Tecnologías automatizadas implementadas en la FMS HAS200

Luini Leonardo Hurtado Cortés[1], John Alejandro Forero Casallas[2], Víctor Elberto Ruiz Rosas[3]

Abstract

This paper presents the automation implemented through a series of projects oriented towards the continuous improvement and development of the didactic systems present in HAS200 flexible manufacturing cells of the Facultad Tecnológica of the Universidad Distrital – Francisco José de Caldas. Through these projects, it has been possible to implement a series of automated improvements such as: i) a virtual environment of the flexible manufacturing cell, geometrically modeled for remote simulation of the didactic processes; ii) a new automated station for recycling pellets that is integrated with the other stations to classify the raw material in three separate colors; iii) a new user-machine interface for a Melfa Mitsubishi RV-M1 manipulator arm, which allows the recycling station to be integrated with the rest of the flexible manufacturing cell; iv) an automated gripper design for handling and subsequent opening of containers within the cell; v) an artificial vision system

[1] BSc. In Mechanical engineering. M.Sc. In Engineering - Automation, Ph.D. In Engineering - Automation. Current position: Titular Professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: llhurtadoc@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1675-9471.

[2] BSc. In Mechanical engineering. M.Sc. In Engineering - Automation. Current position: Assistant Professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: jaforeroc@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5884-1350.

[3] BSc. In Mechanical engineering. M.Sc. In Mechanical engineering. Current position: Assistant Professor at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. E-mail: veruizr@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6798-2534.

implemented to alternate autonomous transport of product between stations using unmanned ground vehicles; vi) a virtual course for the management and operation of the flexible manufacturing cell. The automation strategies proposed in the HAS200 can be extrapolated to real production environments under the same automation concepts, which makes each result obtained doubly beneficial.

Keywords: Gripper, HAS200, Robotic arm, UGV, Virtual reality environment.

Resumen

En este artículo se presenta la automatización implementada a través de una serie de proyectos orientados hacia el continuo mejoramiento y desarrollo de los sistemas didácticos presentes en celdas de manufactura flexibles HAS200 de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital - Francisco José de Caldas. Por medio de dichos proyectos se ha logrado implementar una serie de mejoras automatizadas como por ejemplo: i) un entorno virtual de la celda de manufactura flexible, modelado geométricamente para la simulación remota de los procesos didácticos; ii) una novedosa estación automatizada para el reciclaje de pellets que se integra con las demás estaciones para clasificar la materia prima en tres colores separados; iii) una nueva interfaz de usuario-máquina para un brazo manipulador Melfa Mitsubishi RV-M1, que permite integrar la estación de reciclaje con el resto de la celda de manufactura flexible; iv) un diseño de gripper automatizado, para la manipulación y posterior apertura de recipientes dentro de la celda; v) un sistema de visión artificial implementado al transporte autónomo alterno de producto entre estaciones mediante vehículos terrestres no tripulados; vi) un curso virtual para el manejo y operación de la celda

de manufactura flexible. La automatización propuesta en la HAS200 puede ser extrapolable hacia entornos productivos reales bajo los mismos conceptos de automatización, lo cual hace que cada resultado obtenido sea doblemente beneficioso.

Palabras clave: Ambientes de realidad virtual, Brazo robótico, Gripper, HAS200, UGV.

1. Introducción

Actualmente la Universidad Distrital Francisco José de Caldas cuenta con una celda de manufactura para realizar prácticas tecnológicas de automatización, esta celda de manufactura lleva el nombre de HAS200, figura 1, es un sistema modular de ocho estaciones de trabajo y tiene un proceso de producción en serie, lo que implica, que se realice cada proceso uno después del otro, las estaciones presentes en esta celda de manufactura son: Alimentador de botes multicolor, producción, medición, colocación de la tapa, almacén, paletizado, almacén de materia prima y estación de reciclaje. Al ser una celda de manufactura en serie pueden llegar a existir limitaciones en cuanto a tiempos de simulación a la hora de requerir reiniciar el sistema de producción de recipientes. La materia prima sale mezclada entre los diversos colores de simulación didáctica; las perlas de colores mezcladas deben ser separadas y nuevamente almacenadas por parte del operador de la máquina, actividad que va en contravía con la idea original de la automatización de los procesos productivos relacionados con sistemas de manufactura flexible. Se han desarrollado una serie de proyectos relacionados con tecnologías de punta, con el fin de completar el ciclo absoluto de automatización dentro del sistema productivo flexible.



Figura 1. Celda de Manufactura Flexible HAS200. Fuente: elaboración propia.

2. Ambiente Virtual HAS200

El proyecto desarrollado pone a disposición la celda de manufactura que se encuentra en la Facultad Tecnológica en un ambiente virtual, donde se identifican cada una de las estaciones de trabajo con sus respectivos subconjuntos, ofrece a los docentes y estudiantes una herramienta para el desarrollo de la clase impartida, adicionalmente con el modelamiento de la estación se entrega a la Facultad una base para el desarrollo de proyectos relacionados con celdas de manufactura. Se realizó una búsqueda minuciosa de información sobre la celda, sus elementos y componentes, el funcionamiento de los mismos y la forma en que interactúan para conseguir el ensamble de sistema de giro compuesto por cinco partes, una base o cuerpo, un rodamiento, un eje, una tapa y los tornillos para contener los elementos. El paso siguiente fue el modelamiento de los elementos por medio de una herramienta de diseño asistido por computador CAD (Compute - Aided Design, por sus siglas en inglés), en la cual se realizó primero el modelado de cada uno de los

subensambles que componen cada estación y posteriormente se realizó el ensamble de todas para conformar la celda de manufactura.

Por último, se implementó el software NX 8.5 de Siemens® para realizar la simulación de movimientos de la estación 1, alimentación de la base o cuerpo, donde se pueden distinguir cada uno de los pasos que se llevan a cabo dentro del proceso en el funcionamiento de la celda de manufactura que corresponde con los tiempos y secuencia en que trabaja la celda real en el laboratorio de la Universidad. Con el desarrollo del proyecto se logró el modelamiento de la celda y cada una de sus estaciones en un ambiente virtual, el cual puede ser consultado para identificación de sus componentes por los estudiantes y docentes que ofrecen catedra con la celda como herramienta de trabajo, adicionalmente se dispone de una base de información para el desarrollo de futuros proyectos relacionados con la celda de manufactura.

2.1. Desarrollo de planos

Es la base fundamental de este proyecto pues aquí se caracterizó cada uno de los componentes en cuanto a dimensionamiento, posicionamiento, y estructuración de las estaciones de la celda de manufactura y a su vez la verificación y corrección de componentes adquiridos en la red.

Se utilizó la aplicación para celular QuickMemo+® con el que se agregaron las medidas tomadas a imágenes de la celda de manufactura, figura 2.

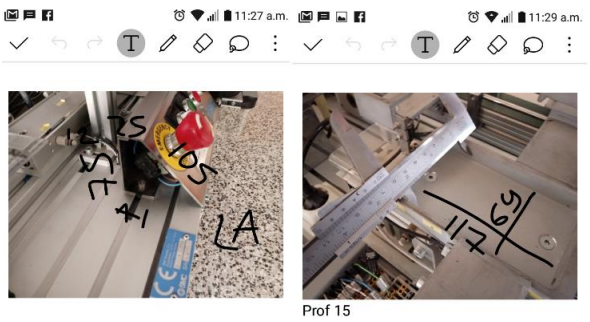


Figura 2. Aplicación QuickMemo+® para anotaciones de medidas en imágenes. Fuente: elaboración propia.

2.2. Búsqueda de elementos gráficos estandarizados

Esta parte es de vital importancia para el ensamblaje de las estaciones durante el modelado, se procuró la mayor precisión a la hora de establecer las diferentes partes y componentes que se usan para la unión de las partes de la celda de manufactura y que se sabe se encuentran en bases de datos de los programas CAD en las diferentes redes de consulta en la web, figuras 3-5.

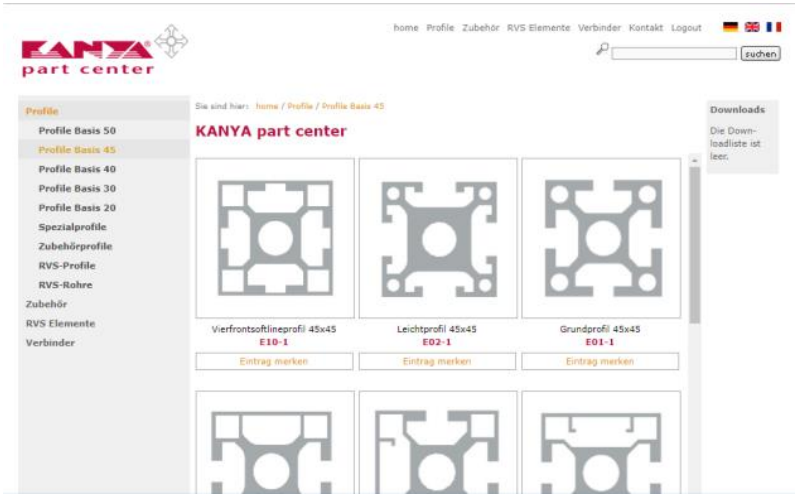


Figura 3. Página para descarga de perfiles en aluminio.



Figura 4. Página principal para descarga de componentes SMC®. Fuente: elaboración propia.

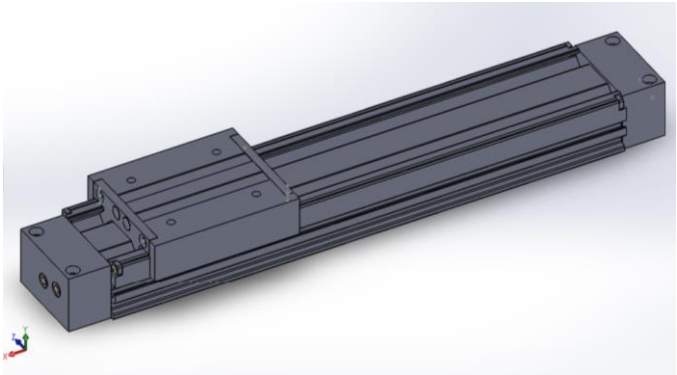


Figura 5. Actuador MY1C25G – 200 descargado para Solid Works®. Fuente: elaboración propia.

3.1. Modelamiento de sub-ensambles de cada estación

Se trata de la verificación en la unión de piezas y superficies para la transmisión de movimientos, análisis de topes, interferencias de movimientos entre piezas y fuerzas entre ellas para el ensamblaje de componentes que realizan tareas específicas. Se desarrolló virtualmente cada una de las estaciones por separado y se presenta en la figura 6 el modelo virtual de las estaciones 1, 2 y 3 a manera de ejemplo.

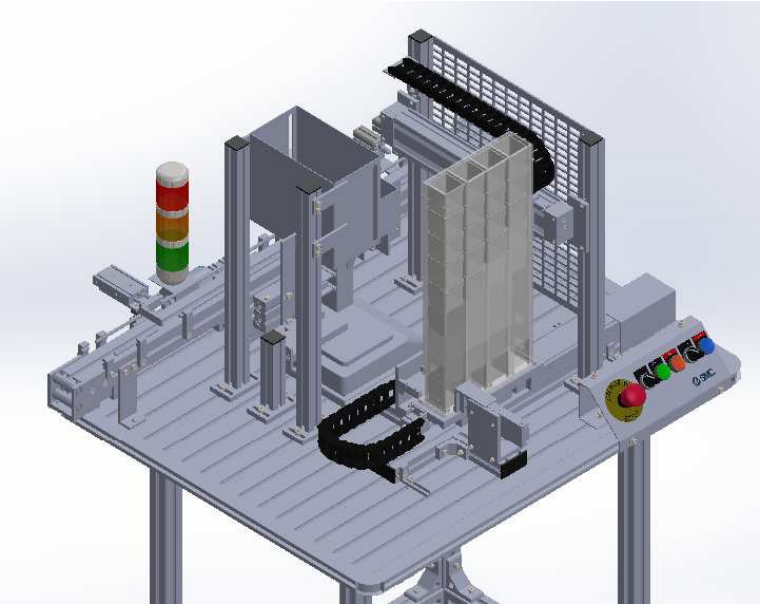


Figura 6. Modelado en 3D en Solid Works® de estaciones 1, 2 y 3 (Dispensador perlas de colores) Celda de manufactura HAS200®. Fuente: elaboración propia.

3.2. Ensamble de la celda de manufactura

Alineamiento de los ensambles de todas y cada una de las estaciones de trabajo, en el caso de la celda de manufactura FMS200, por medio de bandas transportadoras lineales para cada estación que entre sí se encuentran intercomunicadas en forma de “U” para toda la celda, verificando la entrada y salida del producto en cada una de las estaciones vista como un sistema, figuras 7-8.

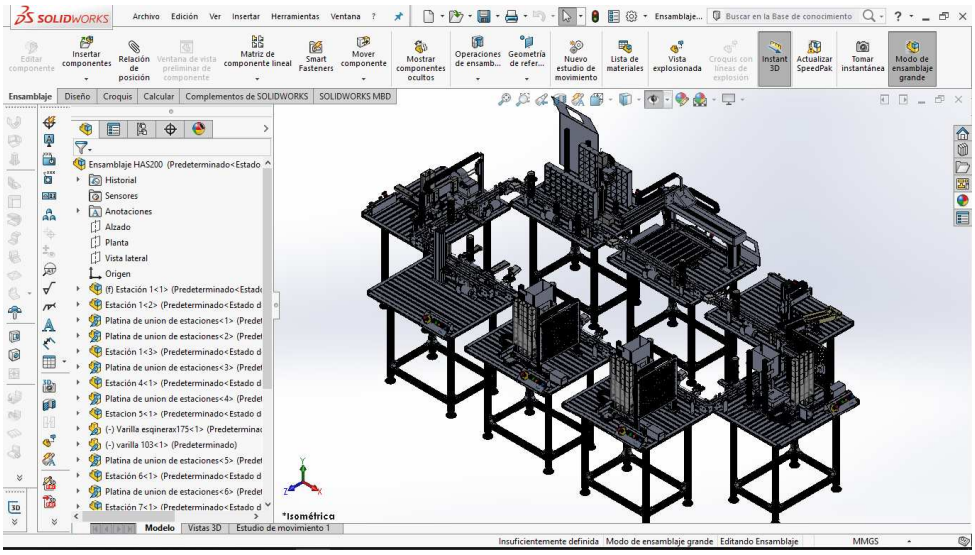


Figura 7. Modelado celda de manufactura HAS200 en entorno Solid Works®. Fuente: elaboración propia.

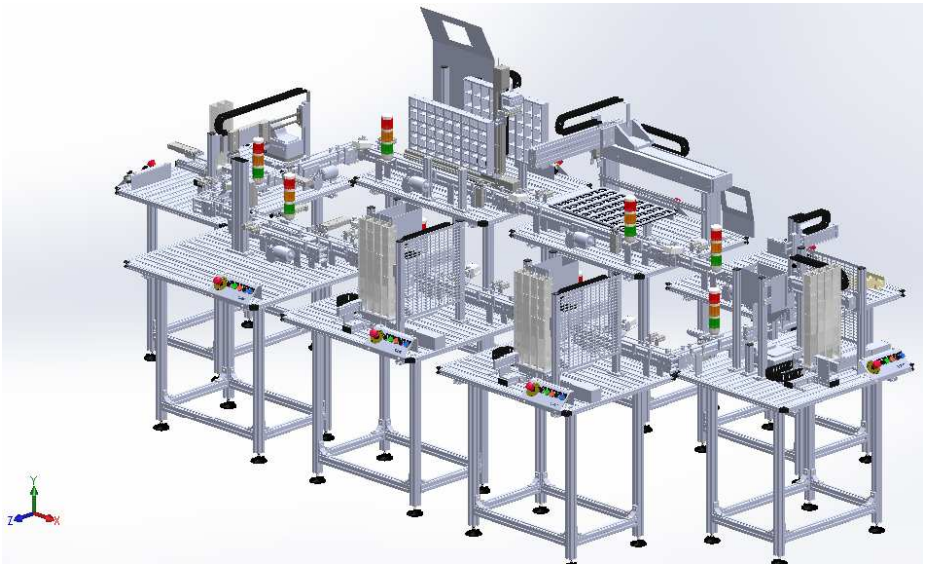


Figura 8. Modelado celda de manufactura HAS-200 renderizado con software Solid Works®. Fuente: elaboración propia.

3.3. Ensamble de la celda de manufactura

Se realizó con el programa Siemens NX11® (Figura 9), que cuenta con varios módulos especializados para la realización de simulaciones de movimiento como lo son el diseñador de conceptos de mecatrónica, el cual funciona con la aplicación de sensores a los componentes que intervienen dentro de la simulación de movimiento y podemos seleccionarlo luego de abrir una pieza o un ensamble.

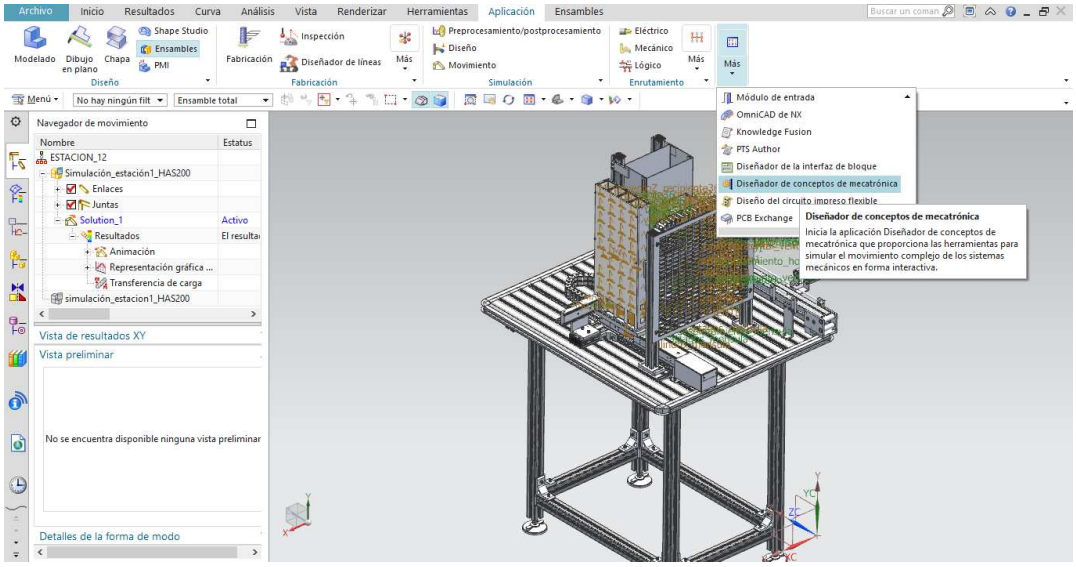


Figura 9. Entorno del programa Siemens NX11®. Fuente: elaboración propia.

3. Estación Automatizada para el reciclaje de pellets

La HAS200 permite simulaciones en las cuales mezcla de los diferentes tipos de pellets y una vez terminada la práctica se hace necesaria la separación por colores para nuevamente almacenarlos por separado en las estaciones de dosificación, figura 10. Siendo un equipo altamente automatizado era necesario incorporar dentro de todas las demás actividades

autónomas la separación de pellets de diferentes colores, figura 11. Una vez establecidas las diferentes características en cuanto al diseño óptimo, se diseña cada uno de los componentes que integran los sistemas que componen el equipo. Mediante la utilización de software de análisis mecánico, eléctrico y de dibujo mecánico, se desarrollan los cálculos, selección de materiales y planos de montaje de la siguiente manera: Mesa ranurada: Diseño de estructura para soportar los diferentes sistemas que componen el equipo modular, esta tiene dimensiones, forma y estética similar a los módulos existentes en el laboratorio. Alimentador Vibratorio: cálculo del mecanismo de transmisión de potencia y sistema dinámico de vibración, el cual garantiza el movimiento rotacional de las perlas de forma organizada hacia la banda transportadora. Banda transportadora: Se selecciona la banda transportadora que garantiza la ubicación de las perlas de manera sincronizada en el sensor, así como en las boquillas de soplado del sistema de selección y clasificación. Sensor: Se selecciona un tipo sensor para la identificación de los colores amarillo, azul y rojo, este sensor se acopla al sistema de control por PLC. Sistema neumático de clasificación: Se implementa la presión y la fuerza con la cual debe expulsar la perla hacia los respectivos recipientes con el fin de no arrojar esta fuera del recipiente.



Figura 10. Recipientes con material de colores mezclado. Fuente: elaboración propia.

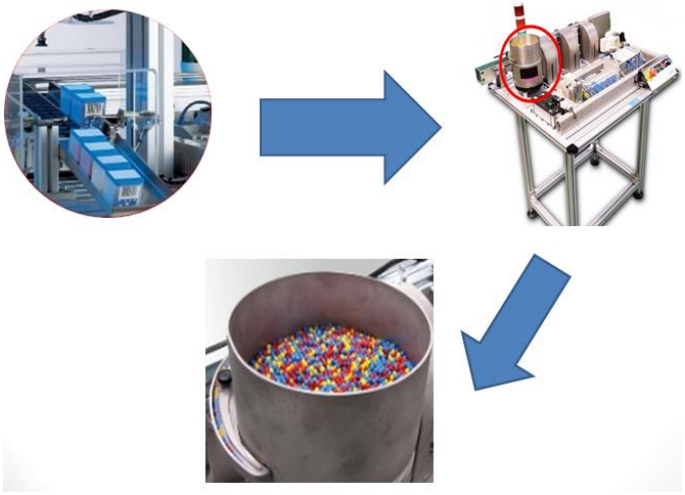


Figura 11. Secuencia de trabajo para separación de perlas. Fuente: elaboración propia.

3.1. Diseño de la estación

Para simplificar el problema se dividió la búsqueda de información en sistemas independientes del equipo y se enfocó la búsqueda en soluciones a cada sistema por separado. El método utilizado para la selección de la mejor alternativa es el método ordinal de criterios ponderados. Los sistemas en los cuales se dividió el problema son:

• Sistema de dosificación. Recibe las perlas a clasificar y garantiza un flujo constante y organizado de perlas, hacia el sistema de transporte.

• Sistema de transporte. Conecta el sistema de dosificación con el sistema de identificación de color y posteriormente con el sistema de clasificación. Se encarga de transportar las perlas hacia los diferentes dispositivos, de una forma contante, ordenada, además garantiza una distancia de separación determinada y una velocidad sincronizada con la velocidad del sistema de identificación del color y sistema de clasificación.

• Sistema de identificación de color. Encargado de identificar el color de las perlas mediante lectura de señales de luz emitidas por cada color en particular, este es capaz de generar una respuesta deferente para tres tipos de colores diferentes.

• Sistema de clasificación y selección. Encargado de recibir las señales del sistema de identificación de color y emitir respuestas que permitan la separación por color de las perlas.

3.2. Fabricación de la estación

Banda transportadora. La banda transportadora está construida con materiales de aluminio y acero inoxidable, los cuales se caracterizan por su resistencia al desgaste y a la corrosión. Cada una de las partes que la conforman la banda, están fabricadas de tal forma que sean flexibles y movibles, facilitando el posible acoplamiento de los demás mecanismos que conforman la máquina, figura 12.

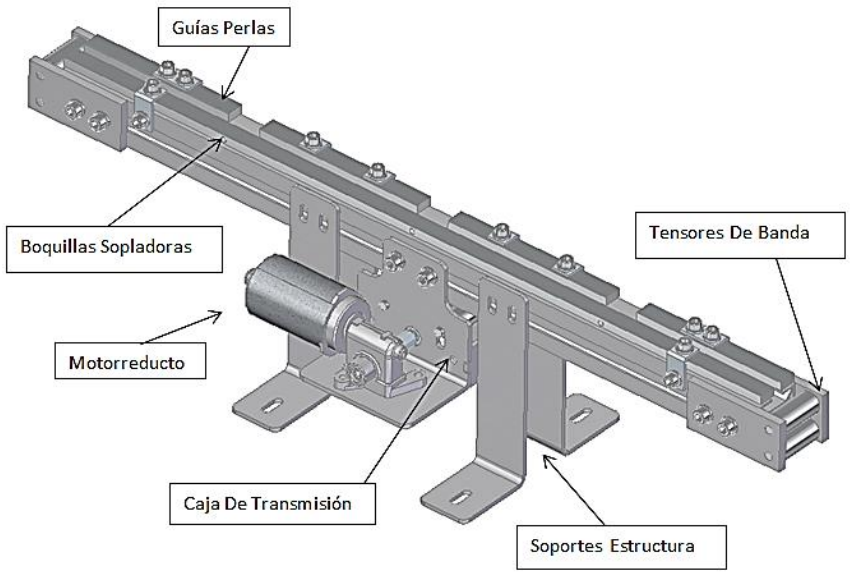


Figura 12. Diseño general de banda transportadora. Fuente: elaboración propia.

Contenedores de perlas. Se fabricó a partir de una lámina de acero inoxidable de un calibre 16, la cual se cortó y dobló de acuerdo al diseño y dimensiones geométricas establecidas. Mediante un proceso de fresado se realizó un sistema de mirilla, con el fin de verificar el nivel máximo de perlas recolectadas en cada contenedor.

Mesa ranurada y soportes. La mesa se fabricó a partir de placas ranuradas unidas entre sí por medio de pernos de sujeción. Esta reforzada con perfiles en los extremos en estilo de marco. La mesa está montada sobre soportes de perfil de estrella de 35mmx35mm que forman una estructura de cuatro patas regulables, por medio de tornillos niveladores.

Sistema vibratorio. La tolva de almacenamiento de las perlas multicolor, se fabricó a partir de una lámina de acero inoxidable de calibre 18, la cual se cortó y rolo en forma de cilindro, la parte inferior de la tolva se cortó en forma de círculo y se soldó con soldadora TIG (Tungsten Inert Gas). Para el sistema de vibración se acopló un motor de 24V DC, con dos masas excéntricas en cada extremo, figura 13.

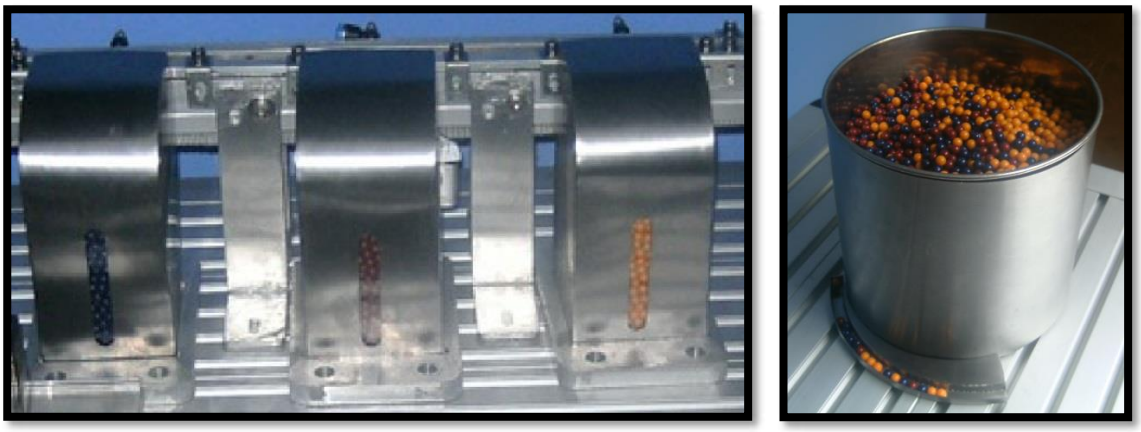
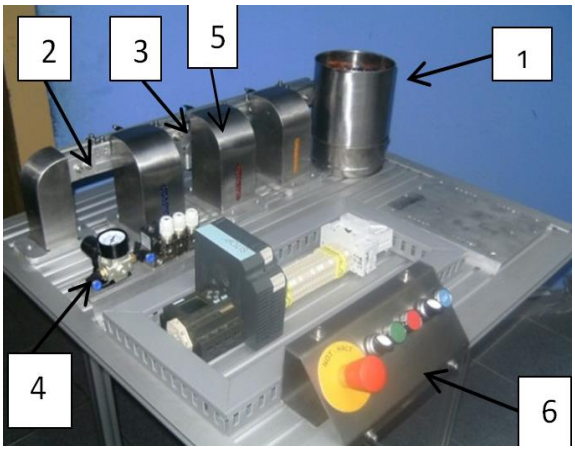


Figura 13. Contenedores de perlas separadas y tolva separadora. Fuente: elaboración propia.

3.3. Control y Visualización

El sistema neumático está conectado a la línea de aire comprimido de la HAS 200, contiene reguladores de presión 3 electroválvulas, mangueras, 3 boquillas sopladoras con regulador de flujo. Cada uno de los componentes del sistema están concatenados con el PLC, el cual es el centro de control de toda la estación recicladora de pellets, figura 14.

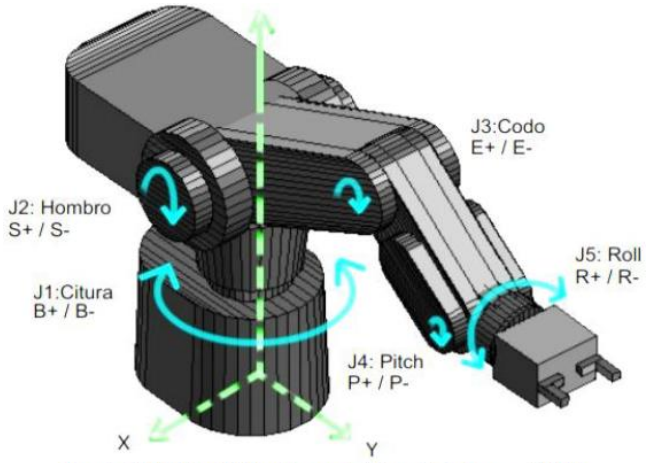


N°	Elemento
1	Alimentador vibratorio
2	Banda transportadora
3	Sensores
4	Sistema neumático de soplado
5	Contenedores de perlas
6	Panel de control

Figura 14. Estación automatizada para el reciclaje de perlas. Fuente: elaboración propia.

4. Interfaz Brazo Robótico

La rehabilitación del brazo Melfa Mitsubishi RV-M1 se llevó a cabo con el fin de utilizar tecnología ya presente en la Facultad en la integración de la estación de reciclaje de perlas con la HAS200, cada uno de los parámetros planteados fueron desarrollados, figura 15.



Fuente (Mckinley R, Rodríguez S, Yime R, & James., 2012)

Figura 15. Brazo Mitsubishi RV-M1. Fuente: elaboración propia.

4.1. Cinemática Directa

Se utilizó para describir la posición del robot en el espacio tridimensional por medio de descomposición algebraica teniendo en cuenta una referencia fija dado que el análisis se hace en el robot, este tiene una serie de eslabones unidos que toman su punto de referencia de la parte fija la solución se reduce en tomar los ángulos θ para cada eslabón y obtener las coordenadas de los puntos P_x, P_y, y P_z este se puede resolver por el método de Denavit-Hartenberg empleando matrices homogéneas donde se tendrá la ubicación de un eslabón respecto al otro, reduciendo a encontrar la matriz homogénea de transformación T (Craig, 2006).

4.2. Cinemática Inversa

El estudio de la cinemática inversa da solución a la mayoría de las aplicaciones, donde se requiere determinar los ángulos entre eslabones necesarios para una posición específica del efector final. Para obtener esta ubicación y orientación dada se hace una referencia de

nuevo a la posición fija ubicada en la parte inferior de la base. Este planteamiento es el de uso fundamental para la aplicación práctica de los manipuladores. (Craig, 2006). A diferencia de la solución del problema cinemático directo, la solución del problema cinemático inverso no es única, arrojando como resultado la existencia de diferentes n-uplas $q=[q_1,q_2,q_3,\ldots,q_n]^T$ que posicionan y orientan el extremo del robot del mismo modo. (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007). El cálculo de la cinemática inversa resulta ser un problema de alto grado de complejidad cuyo proceso de análisis y solución conlleva a resultados comúnmente no únicos. (Solano B, 2015).

4.3. Modelado Geométrico

El proceso de modelado se llevó a cabo en el software SOLIDWORKS®, para el uso del respectivo programa se utilizó una licencia estudiantil con periodo de caducidad, descargada mediante la página de Dassault Systèmes®. El levantamiento de medidas del manipulador RV-M1 se realizó mediante el uso de un calibrador pie de rey y un flexómetro. De los componentes se dibujaron las geometrías externas de las piezas, sin tomar detalle de sus características internas, con el fin de poder crear una máquina virtual, puesto que permiten cumplir con los grados de libertad del manipulador y los desplazamientos. El proceso de dibujo se ejecutó en el entorno “Pieza” de SOLIDWORKS® efectuando las operaciones correspondientes para cada elemento. Posteriormente se realizó una verificación del modelo CAD siguiendo la guía del respectivo manual del fabricante, figura 16.

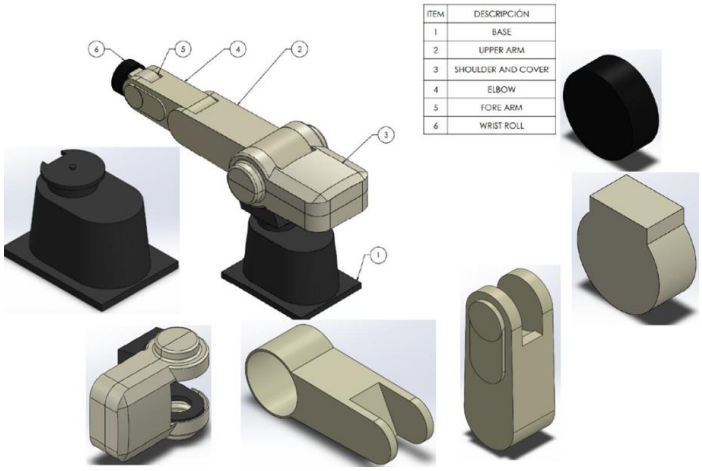


Figura 16. Modelo Geométrico Brazo Mitsubishi RV-M1. Fuente: elaboración propia.

4.4. Simulación

A través de la activación del complemento SimScape Multibody Link® en la consola de MATLAB® se puede desplegar y activar un vínculo con SOLIDWORKS® para exportar de dicho software del modelo del robot a un formato reconocible por MATLAB® para su posterior análisis y programación, figura 17.

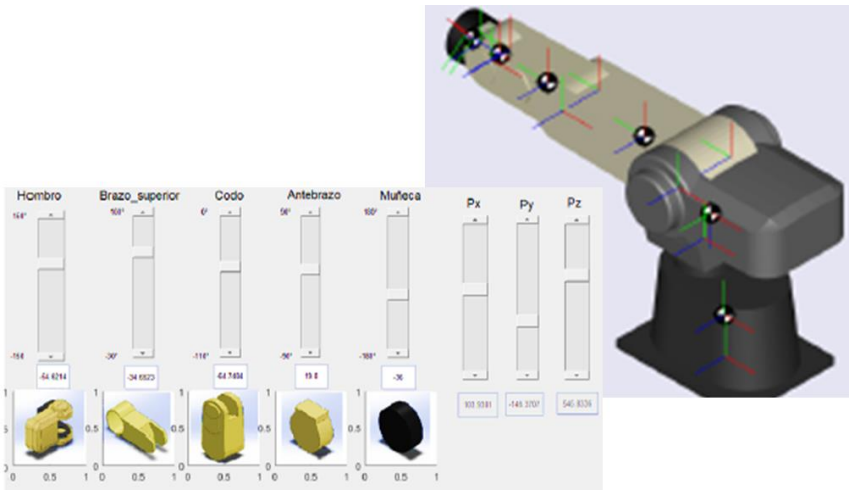


Figura 17. Interfaz Brazo Mitsubishi RV-M1. Fuente: elaboración propia.

5. Gripper Automatizado

Se llevó a cabo el diseño y la fabricación de un gripper capaz de manipular los recipientes con que cuenta la HAS200, la principal virtud del gripper fabricado es que éste puede destapar los recipientes que han sido entregados por la estación de despacho con el fin de vaciar los recipientes en la estación de reciclaje.

5.1. Pinzas Robóticas

La captación y manipulación de objetos en procesos industriales, requieren manipuladores especiales dependiendo de la operación del robot como: mecanizado, soldadura por arco continuo, soldadura por puntos, corte por chorro de agua, pintura pulverizada, montaje e inspección, entre otros. Algunos robots industriales cuentan con dispositivos automatizados que permiten el intercambiar rápidamente herramientas de agarre, utilizados para compensar la baja adherencia del manipulador al objeto, los robots cuentan con dispositivos que permiten seleccionar herramientas en el sistema según la necesidad de alcanzar niveles superiores de manipuladores más evolucionados en la robótica ha hecho que las universidades e instituciones de investigación han estado estudiando en los últimos años, los sistemas de sujeción similar a una mano humana, con énfasis en el modelado cinemático, el control de la estructura y demás, figura 18.



Figura 18. Pinzas Robóticas. Fuente: elaboración propia.

5.2. Recipientes Contenedores

Los recipientes contenedores de la celda de manufactura se encuentran fabricados en un material plástico (41 mm X 41 mm X 52 mm) con cuatro diferentes tipos de etiqueta. Cada etiqueta incorpora un código de barras que permite identificar al producto a lo largo del proceso y dentro de los cuales se va llenando con las perlas de colores de acuerdo a la configuración que le sea establecida. Los recipientes poseen una tapa plástica de color azul, como característica a resaltar al momento de encontrase tapados los recipientes por uno de sus lados sobresale una pestaña que sirve para generar un agarre al operario o en este caso a la pinza y facilitar la separación de la tapa al recipiente, figura 19, dentro de las medidas que presentaron relevancia para el desarrollo del proyecto se observó que al momento de la disposición de los cilindros sobre la plataforma de paletizado la separación entre cada hilera de recipientes está en el rango de 4 mm a 5 mm como máximo.

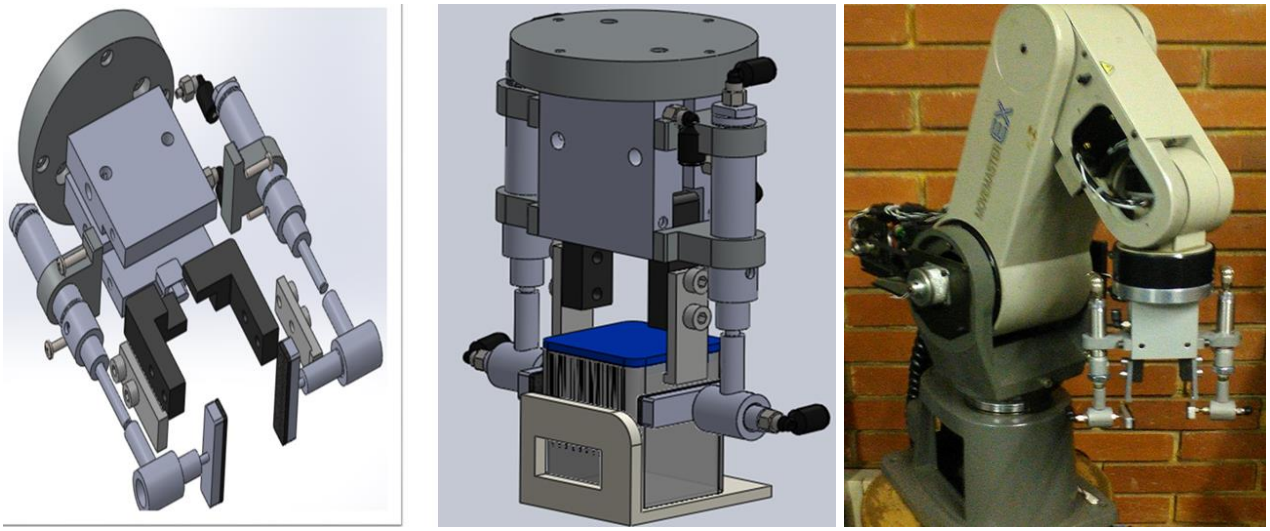


Figura 19. Gripper para la manipulación y apertura de recipientes. Fuente: elaboración propia.

6. Visión Artificial Para Transporte Autónomo

Se realizó un sistema de visión artificial capaz de reconocer un determinado producto existente en posiciones definidas dentro de la HAS200, este sistema de visión artificial tiene la capacidad de reconocer producto en más de una de las posiciones de la celda de manufactura siempre y cuando el usuario cargue de manera correcta las imágenes de cada una de las secciones en las que se dividió la celda. Para este desarrollo se realizó el montaje de una mesa en el área de trabajo para evitar problemas de identificación y tener una base de desplazamiento para el vehículo terrestre no tripulado. Este software de visión artificial, desarrollado en MATLAB®, calcula la trayectoria del vehículo y envía esta información a la unidad de procesamiento (Arduino) mediante el protocolo de comunicación bluetooth para un óptimo desplazamiento del vehículo. La alternativa de chasis

implementada cumple con los requerimientos del desarrollo, a su vez se seleccionaron los componentes electrónicos que son: actuadores, sensores, unidad de procesamiento y módulo de comunicación. Se realizó la conexión de estos componentes y su programación para el desplazamiento y control del vehículo, figura 20.

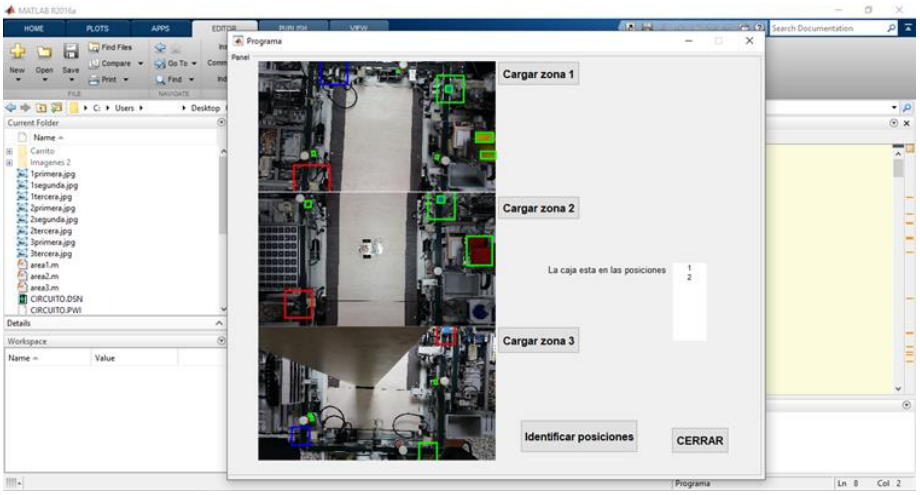


Figura 20. Software de control de UGV para la HAS200 mediante visión artificial. Fuente: elaboración propia.

3. Conclusiones

El desarrollo de actividades de investigación ha permitido incrementar de manera continua el nivel de autonomía alrededor de la HAS200, incorporando en ella estrategias novedosas de control y automatización que al ser extrapoladas al sector industrial proponen crecimientos tecnológicos requeridos en el país.

La necesidad de virtualizar recursos didácticos ha orientado el interés de diferentes grupos de investigación, generando casos de éxito como el logrado en la HAS200 y su nuevo entorno virtual a partir de modelos geométricos desarrollados de forma particular. Una

estación para la separación de perlas de tres colores diferentes fue diseñada, modelada, construida e instrumentada para el idóneo funcionamiento de la HAS200. El control de la totalidad del proceso de la estación de reciclaje se lleva a cabo mediante la programación y puesta a punto de un PLC, el cual controla cada uno de los actuadores ensamblados en la estación de trabajo.

La interacción entre los programas SOLIDWORKS® y MATLAB® permitieron recrear y animar el robot con condiciones reales, diseñar el entorno gráfico y posteriormente generar una interacción virtual con el manipulador robótico. El proceso se llevó a cabo a partir de las herramientas de MATLAB®, Simscape Multibody Link®, Simulink® y el entorno de control Guide, donde se establecieron mediante los respectivos códigos de programación las condiciones geométricas del robot que determinan sus posibles posiciones en el espacio de trabajo, las soluciones de sus cadenas cinemáticas y la simulación de su movimiento, obteniendo valores numéricos en tiempo real de ángulos (cinemática directa) y posiciones (cinemática inversa) para el robot.

Se implementó una primera versión de gripper para la manipulación de recipientes provenientes de la HAS200 basada en el principio de funcionamiento neumático. La propuesta ejecuta las actividades para las cuales fue diseñada y se acopla correctamente con al brazo robótico y la celda.

El nuevo sistema de transporte basado en visión artificial y UGV´s permite generar alternativas de movilidad autónoma de producto que interactúe con el sistema original de transporte y con ello agilizar las estrategias planteadas originalmente.

Referencias

[1] N. Reddy, N. Maheshwari, D. K. Sahu, y G. K. Ananthasuresh, «Miniature Compliant Grippers With Vision-Based Force Sensing», IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 5, pp. 867–877, Oct. 2010.

[2] Barraza, A., Rúa, J., Sosa, J., Yime, E., & Roldan, J. (2015). Modelado dinámico del manipulador serial Mitsubishi Movemaster RV-M1 usando SolidWorks. Revista de la facultad de Ingenierías Físicas Mecánicas, 49-62.

[3] Benbelkacem, Y., & Mohd-Mokhtar, R. (26-29 de Noviembre de 2012). Explicit kinematic model of the Mitsubishi RV-M1 robot arm. IEEE, 404-409. Obtenido de http://ieeexplore.ieee.org/document/6466627/

[4] Carrasco, B., & Alberto, J. (2015). Integración de un UAV (vehículo aéreo no tripulado) en la plataforma robótica ARGOS.

[5] DARMOUL Saber. Reality for Manufacturing: A Robotic Cell Case Study. Department of Industrial Engineering. King Saud University. Saudi Arabia. 7pag. 2015.

[6] Research on Assembly Modeling Process Based on Virtual Manufacturing Interactive Application Technology. School of Mechanical and Electronic Engineering. Wuhan University of Technology. Wuhan, China. 5 pág. 2017.

[7] Barraza, A., Rúa, J., Sosa, J., Yime, E., & Roldan, J. (2015). Modelado dinámico del manipulador serial Mitsubishi Movemaster RV-M1 usando SolidWorks. Revista de la facultad de Ingenierías Físicas Mecánicas, 49-62.

[8] Forero, J., Hurtado, L., & Ruiz, V. (Febrero de 2015). Visión electrónica, Más que un estado sólido. Arquitectura paralela robótica: modelado y simulación con siemens NX. Recuperado el 10 de agosto de 2015, de

http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/article/view/11018.

[9] Marcu, C., Lazea, G., Herle, S., Robotin, R., & Tamas, L. (2010 de junio de 25). IEEE explore Digital Library, 3D graphical simulation of an articulated serial manipulator based on kinematic models. Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5524593/.

[10] Luengas, L. A., Sánchez, G., & Cárdenas, S. M. (2015). Nuevas herramientas pedagógicas: laboratorio virtual. Visión electrónica, 9(2), 277-284.https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/11034.

[11] Luengas, L. A., Rincón López, D. A., & Galeano, K. J. (2010). Realidad virtual no inmersiva: instrumentos electrónicos de aplicación educativa. Visión electrónica, 4(1), 94-105.https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/275.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

DESIGN AND SIMULATION OF TEMPERATURE AND PH CONTROL FOR THE START A BATCH TYPE BIOREACTOR

Diseño Y Simulación De Control De Temperatura Y Ph Para El Inicio De Un Biorreactor Tipo Batch

Angie Katherine Lizcano[1], Andrea Carolina Morales[2], Walter Naranjo Lourido[3], Javier Eduardo Martínez Baquero[4]

Abstract

For the design, development, startup, and general operation of anaerobic digestion systems that obtain energy from organic waste, it is necessary to implement the monitoring and control of critical variables within methanogenesis. The bioreactor recreates the ideal conditions for those bacteria (inoculum), which will reproduce quickly and increase the energy generation. This process is proportional to the matter decomposition. This document presents the design of an automated system that monitors and controls two fundamental parameters for starting a Batch-type bioreactor: temperature and pH. An experimental design was performed on two Batch-type bioreactors composed of a common substrate (organic waste), and a specific inoculum for each one. The experimental design uses

[1] Especialista en Instrumentación y Control Industrial. Universidad de los Llanos. Colombia. E-mail: angie.lizcano@unillanos.edu.co
[2] Especialista en Instrumentación y Control Industrial. Universidad de los Llanos. Colombia. E-mail: acmorales@unillanos.edu.co
[3] Doctor en Ingeniería. Universidad de los Andes. Colombia. Docente Catedrático Universidad de los Llanos. Colombia. E-mail: wnaranjo@unillanos.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0697-4282
[4] Especialista en Instrumentación y Control Industrial. Universidad de los Llanos. Colombia. Docente de Planta Universidad de los Llanos. Colombia E-mail: jmartinez@unillanos.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4377-7867

sensors and actuators of pH, temperature, and flow. Also, a control algorithm operates the temperature and pH system. This control adjusts each variable to guarantee a maximum bacterial growth within the bioreactor, which generates as much biogas as possible.

Keywords: anaerobic biodigestion, bioreactor Batch, methanogenesis, methane production, pH, proportional integral control (PI), temperature.

Resumen

Para el diseño, desarrollo, puesta en marcha y operación general de sistemas de digestión anaeróbica que obtienen energía de residuos orgánicos, es necesario implementar el monitoreo y control de variables críticas dentro de la metanogénesis. El biorreactor recrea las condiciones ideales para esas bacterias (inóculo), que se reproducirán rápidamente y aumentarán la generación de energía. Este proceso es proporcional a la descomposición de la materia. Este documento presenta el diseño de un sistema automatizado que monitorea y controla dos parámetros fundamentales para la puesta en marcha de un biorreactor tipo Batch: temperatura y pH. Se realizó un diseño experimental en dos biorreactores tipo Lote compuestos por un sustrato común (residuo orgánico), y un inóculo específico para cada uno. El diseño experimental utiliza sensores y actuadores de pH, temperatura y flujo, además, un algoritmo de control opera el sistema de temperatura y pH. Este control ajusta cada variable para garantizar un máximo crecimiento bacteriano dentro del biorreactor, que genera la mayor cantidad de biogás posible.

Palabras clave: biodigestión anaeróbica, biorreactor Batch, control integral proporcional (PI), metanogénesis, pH, producción de metano, temperatura.

1. Introducción

Los biodigestores representan una fuente de energía renovable, viable desde mediados del siglo XIX, al ser implementados en el tratamiento de aguas negras sometidas a digestión anaeróbica. Sin embargo, su potencial fue tenido en cuenta sólo hasta la crisis de los combustibles fósiles, donde se incursionó en la investigación y mejoramiento de estos sistemas. Desde entonces, los biodigestores fueron considerados como una opción para disminuir la cantidad de residuos sólidos generados. Estos residuos son aprovechados para generar biogás y fertilizantes naturales, generando una alternativa factible para contrarrestar la dependencia de los combustibles fósiles [1,2].

Para que ocurra el proceso bioquímico al interior de un biodigestor, se requieren condiciones óptimas de temperatura y pH, que permitan un rápido crecimiento de los microorganismos. Esta proliferación bacteriana degrada velozmente la materia orgánica y por ende se incrementa la producción de biogás. En este caso, el control de temperatura es crucial puesto que garantiza una rápida descomposición de la materia orgánica. Los rangos de temperatura propicios pueden variar entre los 12 a 37° C, para los organismos mesófilos; y de 49 a 65 °C, para los termófilos; sin embargo, es común trabajar en el rango mesofílico (37 °C) debido a que es fácil mantener la temperatura estable sin requerir de grandes transferencias de energía. En el caso del pH, mantener este parámetro en condiciones idóneas permite la coexistencia de las poblaciones microbianas y la composición del biogás producido. Para que ocurra la metanogénesis es necesario mantener un pH entre 6,5 a 7,5, debido a que valores inferiores inhiben la fermentación e

incluso la detienen. Una alteración del pH produce biogás pobre en metano y, por tanto, menores cualidades energéticas, [3].

Por lo anterior, durante el arranque de un biodigestor tipo Batch, figura 1, se hace necesario un monitoreo constante de la temperatura y el pH. Con esto se pretende tomar acciones correctivas para garantizar condiciones óptimas que incentiven el crecimiento bacteriano y favorezcan el desarrollo de cada etapa en la digestión anaerobia. Como resultado se logra la degradación del material orgánico obteniendo un alto potencial energético del biogás.

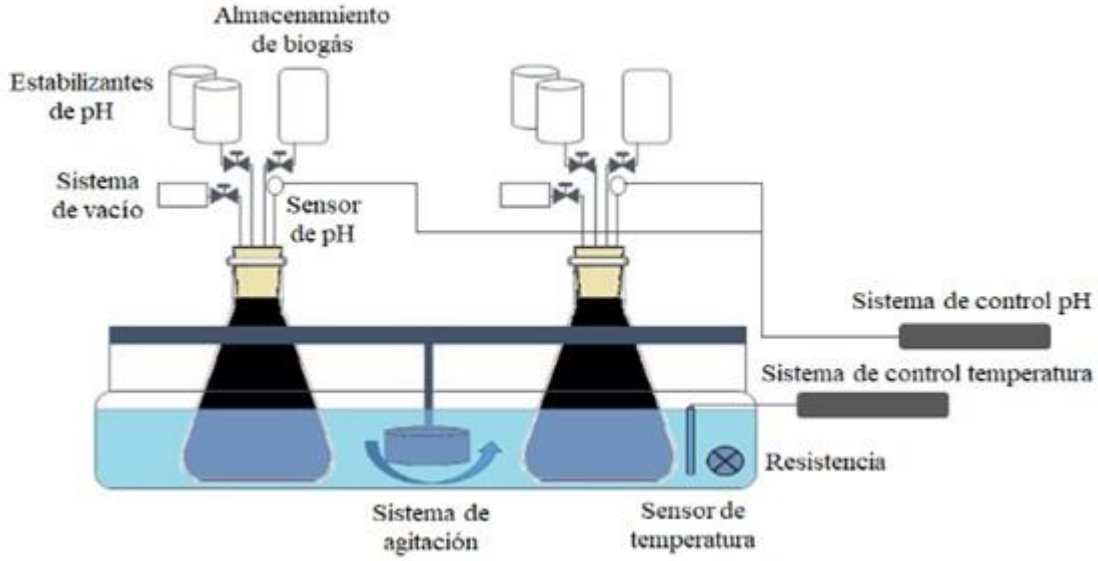


Figura 1. Esquema del diseño experimental. Fuente: elaboración propia.

2. Descripción del trabajo

Este diseño plantea el monitoreo y control de temperatura y pH para un sistema de digestión anaerobia de material orgánico. Este control permite garantizar el arranque de un biodigestor tipo Batch, el cual está cargado con una relación inóculo/sustrato predefinida. Para este control, se diseñó la instrumentación que monitorea los parámetros. Dicho control

garantiza condiciones idóneas para una alta reproducción de los microorganismos en la mezcla, así como la estabilidad del sistema.

El sustrato utilizado corresponde a una mezcla homogeneizada de material orgánico compuesta por desechos de frutas, hortalizas y tubérculos. Los inóculos seleccionados corresponden a lodo activo para el tratamiento de aguas residuales y a un inóculo biológico para el tratamiento de pozos sépticos. Dichos biorreactores fueron establecidos en un matraz Erlenmeyer y ubicados en un sistema de calentamiento común para garantizar condiciones comunes de temperatura (37 °C).

3. Generalidades del diseño experimental

Para el diseño experimental, se proponen dos biorreactores tipo Batch que utilizarían dos matraces Erlenmeyer adecuados con pintura epóxica con el fin de minimizar el paso de luz que pudiese inhibir la replicación de los microorganismos. Los matraces serían ubicados en un recipiente de vidrio con agua, donde se ubicaría la resistencia para calentar este fluido. Dicho recipiente contaría con un sistema de agitación para distribuir y homogeneizar el calor del fluido, así como el sensor para el monitoreo de la temperatura.

Cada biorreactor tendría con un sensor de pH, así como su sistema de vacío para eliminar el aire del recipiente antes de cargar el sustrato/inóculo y garantizar las condiciones anaeróbicas. El montaje experimental también contaría con dos recipientes para contener las soluciones ácida y básica, y sus respectivas electroválvulas. Lo anterior con el fin de dosificar de acuerdo con el comportamiento del pH medido al interior de los reactores, tal como lo muestra la figura 1.

4. Sensores e instrumentación

Para el diseño, se requieren dos sensores de pH, un sensor de temperatura y dos sensores de gas; así mismo se necesitan dos válvulas en cada biorreactor para la dosificación estabilizadora de pH. El sistema de control fue planeado y diseñado en el programa IDE Arduino y la adquisición y visualización de datos se realizó a través de LabVIEW. Cabe anotar que se realizaron dos controles totalmente independientes para cada parámetro.

Para el control de la temperatura se seleccionó un sensor DS18B20 y, a través de, un control PID se estabiliza la temperatura de referencia a través de la potencia en la resistencia térmica. La variación de la potencia se controla por el ángulo de fase para mantener los 37 °C.

El medidor de pH seleccionado es el PH- 4502C, que también utiliza un control PID. Con las variaciones del parámetro se abre la dosificación de la solución y se cuantifica la cantidad necesaria para recuperar las condiciones que garantizan el pH idóneo para la actividad de las bacterias. Así mismo, se seleccionaron los sensores (MQ- 2 y MQ-4) de CH_4 (gas metano) para recolectar datos e identificar cuál inóculo proporcionó más gas y, de esta manera, establecer el sistema de mejor producción.

5. Etapas previas al experimento

5.1. Preparación, selección y caracterización del sustrato y del inóculo

El sustrato consistirá en una mezcla de 500 g de material orgánico compuesta por desechos de frutas, hortalizas y tubérculos. Este material será previamente triturado y homogeneizado

empleando agua destilada con el fin de compactar los sólidos. Esta técnica no añadiría impurezas y facilita el proceso de digestión.

5.2. Inicio de los biorreactores

El inicio de la generación de metano tardará cerca de tres semanas después de agregar el inóculo. Este proceso se puede descomponer en cuatro fases. En la primera fase, llamada hidrólisis, las enzimas de las bacterias se encargan de descomponer los residuos de moléculas complejas a solubles, pasando de proteínas, grasas y celulosa a aminoácidos y azúcares, [4].

Para la segunda fase, se presenta un proceso fermentativo en el cual los azúcares y aminoácidos son transformados principalmente en ACV (ácidos grasos volátiles). En este proceso se obtienen otros subproductos como H_2, CO_2 y alcoholes. Esta fase de acidogénesis se produce en un pH entre 5,0 y 6,9, [4].

Durante la tercera fase, la aceto-génesis, los ACV, butírico y propiónico, son oxidados por las bacterias acetogénicas dando lugar al H_2 y al ácido acético. Así mismo, se produce CO_2, N_2, H_2, así como bicarbonatos y algunos derivados del amonio. En la fase de aceto-génesis, el pH permanece en rango ácido, entre 6,5 y 6,9.

En la fase final, la metanogénesis, las bacterias metanogénicas se alimentan del H_2 y el ácido acético y los transforman principalmente en metano, sin embargo, durante este proceso también se produce CO2 y N2, así como sales de ácido orgánicos. En esta fase el pH es alcalino y se encuentra en un rango entre los 6,9 y 7,5; [4].

Todas las bacterias del proceso se encuentran de forma simbiótica. Las bacterias encargadas de la acidogénesis predisponen el entorno para la actividad de las bacterias metanogénicas, al garantizar condiciones anaerobias y que reciban compuestos de cadena corta. Los productos intermedios de las bacterias acidogénicas son consumidos por las metanogénicas, evitando que haya condiciones tóxicas para las acidogénicas, [5].

Por tanto, es tan importante, durante estas fases iniciales, controlar el pH para que los biorreactores tengan las condiciones necesarias para llegar a producir el biogás. El seguimiento de estas fases se realizará a través de la adquisición de datos y el seguimiento gráfico; la estabilidad del pH se garantizará a través de la adición de la solución alcalinizante o acidificante según se requiera, figura 2.

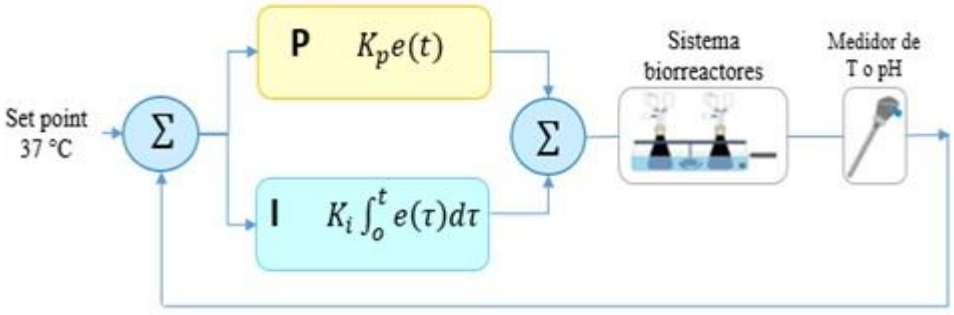


Figura 2. Esquema del diseño experimental y controlador PI. Fuente: elaboración propia.

6. Requerimientos del experimento

El desarrollo del experimento comprende el montaje, previa selección del sustrato e inóculo del biorreactor; la adquisición de datos y graficación de resultados. Así mismo, se

consideran cuatro etapas para llevar el seguimiento del proceso. Estas etapas son descritas a continuación:

6.1. Etapa 1 – Arranque de los biorreactores.

Con este experimento se determinará la producción de metano bajo una condición de temperatura en el rango mesofílico (37 °C), para dos biorreactores cargados con un sustrato en común y dos inóculos diferentes. El objetivo del experimento será el arranque de los biorreactores, tipo Batch, por lo cual se deben garantizar las condiciones óptimas de pH y temperatura en las tres fases previas a la metanogénesis.

6.2. Etapa 2 – Adquisición de datos.

Se hace necesario definir la forma en la que se adecuaron los sensores de temperatura, pH y gas. Así como el algoritmo que permite el control y la visualización de esta información.

- Temperatura del baño de calentamiento de cada matraz siguiendo el valor de referencia.
- Nivel de pH de la mezcla en cada biorreactor.
- Volumen del biogás generado en la fase de metanogénesis.

6.3. Etapa 3 – Seguimiento a la agitación.

La agitación se llevará a cabo en el baño de calentamiento con el fin de garantizar una distribución de calor homogénea en el fluido.

6.4. Etapa 4 – Presentación de resultados de experimentación.

Para presentar los resultados se realizará la retroalimentación del valor medido con el detector de CH_4. A su vez, se mostrará un gráfico de la producción de metano en una

interfaz gráfica de usuario (GUI). De esta manera se conocerá si efectivamente se dio el arranque de los biorreactores. Así mismo, durante el alcance de la metanogénesis, el control verificará la temperatura y el pH ajustando la potencia en la resistencia de calentamiento, el nivel de agitación y la adición de solución (ácida o base) que se utilizará.

7. Materiales requeridos para la experimentación

La Tabla 1 detalla los materiales y sensores a utilizar en el arranque del biorreactor tipo Batch. Cada implemento fue cuidadosamente escogido pensando en la forma más práctica para minimizar el tiempo de arranque frente a la producción del biogás.

Tabla 1. Listado de materiales y sensores. Fuente: elaboración propia.

2 Erlenmeyer de 500 ml 2 tapones de caucho 2 bolsas de almacenamiento de gas 1 lata de pintura epóxica en aerosol (negra)	1 refractaria 1 agitador 1 resistencia eléctrica	2 sensores de pH PH-4502C 1 sensor de temperatura DS18B20 1 sensor de gas MQ-4

8. Diseño de los controladores

En esta sección se define los tipos de controlador utilizados en el arranque del biodigestor.

8.1. Control de temperatura

Para el control de temperatura del baño de calentamiento, mostrado en la figura 2, se utilizará un control PI.

Este control está definido por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{u(t) = K_p\, e(t) + K_p\, T_i \int_0^t e(t)\ dt} \qquad \textbf{(1)}$$

Donde K_p es el ajuste proporcional, el cual controla el tiempo de alcance de la temperatura ideal (37 °C). Por otra parte, K_i representa el coeficiente que elimina el error de estado estacionario. Esta variable K_i es igual a $\frac{K_p}{T_i}$, donde T_i representa el tiempo que ajusta la acción integral. La función de transferencia resultante se expresa mediante la ecuación (2):

$$\boldsymbol{CPI(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i\, s}\right)} \quad \textbf{(2)}$$

$$\boldsymbol{T = T_a + (T_o - T_a)e^{-kt}} \quad \textbf{(3)}$$

Por su parte, la ecuación (2) describe el cambio de temperatura que responde a un sistema de primer orden. Esta ecuación ayuda a implementar del control PI.

A través del control proporcional se establece la presencia de un error que favorezca que la acción sea diferente de cero. Mediante la acción integral un error pequeño garantizará una acción de control creciente; en caso de que el error sea negativo, el control será decreciente [6]. Este trabajo propone la utilización de un Arduino UNO para variar la potencia del resistor térmico mediante el control de ángulo de fase. Para aislar el control de la etapa de potencia se utilizará un optoacoplador, como se observa en la figura 3.

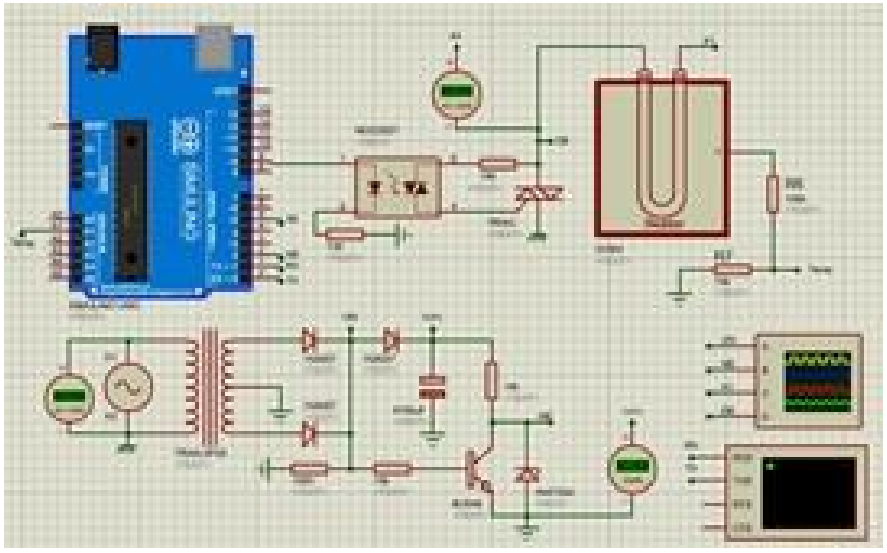


Figura 3. Esquemático del control de temperatura usando triac. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el control de temperatura utiliza el triac para modificar la cantidad de potencia transferida a la resistencia. Como resultado de este control de disparo se observa la respuesta de voltaje entregado a la carga, en la figura 4, según la simulación realizada en Proteus.

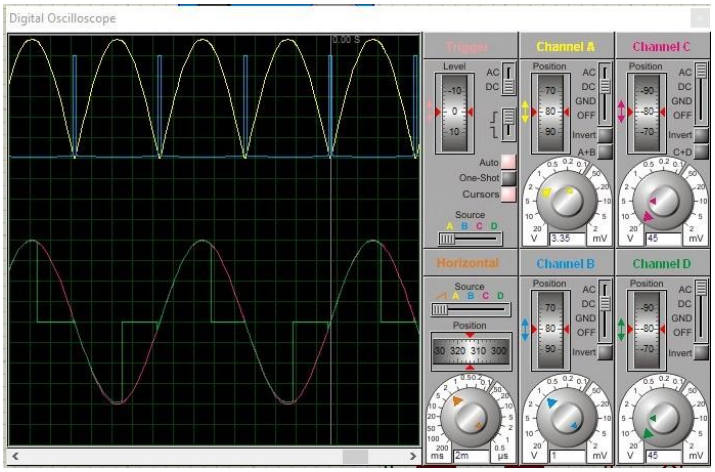


Figura 4. Voltaje en la resistencia cuando se aplica el control por ángulo de fase. Fuente: elaboración propia.

8.2. Control de pH

El control de pH funciona de manera similar al control de temperatura. Es decir, que ambos sistemas se asocian a un sistema de primer orden, por lo cual se esperan cambios lentos en el pH. Este tipo de cambios lentos pueden ser controlados utilizando un algoritmo tipo PI. La figura 5 relaciona el pH del inóculo/sustrato donde el máximo crecimiento bacteriano corresponde al pH neutro.

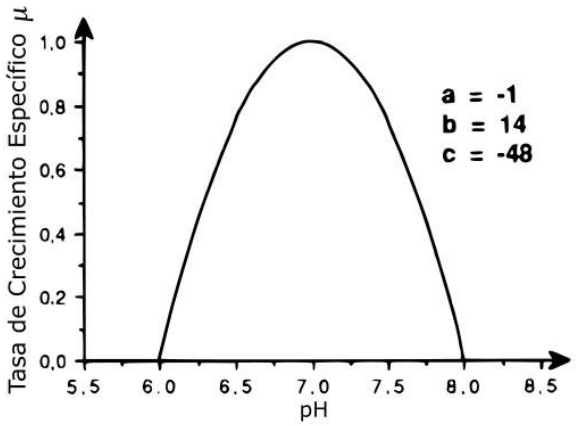


Figura 5. Tasa de crecimiento bacteriano respecto al pH de la mezcla, [7].

La anterior gráfica está definida por la ecuación 4. Del análisis de esta ecuación se puede determinar que existe reducción de la población bacteriana en dos rangos, 6.0 < pH < 8.0, de acuerdo a [7].

$$\mu(pH) = a(pH^2) + b(pH) + c \quad (4)$$

Cada cambio de pH está asociado a una fase específica dentro del arranque del biorreactor. El control de pH deberá actuar si la mezcla inóculo/sustrato sale del rango de operación. Si el pH está dentro del rango, no habrá ningún control y se dejará evolucionar las fases de inicio del biorreactor sin intervención alguna, acorde a lo estipulado en la sección 2.3.2, [7].

9. Simulación del biorreactor

El control seleccionado es el brindado por Hassam et al. Las ecuaciones siguientes muestran la evolución de los procesos que relacionan las variables que enlazan los procesos de las fases de iniciales, desde la hidrólisis hasta la metanogénesis. Para esto se muestra cada una las ecuaciones diferenciales que corresponden a las fases de diferencias, [8, 9].

$$\frac{dx_1}{dt} = (\mu_1 S_1 - \alpha D) X_1 \qquad (5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = (\mu_2 S_2 - \alpha D) X_2 \qquad (6)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{\{1,in\}} - S_1) - k_1 \mu_1 S_1 X_1 \qquad (7)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = D(S_{\{2,in\}} - S_2) - k_2 \mu_1 S_1 X_1 - k_3 \mu_2 S_2 X_2 \qquad (8)$$

$$\frac{dz}{dt} = D(Z_{in} - Z) \qquad (9)$$

$$\frac{dC}{dt} = D(C_{in} - C) - q_c + k_4 \mu_1 S_1 X_1 + k_5 \mu_2 S_2 X_2 \qquad (10)$$

$$CH_4 = k_6 \mu_2, max \frac{S_2}{\left\{S_2 + K_{S_2} + \frac{S_2^2}{K_{I_2}}\right\}} X_2 \qquad (11)$$

Donde X_1 corresponde a la concentración de las bacterias acidogénicas, X_2 es la concentración de las bacterias metanogénicas, S_1 a la concentración del sustrato orgánico, S_2 a la concentración de los ácidos volátiles, μ_1 a la tasa de crecimiento específico de las bacterias acidogénicas, μ_2 a la tasa de crecimiento específico de las bacterias metanogénicas, D al coeficiente de dilución, k_1 al rendimiento de la concentración del sustrato, k_2 al rendimiento de producción de ácidos grasos volátiles (AGV), k_3 al

rendimiento del consumo del AGV, k_4 al rendimiento de la producción de CO_2 con X_1, k_5 al rendimiento de la producción de CO_2 con X_2 y k_6 que corresponde a la producción de CH_4, [8], [9].

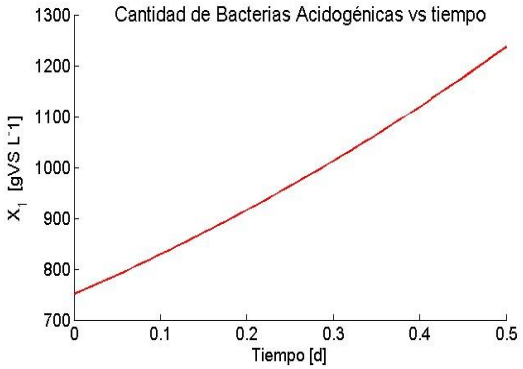
El modelo anterior, llamado modelo AMOCO, es el más generalizado y utilizado en el diseño y simulación de biodigestores anaeróbicos. Este modelo permite comprender el proceso de cambios químicos que ocurren durante el alcance de la etapa metanogénica.

En la etapa de acidogénesis, las bacterias acetogénicas X_1 consumen el sustrato S_1 y se producen los ácidos grasos volátiles (AGV) y dióxido de carbono, de acuerdo con la ecuación (12). Durante la etapa de metanogénesis, las bacterias metanogénicas consumen los AGV, y se produce metano y dióxido de carbono, siguiendo la ecuación (13).

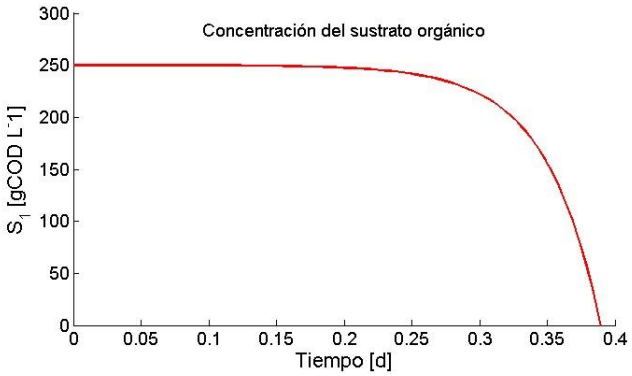
Acidogénesis (con tasa de μ_1): $$\boldsymbol{k_1 S_1 \rightarrow X_1 + k_2 S_2 + k_4 CO_2} \quad \textbf{(12)}$$

Metanogénesis (con tasa de μ_2): $$\boldsymbol{k_3 S_2 \rightarrow 2X_2 + k_5 CO_2 + k_6 CH_4} \quad \textbf{(13)}$$

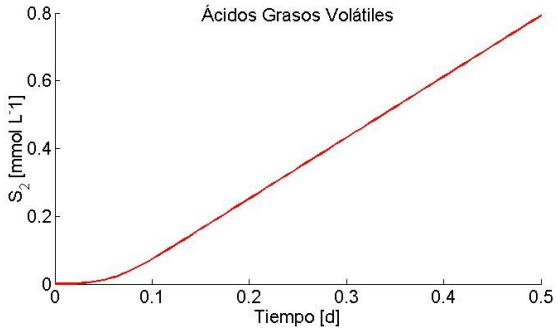
Para la simulación computacional del biorreactor, figura 6, se tendrán en cuenta las ecuaciones 3 a la 11, [8, 9].



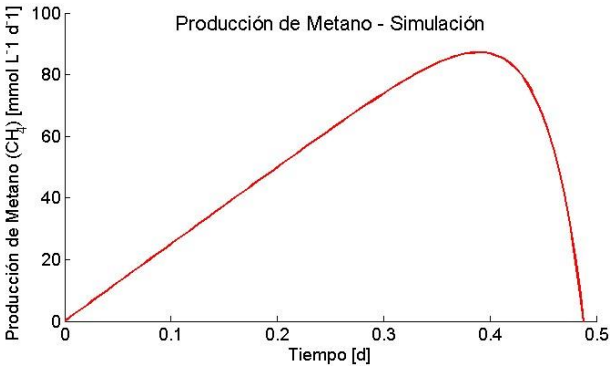
a. Cantidad de Bacterias Acidogénicas.



b) Concentración de sustrato orgánico.



c) Concentración de Ácidos Grasos Volátiles.



d) Producción de Metano

Figura 6. Resultados de las variables de estado del proceso. Fuente: elaboración propia.

10. Resultados y conclusiones

Como resultado de implementar las ecuaciones simplificada del modelo AMOCO, se tiene que:

- El control de temperatura corresponde a un sistema simple de primer orden. En este caso, el control se desagrega del biorreactor controlando la temperatura del agua del baño termostático. Por equilibrio térmico se autorregula la temperatura del biorreactor.
- El control de temperatura sólo aplica para un rango entre 6,0 < pH< 8,0. Para garantizar que las fases de generación de ácidos grasos volátiles y ácido acético evolucionen de manera natural.
- La figura 6 muestra el crecimiento bacteriano; mientras disminuye la concentración de sustrato orgánico en la mezcla.
- Por otra parte, se muestra cómo se incrementan los ácidos grasos volátiles con el transcurrir de la simulación, dando paso a la fase acetogénica.

Como resultado principal se muestra la evolución de producción del metano. Es de destacar que existe un pico de producción del biogás. Posterior a 0,4 d, se disminuye la tasa de producción debido a la disminución de la concentración del sustrato orgánico. Esto indica que hay sobrepoblación de bacterias y su alimento escasea.

Referencias

[1] K. Cacua, O. Amell y L. Olmos, "Estudio comparativo entre las propiedades de combustión de la mezcla biogás-aire normal y biogás-aire enriquecido con oxígeno", Revista Ingeniería e Investigación, vol. 1, pp. 233-241, 2011.

[2] R. Liriano, Aplicación de biofertilizantes como alternativa nutricional, ambiental y económica en la agricultura urbana, España: Universidad de Girona, 2005.

[3] A. Padilla y J. Rivero, "Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del complejo arqueológico Huaca de la Luna", Ciencia y Tecnología, vol. 1, pp. 29-43, 2016

[4] L. O. González Salcedo y Y. Olaya Arboleda, Fundamentos para el diseño de Biodigestores, Departamento de Ingeniería, 2009.

[5] M. T. Madigan, J. M. Martinko y J. Parker, Biología de los microorganismos, 10 ed, 2004.

[6] A. Pulido y J. Espitia, Diseño e implementación de un sistema de supervisión, monitoreo y control de temperatura, presión y tiempo de proceso en un sistema de digestión anaerobia de biomasa (contenido ruminal bovino) a escala de laboratorio, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.

[7] G. Bastin, "On-line estimation and adaptive control of bioreactors", Elsevier, vol. 1, 2013.

[8] S. Hassam, E. Ficara, A. Leva y J. Harmand, "A generic and systematic procedure to derive a simplified model from the anaerobic digestion model No. 1 (ADM1)", Biochemical Engineering Journal, pp. 99, 193-203, 2015.

[9] E. Ficara, S. Hassam, A. Allegrini, A. Leva, F. Malpei y G. Ferretti, "Anaerobic digestion models: a comparative study. IFAC Proceedings.", vol. 45(2), pp. 1052- 1057, 2012.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

CONTROL GLOVE BASED ON ANGULAR ORIENTATION.

Guante de control basado en orientación angular.

Vergara Torres Santiago[1] Novoa Roldán Kristel Solange[2]

Abstract

This document presents a prototype developed at the Francisco José de Caldas District University of a tool called Control Glove based on angular orientation that will be in charge of controlling different specialized systems, the system starts from the information that can be found in the movements of the hands, this information varies between acceleration, velocity and angular orientation with respect to the three-dimensional Cartesian plane (X, Y, Z). The final prototype of the control glove may be used in industrial, manufacturing, educational, medicinal, and amateur applications, which will be determined depending on the use that the glove needs.

Keywords: Acceleration, accelerometer, angular, control, glove, orientation, prototype

[1]Estudiante de Tecnología en electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, miembro del semillero de investigación en robótica SIRO. E-mail:svergarat@correo.udistrital.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8713-4807.

[2] Profesora de carrera Tecnología en Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica. Miembro del Grupo de investigación en Robótica Móvil Autónoma ROMA. E-mail: ksnovoar@udistrital.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2951-676X

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

Resumen

En este documento se presenta el prototipo de un "Guante de control basado en orientación angular" desarrollado dentro del grupo de investigación en Robótica Móvil Autónoma ROMA- de la en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas el cual, se basa en controlar y sensar algunos de los movimientos realizados por las manos, razón por la cual, la información varía en tres parámetros: aceleración, velocidad y orientación angular, en términos del plano cartesiano tridimensional (X,Y,Z). El prototipo final del guante de control puede ser usado en aplicaciones industriales, manufactureras, educativas, medicinales, y amateur, las cuales se determinarán de acuerdo a su aplicación.

Palabras clave: Aceleración, acelerómetro, angular, control, guante, orientación, prototipo

1. Introducción

El desarrollo científico tecnológico, le ha permitido al hombre solventar diferentes necesidades desde su oficio, brindándole herramientas de tipo electrónico y electromecánico, que facilitan la relación hombre-máquina, por lo anterior, se tiene que la realización de diferentes tareas se hace más sencilla y en algunos casos más seguras [1].Partiendo de lo anterior, se realizó un prototipo electrónico experimental, basado en un guante que permite convertir algunos movimientos físicos de las manos en información, para poder almacenarla y poder estudiarla en diferentes ambientes.

Este prototipo, pretende controlar diferentes sistemas del tipo electrónico y virtual, de manera inalámbrica; por medio de un conjunto de sensores de aceleración, pulsadores y

protocolos de comunicación, lectura e interpretación mediante radiofrecuencia. Cabe resaltar que cada uno de estos protocolos, se ejecutan en un microprocesador Atmega328p, adicionalmente se tiene que, dicho prototipo crea una inmersión y una vinculación entre el humano y el sistema. El prototipo tiene la capacidad de control con diferentes sistemas programables, en comparación con otros sistemas de control angular, se denota un cambio en su tecnología además de capacidad industrial con la adaptación de sensores y programación de alto nivel con el fin específico de la vinculación tecnológica-humana, [2] [3].

1 Marco de referencia

1.1. Acelerómetro

Es un dispositivo que mide la aceleración del movimiento de una estructura ó cuerpo; este sensor se basa en un material piezoeléctrico que realiza su lectura, con base en a la fuerza generada por la aceleración del cuerpo, dicha fuerza representa una carga eléctrica en el material piezoeléctrico que es proporcional a la fuerza ejercida. Estos sensores son muy usados en navegación, ubicación y estabilización, [4].

1.2. Aceleración

La aceleración es el fenómeno físico que se obtiene del cambio de la velocidad; para cambiar la aceleración se puede cambiar la rapidez, o su dirección. Se puede denotar la aceleración como $a = \frac{dV}{dt}$, ya que es la variación de la velocidad con respecto al tiempo.

1.3. Velocidad angular

La velocidad angular es la rapidez con la que cambia el ángulo en función del tiempo, en otras palabras, es la variación del ángulo respecto al tiempo y se define como $W = \frac{d\Theta}{dt}$

1.4. Acelerómetro MPU6050, figura 1

Este sensor es una unidad de medición inercial de 6 grados de libertad, capaz de leer 3 ejes de giroscopio y 3 ejes de acelerómetro, [5].

Este acelerómetro, es parte esencial del prototipo, ya que permitirá determinar la ubicación espacial tridimensional del guante, que llevará el dispositivo.



Figura 1. Acelerómetro MPU6050, [5].

1.5. Arduino nano, figura 2

Es una placa I/O que se ajusta a un entorno de desarrollo, fundamentado en procession/Wiring que se basa en un microcontrolador ATmega328P, [7]. Esta placa es usada para desarrollar objetos interactivos, también se puede usar para establecer comunicación entre un sistema electrónico y una computadora.

En el prototipo cumple con la función directa de procesar los datos de los sensores,

reconfigurar las tareas y enviarlas a los puertos de comunicación.



Figura 2. Arduino nano, [7].

1.6. Radio comunicación

Es un medio de comunicación que se basa en ondas de radio, este principio se maneja a través de los campos eléctricos y campos magnéticos, esta conexión se basa en un espectro radioeléctrico, donde se encuentran diferentes tipos de frecuencia; la baja frecuencia, la media frecuencia, alta frecuencia, muy alta frecuencia y ultra alta frecuencia, [5].

1.7. Módulo de radio frecuencia

Los módulos de radiofrecuencia son muy usados para comunicación inalámbrica, ya que, son de bajo costo; estos sistemas usan dos módulos, uno de recepción y otro de transmisión, y la frecuencia a la que trabajan es de alrededor de 433MHz, [8], figuras 3 y 4.

2 Metodología

2.1. Calibración sensor MPU6050.

La correcta calibración del acelerómetro MPU 6050, se puede realizar mediante un proceso de computación; uno de los procesos más fiables para su correcta calibración, además, se basa en la corrección de los OFFSETS del sensor, de tal manera que, modificando sus valores internos, estos OFFSETS lleguen a 0 (su valor más cercano posible); esta

calibración cumple la función de dejar al sensor listo para funcionar de manera correcta. La calibración de este sensor se puede hacer por cualquier placa programable, capaz adoptar las medidas y los parámetros que nos da el proveedor en la hoja técnica o datasheet, [5].

Para el desarrollo del proyecto, se tuvieron en cuenta cuatro fases:

1. Estructuración de los prototipos.
2. Producción de señales.
3. Recepción de las señales.
4. Uso final

2.2. Estructuración de los prototipos.

- **Modelo de transmisión.**

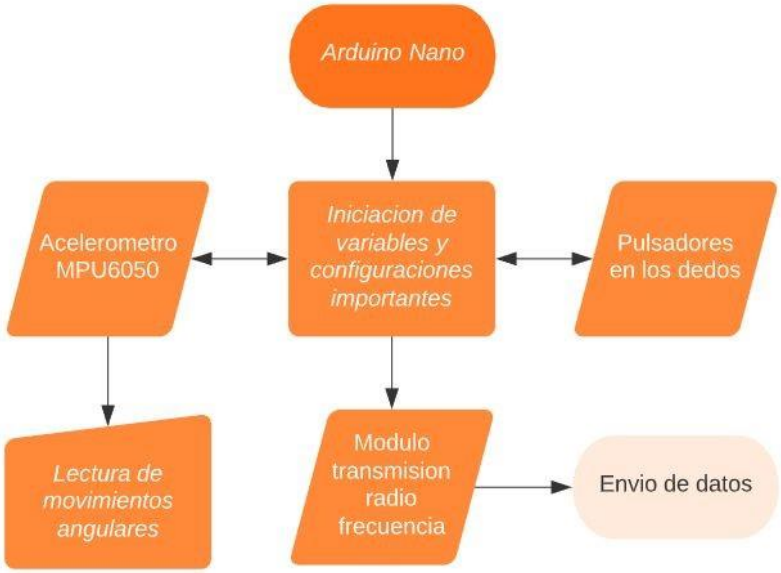


Figura 3. Modelo de transmisión. Fuente: elaboración propia.

- **Modelo de recepción**

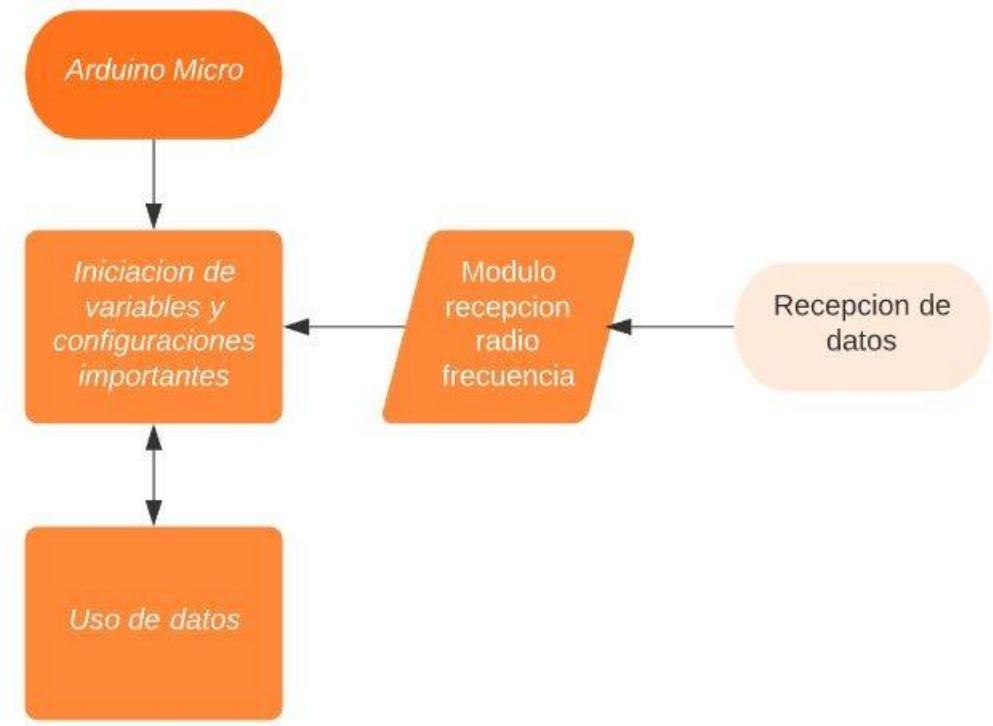


Figura 4. Modelo de recepción. Fuente: elaboración propia.

2.3. Producción de señales

La producción de las señales por radiofrecuencia se basa en la lectura acertada de los ángulos en los ejes (X, Y) con respecto a la horizontal del eje (Z=0) . Esto relaciona diferentes momentos en cada eje.

Los valores de cada ángulo varían entre 0 y ±80°

i. El primer momento, cuando el ángulo de cada eje tiene una lectura ≈ 0°

ii. El segundo momento, cuando el ángulo de cada eje está entre los 15° y los 35°

iii. El tercer momento, cuando el ángulo del eje está entre los -15° y los -35°

iv. El cuarto momento, cuando el ángulo de cada eje es menor a -35°

El siguiente modelo de relación entre ángulos, permite una correcta interpretación en el control angular positivo, tabla 1.

Tabla 1. Relación entre los ángulos positivos de cada eje. Fuente: elaboración propia.

Eje X	Eje Y	Nº Tarea
0°	0°	1
>15°,35°<	0°	2
0°	>15°,35°<	3

En cuanto a la relación angular negativa se obtiene la siguiente relación, tabla 2.

Tabla 2. Relación entre los ángulos negativos de cada eje. Fuente: elaboración propia.

Eje X	Eje Y	Nº Tarea
0°	0°	1
>-15°, -35°<	0°	4
0°	>-15°, -35°<	5

Todos los dedos menos el pulgar cuentan internamente con pulsadores en la punta de los dedos con el fin de interpretar estos movimientos, por cada pulso se envía una señal

diferente, es así como, cada dedo genera una tarea diferente.



Figura 5. Interpretación de los ángulos y las tareas para cada eje. Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se puede observar como el esquema de tareas se hace de manera individual, haciendo referencia a que el envío de datos y la relación de tareas se ejecutan un eje a la vez, en el momento en que dos ángulos lleguen a su umbral de tarea, el microcontrolador enviará una después de la otra.

Las tareas en los dedos al no afectar o no variar con respecto a la orientación del guante, no son puestas en la figura 5, mientras que, en la figura 6 se ve el comportamiento de las tareas según los sensores en los dedos.



Figura 6. Interpretación de las tareas para cada dedo. Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se ve la relación de las funciones en los dedos y sus ejecuciones según las tareas correspondientes; cada dedo ejecuta una tarea diferente.

2.4. Recepción de señales

La recepción de señales se basa en las lecturas de los caracteres o señales enviadas para cada tarea, en la recepción de señales se tendrá que construir o adaptar el modelo de comunicación adoptado por el guante de control y su reloj, con el fin que requiera el usuario final.

2.5. Uso final

El uso final del guante de control, depende únicamente del usuario que lo utilice; con la idea de no limitar su alcance; el usuario será capaz de adaptar su funcionalidad y tarea a sus propias necesidades, como ejemplos de prueba se tiene manejo de equipos, robots,

conducción de vehículos tripulados y no tripulados, vinculación de realidad virtual, además de realidad aumentada, [9]. No obstante, al no preocuparse por las limitantes, el área de trabajo se verá marcada por la creatividad del usuario final, quien decidirá si adoptar alguna de las aplicaciones ya mencionadas, ó por el contrario decide usarlo para uso personal o comercial, [10].

3 Desarrollo

La construcción del transmisor se basa en tres partes esenciales, figura 7:

3.1. Reloj de transmisión.

- El reloj, se encarga de leer los ángulos del sensor en el guante de orientación, para poder ser interpretados y enviados por medio del módulo de Transmisión RF.
- El guante de orientación y el reloj de transmisión, están conectados de forma alámbrica.

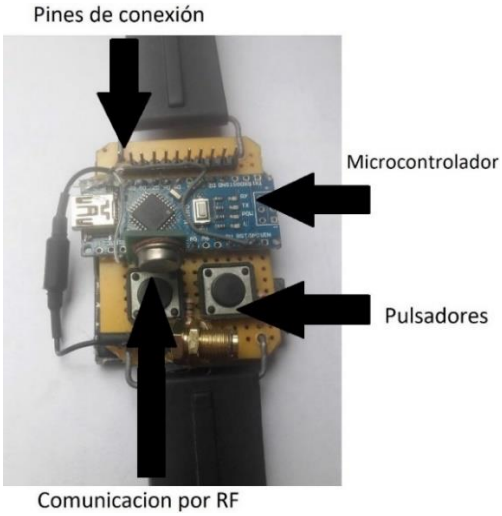


Figura 7. Reloj de transmisión. Fuente: elaboración propia.

3.2. Guante de orientación.

- El guante cumple con la función de generar los datos de orientación que son interpretados por el reloj de transmisión.
- En este prototipo, el guante cuenta con dos capas, una interna y otra externa, las cuales, cumplen la función de proteger las conexiones y el sensor MPU6050, estos, se encuentran ubicados en medio de las capas, figura 8.

En cuanto a la conexión entre el guante de orientación y el reloj de transmisión, se dispone de una cadena de cables de conexión rápida, que se conectan de manera ordenada de izquierda a derecha en ambas interfaces.



Figura 8. Guante de orientación. Fuente: elaboración propia.

Una vez conectado y encendido el sistema, los dispositivos están listos para enviar las señales de las coordenadas angulares leídas por el guante de orientación.

3.3. Módulo de recepción.

Los módulos de recepción de señales, se basan en las diferentes aplicaciones, (Como las mencionadas en el capítulo anterior: Uso final), que se le puede dar al proyecto, basándose en el modelo de recepción mostrado en la Figura 9.

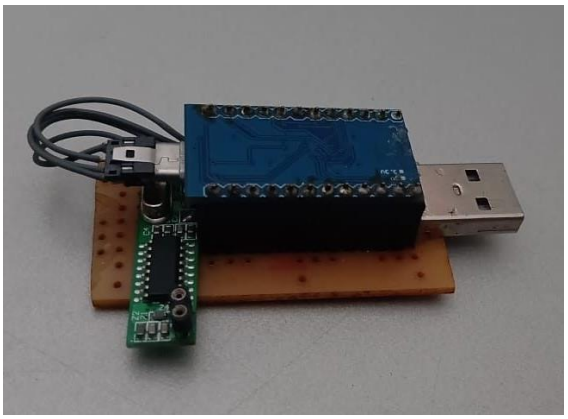


Figura 9. Módulo de recepción. Fuente: elaboración propia.

4 Pruebas y resultados

En el sistema de prueba se realiza la recepción de las funciones por medio de un computador, simulando los periféricos USB y el puerto de comunicación serial, con el fin de visualizar las tareas y mover el puntero (mouse del equipo), figura 10.

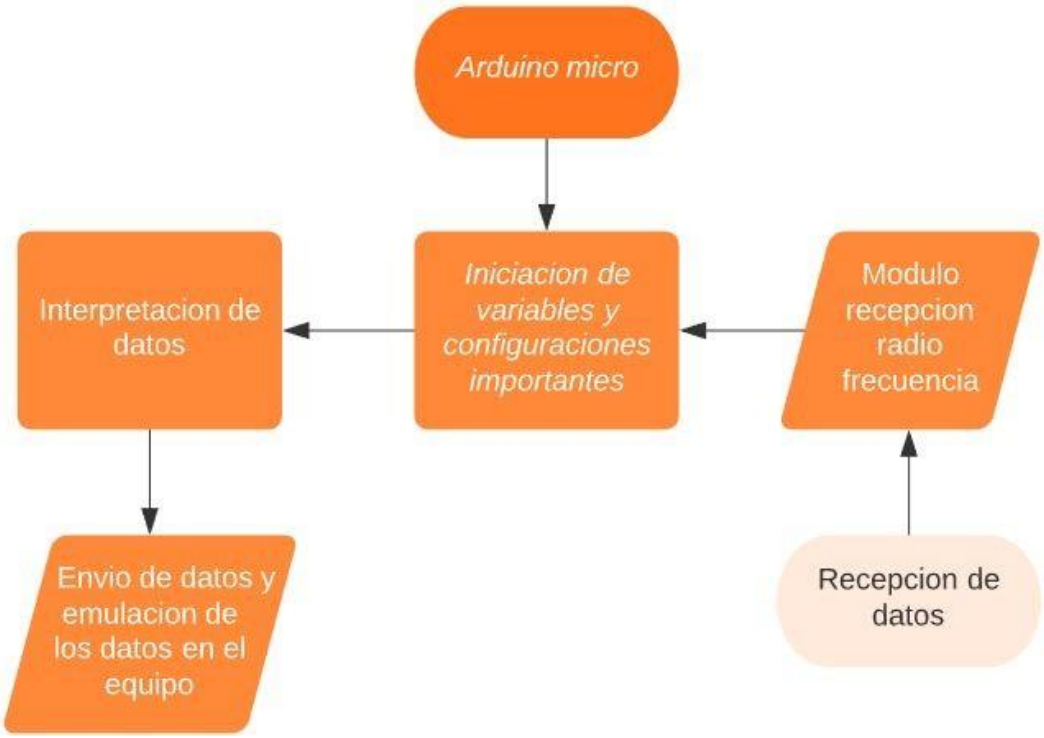


Figura 10. Esquema de prueba. Fuente: elaboración propia.

En esta fase, es necesario conectar el guante y revisar que sus conexiones estén en una posición correcta, para posteriormente ponerse el guante de orientación y ajustar el reloj de transmisión en la muñeca. Una vez acomodado el guante, queda prender el reloj de transmisión y conectar el módulo de pruebas por USB al computador, figura 11.



Figura 11. Uso correcto del guante. Fuente: elaboración propia.

En el computador no es necesario hacer configuraciones extras; es suficiente con saber que puerto de comunicación serial está usando el módulo de recepción y abrir una terminal que permita leer lo que se imprima en el puerto, simultáneamente con la lectura de los datos a través de la terminal se moverá el puntero en la misma dirección que se mueva el guante. El microcontrolador de recepción, está programado para leer las tareas que envía el guante, imprimirlas en la terminal y emular el funcionamiento del puntero, haciendo movimientos cada 15 píxeles hacia: arriba, abajo, izquierda y derecha.

El receptor del guante se modificó específicamente para poder visualizar los datos con un retardo de 250 milisegundos, tiempo suficiente para ver la variación en los movimientos interpretados por el guante; se aclara que el tiempo de respuesta en un entorno normal se aproxima a los 15 milisegundos.

Al conectar el modulo de recepcion; lo siguiente es abrir la terminal del puerto de comunicación que asignó el computador al módulo de recepción.

Una vez el receptor indique que está funcionando, ya está listo para recibir las tareas del guante.

En las siguientes figuras se dibujan dos líneas entre sus esquinas, formando una X con el fin de dejar el puntero en todo el centro de la consola para tener el consentimiento del movimiento del mouse.

Al momento de encender el guante, inmediatamente se va a empezar a transmitir los datos; en este módulo de funcionamiento se deja el guante en una posición horizontal, con el fin de que no se vean los otros movimientos. El puerto serial muestra cómo recibe varias veces la tarea número 1, según las tablas 1 y 2.

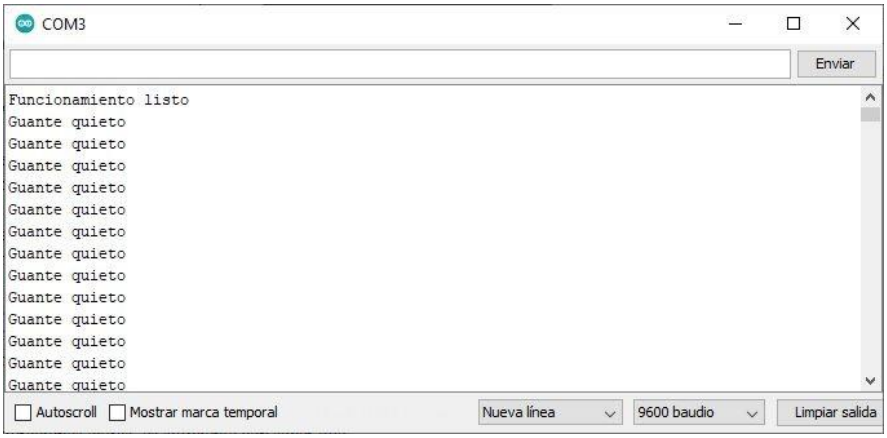


Figura 12. Puerto de comunicación en la tarea #1, guante en posición horizontal. Fuente: elaboración propia.

En la figura 12, se observa cómo después de iniciar la comunicación con el computador, el transmisor muestra su funcionamiento, seguido de imprimir la tarea que está recibiendo y

ejecutando, mientras en la figura 13, el guante se encuentra en reposo.

Ahora bien, en el buffer se tiene que, cada 250 milisegundos, se verá la instrucción que el guante emita, un claro ejemplo, si está quieto y horizontal a menos que se cambie la posición del guante; en la figura 14 se logra percibir que la última instrucción fue que el guante estaba arriba, en ese momento el guante se inclinó para ver su funcionamiento.

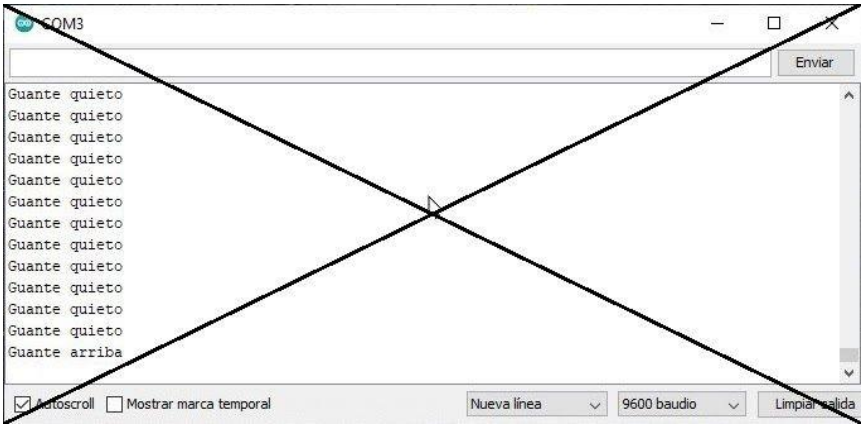


Figura 13. Puerto de comunicación en la tarea #2, guante inclinado arriba. Fuente: elaboración propia.

En consecuencia, se identifica como en el momento en que el guante se inclinó hacia arriba, el puntero del computador, (que estaba en el centro de la X), se movió 15 píxeles por encima de su posición inicial, si el guante se mantiene en la tarea 2, el puntero del computador se moverá 15 pixeles cada 250 milisegundos; Después de que se denota el cambio del puntero con la primera instrucción enviada por el guante, se pone en reposo horizontal y se vuelve a ubicar el puntero en el centro de la X de la pantalla.

La siguiente instrucción que se le dio al guante, fue inclinarlo a la derecha, lo que se refiere a la tarea 3.

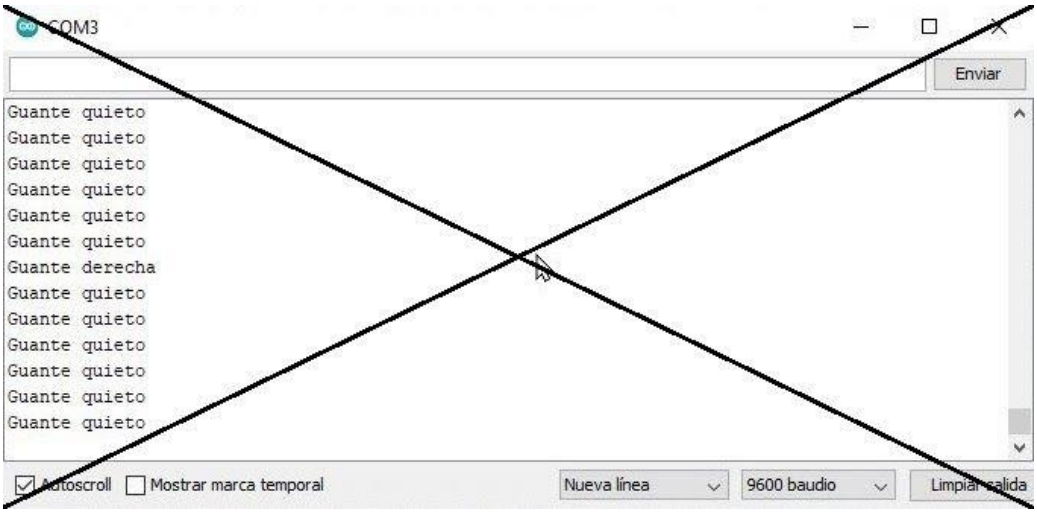


Figura 14. Puerto de comunicación en la tarea #3, guante inclinado derecha. Fuente: elaboración propia.

Partiendo del mismo análisis de la figura 14, se observa que, al inclinar el guante a la derecha, se imprime en consola la tarea 3, además de verse que el puntero se movió 15 píxeles en dirección derecha de la pantalla.

La tarea 4, referente al movimiento hacia la izquierda, el cual se observa en la figura 15, donde el puntero, al igual que en los movimientos pasados, se ve 15 píxeles hacia la dirección de la tarea con respecto al centro de la X en la pantalla.

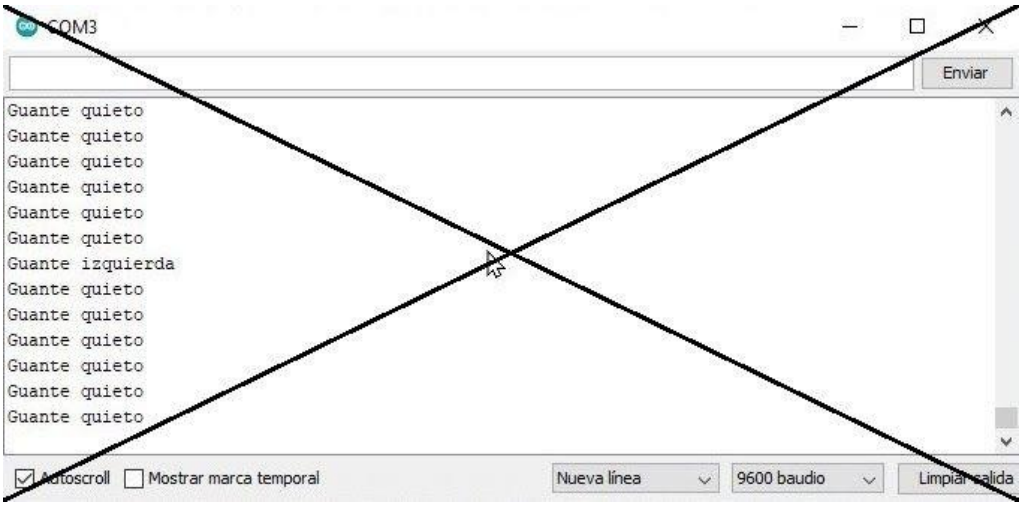


Figura 15. Puerto de comunicación en la tarea #4, guante inclinado izquierda. (Elaboración propia)

Con respecto a la última tarea de orientación, se aclara que el puntero al moverse, no se mueve pixel por pixel, sino el número que se eligió para el movimiento; el puntero genera un salto en la pantalla, diciéndole que se vaya a la coordenada en la que estaba, mas los pixeles que tiene que moverse, de esa manera el puntero se puede mover en libertad por toda la pantalla; el salto del puntero, al tener una diferencia en sus coordenadas, permite que la máquina lo lea como un movimiento suave o rápido, dependiendo del número de píxeles que se mueva en un solo salto; en la figura 16, se usaron los mismos 15 píxeles de las figuras anteriores, demostrando cómo se movió hacia abajo, quedándose por debajo de la X, en el momento que se movió el guante en la dirección de la tarea.

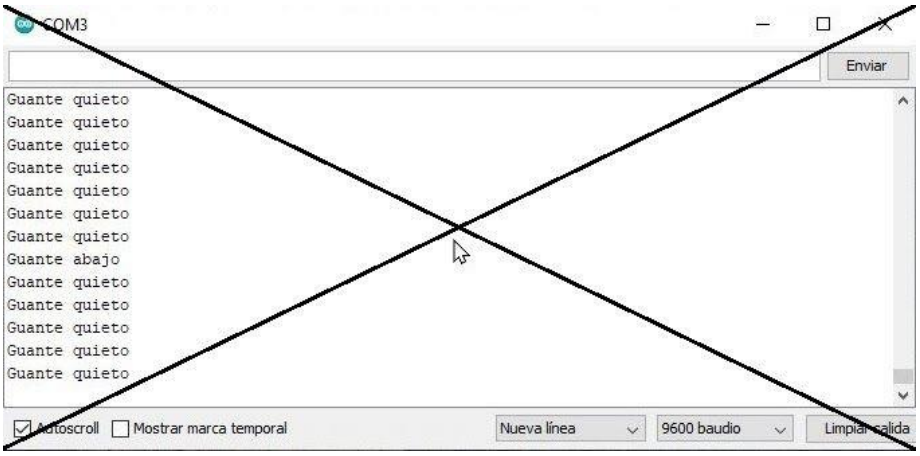


Figura 16. Puerto de comunicación en la tarea #5, guante inclinado abajo. Fuente: elaboración propia.

De la figura 9 hasta la figura 16, se muestra el funcionamiento y la emulación propia de la demostración de lo que es capaz de relacionar el guante de control basado en orientación angular.

De la misma forma, en la figura 17 se muestra la comunicación de las funciones de los dedos; para esta ocasión, debido al contexto solo se puede leer qué función se está ejecutando; por la arquitectura de la emulación, se tienen funciones diferentes para dar click y mantener el click, la función click no funciona para mantenerlo. Si se mantiene la función click se harán clicks en cada retardo de respuesta, mientras que el click sostenido es necesario solo presionarlo una vez y ya sostendrá el click, hasta que se vuelva a presionar.

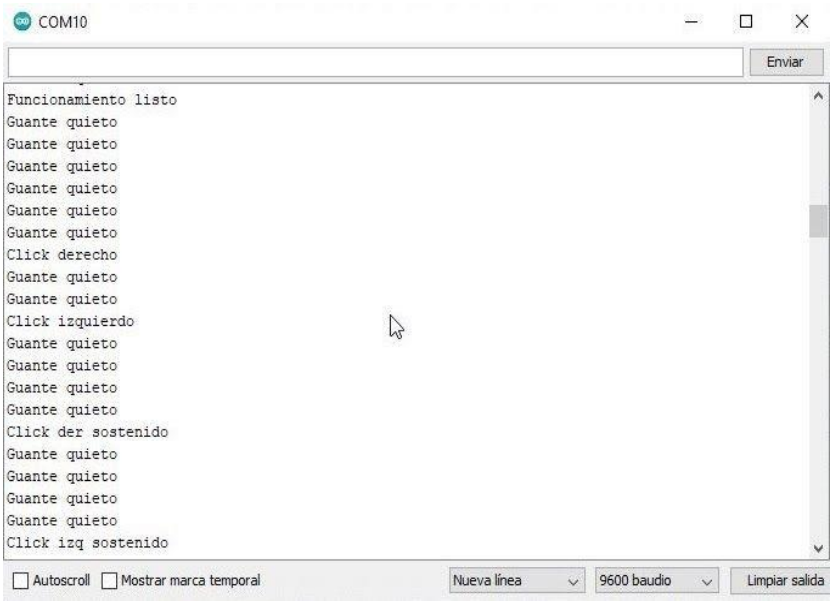


Figura 17. lectura de tareas en los dedos desde la terminal. (Elaboración propia)

El guante está optimizado con el fin de ejecutar varias tareas a la vez, que no se confundan los datos o se pierdan, al realizar movimientos y probar funciones de los dedos, tanto el receptor con el transmisor, tienen la capacidad de diferenciar las tareas y desarrollarlas de tal manera que no se vea un retardo, figura 18.

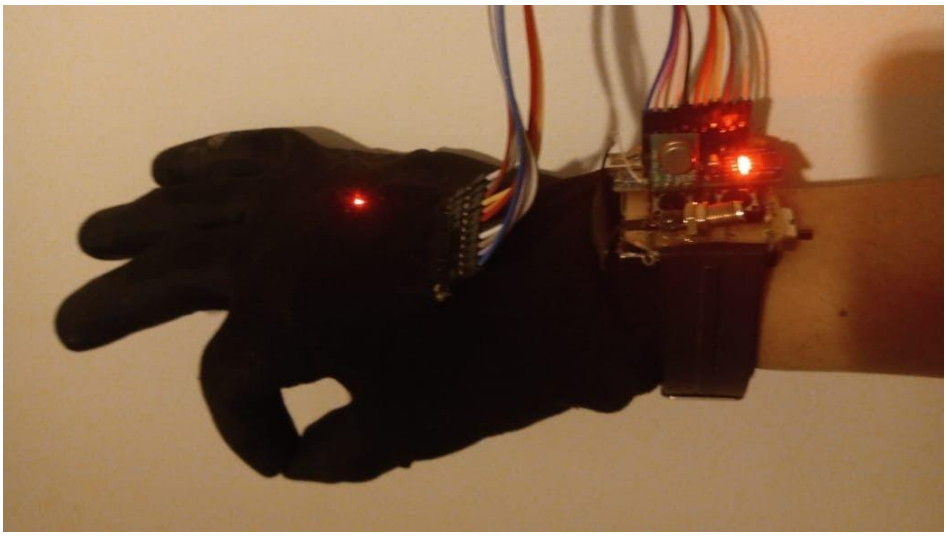


Figura 18. Prototipo final del guante de control. Fuente: elaboración propia.

5 Conclusiones

-Por la dinámica del guante, la manera de usarlo sin generar falsas señales y mal funcionamiento, es con la palma de la mano hacia abajo, ya que, el acelerómetro está programado para leer los ángulos basándose en una orientación horizontal.

-El prototipo diseñado es eficiente, se probó en diferentes condiciones, 9 de 10 pruebas fueron satisfactorias; arrojando así un 90% de éxito en pruebas.

-La elaboración del prototipo fue directa, concisa y satisfactoria, ya que, cumplio con los objetivos de control planteados.

-La comunicación entre el modulo de recepcion y el guante de control angular puede oscilar entre 50 m a 70 m en lugares abiertos.

-El guante por sus funciones, retardos y cantidad de pixeles a mover, es capaz de ser preciso, dicha precisión hace que sea susceptible a que se congele el buffer durante unos

segundos hasta retomar la comunicación.

Referencias

[1] J. A. Jiménez, G. Pomboza y J. A. Holgado, «El gesto aplicado al control de dispositivos en,» Jornadas SARTECO, Ecuador, 2017.

[2] O. F. Olivera, J. A. Cuervo, y F. N. Giraldo Ramos, “Sistema de control de posición angular aplicado a dispositivos RF", Visión Electrónica, vol. 5, no. 2, pp. 42-58, 2011.

[3] T. G. Zimmerman, J. Lanier, C. Blanchard, S. Bryson, and Y. Harvill, “A hand gesture interface device,” ACM SIGCHI Bull., vol. 17, no. SI, pp. 189 192, 1986.

[4] Omega engineering, «Omega ENGINEERING,» es.omega.com, [En línea]. Available: https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html. [Último acceso: 11 08 2019].

[5] tdk, «Datasheet MPU60XX,» [En línea]. Available: https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf. [Último acceso: 11 08 2020].

[6] Naylamp Mechatronics, «Naylamp Mechatronics,» Naylamp Mechatronics, [En línea]. Available:https://naylampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Acelerómetro-y-Giros copio.html. [Último acceso: 11 08 2019].

[7] Arduino, «arduino.cl,» arduino.cl, [En línea]. Available: http://arduino.cl/arduino-nano/. [Último acceso: 15 08 2019].

[8] J. J. M. Fuentes, Fundamentos de radiación y radiocomunicación, Sevilla: Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, 2012.

[9] J. Vargas, G. Poveda y V. Martinez, «Dispositivo inalámbrico para el control de,» ESPACIOS, vol. 39, nº 45, p. 9, 2018.

[10] M. A. Arenas, J. M. Palomares, L. Girard, J. Olivares y J. M., «Diseño y Construcción de un Guante de Datos mediante Sensores de Flexibilidad y acelerómetro,» researchgate, España, 2011.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

MODELING AND IMPLEMENTATION OF A THERMAL PLANT

Modelamiento e implementación de una planta térmica

Jairo Humberto Fresneda Alarcon[1], Andrés Escobar Diaz[2], Harold Vacca González[3], Gloria Jeanette Rincón Aponte[4]

Abstract

This article presents the mathematical modeling of a thermal plant. For that, the equations that model the thermal system are proposed, through relation of heat applied to increase the temperature and the amount of heat that is lost by different types of heat transfer.

Likewise, it is shown how the development of these equations allows obtaining the equations of state and, through of the application of the Laplace transform, system's transfer function is achieved and allows the implementation in software and the simulation using different control tools. Also, it is exposed the development of a thermal plant prototype which consists of a box divided into two sections that has a double filament bulb as a heating element and two fans for heat dissipation, and the circuits and materials for actuators, sensors and power supplies.

[1]Estudiante, Universidad Distrital Francisco José de Caldas**:** Bogotá, CO E-mail: jhfresnedaa@correo.udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5212-4759
[2]Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas**:** Bogotá, Colombia/Suramérica, CO**,** E-mail: aescobard@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0527-8776
[3]Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas**:** Bogotá, Colombia/Suramérica, CO**,** E-mail: hvacca@udistrital.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7017-0070
[4] Docente, Universidad Cooperativa de Colombia**:** Colombia, Bogotá, CO E-mail: gloriajeanette35@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3381-9456

Keywords: actuator, hot, sensor, source, temperature, thermal, transfer.

Resumen

En este artículo se presenta el modelamiento matemático de una planta térmica. Para eso, se plantean las ecuaciones que modelan el sistema térmico mediante la relación de calor aplicado para incrementar la temperatura y la cantidad de calor que se pierde por los diferentes tipos de transferencia térmica. Así mismo, se muestra como el desarrollo de estas ecuaciones permite obtener las ecuaciones de estado y, por medio de la aplicación de la transformada Laplace, se logra la función de transferencia del sistema que permite la implementación en software y la simulación usando diferentes herramientas de control.

También, se expone el desarrollo de un prototipo de planta térmica, el cual consta de una caja dividida en dos secciones que tiene como elemento calefactor un bombillo de doble filamento y dos ventiladores para la disipación de calor, y se plantean los circuitos y materiales para los actuadores, los sensores y las fuentes de alimentación.

Palabras clave: actuador, calor, fuente, sensor, temperatura, térmico, transferencia.

1. Introducción

El estudio de los sistemas térmicos cobra gran relevancia en la literatura dadas las múltiples aplicaciones en procesos industriales [1], [2]. La linealidad, la velocidad, los tiempos muertos y las interferencias son las características más sobresalientes para su análisis [3]–[5].

En este documento proponemos el modelamiento matemático partiendo de la transferencia y disipación de calor [6], [7], [8]. Se plantea la implementación del prototipo de una caja

térmica y los circuitos del actuador y los sensores utilizando amplificadores operacionales y transistores [9], [10] y las fuentes de alimentación necesarias para el funcionamiento.

2. Modelamiento de una planta térmica

Es uno de los sistemas más utilizado en procesos industriales, comencemos por analizar la dinámica de dicho sistema:

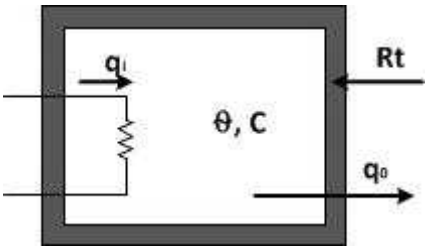


Figura. 1. Sistema Térmico con una capacitad Térmica. Fuente: elaboración propia.

De la figura 1 puede analizarse que en los sistemas térmicos existe: un estado de equilibrio que se puede relacionar entre la cantidad de calor que hace que incremente la temperatura interna del sistema; y la cantidad de calor que se pierde por los diferentes tipos de transferencia térmica que existen, inherente al mismo sistema térmico, por lo tanto, la relación entre el incremento de la temperatura y el incremento del flujo de calor está dado por (1) y (2):

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{t}) - \overline{\boldsymbol{\theta}} \qquad (1)$$

$$\widehat{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{q}(\boldsymbol{t}) - \overline{\boldsymbol{q}} \qquad (2)$$

$\widehat{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{t})$: Variación de temperatura

$\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{t})$: Temperatura inicial

$\overline{\boldsymbol{\theta}}$: Temperatura perdida

$\widehat{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{t})$: Variación flujo de calor

$\boldsymbol{q}(\boldsymbol{t})$: Flujo de calor inicial

$\overline{\boldsymbol{q}}$: Calor perdido

Donde θ, temperatura en grados Kelvin (°K); q, flujo de calor en Joule en segundo (J/s) o en Vatios (W).

Cuando los valores son nominales para $\bar{\theta}$ y $\bar{q}$**.**

La capacidad térmica de este sistema es la relación entre la temperatura del cuerpo térmico y el calor que este almacena. Esta relación es considerada lineal.

Si denotamos el flujo de calor neto entre el cuerpo del sistema en cualquier tiempo como: $q_{in}(\lambda) - q_{out}(\lambda)$, donde el calor neto aplicado este entre $t_o y\, t$ (3).

$$\int_{to}^{t}[\boldsymbol{q_{in}}(\boldsymbol{\lambda}) - \boldsymbol{q_{out}}(\boldsymbol{\lambda})]\boldsymbol{d\lambda} \qquad (3)$$

Se asume que el calor aplicado durante el lapso de tiempo es constante y lo que cambia es la temperatura θ; la temperatura inicial en tiempo cero t_o estará descrita por $\theta(t_o)$ (4).

$$\boldsymbol{\theta(t)} = \boldsymbol{\theta(to)} + \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{c}}\int_{to}^{t}[\boldsymbol{q_{in}}(\boldsymbol{\lambda}) - \boldsymbol{q_{out}}(\boldsymbol{\lambda})]\boldsymbol{d\lambda} \qquad (4)$$

La constante C es conocida como la capacidad térmica en unidades de Juoles por Kelvin, si consideramos que un cuerpo tiene una cantidad de masa conocida M y un calor especifico σ.

Derivando a (4) obtenemos;

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{c}}[\boldsymbol{q_{in}(t)} - \boldsymbol{q_{out}(t)}] \quad (5)$$

En nuestro sistema térmico el calor tiene tres formas de dispersarse de un punto a otro, conocidos como: conducción, convección y radiación. Para este caso solo consideramos la conducción, por lo consecuente tendremos dos diferentes temperaturas entre el punto de inicio de la conducción y el punto final de conducción. Entonces la relación entre la temperatura inicial θ_1 y la temperatura final θ_2 cera:

$$\boldsymbol{q(t)} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R}}[\boldsymbol{\theta_1(t)} - \boldsymbol{\theta_2(t)}] \quad (6)$$

Señalando que R es la resistencia térmica del medio de conducción que hay entre los dos puntos, las unidades de esta relación kelvin-segundo por julio o kelvin por Vatio (K/W), dada como:

$$\boldsymbol{R} = \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{A\sigma}} \quad (7)$$

Donde d es la distancia entre los puntos del cuerpo y A es el área trasversal de cuerpo y σ es la ya mencionada conductividad térmica.

Realizando el análisis sobre la Figura 1. encontramos que:

$$\boldsymbol{q_{in}(t)} = \boldsymbol{q_i(t)} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{q_{out}(t)} = \boldsymbol{q_o(t)} \quad (9)$$

Despejando de (6),

$$\boldsymbol{q_o(t) = \frac{1}{Rt}(\theta_i - \theta_a)} \quad (10)$$

Basados en lo anterior obtenemos la variable de estado

$$\boldsymbol{\dot{\theta} = \frac{1}{c}\left[q_i(t) - \frac{1}{Rt}(\theta_i - \theta_a)\right]} \quad (11)$$

Como la temperatura exterior del cuerpo es proporcional a la temperatura ambiente, y la fuente de calor está representada por $q_i(t)$, despejando (11):

$$\boldsymbol{\dot{\theta} + \frac{1}{RtC}\theta_i = \frac{1}{c}q_i(t) + \frac{1}{RtC}\theta_a} \quad (12)$$

Actualizando la ecuación diferencial linealmente y de primer orden para un tiempo constante dado por $\tau = RC$ y las entradas de información q_i y θ_o,

$$\boldsymbol{\frac{1}{RtC}\overline{\theta i} = \frac{1}{C}\overline{q_i} + \frac{1}{RtC}\theta_a} \quad (13)$$

Como el sistema está el equilibrio para un tiempo determinado, la capacidad térmica permanece constante y el flujo de calor de entrada y consumido por la resistencia térmica es igual al calor de salida entonces

$$\boldsymbol{\overline{\theta i} = \theta_a + Rt\overline{q_i}} \quad (14)$$

Y se define que

$$\boldsymbol{\widehat{\theta}(t) = \theta_a(t) - \overline{\theta} i} \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\widehat{\theta}(t) = \theta_a(t) - \overline{\theta} i} \quad (16)$$

Realizando la sustitución en (12) obtenemos

$$\boldsymbol{\dot{\widehat{\theta}} + \frac{1}{RtC}\left(\widehat{\theta} + \overline{\theta}\right) = \frac{1}{C}[\widehat{q_i}(t) + \overline{q_i}] + \frac{1}{RtC}\theta_a} \quad (17)$$

Usando la ecuación (13) y al cancelar las variables establecidas constantes obtenemos.

$$\dot{\hat{\theta}} + \frac{1}{RtC}\hat{\theta} = \frac{1}{C}\hat{q}_i(t) \quad (18)$$

Por lo tanto, para el sistema tenemos la ecuación de estado (11) y de salida (14)

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \frac{1}{C}\left(q_i - \frac{\theta_i}{Rt} + \frac{\theta_a}{Rt}\right) \quad (19)$$

$$q_o = \frac{\theta_i - \theta_a}{Rt} \quad (20)$$

Realizando transformada de Laplace obtenemos,

$$S\theta_i(s) = \frac{1}{C}\left(q_i(s) - \frac{\theta_i(s)}{Rt} + \frac{\theta_a(s)}{Rt}\right) \quad (21)$$

$$q_o = \frac{\theta_i(s) - \theta_a(s)}{Rt} \quad (22)$$

La función de transferencia

$$H(s) = \frac{y(s)}{u(s)} \quad (23)$$

$$H(s) = \frac{\frac{1}{C}}{s + \frac{1}{RtC}} \quad (24)$$

Ahora, la ecuación de estado en diagrama de bloque por Simulink, figura 2,

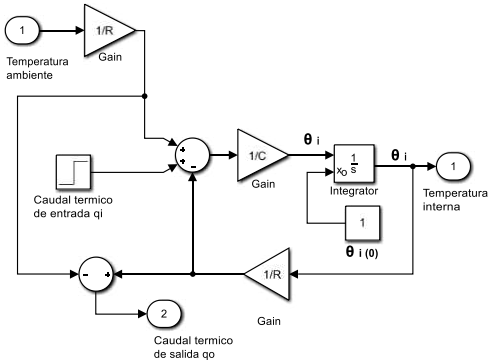


Figura 2. Sistema Térmico Básico. Fuente: elaboración propia.

3. Ejemplo de implementación de una planta térmica

En el siguiente ejemplo se muestra la implementación de un sistema térmico con sus respectivo actuador y sensores.

La visualización del sistema es la siguiente, figura 3:

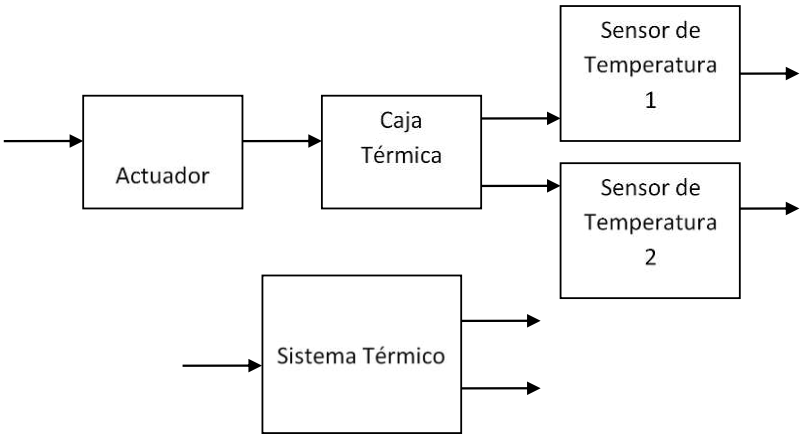


Figura 3. Diagrama de bloque sistema Motor. Fuente: elaboración propia.

El sistema se compone de una entrada y dos salidas. La entrada al sistema es una señal de voltaje que maneja la temperatura en dos cámaras de una caja térmica. Una de las salidas del sistema es una señal de voltaje que con alguna proporción muestra la temperatura en una cámara donde está la fuente de calor, esta corresponde al sensor de temperatura 1.

La otra salida es un voltaje que es proporcional a la temperatura de la otra cámara que tiene un intercambio térmico con la primera por medio de una membrana separadora; esta salida corresponde al sensor de temperatura 2.

3.1. **Circuito actuador,** figura 4 y tabla 1

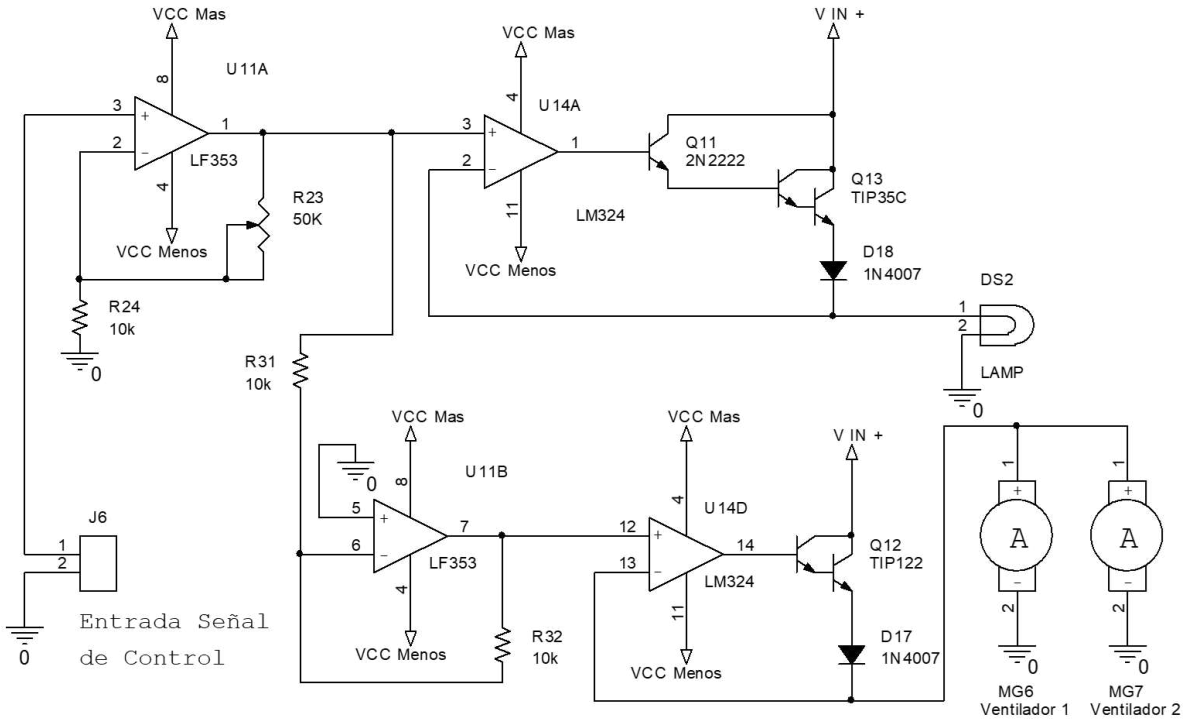


Figura 4. Circuito actuador del sistema térmico. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Elementos Actuador

Cantidad	Elementos
1	Regleta
2	LM 324
2	LF353
1	TIP 35C

1	TIP 122
1	2N2222
2	Diodos 1N4007
1	Trimmer 50K
3	Resistencias 10K
2	Ventiladores de 12V
1	Bombillo 24W
1	Bornera 2 entradas

Fuente: elaboración propia.

El actuador es un dispositivo que le da la suficiente energía al sistema, para que este pueda ser manipulado. En este caso se manipula un bombillo de doble filamento de 12 voltios con una potencia de 24W y 2 ventiladores de 12 voltios.

El Jumper (J6) representa la conexión de entrada al sistema, el cual debe ser un voltaje que varía entre +/- 5 voltios. De 0v +5v el bombillo se enciende a máxima potencia y los ventiladores no se encienden, con un rango de voltaje de 0v a -5v los ventiladores funcionan y el bombillo está apagado.

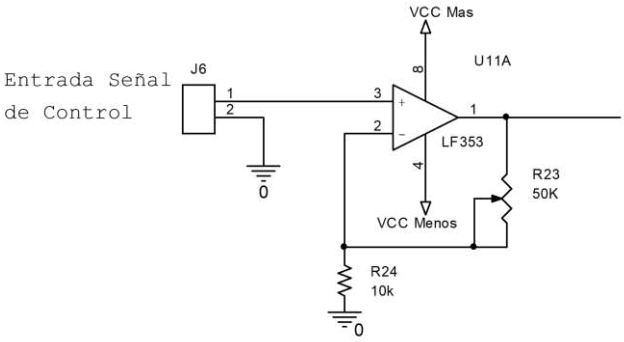


Figura 5. Etapa amplificación o calibración señal de entrada. Fuente: elaboración propia.

Esta etapa hace parte del actuador: Luego hay un amplificador operacional configurado como no inversor con ganancia (LF353 U11A) que amplifica el voltaje que entra por J6. Esta etapa sirve como calibración para la señal de salida que actúa sobre el bombillo o sobre los ventiladores.

La ganancia del Amplificador operacional (LF353 U11A) no inversor es variable cambiando el valor de resistencia del potenciómetro R23, está configurado de tal forma que cuando a la entrada al sistema sea de +/-5v, al bombillo o a los ventiladores lleguen +/- 12v teniendo la máxima ganancia en el amplificador. Esto porque se configuro el sistema para trabajar con un bombillo y los ventiladores de 12v.

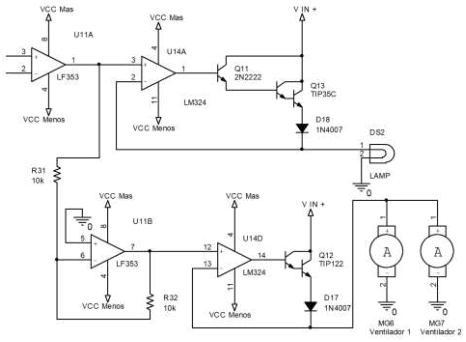


Figura 6. Etapa de potencia del actuador. Fuente: elaboración propia.

La anterior etapa es la de potencia del actuador. La salida del amplificador operacional no inversor (LF353 U11A), es el mismo voltaje que le llega al bombillo, por medio del operacional (LM324 U14A) configurado como seguidor. La corriente que necesita el bombillo para encender la proporciona las configuraciones Darlington del TIP 35C y el 2N2222. Este transistor 2N2222 es usado como acople entre el amplificador operacional (LM324 U14A) y el TIP 35C para que el consumo de corriente no exceda los límites del integrado. Los ventiladores funcionan de una forma muy similar, pero con voltaje negativo. Dependiendo del voltaje que le llegue en la señal de control, si es positivo, está activo el 2N2222 por lo tanto el TIP 35C, haciendo que se encienda el bombillo y si el voltaje en la señal de control es negativo, se activa el Tip 127 haciendo que los ventiladores se prendan. Los Diodos son para evitar “patadas” inductivas de los ventiladores.

3.2. **Circuito de los sensores,** figura 7

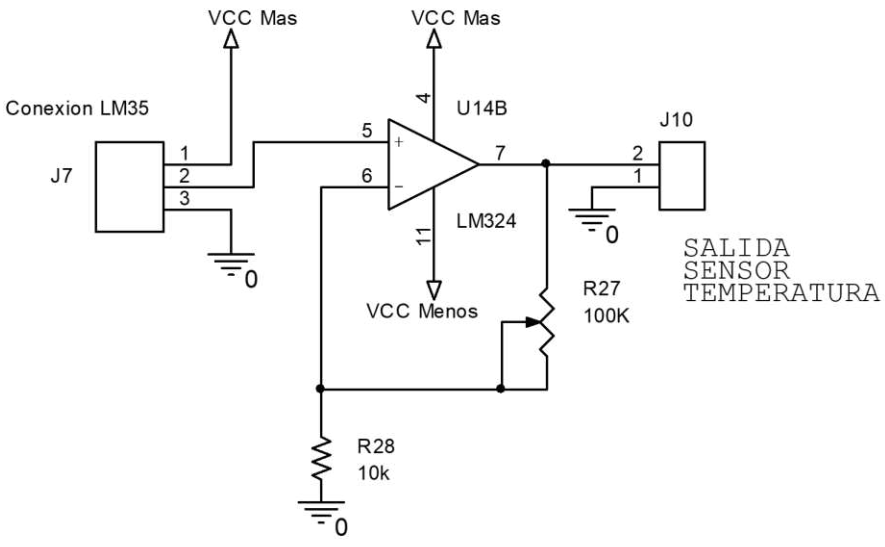


Figura 7. Circuito sensor de Temperatura. Fuente: elaboración propia.

La figura 7 muestra la configuración del sensor de Temperatura. El sensor de Temperatura es un LM35 conectado en el interior de la cámara. El LM35 está configurado para un rango de temperatura entre 2°C a 150°C, con una salida de 10mv/°C. La salida de esta configuración mostrará un voltaje de cero voltios cuando la temperatura en la cámara sea de 2°C y de 5 voltios cuando haya una temperatura de 100°C. El voltaje de salida del sensor de temperatura es proporcional con la salida del LM35. El sensor está acoplado a un amplificador operacional configurado como no inversor, LM324 U14B. Este actúa como un amplificador con ganancia variable que tiene un ajuste por medio del trimmer R27 de 100KΩ. Este potenciómetro permite graduar la escala de temperatura con la cual se quiera trabajar, es decir, variar la temperatura con la cual se obtiene a la salida un voltaje de 5v. El Jumper J10 es la conexión de salida de este sub-sistema; es una señal de voltaje, tabla 2.

Tabla 2. Elementos sensor de posición

Cantidad	Elementos
1	LM35
1	LM 324
1	Regleta
1	Trimmer 100KΩ
1	Resistencia 10KΩ
1	Bornera 2 entradas

Fuente: elaboración propia.

3.3. Circuito fuente de alimentación

El circuito utiliza diferentes voltajes de alimentación. El circuito en general es alimentado con una fuente dual de +/-20v en las entradas del circuito VIN+ y VIN-, figuras 8-9 tabla 3.

Los Amplificadores operacionales se alimentan con +/-15v. Estos voltajes se generan con los siguientes reguladores: LM 317 para la fuente positiva +15v; y con el LM 337 para las fuentes negativa -15v.

Los potenciómetros (R21, R22) conectados en cada uno de los reguladores permiten configurar el voltaje exacto de salida para cada configuración.

Los diodos emisores de luz en los reguladores de voltaje (LM317 Y LM337) permiten reconocer que la fuente externa está conectada.

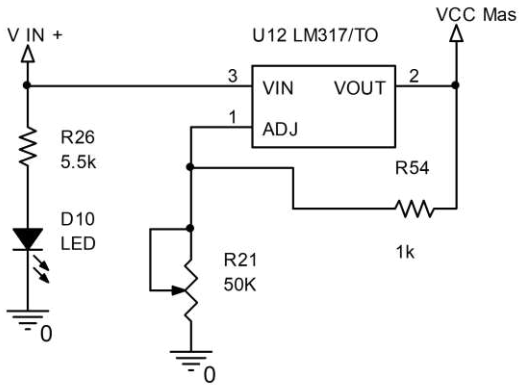


Figura. 8. Alimentación de 15 Voltios. Fuente: elaboración propia.

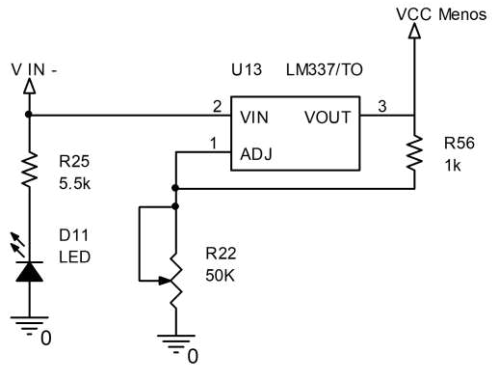


Figura. 9. Alimentación de -15 Voltios. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Elementos circuitos alimentaciones

Cantidad	Elementos
1	Regleta
1	LM 337
1	LM 317
2	Trimmer 50K
4	Resistencias (2)1K,(2) 5.5K
2	Leds
1	Bornera 3 entradas

Fuente: elaboración propia.

3.4. **Esquema de todo el montaje,** figura 10

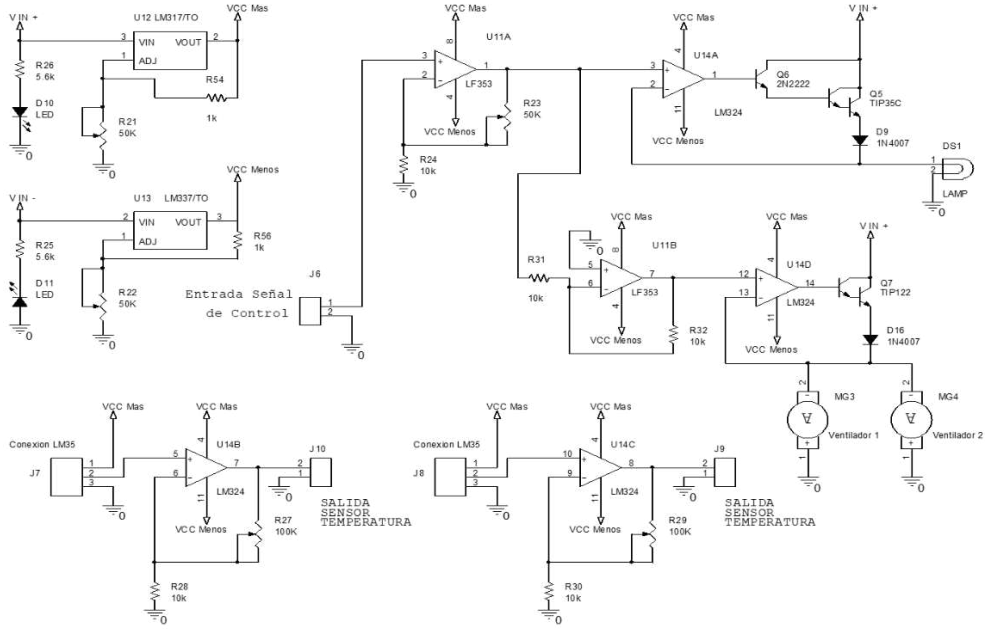


Figura 10. Circuito de todo el Sistema Térmico. Fuente: propia. Fuente: elaboración propia.

3.5. **Circuito impreso (PCB, Printed Circuit Board),** figura 11

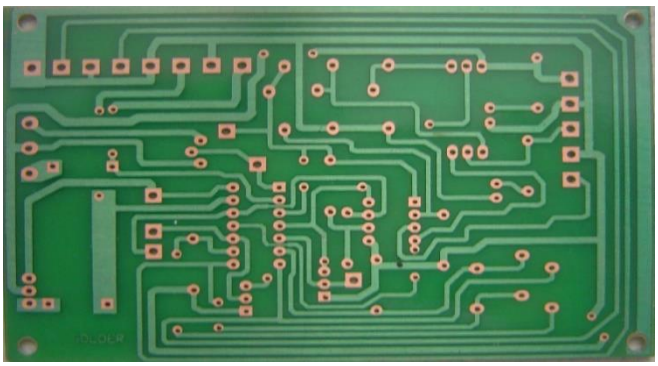


Figura 11. Vista inferior. Fuente: elaboración propia.

3.6. Proyecto terminado, figuras 12-18

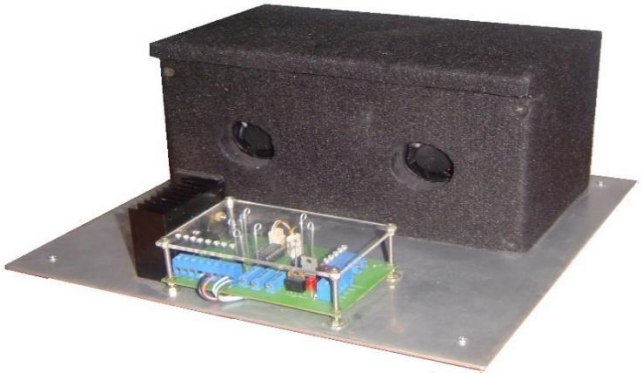


Figura. 12. Planta térmica. Fuente: elaboración propia.



Figura 13. Planta Térmica. Fuente: elaboración propia.



Figura. 14. Planta Térmica. Fuente: elaboración propia.



Figura 15. Circuito Térmico vista superior. Fuente: elaboración propia.

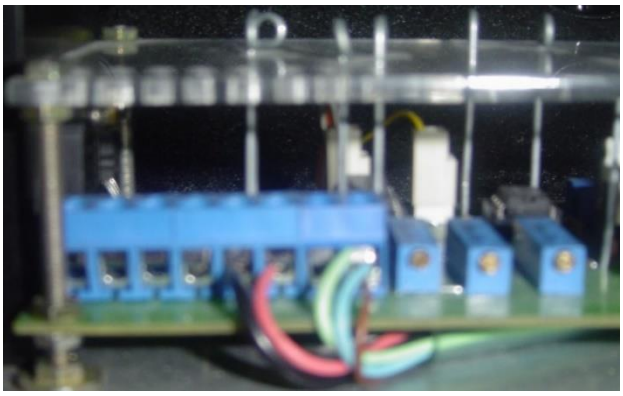


Figura. 16. Salidas del Sistema Térmico. Fuente: propia.

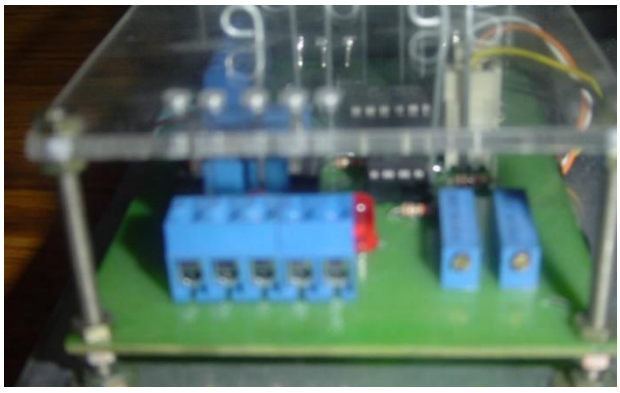


Figura. 17. Entradas del Sistema Térmico. Fuente: propia.

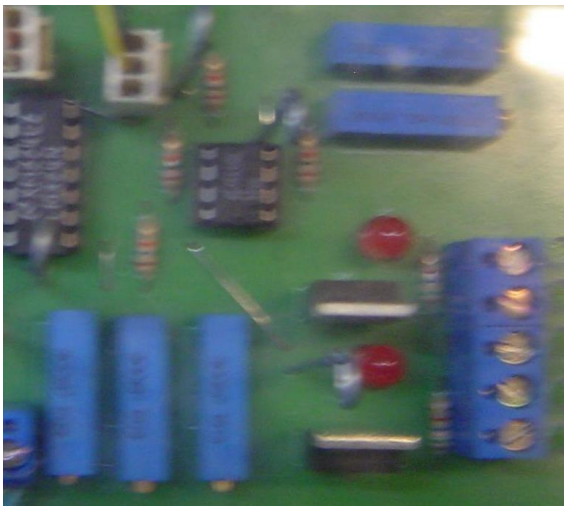


Figura 18. Potenciómetros de Ajuste. Fuente: propia.

4. Conclusiones

El desarrollo del modelamiento matemático genero las ecuaciones de estado las cuales se montaron en diagrama de bloques en Simulink para su simulación y posterior aplicación de algún tipo de controlador.

En funcionalidad y eficiencia el circuito es óptimo, aunque presenta una gran sensibilidad al ruido.

La planta térmica es lenta en la transferencia y disipación de calor estableciéndose como principal característica de este tipo de sistema.

Agradecimientos

Grupos de investigación: SciBas y ORCA

Referencias

[1] K. K. Abgaryan and I. S. Kolbin, “Calculation of Heat Transfer in Nanosized Heterostructures,” *Russ. Microelectron.*, vol. 48, no. 8, pp. 559–563, 2019, doi: 10.1134/S1063739719080031.

[2] A. R. Shabaan, S. M. El-Metwally, M. M. A. Farghaly, and A. A. Sharawi, “PID and fuzzy logic optimized control for temperature in infant incubators,” *2013 Proc. Int. Conf. Model. Identif. Control. ICMIC 2013*, no. Icmic, pp. 53–59, 2013.

[3] D. M. Ovalle M and L. F. Cómbita A., “Teaching basic control concepts with a home-made thermal system,” *IEEE Glob. Eng. Educ. Conf. EDUCON*, no. April, pp. 739–744, 2014, doi: 10.1109/EDUCON.2014.6826176.

[4] S. A. Adnan, A. Muhammad, and Z. Shareef, “Development of a low cost thermal feedback system for basic control education,” *Proc. 14th IEEE Int. Multitopic Conf. 2011, INMIC 2011*, pp. 228–232, 2011, doi: 10.1109/INMIC.2011.6151478.

[5] R. Urbieta Parrazales, “Diseño, Simulación y Construcci?n de un Control PID Aplicado a un Sistema Térmico,” *Polibits*, vol. 15, pp. 11–19, 1995, doi: 10.17562/pb-15-2.

[6] C. Close, *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*. 2002.

[7] F. Navas, “DISEÑO Y CONSTRUCCION DE CAJA DE TRANSFERENCIA DE CALOR (GUARDED HOT BOX),” 2007.

[8] J. Bravo, G. López, R. Rodríguez, and F. J. Sabina, “Acerca de la homogeneización y propiedades efectivas de la ecuación del calor On homogenization and effective properties of the heat equation Resumen,” pp. 149–159, 2013.

[9] E. Significativas, *Electrónica : teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. .

[10] P. E. Allen, *Operational amplifiers and linear integrated circuits*, vol. 71, no. 9. 2008.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

ROBOTS FOR CLEANING SUPPORT IN SWIMMING POOLS

Robots para el apoyo de limpieza en piscinas

M. A. Amador Nava Miguel[1], J. E. Magadán Godínez[2], J. A. Martínez Diaz [3], R. Galicia Mejía [4], L. N. Oliva Moreno [5]

Abstract

This article describes the design and implementation of an aquatic type robot to work as a distributed system for surface cleaning of swimming pools. Communication is carried out through the WLAN network between the robot and a personal computer in order to implement control algorithms that allow routes to be optimized and to experiment with disturbances in the environment. To collect the dirt, a collecting mesh is used to contain floating objects such as tree leaves. These robots are made of acrylic, ethylene acetate and vinyl used for floating; They have the power and control electronics, proximity sensors, motors, a magnetometer and a wireless communication module.

[1] Ingeniero en Sistemas Computacionales, Instituto Politécnico Nacional, México. E-mail: miguel.amador.n@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1063-1346
[2] Ingeniero en sistemas computacionales, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo, Mexico. E-mail: mgdn5561@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3839-8670
[3] Ingeniero en Sistemas Computacionales, Instituto Politécnico Nacional, México. E-mail: miguel.amador.n@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1063-1346
[4] Ingeniero en electrónica industrial, Instituto tecnológico de Puebla. Doctor en Comunicaciones y electrónica IPN, México. Profesor: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo, México. E-mail: rgaliciam@ipn.mx ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3479-4342
[5] Ingeniero en comunicaciones y electrónica, Instituto Politécnico Nacional, México. Doctor en Ingeniería eléctrica, CINVESTAV-IPN, México. Profesor: Instituto Politécnico Nacional, UPIIH, México. E-mail: loliva@ipn.mx ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5293-0427

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

Keywords: Collaborative, robots, aquatic, pool creanler.

Resumen

En este artículo se describe el diseño y la implementación de un robot tipo acuático para trabajar como un sistema distribuido para la limpieza superficial de piscinas. La comunicación se realiza mediante la red WLAN entre el robot y una computadora personal con el objetivo de implementar algoritmos de control que permitan optimizar las rutas y poder experimentar con perturbaciones en el medio. Para la recolección de la suciedad se utiliza una malla colectora para contener objetos que flotan como lo pueden ser hojas de árbol. Estos robots están fabricados en acrílico, acetato de etileno y vinilo utilizados para flotar; Cuentan con la electrónica de potencia y control, sensores de proximidad, motores, un magnetómetro y módulo de comunicación inalámbrica.

Palabras clave: Robots, colaborativos, acuático, piscina, limpieza.

1. Introducción

Hoy en día la limpieza en las piscinas resulta un trabajo difícil, tardado y de importancia para que se encuentren en óptimas condiciones y en la mayoría de las ocasiones el usuario encargado de esta tarea no cuenta con una forma sencilla y eficiente de limpiarlas. En el artículo “problemas frecuentes en el mantenimiento de piscinas y su solución” [1,2], se documentan las situaciones más comunes en este tema de la limpieza y en uno de estos rubros está el de la limpieza superficial de las piscinas techadas o expuestas para quitar basura, residuos de todo tipo, hojas, pasto, tierra e incluso moho o algas, en este artículo se plantea el uso de una amplia red con un maneral con longitud de 1 metro

aproximadamente para que el usuario pueda desplazarse perimetralmente y así recoger los residuos. En este trabajo se presenta una manera novedosa a la solución en la limpieza de las piscinas, con la finalidad de implementar un robot colaborativo que tengan la facultad de poder hacer una limpieza superficial de las albercas de una manera autónoma, recorriendo la superficie de la alberca y recogiendo la suciedad que ésta pueda tener, por ejemplo: hojas, pasto, entre otros, gracias al comportamiento colectivo. Este robot permite la implementación de algoritmos de control mediante una computadora personal, ya que cuenta con una comunicación inalámbrica, un microcontrolador y diversos sensores y actuadores, además cuenta con un sistema de recarga de baterías por medio de celdas solares reduciendo el consumo energético, ya que existen equipos como las bombas de filtrado o equipo de depuración que consumen gran cantidad de electricidad [3,4].

2. Desarrollo

El robot está constituido por cinco módulos principales: comunicación con el servidor o computadora personal, procesamiento del algoritmo, desplazamiento de los robots, recolección de basura y carga eléctrica a la batería. Básicamente, el bloque de comunicación con el servidor está formado por el módulo WiFi (ESP8266), algunas de las principales funciones son el acoplamiento del robot con la computadora personal y la comunicación. El bloque de procesamiento del algoritmo toma lugar importante dentro de la computadora personal ya que éste proporciona los recursos de memoria y de procesamiento necesarios para la robustez del algoritmo, además de poder hacer uso de otros recursos que se pueden ayudar en el mejor desempeño de la actividad, como el uso

de una cámara que tome las imágenes o video de la piscina. Dentro de este módulo se generan las secuencias del control de los motores para que el robot pueda desplazarse o realizar giros predefinidos dentro del área de la piscina las cuales pueden ser coordinadas y aplicadas a un solo robot o a un conjunto de ellos mediante la distribución de la carga de trabajo, también llamado trabajo colaborativo. El proceso de trabajo se realiza enviando las señales de control a los robots acoplados para que comiencen su tarea, al finalizar las trayectorias el servidor indica al usuario que la limpieza de la piscina ha finalizado.

En el bloque de desplazamiento del prototipo se implementa dos motores ubicados dentro de la estructura acoplados magnéticamente a las aletas de propulsión circulares que se muestran en la descripción del diseño, los ejes de los motores se encuentran de manera exterior ya que se perforó y selló el acrílico para así tener un óptimo funcionamiento y acoplamiento de ambos motores con las aletas, dentro de este módulo también se encuentra el sensor del magnetómetro y de giroscopio, encargado de monitorear la dirección y giro del robot.

El bloque de recolección de basura consiste un rodillo instalado en la parte frontal de la estructura, este funciona con un tercer motor acoplado con bandas dentadas, cuando se inicia el desplazamiento el rodillo atrae la basura a una cavidad debajo de la estructura que tiene la malla colectora. Por último, se ubica el bloque del cargador eléctrico de la batería, esto se realiza por medio de un módulo cargador de baterías y tres celdas solares en un arreglo paralelo que son posicionadas en la parte superior de la estructura, cada celda da un voltaje de 5 volts 2w. La batería utilizada fue una batería tipo LiPo de 2 celdas.

2.1. Distribución de área de limpieza

El área de limpieza por robot se basa en la ecuación (1), donde el ancho de la piscina siempre se mantiene fijo y la longitud se distribuye con prototipos emparejados.

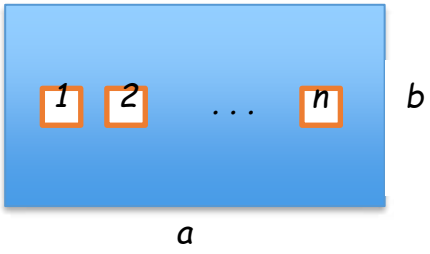
$$x = a(b/n) \quad \text{donde:} \tag{1}$$

$$x = \text{área de limpieza por prototipo } x | x \geq 2.25\ m2$$

$$a = \text{ancho de la piscina } a | a \geq 1.5\ m$$

$$b = \text{largo de la piscina } b | b \geq 1.5\ m$$

$$n = \text{total de prototipos acoplados } n > 0$$



La Figura 1 muestra que, a mayor cantidad de robots, menor será el área por robot para la limpieza [5,6]. Esta distribución del trabajo permite reducir el tiempo de ejecución en la limpieza de piscinas, también al reducir el tiempo de limpieza, los prototipos reducen el consumo de energía, lo que extiende el tiempo de vida de batería.

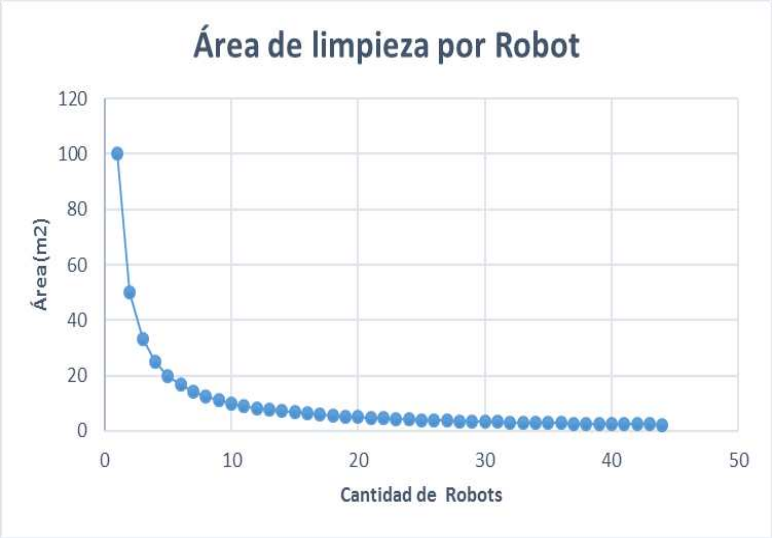


Figura 1. Gráfica con la mayor área posible permitida por el servidor y su distribución con cada prototipo. Fuente: elaboración propia.

2.2 Comunicación multicast: servidor y prototipos

Para implementar la comunicación de los robots colaborativos se implementó el tipo multicast para la transmisión de mensajes IP que es el protocolo de enrutamiento multidifusión. Esto nos permite que el robot en su área de trabajo entregue flujos de datos IP con las señales que fueron programadas (paquetes con la información requerida en el servidor y viceversa) solamente una vez y al mismo tiempo a múltiples destinos. Los paquetes IP que están siendo intercambiados son entregados mediante una conexión directa entre sistemas que se comunican entre ellos, en este caso el robot colaborativo acoplado con el servidor, la conexión se realiza mediante una red de área local inalámbrica (WLAN) por lo tanto se hace uso de un router. Los robots realizan la tarea de receptores multicast, específicamente con el módulo WiFi y el servidor realiza la función de emisor

multicast. La implementación de este protocolo de comunicación IP asegura que no existan conflictos de recepción o transmisión de datos entre robots y servidor además resalta la escalabilidad del sistema ya que se pueden acoplar más de un de prototipo, en el desarrollo de este prototipo es necesario la eficacia en la comunicación para evitar fallos, por esa razón en este protocolo no se envía la información del servidor a todos los usuarios de la red WLAN, si no solo a aquellos que han sido acoplados previamente por parte del servidor mediante la dirección IP de cada uno de los elementos en la red. Específicamente en este sistema el servidor inicia con la interfaz para que se realice el acoplamiento de WiFi con el robot seleccionado y se envía la señal (paquete IP) para que se inicie las trayectorias descargadas en el microcontrolador [7,8] del robot, indicando que se está realizando la limpieza. Se utiliza la comunicación mediante la tecnología inalámbrica WiFi ya que ésta provee mayor rango de emparejamiento que otras tecnologías, también mayor estabilidad inalámbrica y mayor alcance de implementación de protocolos seguros, ver figura 2.

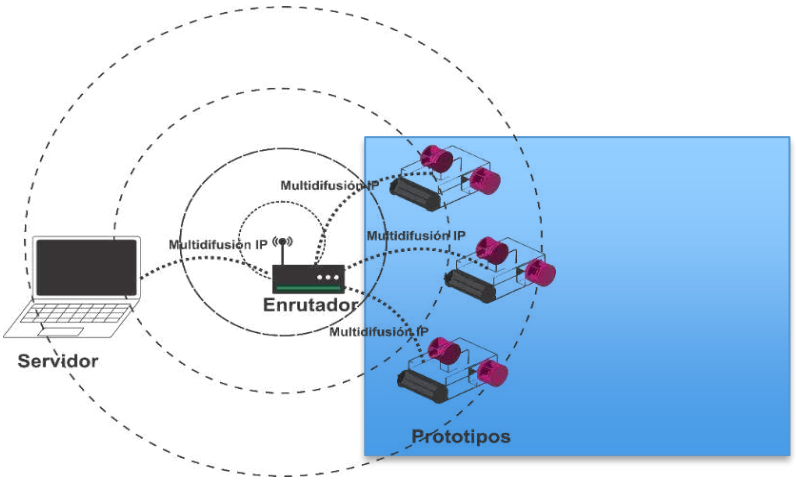


Figura 2. Diagrama de comunicación multicast por medio red WLAN. Fuente: elaboración propia.

2.3 Diseño de la funcionalidad del robot

El robot debe de flotar, tener equilibrio, poder desplazarse y tener una fuente que suministre la suficiente energía para el funcionamiento de los motores, comunicación y procesamiento del algoritmo para realizar su recorrido en la limpieza. Los flotadores en forma de aletas hechos de acetato de etileno y vinilo permiten que el robot pueda flotar con todos sus componentes y al mismo tiempo pueda brindar el equilibrio que se requiere para que no se hunda. Como se muestra en la figura 3 cuentan con dos en la parte lateral y una en la parte trasera.

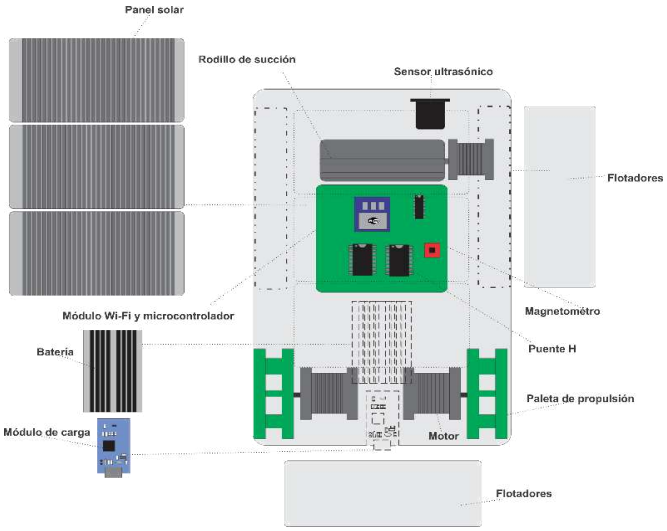


Figura 3. Composición del prototipo. Fuente: elaboración propia.

Para el desplazamiento se diseñó una paleta de propulsión que fuese acorde con la dinámica del agua de tal forma que al girar los motores estos accionen la paleta y esta a su vez al tener contacto con el agua generan el movimiento del prototipo. La alimentación de los motores se realiza mediante un puente H. La tarea de recolección de basura es apoyada por el rodillo como puede observarse en la Figura 4 donde al girar el mismo atrae la basura

a una malla colocada en la parte inferior que al final de la limpieza simplemente se le retira la basura.

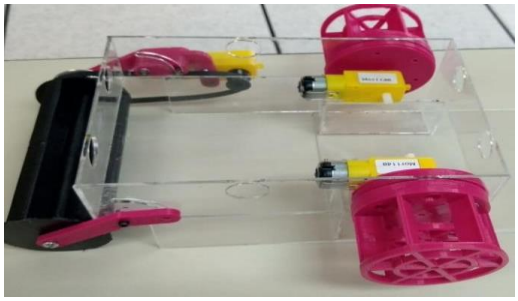


Figura 4. Vista lateral de la estructura del robot. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se muestra la estructura de las paletas de propulsión adheridas magnéticamente desde el interior de la estructura del acrílico y que son acopladas con los motores.

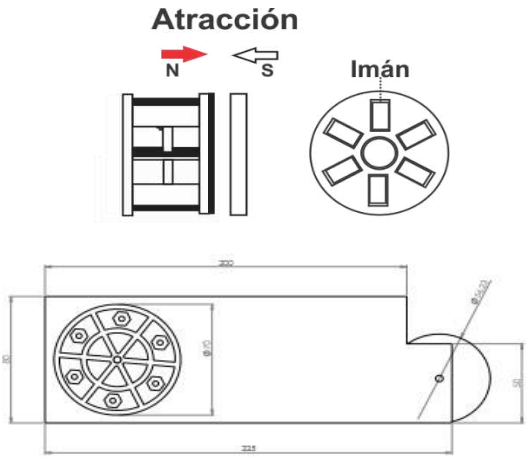


Figura 5. Atracción magnética de las paletas propulsoras. Fuente: elaboración propia.

2.2 Control del movimiento en el robot colaborativo

La figura 6 muestra la arquitectura de control del robot, en la que se integran los sensores y actuadores, módulo de potencia, así como la comunicación inalámbrica.

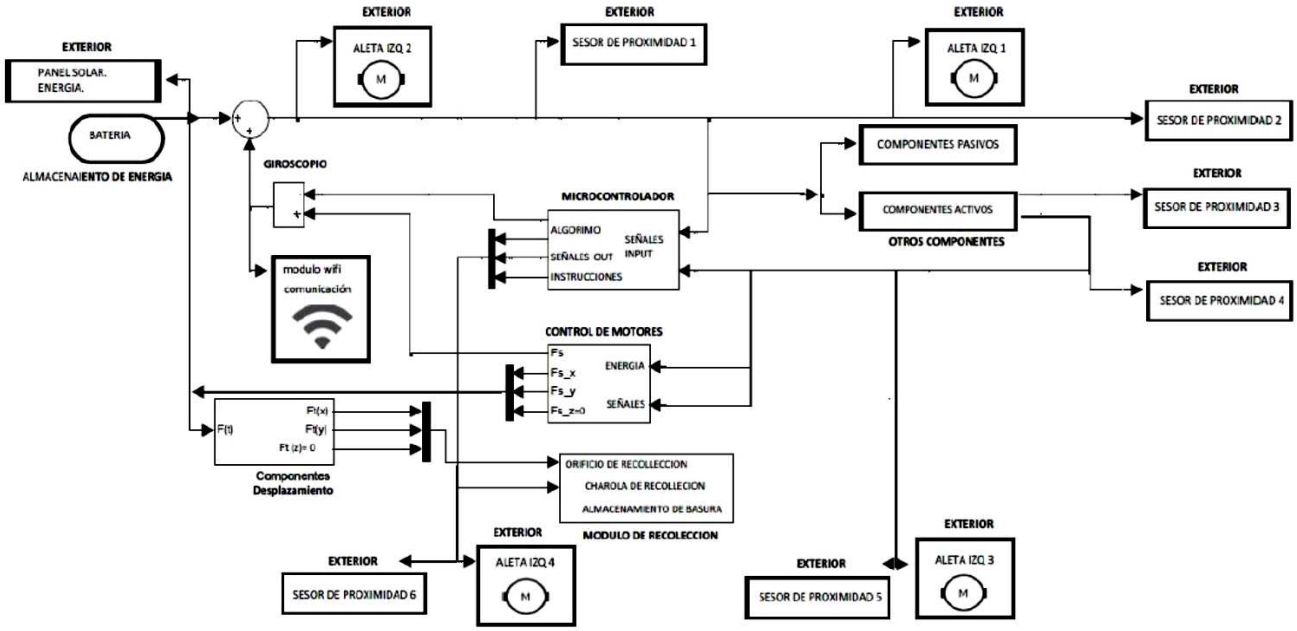


Figura 6. arquitectura a bloques de la parte del control del robot. Fuente: elaboración propia.

El robot tiene un microcontrolador (MSP430), el módulo de comunicación (ESP8266EX), un puente H (TB6612), la etapa de baterías y cargador, un magnetómetro y acelerómetro (MPU-9250) para tener los valores aproximados en los giros del prototipo con una precisión de 16 bits. En la figura 7 se muestra la electrónica desarrollada para este prototipo.

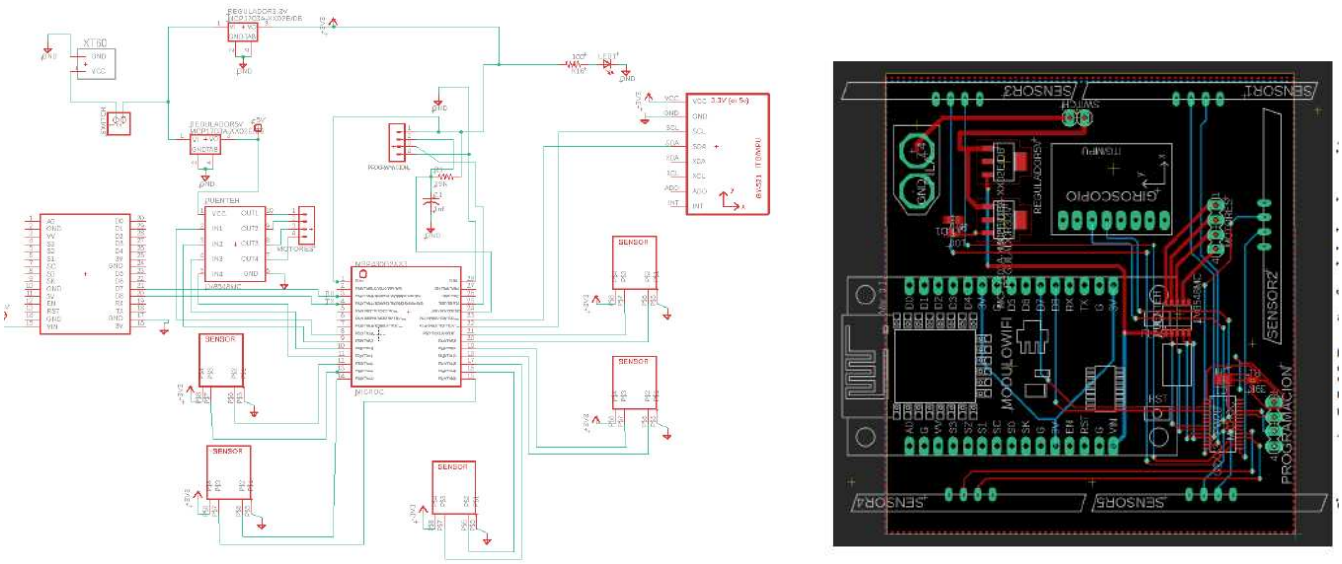


Figura 7 Diseño esquemático y del PCB del robot colaborativo. Fuente: elaboración propia.

En la figura 8 se muestra el diseño realizado para el robot con los componentes colocados en la tarjeta.

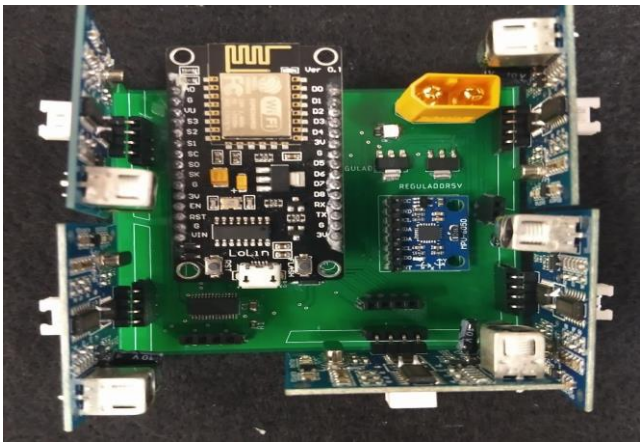


Figure 8. Etapa de electrónica del robot colaborativo. Fuente: elaboración propia.

2.3 Algoritmo del robot colaborativo

El algoritmo que se muestra en la Figura 9 y Figura 10 fue implementado en el robot para verificar el funcionamiento y mediante la comunicación de la computadora con el robot para realiza la tarea de limpieza. El giro que depende del tiempo que se activen los motores monitoreando con los sensores del magnetómetro y del giroscopio:

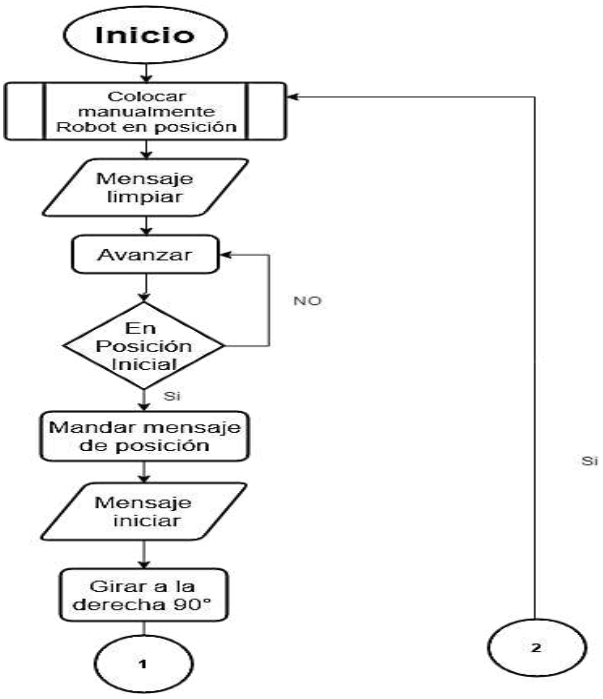


Figura 9. Algoritmo primera parte. Fuente: elaboración propia.

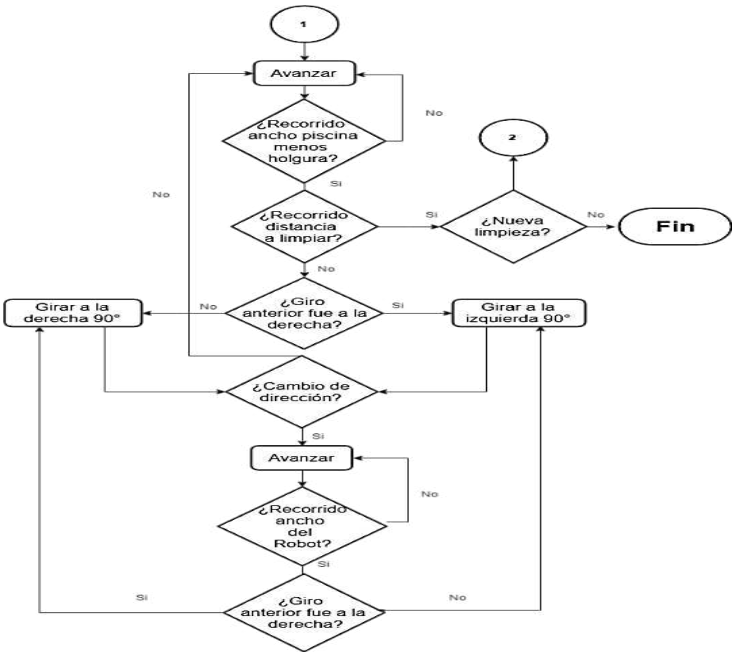


Figura 10. Algoritmo segunda parte. Fuente: elaboración propia.

En su posterior implementación en el robot se siguió de la misma manera el algoritmo mostrado apoyándose en los componentes ya mencionados.

3 Pruebas y resultados

Para las pruebas el usuario ingresa las medidas de la piscina y debe acoplar los módulos de comunicación, el programa realiza la comunicación y descarga la trayectoria a seguir indicando el programa la posición inicial del robot para comenzar con la recolección de la basura superficial como se muestra en la figura 11, encendiendo el motor del rodillo frontal.



Figure 11. Pruebas del robot en un ambiente controlado. Fuente: elaboración propia.

La trayectoria programada fue en modo de un extremo a otro de la piscina recorriendo toda el área como se muestra en la figura 11, en la cual afectaron algunos factores como la del rodillo frontal y las perturbaciones de las paredes, siguiendo una trayectoria aproximada de la original. En la figura 12 se muestran algunas de las trayectorias de pruebas del robot en el ambiente controlado y las cuales se requiere de un algoritmo robusto de control y sistemas de monitoreo de las trayectorias, en las que se observa que se tiene un control reducido en sus movimientos, pero bajo estas condiciones se logra la manipulación de las trayectorias.

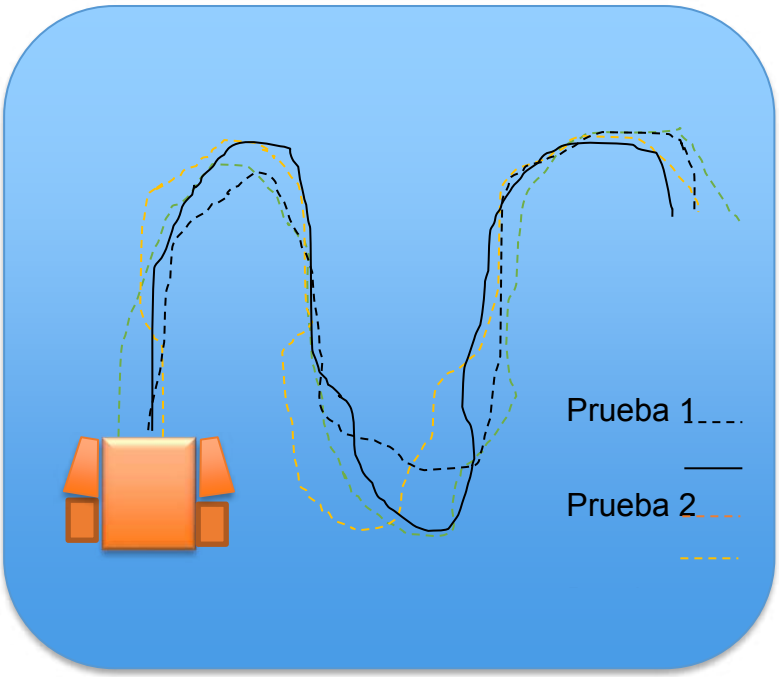


Figura 12. Trayectoria de las pruebas del robot en un ambiente controlado. Fuente: elaboración propia.

4 Conclusiones

Al concluir el desarrollo del prototipo, se logró tener un sistema de limpieza de la superficie de piscinas con la ayuda de un prototipo, con el fin de automatizar, reducir costos y optimizar el tiempo de la limpieza. Se resolvieron diversas problemáticas tanto en el proceso de flotamiento, equilibrio del prototipo, así como desplazamiento, en cuanto al magnetómetro y su operación presentan un pequeño error que para superficies grandes pueden ser considerables, pero con periféricos alternos como una cámara le permitirá al servidor corregir el desplazamiento, haciéndolo totalmente automático y verificando la calidad de la

limpieza mediante algoritmos más robustos para el control como el de procesamiento de imagen y la inteligencia artificial.

Se logró controlar su funcionamiento mediante el algoritmo desarrollado e implementado realizando la comunicación entre servidor y prototipo mediante una conexión WLAN. Comprobando la interacción con las señales de los sensores y los actuadores.

Reconocimientos

Los Autores agradecen a la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido y las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo terminal.

Referencias

[1] N. Ruangpayoongsak, J. Sumroengrit, & M. Leanglum, “A floating waste scooper robot on water surface”, In 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 1543-1548, IEEE, October 2017.

[2] I Baturone, Robótica: manipuladores y robots móviles. Marcombo, 2005.

[3] P. Jorge-Sanz, "Robots industriales colaborativos: una nueva forma de trabajo", Seguridad y Salud en el trabajo 95, pp. 6-10, 2018.

[4] H. Thomas, S. Bensch. "Understandable robots-what, why, and how." Paladyn, Journal of Behavioral Robotics 9,pp. 110-123. no. 1, 2018.

[5] B. Andrew, E. F. Buffie, and L.F. Zanna. "Robots, growth, and inequality." Finance & Development 53, pp. 10-13, no. 3, 2016.

[6] S. Martínez, A. Carvajal, D. Loza, A. Ibarra, and L. Segura. "Collaborative two-arm robotic torso for the development of an assembly process." In 2017 CHILEAN Conference

on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), pp. 1-6. IEEE, 2017.

[7] T.I., Getting Started MSP430G2553 Value Line LaunchPad Workshop Series, [En línea]. Disponible en: https://training.ti.com/getting-started-msp430g2553-launchpad-part-1.

[8] D. Anderson, G. Constante, and T. Arrigoni. "Arquitetura FPGAs CPLDs da Xilinx."

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

VIRTUAL INSTRUMENTATION FOR LOAD CELL SIGNAL PROCESSING

Instrumentación virtual para el procesamiento de la señal de una celda de carga

Leonardo César Vega Gómez [1], Sonnia Pavoni Oliver [2], Dilaila Criado Cruz [3], Víctor Eugenio Escartín Fernández [4]

Abstract

In different spheres of everyday life, it is very important to determine the weight of substances, objects and peoples. Strain gauges are widely used in load cells for electronic scales. However, the signal from these transducers presents noise due to various factors. This work presents a virtual instrument developed in LabVIEW for acquisition and processing of the AC108B/BW load cell signal. An integrating moving average digital filter was developed, in order to decrease the amplitude of the signal noise.

Keywords: digital filter, load cell, moving average, strain gauge, virtual instrument.

[1] Ingeniero en Automática (2019), Departamento de Investigaciones en Microelectrónica (CIME), Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba. E-mail: lcesarv@cime.cujae.edu.cu ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5782-1828

[2] Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica (1997), Máster en Electrónica (2001), Doctor en Ciencias Técnicas (2007), Departamento de Investigaciones en Microelectrónica (CIME), Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba. E-mail: sonnia.pavoni@cime.cujae.edu.cu ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9348-6051

[3] Ingeniera en Física Nuclear (1992), Máster en Electrónica (1997), Departamento de Investigaciones en Microelectrónica (CIME), Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba. E-mail: dilaila.criado@cime.cujae.edu.cu ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1718-3598

[4] Ingeniero en Telecomunicaciones (1970), Doctor en Ciencias Técnicas (1995), Departamento de Investigaciones en Microelectrónica (CIME), Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba, E-mail: victor.escartin@cime.cujae.edu.cu ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7592-4166

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

Resumen

En diferentes esferas de la vida cotidiana es muy importante determinar el peso de sustancias, objetos e incluso de personas. Las galgas extensiométricas son ampliamente utilizadas en la construcción de celdas de carga para balanzas electrónicas. Sin embargo, la señal de estos transductores presenta ruido debido a diversos factores. En este trabajo se presenta un instrumento virtual desarrollado en LabVIEW para la adquisición y procesamiento de la señal de una celda de carga AC108B/BW. Se desarrolló un filtro digital integrador de media móvil, configurable, para disminuir la amplitud del ruido de la señal.

Palabras clave: celda de carga, filtro digital, galga extensiométrica, instrumentación virtual, media móvil.

1. Introducción

En la industria comercial, la medicina, trabajos de investigación y prácticamente en la vida cotidiana, es de gran importancia determinar el peso de sustancias, objetos e incluso de personas. Existen varios métodos para medir peso: la comparación con otros pesos patrones, el empleo de celdas de carga a base de galgas extensiométricas, las celdas de carga hidráulicas y celdas de carga neumáticas, [1]. En la construcción de balanzas electrónicas es usual la selección celdas de carga con galgas extensiométricas como transductor. Estos elementos convierten el estado de deformación provocado por un peso aplicado a la celda, en un nivel de tensión que permite medir este peso, [2].

A los bajos niveles de voltaje de la señal de salida de las celdas de carga a base de galgas extensiométricas, se superpone el ruido añadido por la fuente de alimentación y por los

componentes mecánicos que conforman el sistema. Como consecuencia, puede afectarse significativamente la información útil de la señal de la celda y por esta razón es importante realizar un proceso de filtrado. Tradicionalmente el filtrado de señales se ha efectuado con técnicas analógicas implementadas electrónicamente con circuitos basados en amplificadores operacionales, resistores, condensadores e inductores. Este tipo de filtrado ofrece ventajas tales como el bajo coste de los componentes, la posibilidad de realizarse en tiempo real y la posibilidad de diseñar circuitos integrados que compacten toda una red electrónica. Sin embargo, los componentes analógicos añaden ruido y son sensibles a los cambios de las condiciones de trabajo. Para solucionar este problema aparecen alternativas de filtros digitales que, en comparación con los sistemas analógicos, son más robustos a las perturbaciones, pueden ser programables, son más estables, no requieren componentes muy precisos y no varían su comportamiento con las condiciones de operación, [3, 4].

El procesamiento y filtrado digital de señales puede realizarse sobre diferentes tecnologías, por ejemplo, microcontroladores, dispositivos DSP, FPGA y computadoras, [5, 6]. Para el estudio de las señales que entregan los sensores, el análisis de variantes de procesamiento digital, así como la concepción de las funcionalidades equivalentes a las de los instrumentos tradicionales, la instrumentación virtual constituye una herramienta muy útil, [7]. Este tipo de sistema, además de los transductores, está formado por una computadora personal (PC), un software de aplicación, una tarjeta de adquisición de datos (TAD) y un módulo acondicionador de señal. Los procesos de análisis y presentación de las señales se llevan

a cabo en un software de aplicación que puede ser de programación gráfica o mediante un lenguaje basado en texto. Entre estos se encuentra LabVIEW, el cual es un lenguaje y a la vez entorno de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla.

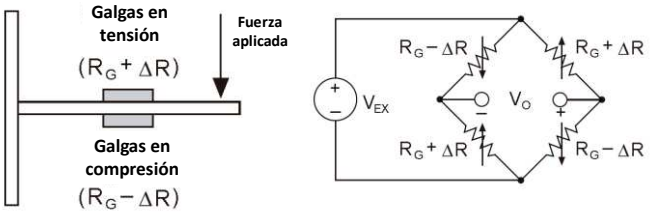
El objetivo de este trabajo es procesar la señal de salida de la celda de carga a base de galgas extensiométricas AC108B/BW mediante un instrumento virtual (VI) desarrollado en LabVIEW. Se utilizó la celda de carga AC108B/BW, la tarjeta de adquisición de datos (TAD) NI USB-6009, una PC y el programa LabVIEW 2019.

Además de la Introducción, el resto de este trabajo se ha estructurado en otras seis secciones abordando las temáticas que se describen a continuación: en la Sección 2 “Celda de carga” se describe el principio de funcionamiento de las celdas de carga a base de galgas extensiométricas y las principales características de la celda AC108B/BW. En la Sección 3 “Sistema de medición”, se describe el sistema desarrollado para la adquisición y procesamiento de la señal de la celda, basado en la instrumentación virtual. En la Sección 4 “Instrumento Virtual”, se presentan aspectos teóricos fundamentales de los VI, así como el desarrollado en este trabajo para la implementación del filtrado digital. Las Secciones 5 y 6, “Trabajo experimental” y “Resultados y Discusión”, se dedican a exponer los experimentos realizados relacionados con la medición y procesamiento digital de la señal de la celda de carga. Finalmente, se presenta la Sección de “Conclusiones”.

2. Celda de carga

Las galgas extensiométricas son dispositivos utilizados para medir esfuerzo. Entre la diversidad de galgas existentes, son ampliamente utilizadas las de tipo metálica. Estos casos están formados por varias espiras de hilo metálico pegado a un soporte de papel o de resina sintética. El esfuerzo al que se somete la galga producto del peso, hace variar la longitud del hilo y modifica, por tanto, su resistencia eléctrica, [2, 8].

La celda de carga a base de galgas extensiométricas contiene una pieza de elasticidad conocida, capaz de soportar la carga sin exceder su límite de elasticidad. A esta pieza se encuentra pegado el conjunto sellado y encapsulado del puente de Wheatstone y las galgas (figura 1). La utilización de un puente de Wheatstone, permite convertir la variación de resistencia eléctrica de las galgas en una variación de voltaje y compensar los efectos de la temperatura en la variación de la resistencia de las galga, [2, 9, 10, 11]. Las celdas de carga poseen dos terminales para aplicarles el voltaje de excitación (V_{EX}) y dos terminales para la señal de salida, cuyo voltaje (V_O) varía en dependencia de la tensión o la compresión a la que se somete la celda producto del peso [1, 2, 12].



R_G : resistencia nominal de la galga
ΔR : cambio en la resistencia producto del esfuerzo
V_{EX} : voltaje de excitación
V_O : voltaje da salida

Figura 1. Circuito con puente completamente activo. Fuente: elaboración propia.

En este trabajo se utilizó una celda de carga AC108B/BW. La exactitud de esta celda es de clase C3 de acuerdo con la norma OIML R60 [13], que regula los valores de parámetros como desviación de linealidad, repetibilidad, error de histéresis y efecto de la temperatura sobre la sensibilidad. La capacidad máxima de esta celda es 30 kg, la sensibilidad es 2 mV/V ± 10 %, posee una resistencia de entrada de 415 Ω ± 15 Ω, una resistencia de salida de 350 Ω ± 3 Ω y el rango de temperatura nominal es de -10 ºC a +40 ºC. La celda de carga se excitó con 5 V, que deben generar un voltaje de salida de la celda de 10 mV para la carga máxima (30 kg).

3. Sistema de medición

La principal función de la etapa de adquisición es convertir la señal analógica en una señal digital que pueda ser procesada por una computadora. Para esta tarea, la utilización de TAD ha conseguido una gran aceptación en muchas aplicaciones, estas se conectan al bus del ordenador y permiten adquirir y procesar datos en tiempo real. Cada tarjeta presenta varias funcionalidades, lo que proporciona mucha flexibilidad y operatividad para las necesidades de la medición. Luego de la adquisición de la señal, tiene que obtenerse la información que interese contenida en esta señal; generalmente la extracción de información se reduce a dos procedimientos: el filtrado de la señal y su procesamiento.

En este trabajo se diseñó un sistema de medición basado en una PC que adquiere la señal de salida de la celda a través del bus USB, mediante la TAD NI USB-6009 (National Instruments). Esta es una tarjeta externa al PC que provee conexión para ocho canales analógicos de entrada, dos canales analógicos de salida, 12 canales digitales de

entrada/salida y un contador de 32 bit para entrada/salida de conteo. Las entradas analógicas tienen una resolución de 14 bits en modo diferencial y 13 bits en modo *single-ended*. Su máxima frecuencia de muestreo es de 48 000 muestras por segundo por canal. Esta tarjeta posee una salida que actúa como fuente de alimentación de +5 V / 200 mA para energizar componentes externos, esta fuente se utilizó para excitar la celda de carga [14].

El circuito para las entradas analógicas (AI) de la TAD se muestra en la figura 2. Con el multiplexor se selecciona el canal de entrada analógico que se va a muestrear. El amplificador de ganancia programable (PGA) provee varios valores específicos de ganancia entre 1 y 20 a la señal de entrada, si el canal está configurado en modo *single-ended* la ganancia es de 1. Esta TAD tiene un solo conversor analógico-digital (ADC) del tipo aproximaciones sucesivas. Como la tarjeta puede ser configurada para realizar una o múltiples conversiones de un número fijo o infinito de muestras, un registro del tipo FIFO retiene los datos durante el proceso de adquisición, [14].

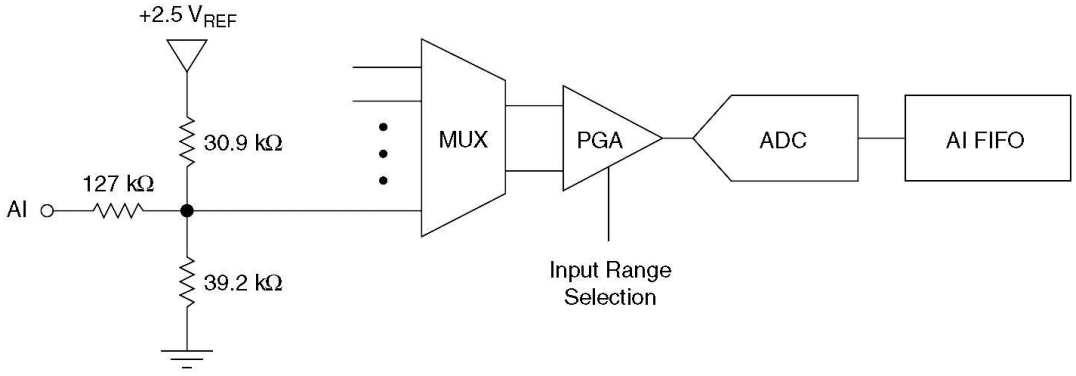


Figura 2. Circuito para las entradas analógicas, [14].

Para el procesamiento de la señal adquirida y la presentación de la información en la PC, se desarrolló un instrumento virtual en LabVIEW 2019. Para utilizar la TAD con LabVIEW se empleó el driver NI-DAQmx, este software de bajo nivel permite la comunicación bidireccional de los productos software y los elementos de adquisición de datos de NI. La configuración y diagnóstico de la TAD se realizó mediante el software Measurement & Automation Explorer, software de diagnóstico de NI para todos sus dispositivos de hardware. En LabVIEW 2019, para la utilización de la señal adquirida por uno de los canales analógicos de entrada de la TAD, se utilizó el VI express DAQ Assistant, el cual tiene asociada una interfaz gráfica que permite configurar tareas asociadas a la TAD.

4. Instrumento Virtual

Actualmente, la utilización de los ordenadores es fundamental dentro de la infraestructura de cualquier disciplina tecnológica. De hecho, diferentes ramas de la industria como las cadenas de producción y los sistemas de medida dependen de la ayuda de los ordenadores, [3].

Un instrumento virtual es un módulo de software que intenta simular cada uno de los aspectos funcionales del instrumento real, basándose en todos los dispositivos físicos que pueden ser accesibles para el ordenador (TAD, tarjetas DSP, instrumentos accesibles vía GPIB, VXI, RS-232, etc.), [3, 15].

Los sistemas de instrumentación virtual son ampliamente utilizados por su bajo costo, gran flexibilidad y reconfigurabilidad, así como por su alto rendimiento y ahorro considerable en tiempo de desarrollo; razón por la cual constituyen una evolución natural respecto a los

sistemas tradicionales de instrumentación. Históricamente, los sistemas de instrumentación tradicional se han basado en el uso de aparatos o instrumentos de medición individuales, los cuales incluyen el uso de sensores o transductores para adquirir variables físicas y convertirlas a señales eléctricas que el usuario pueda interpretar para su posterior registro o procesamiento. Sin embargo, en dichos sistemas se tienen varios inconvenientes que incluyen el hecho de que se requieran diferentes aparatos físicos para medir múltiples variables, con la desventaja que representa la portabilidad de los mismos; además, dichos aparatos pueden incluir diferentes interfaces o no incluirlas, lo cual ocasiona que no puedan ingresarse los datos a la computadora de manera automática. Lo anterior representa las mayores desventajas en el uso de sistemas de instrumentación tradicionales, ya que no se tiene interacción con equipos de cómputo en tiempo real, aunado a la nula posibilidad de comunicación inalámbrica y aplicaciones móviles. Debido a esto, la instrumentación se ha caracterizado por un incremento continuo en cuanto a flexibilidad y escalabilidad de equipos e instrumentos de medición, así como de las interfaces que permitan ingresar datos a alta velocidad en la computadora para su posterior análisis y procesamiento. Todo esto ha llevado al nacimiento de la instrumentación virtual, el cual es un término asociado al uso de instrumentos virtuales (virtual instruments o VIs) dado que se encuentran dentro de la computadora y mediante los cuales se pueden desarrollar aplicaciones computacionales basadas en interfaces gráficas de usuario.

Todo VI consta de tres elementos fundamentales: la adquisición, el análisis y la presentación. La adquisición es el proceso mediante el cual una señal analógica es

convertida a un formato digital y entregada al PC. El análisis permite caracterizar a la señal adquirida y es realizado por rutinas de software optimizadas para este objetivo y disponibles en diversos ambientes de desarrollo. La presentación de la señal adquirida y analizada se puede realizar de diversas maneras, como por ejemplo utilizando el monitor de la PC, mediante una copia dura obtenida de una impresora, a través de ficheros o en una página WEB de Internet.

La figura 3 muestra el Panel Frontal del instrumento virtual desarrollado para el procesamiento de la señal de la celda. Se utilizaron dos gráficas para mostrar la señal adquirida por la TAD y la señal resultante después de la operación de filtrado. Se utilizaron controles para establecer el número de muestras de la ventana del filtro (N) y rangos específicos para los ejes de la gráfica correspondiente a la señal resultante.

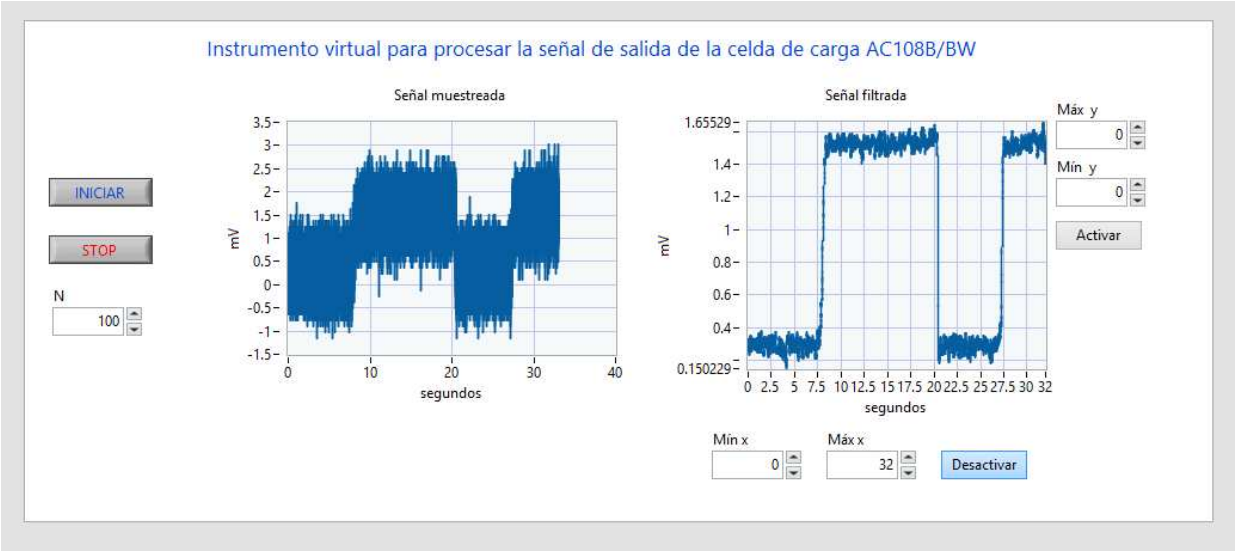


Figura 3. Panel Frontal del instrumento virtual para procesar la señal de la celda de carga. Fuente: elaboración propia.

Este VI, en la etapa de adquisición, recibe y digitaliza la señal mediante el VI express DAQ Assistant. En la etapa de análisis se filtra mediante una implementación del filtro de ventana móvil y en la etapa de presentación se muestran la señal sin filtrar y la señal filtrada. En esta última etapa es necesario generar el vector de tiempo a partir del número de muestras y la frecuencia de muestreo.

Una de las técnicas de filtrado consiste en el promediado de muestras [15]. Entre los filtros que se basa en esta técnica se encuentra el de ventana móvil. Este es un filtro pasa bajo, cuya implementación consiste en calcular el promedio de la señal en un intervalo determinado, llamado ventana. En un sistema discreto el tamaño de la ventana serán las muestras de la secuencia de entrada que se promedian. Esta ventana es móvil, es decir, avanza en cada paso del algoritmo una posición en la secuencia de entrada para realizar el promedio. El ancho de la ventana se determina empíricamente. Es importante tener en cuenta que el número de operaciones que realiza el ordenador es proporcional al tamaño de la ventana.

La ecuación 1 corresponde al filtro integrador de ventana móvil, donde N corresponde al número de muestras en la ventana.

$$y(n) = \frac{1}{N} \Sigma_{k=0}^{N-1} x(n-k) \quad (1)$$

Para el filtro integrador de ventana móvil se desarrolló una función en LabVIEW, cuyo diagrama de programación se muestra en la figura 4. Esta función tiene como parámetros

de entrada el vector que contiene las muestras filtrar y el tamaño de la ventana (N) y como parámetro de salida el vector que contiene la señal filtrada.

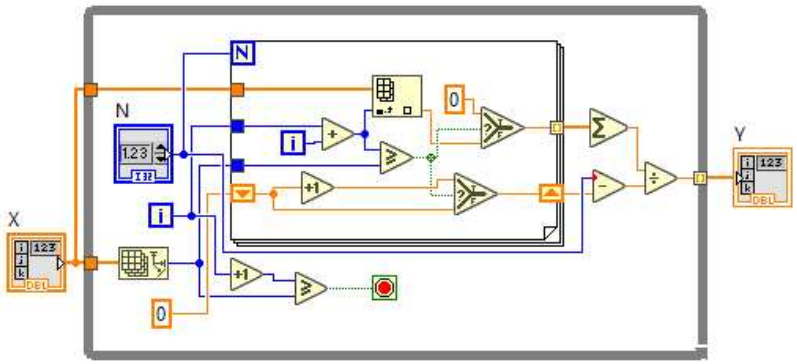


Figura 4. Diagrama de la programación del filtro integrador de ventana móvil. Fuente: elaboración propia.

5. Trabajo experimental

Para trabajo experimental se utilizaron la celda de carga, el sistema de medición y el instrumento virtual presentados en los tópicos anteriores. Se realizaron experimentos consistentes en medir la señal de la salida de la celda de carga sin peso sobre ella y con un peso de 5 kg. Se midieron las señales sin utilizar filtro digital y utilizando el filtro integrador de ventana móvil con ventanas de 100 y 1000 muestras. La TAD se configuró en modo de adquisición “N Samples” para tomar mil muestras a 1 kHz. La salida de la celda de carga se conectó al canal analógico de entrada 0 (ai0), el cual se configuró para medir voltaje en modo single-ended en el rango de 0 V a +5 V.

Las mediciones comenzaron con la celda sin carga. Luego se alternó entre ubicar durante algunos segundos un peso de 5 kg y retirarlo.

6. Resultados y discusión

En la figura 5 se presentan las señales de salida de la celda, medidas sin filtro y filtradas utilizando el integrador de ventana móvil desarrollado en LabVIEW, para unas ventanas de 100 y 1000 muestras, respectivamente. En la tabla 1 se presentan resultados cuantitativos de estos experimentos.

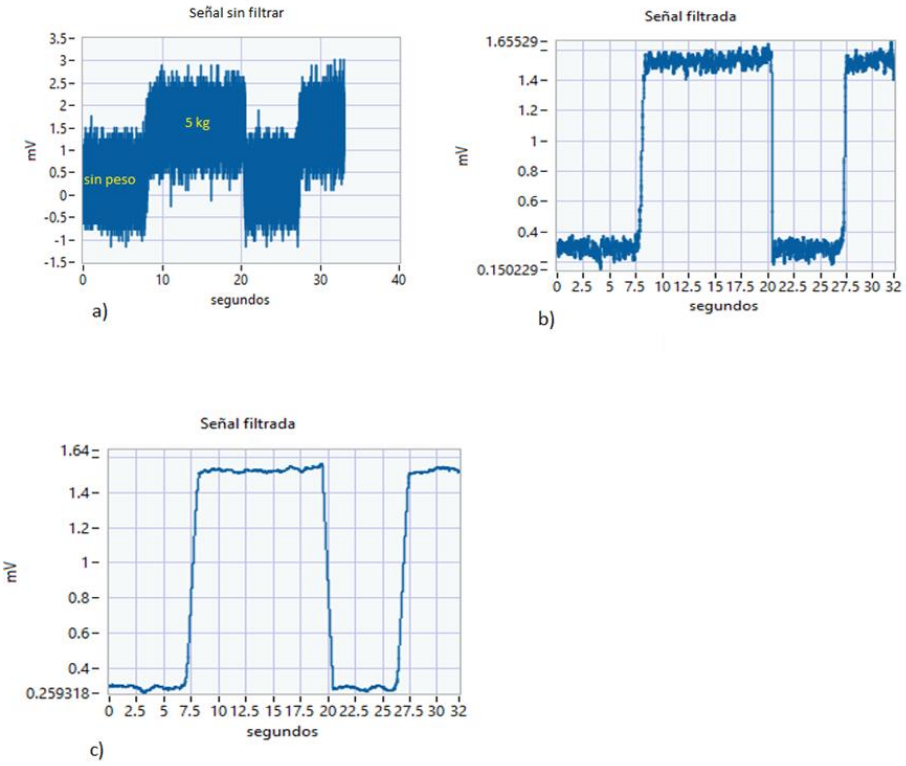


Figura 5. Señal de salida de la celda de carga: a) sin filtro digital); con filtro digital integrador media móvil b) N=100 y c) N=1000. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Resultados experimentales.

Número de muestras en la ventana (N)	**Amplitud del ruido (mV)**	**Tiempo de respuesta (s)**
Sin filtro	2	-

Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse, en la señal sin filtrar el ruido añadido afecta significativamente la información útil. La relación señal/ruido aumentó con el incremento del número de muestras de la ventana. Un peso de 5 kg sobre la celda generó una tensión media de 1,53 mV a la salida de la celda, sin embargo, la amplitud pico a pico de las oscilaciones de la señal muestreada es de 2 mV.

Al aplicar el filtro integrador, mejoró la calidad de la señal dado que la amplitud del ruido se atenuó 10 veces para la ventana de 100 muestras y 40 veces para la ventana de 1000 muestras. Según se incrementó el número de muestras de la ventana, aumentó la relación señal/ruido, sin embargo, el tiempo de respuesta ante los cambios de peso también aumentó.

7. Conclusiones

En este trabajo se realizó la adquisición y procesamiento de la señal de una celda de carga AC108B/BW mediante instrumentación virtual. Se desarrolló en LabVIEW un filtro integrador de media móvil con ventana configurable. La utilización del filtro digital de media

móvil logró reducir la amplitud del ruido añadido a la señal de la celda de 2 mV hasta 0,05 mV.

Aumentar el tamaño de la ventana del filtro integrador de media móvil, disminuyó notablemente la amplitud del ruido añadido a la señal de la celda de carga, sin embargo, aumentó el tiempo de respuesta.

Utilizar la instrumentación virtual permitió el análisis de la señal proveniente del sensor y constituye una herramienta práctica para el estudio de variantes de filtrado digital. Para próximos trabajos se recomienda la identificación del tamaño óptimo de la ventana, de modo que se establezca una relación de compromiso entre la relación señal/ruido y el tiempo de respuesta del filtro.

Reconocimientos

Agradecemos a la empresa cubana PEXAC por facilitarnos la celda de carga AC108B/BW para la realización del trabajo experimental.

Referencias

[1] Creus-Solé, “Instrumentación industrial”, 8va. ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2011.

[2] M. A. Pérez-García, et al., “Instrumentación electrónica”, Madrid: Thomson, 2004.

[3] Manuel, et al., “Instrumentación virtual adquisición, procesado y análisis de señales”, 1era ed. Barcelona: UPC, 2001.

[4] O. F. Corredor, et al. “Diseño e implementación de filtros digitales”. Visión electrónica, vol. 3, no. 1, pp. 55-56,2009. https://doi.org/10.14483/22484728.691

[5] Silicon Labs, “Using microcontrollers in digital signal processing applications”. AN219, Rev. 0.2 8/08. https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an219.pdf

[6] Hernández y E. Jacinto, “Una nueva metodología en el diseño de filtros digitales FIR sobre FPGA”. Visión electrónica, vol. 3, no. 2, pp. 40-47, 2009. https://doi.org/10.14483/22484728.2834

[7] V. M. Gómez, et al. “Diagnóstico de rodamientos con vibraciones mecánicas einstrumentos virtuales”. Visión electrónica, vol. 8, no. 2, pp. 107-113, 2014. https://doi.org/10.14483/22484728.9881

[8] National Instruments, “Strain gauge measurement - A tutorial”, Aplication Note 078, 2018.

[9] J. Horn y G. Gleason, “Weigh Scale Applications for the MCP3551”, AN1030 Microchip, 2006.

[10] F. Quiles-Latorre, et al., “Diseño del interfaz de una balanza electrónica basada en una celda de carga,” en Libro de catas SAAAEI2018, Córdoba, pp. 272-277, 2018.

[11] J. Hernández-Jiménez y M. Fabela-Gallegos, “Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento”, 2004.

[12] Rice Lake Weighing Systems, “Load cell and weigh module handbook”, 2017.

[13] OIML, “Metrological regulation of load cells”, OIML R 60-1, 2017.

[14] National Instruments, “User guide and specifications NI USB-6008/6009”, 2007. C. E. Pardo-Beainy, “Instrumentación Virtual, Control y Adquisición de Datos para Unidades de Cuidados Intensivos”, 2007.

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES
El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos
26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

STATE FEEDBACK CONTROL WITH INTEGRAL ACTION FOR MULTIRROTOR UAV

Control por Realimentación De estados Con accón Integral para Multirrotor UAV

Nicolás Felipe Conde González[1], Luisa Fernanda Mahecha Mora[2]

Abstract

This paper presents the identification and control by feedback of states with integral action of the UAV model for the 2020 Engineering in Control competition presented by the University of La Rioja; The proposed identification of the plant, the tuning and implementation of the controller in the model obtained and then in the UAV plant are presented.

Keywords: UAV, State Feedback Control, Integrator.

Resumen

En este documento se presenta la identificación y control por realimentación de estados con acción integral del modelo UAV para el concurso de Ingeniería en Control 2020 presentado por la Universidad de la Rioja; se describe la identificación en lazo de la planta, la sintonización e implementación del controlador en el modelo obtenido y luego en la planta UAV.

Palabras clave: UAV, Control por realimentación de estados, integrador.

[1] Tecnólogo en Electrónica, Estudiante de Ingeniería en Control y Automatización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. https://orcid.org/0000-0001-5452-6866
[2] Tecnóloga en Electrónica, Estudiante de Ingeniería en Control y Automatización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) representan una herramienta interactiva a la vez que plantean un reto para probar y formular distintos métodos de control los cuales deben contrarrestar tanto el efecto colateral de cada motor como las perturbaciones externas que se introduzcan al sistema, por lo que los UAV son sistemas adecuados para probar diversas estrategias de control que permitan reducir el error respecto a la señal de referencia planteada.

2. Descripción del problema

Se plantea realizar el control de orientación de un multirrotor UAV teniendo en cuenta la orientación de los ángulos de Euler: Roll, Pitch y Yaw y las velocidades de rotación en SRB [p,q,r], inicialmente, se trabaja en Matlab-Simulink como se observa en Figura donde se podrá tener acceso a las variables del UAV ya mencionadas anteriormente y con ellas plantear la estrategia de control, luego, el controlador se lleva a la planta real Figura2, donde se aplicará el controlador diseñado a partir de las funciones de transferencia identificadas del sistema. Para este caso, se va a concursar en la categoría 1 del concurso, por lo que el ángulo Yaw y la velocidad r son cero y no se tendrán en cuenta para la realización del controlador.

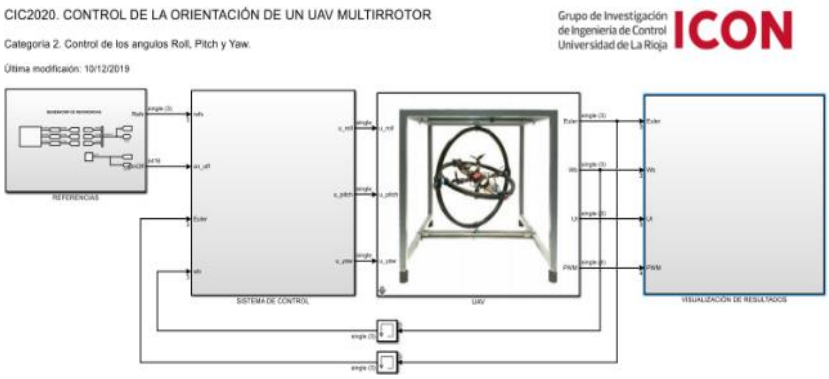


Figura 1. Modelo de la planta, [1].



Figura 2. Estructura del cuatrirrotor UAV, [1].

2.1. Descripción del problema físico

Se trata de un cuatrirrotor UAV de 250 mm envergadura el cual se encuentra confinado en una estructura que permite su rotación alrededor de sus tres ejes principales (XB, YB, ZB) en el sistema de referencia no inercial del cuerpo (SRB), estas rotaciones traducidas al sistema de referencia inercial terrestre (SRG) de ejes (XG, YG, ZG), definen la orientación

según los ángulos de Euler: roll (ϕ), pitch (θ) y yaw (ψ). La estructura está formada por 2 aros concéntricos, que giran sobre ejes enfrentados 90° entre sí, y que permiten la orientación deseada en yaw y pitch, el aro exterior presenta un diámetro de 580 mm y el aro interior un diámetro de 470 mm. A 90° del eje de giro del aro interno se acopla una varilla que permite la orientación deseada en roll. Sobre esta varilla se coloca el cuatrirrotor y su equipamiento tal que el centro de gravedad se sitúe por debajo del centro de giro; la disposición de los cuatro brazos es en modo aspa, quedando los sistemas de referencia SRG y SRB. El eje de giro del aro exterior está sujeto a una estructura metálica que conforma un cubo. Las variables dinámicas proporcionadas para el concurso son: los ángulos de orientación en SRG, $[\phi, \theta, \psi]^T$ (objeto de control), y las velocidades de rotación en SRB, $[p, q, r]^T$, [1].

Además, se tienen las siguientes consideraciones:

- La controladora de vuelo es una ArduPilot Mega - APM 3.1 Pro-, que contiene un microcontrolador ATMEGA2560 de 8 bits y tiempo de muestreo de 0.01 ms.
- El sistema de propulsión utilizado son hélices tripala acopladas a motores de corriente continua sin escobillas (BLDC), cuyo controlador responde a señales de pulso PWM RC. El ancho de pulso se sitúa en un rango de $1000\,\mu s$ a $2000\,\mu s$, las cuales

corresponden a potencias de 0% a 100%. El punto ideal de funcionamiento corresponde a $1500\ \mu s$ donde ϕ = 0 °, θ = 0 ° y ψ = 0 °.

- El hardware APM integra una unidad de medida inercial (IMU) de seis ejes y un barómetro.
- El voltaje de la batería será una perturbación externa, inicialmente se implementará el controlador sobre el sistema real con un voltaje de 12V, luego, se probará el controlador con las baterías a 11V y por último a 10V.

La conexión del sistema se puede observar en la Figura 3

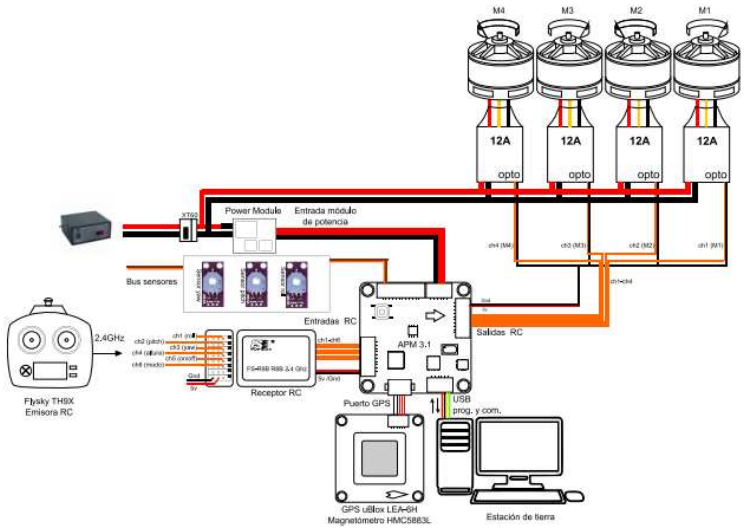


Figura 3. Sistema del cuatrirrotor, [1].

3. Background y notación

3.1. Ángulo de euler

Los ángulos de Euler son tres ángulos introducidos por Leonhard Euler para describir la orientación de un cuerpo rígido con respecto a un sistema de coordenadas fijo. [2]

La definición geométrica comienza definiendo la línea de nodos (N) como la intersección de los planos xy y XY. De esta manera, los tres ángulos de Euler se pueden definir de la siguiente manera, [3]:

- α es el ángulo entre el eje x y el eje Y
- β es el ángulo entre el eje z y el eje Z.
- γ es el ángulo entre el eje N y el eje X

3.2. Fórmula de arckeman

La fórmula de Arckeman es un método de diseño de sistema para resolver el problema de asignación de polos para sistemas de tiempo invariante de Jürgen Ackermann. Uno de los principales problemas en el diseño de un sistema de control es la creación de controladores que cambiarán la dinámica de un sistema al cambiar los valores propios de la matriz que representa la dinámica del sistema de circuito cerrado. Esto equivale a cambiar los polos de la función de transferencia asociada en el caso de que no haya cancelación de polos y ceros, [4].

3.3. IAE (Integral del error absoluto)

Este índice se usa para identificar la variabilidad promedio de la curva de respuesta de control, en una ventana de tiempo definida. Permite medir la desviación de la variable del proceso, en relación con el set-point. Este índice es más sensible al error que el ISE, tiende

a dar tiempos largos de establecimiento y sobrepicos más altos, Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión, [5]:

$$\text{IAE} = \int_0^t |e(t)| dt \tag{1}$$

3.4. IAVU (Integral de la Variación de la Acción de control Absoluta)

Este índice mide el esfuerzo de la acción de control, es decir, se obtiene un valor mayor cuánto más bruscamente varía la acción de control. Su cálculo de realiza de la siguiente manera, [6]**:**

$$\text{IAVU} = \int_0^t \left| \frac{du(t)}{dt} \right| dt \tag{2}$$

3.5. ITAE (Integral del Error Absoluto ponderado a lo largo del Tiempo)

Se representa como la integral el error absoluto multiplicado por el tiempo a lo largo del tiempo. Lo que esto hace es ponderar los errores que existen después de mucho tiempo mucho más que los que se encuentran al comienzo de la respuesta. La sintonización ITAE produce sistemas que se estabilizan mucho más rápidamente que los otros dos métodos de sintonización, [7].

La desventaja de esto es que la sintonización ITAE también produce sistemas con una respuesta inicial lenta (necesaria para evitar una oscilación sostenida), [6].

$$\text{ITAE} = \int_{t_1}^{t_1+t_2} (t - t_1)|e(t)| dt \tag{3}$$

4. Identificación del sistema

Antes de realizar la identificación, se puede observar que el sistema lo presentan previamente con un controlador proporcional en cascada, de acá se analiza que el sistema es inestable sin la acción del controlador, por lo que se decide realizar la identificación del sistema en lazo cerrado para lo cual se procede a modelar el sistema con 4 funciones de transferencia, siendo 2 las principales para cada ángulo Roll y Pitch respectivamente y las otras 2 presentan las perturbaciones que un ángulo proporciona al otro.

Para comenzar, se debe valer de la teoría de la superposición, por lo tanto, se debe llevar la referencia del ángulo Pitch a cero, luego, se realiza el modelo matemático del sistema comenzando por el lazo interno (velocidad)

$$vel(\phi) = \frac{y1}{x1} = \frac{\alpha * G1}{1 + \alpha * G1} \tag{4}$$

Ahora el lazo de posición:

$$pos(\phi) = \frac{y}{x} = \frac{\beta * vel}{1 + \beta * vel} \tag{5}$$

Sustituyendo vel, se obtiene:

$$pos(\phi) = \frac{y}{x} = \frac{\frac{\beta}{s} * \frac{\alpha * G1}{1 + \alpha * G1}}{1 + \frac{\beta}{s} * \frac{\alpha * G1}{1 + \alpha * G1}} \tag{6}$$

Simplificando:

$$pos(\phi) = \frac{y}{x} = \frac{\beta * \alpha * G1}{s + \alpha * s * G1 + \beta * \alpha * G1} \tag{7}$$

Ahora, considerando $\frac{y}{x} = \zeta$, y despejando G1:

$$G1 = \frac{\zeta * s}{\alpha * [\beta - \zeta * (s + \beta)]} \tag{8}$$

Reemplazando $\alpha = 0.04$ y $\beta = 8$, se obtiene la función de transferencia del ángulo Roll.

$$G1 = \frac{\zeta * s}{0.04 * [8 - \zeta * (s + 8)]} \tag{9}$$

Análogamente se realiza el mismo procedimiento con G2, obteniendo:

$$G2 = \frac{\zeta 2 * s}{\gamma * [\delta - \zeta 2 * (s + \delta)]} \tag{10}$$

Reemplazando $\gamma = 0.1$ y $\delta = 8$, se obtiene la función de transferencia del ángulo Pitch

$$G2 = \frac{\zeta 2 * s}{0.1 * [8 - \zeta 2 * (s + 8)]} \tag{11}$$

Para hallar G11 es un procedimiento similar, pero ahora se debe hacer la referencia del ángulo Roll a cero, y se debe hallar la función de transferencia que relacione la salida del ángulo Roll con la entrada Pitch, se obtiene lo siguiente:

$$G11 = \zeta 11 * \frac{[s + G2\gamma(\delta - s)][s + \alpha G1s + \alpha\beta G1]}{\gamma\delta s(s + \alpha G1s)} \tag{12}$$

Por lo tanto, G22 sería

$$G22 = \zeta 22 * \frac{[s + G2\alpha(\beta - s)][s + \gamma G1s + \gamma\delta G1]}{\alpha\beta s(s + \gamma G1s)} \tag{13}$$

Ahora, para obtener las funciones de transferencia que representan a $\zeta 1$, $\zeta 2$, $\zeta 11$, $\zeta 22$, se utiliza el bloque “To workspace” de Simulink y la herramienta “System Identification” de Matlab, la señal de referencia se modifica siendo un paso de amplitud 200 junto con una

señal aleatoria la nueva referencia, lo que permitirá abarcar un ancho de banda mayor, permitiendo realizar así una mejor identificación del sistema.

Las funciones de transferencia obtenidas son:

$$\zeta 1 = \frac{72.07}{s\text{^}2 \; + \; 10.31\, s \; + \; 97.56} \tag{14}$$

$$\zeta 2 = \frac{21.35}{s\text{^}2 \; + \; 1.639\, s \; + \; 23.74} \tag{15}$$

Por lo tanto, las funciones de transferencia que modelan el sistema son, estas se pueden observar en Figura 19 y Figura 205:

$$G1 = \frac{225.2}{s^2 \; + \; 1.303\, s \; + \; 25.49} \tag{16}$$

$$G2 = \frac{26.69}{s^2 - \; 1.03\, s \; + \; 2.39} \tag{17}$$

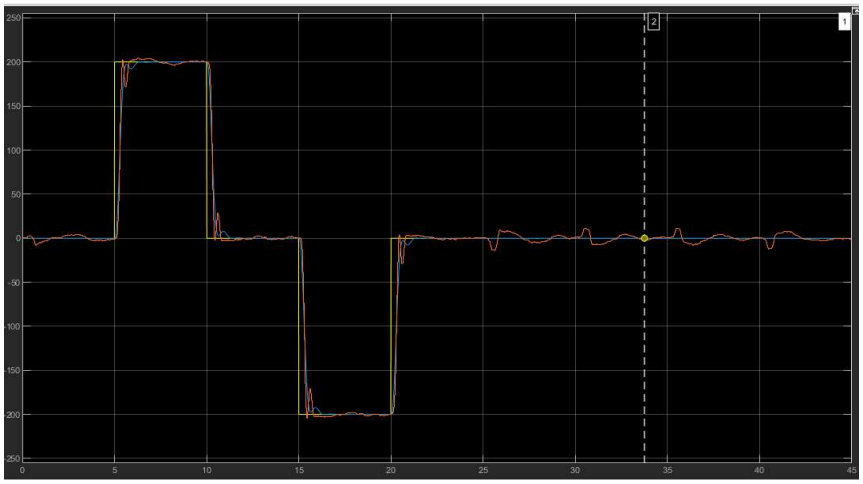


Figura 19. Gráfica Identificación Roll vs Planta real. Fuente: elaboración propia.

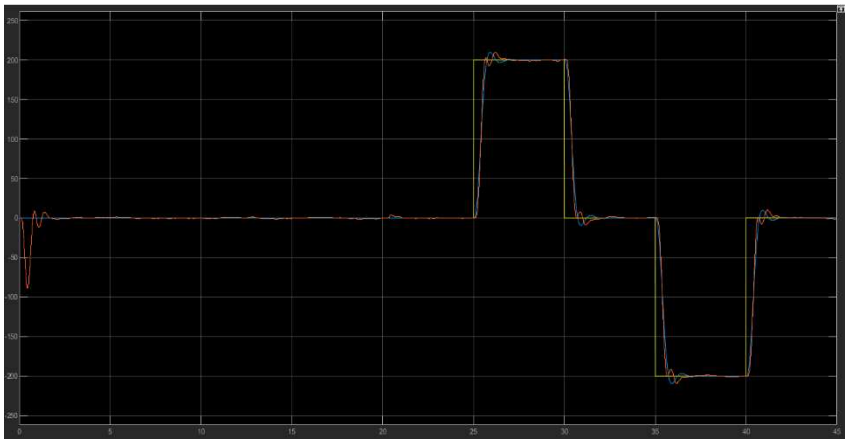


Figura 20. Gráfica Identificación Pitch vs Planta real. Fuente: elaboración propia.

5. Controlador

5.1. Control de dirección

Para comenzar, se diseña el controlador sobre G1 y G2 independientemente considerando G11 y G22 como perturbaciones a la hora de sintonizar el controlador.

Ahora, se debe pasar las funciones de transferencia G1 y G2 a su correspondiente forma canónica controlable en el espacio de estados la cual nos garantiza que el sistema es controlable, [8].

Las matrices A, B, C, D del sistema G1 se muestran a continuación:

$$A_{G1} = \begin{bmatrix} -1.3026 & -25.4895 \\ 1.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{G1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$C_{G1} = [225.2052 \quad 0]$$

$$D_{G1} = [0]$$

Las matrices A, B, C, D del sistema G2 se muestran a continuación:

$$A_{G2} = \begin{bmatrix} 1.0301 & -2.3903 \\ 1.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{G2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$C_{G2} = [0 \quad 26.6876]$$

$$D_{G2} = [0]$$

Se puede observar que las matrices A de los sistemas son de tamaño $2x2$, lo cual representa dos estados (velocidad y posición) para cada ángulo.

5.2. Controlabilidad del sistema

La controlabilidad es la propiedad que indica si el comportamiento de un sistema puede ser controlado por medio de sus entradas, [9].

Para $(A, B) -> A \epsilon R^{nxn}, B \epsilon R^{nxp}$ el sistema es controlable si:

$$C = [B \; AB \; A^2B \; \dots \; A^{n-1}B \,]; \; C \epsilon R^{nxp} \quad (20)$$

Es el rango de n (rango fila pleno), [9].

Ahora, se verifica si los sistemas son controlables hallando el rango de la matriz de controlabilidad, el cual debe ser igual a la cantidad de estados (dos) por cada sistema.

$$ran(C_{G1}) = ran([B_{G1} \; A_{G1}B_{G1}]) \quad (21)$$

$$ran(C_{G1}) = ran(\begin{bmatrix} 1.0000 & -1.3026 \\ 0 & 1.0000 \end{bmatrix}) \quad (22)$$

$$ran(C_{G1}) = 2 \quad (23)$$

$$ran(C_{G2}) = ran([B_{G2}\ A_{G2}B_{G2}]) \tag{24}$$

$$ran(C_{G2}) = ran(\begin{bmatrix} 1.0000 & -3.2430 \\ 0 & 1.0000 \end{bmatrix}) \tag{25}$$

$$ran(C_{G2}) = 2 \tag{26}$$

5.3. Realimentación de Estados

Se desea que el sistema sea controlado mediante la ley de control:

$$u = -k * x \tag{27}$$

Donde “x” son los estados del sistema y “u” la entrada.

La matriz K se determina estableciendo la ley de control, es decir, la ecuación característica que se desea para el sistema realimentado y como tal determina la posición de los "n" polos en bucle cerrado Figura6.

$$u = -k * x \tag{28}$$

$$\det[\mathrm{sI} - \mathrm{A} + \mathrm{BK}] = \alpha c(\mathrm{s}) \tag{29}$$

De la expresión anterior se puede deducir la fórmula de Ackermann:

$$\mathrm{K} = [0 \ldots 1]\mathrm{C}^{-1}\alpha c(\mathrm{A}) \tag{30}$$

donde A es la matriz del modelo del sistema y C la matriz de controlabilidad. Mediante la función “acker()” de MatLab® se resuelve esta fórmula, siendo A y B las matrices del modelo de estado del sistema y “polos” un vector columna de dimensión “n” con los polos de la ley de control, αc(s), [10].

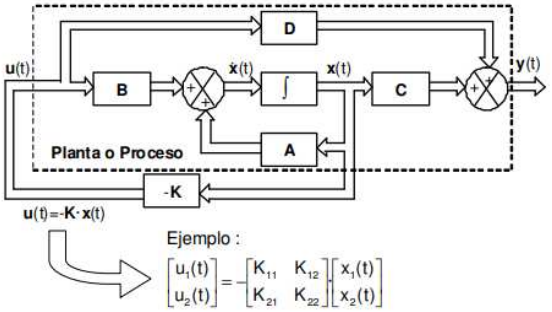


Figura 6. Control matricial por realimentación de estado,[10].

Si se introduce un integrador a la planta Figura 7, este va a eliminar el error de posición a una entrada. Esto cambia la estructura de control, que queda ahora de la forma siguiente [10]:

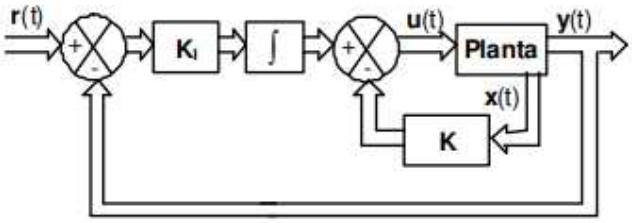


Figura 7. Control por realimentación de estados con acción integral, [10].

Para poder agregar este integrador, se debe reescribir las matrices de estado como:

$$\begin{bmatrix}\theta'(t)\\ v'(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & 0\\ C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta(t)\\ v(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B\\ D\end{bmatrix}u(t)$$

$$y(t)=\begin{bmatrix}C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta(t)\\ v(t)\end{bmatrix}+Du(t) \qquad (31)$$

Las matrices Ai, Bi, Ci, Di del sistema G1 se muestran a continuación:

$$A_{iG1} = \begin{bmatrix} -1.3026 & -25.4895 & 0 \\ 1.0000 & 0 & 0 \\ 225.2052 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{iG1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$C_{iG1} = [225.2052 \quad 0 \quad 0]$$

$$D_{iG1} = [0]$$

Las matrices Ai, Bi, Ci, Di del sistema G2 se muestran a continuación:

$$A_{iG2} = \begin{bmatrix} 1.0301 & -2.3903 & 0 \\ 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 26.6876 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{iG2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$C_{iG2} = [0 \quad 26.6876 \quad 0]$$

$$D_{iG2} = [0]$$

Obtener los valores del controlador “k” y “ki”, se deben elegir tres polos, $[K_1\ K_2]$ para realimentar los estados y K_i será la ganancia del integrador; se estima siempre K_i > 10 veces los polos del sistema para que no sea un polo dominante e interfiera en la planta.

Los polos elegidos son [-2,115 ; -2,42120; -10.412], utilizando la instrucción de MatLab®.

$$k = acker(A_{iG1}, B_{iG1}, [polos; polos\ i] \quad (34)$$

Se obtiene el vector de valores k el cual el sistema se logra controlar con un índice de error bajo como se observa en Figura 8.21 y Figura 22.

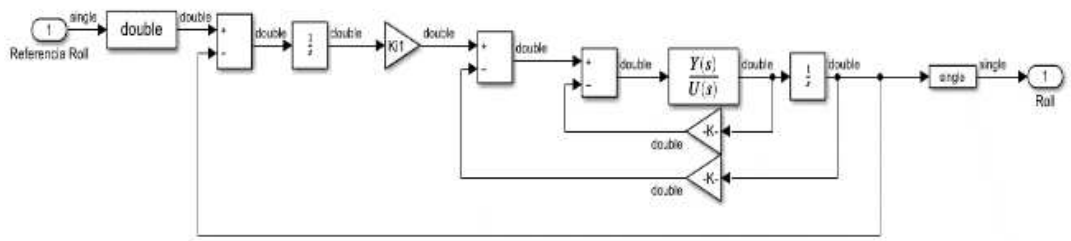


Figura 8.21 Controlador aplicado al modelo. Fuente: elaboración propia.

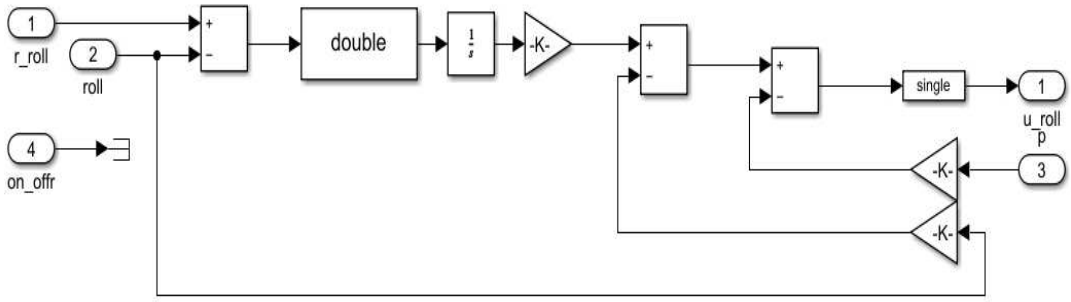


Figura 22 Controlador aplicado a la planta. Fuente: elaboración propia.

5.4. Sintonización del Controlador

A partir de los valores de k obtenidos para el controlador, como el objetivo del concurso es reducir aún más el error, se realiza un algoritmo iterativo el cual calcula los errores IAE, ITAE y IVAU (ecuaciones (1), (2) y (3) respectivamente) de forma similar a como se calcula para la calificación del controlador, con el objetivo de obtener los valores de k que minimicen el error de la planta.

El dato de error obtenido se observa en la Figura, además, en las Figura 11, Figura 1213, se puede observar el comportamiento de la señal aplicando la acción de control respecto a la señal de referencia.

6. Resultados

6.1. Resultados simulación en simulink

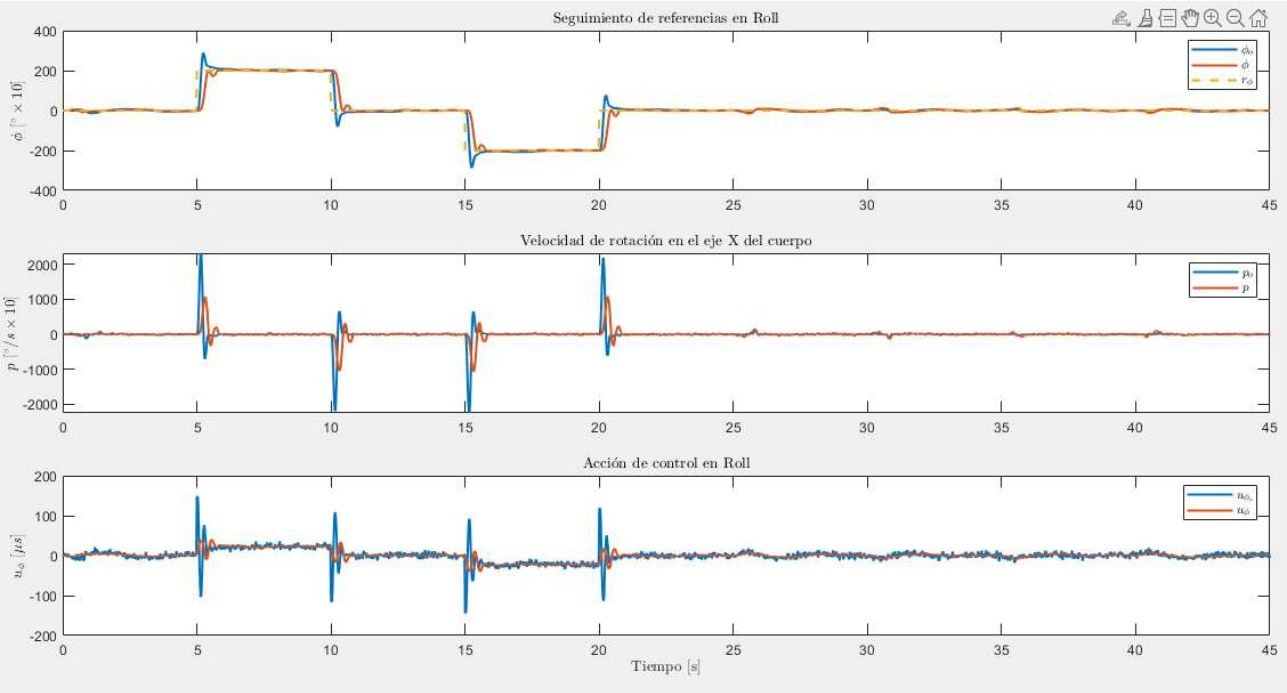


Figura 10. Gráfica de roll vs control de referencia. Fuente: elaboración propia.

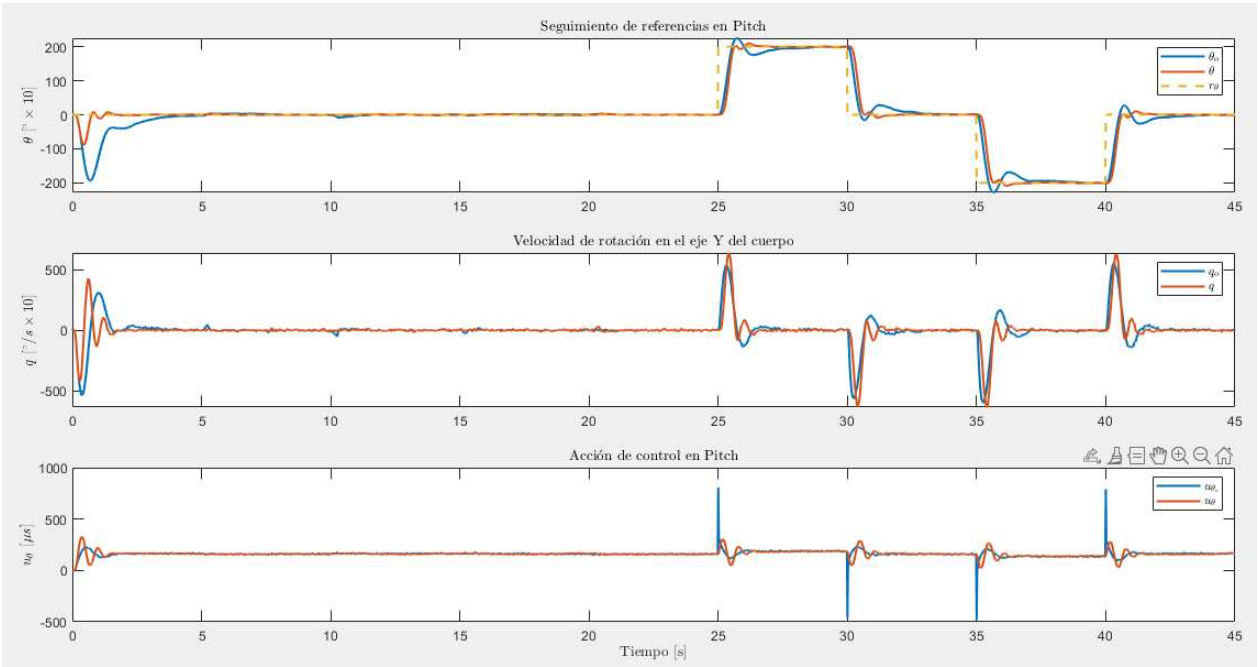


Figura 11. Gráfica de pitch vs control de referencia. Fuente: elaboración propia.

Resultados de la evaluación

	IAE	ITAE	IAVU	Total
Roll	1.2577	0.70972	0.12732	0.81244
Pitch	0.8967	0.43095	0.40431	0.61192

Resultado total de la ley de control:
0.7122

Figura 12. Error obtenido con el controlador. Fuente: elaboración propia.

En las gráficas Figura y 11, se puede observar un sistema de control de referencia (línea azul), contra el sistema de control por realimentación de estados con acción integral obtenido (línea naranja).

En la Figura 12 se observa el error que genera el controlador diseñado contra el controlador de referencia donde si el resultado es 1, el error del controlador generado es igual al error del controlador de referencia, si el resultado es menor a 1, es mejor el controlador generado que el controlador de referencia.

6.2. Resultados sobre sistema real

Tabla 11: Resultados finales sobre planta real. Fuente: elaboración propia.

V bat	ROLL				PITCH				ÍNDICE	MEDIA
	IAE	ITAE	IAVU	TOTAL	IAE	ITAE	IAVU	TOTAL		
10V	1,441	2,020	0,115	1,408	0,968	0,547	0,389	0,684	1,046	**1,023**
11V	1,512	1,923	0,119	1,400	0,917	0,487	0,371	0,636	1,018	
12V	1,613	1,625	0,130	1,321	0,959	0,557	0,418	0,690	1,006	

Se observa en la tabla 14 la variación de los errores IAE, ITAE y IAVU para ROLL y PITCH a 10V, 11V y 12V, Igualmente que en la simulación sobre Simulink, los resultados se evalúan contra el controlador propuesto de referencia, si el resultado es 1, el error del controlador generado es igual al error del controlador de referencia, si el resultado es menor a 1, es mejor el controlador generado que el controlador de referencia.

7. Conclusiones

Se puede observar que el controlador diseñado es mejor que el controlador de referencia presenta una menor sobreoscilación, la acción de control es menor por lo que no esfuerza de más los controladores, por lo que representa una mejor acción de control teniendo en cuenta la afectación que tiene un eje sobre el otro.

Sobre la implementación en el sistema físico se puede observar que el controlador del roll presenta un mayor error que el controlador de referencia en los apartador de IAE e ITAE pero siendo mucho mejor en IAVU, esto debido a que la acción de control es mucho menor en el controlador propuesto y en general, para el ángulo pitch el controlador propuesto es en general mejor que el controlador de referencia, en todos los errores evaluados presenta un mejor índice; en general el resultado del controlador se observa que aunque el en controlador del ángulo pitch es bastante mejor que el controlador de referencia, el controlador del roll presentó bastante error por lo que la media del índice da como resultado un controlador un poco peor que el controlador de referencia.

Referencias

[1] G. Tem, “Concurso en Ingeniería de Control 2020,” 2020.

[2] G. G. Slabaugh, “Computing Euler angles from a rotation matrix,” *denoted as TRTA Implement. from httpwww starfireresearch comservicesjava3dsamplecodeFlorinE ulers html*, vol. 6, no. 2000, pp. 1–6, 1999.

[3] L. Euler, “Formvlae generales pro translatione qvacvnqvve corporvm rigidor,” *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, vol. 20. pp. 189–207, 1776.

[4] D. Entwurf, “Der Entwurf linearer Regelungssysteme im Zustandsraum,” vol. 1, no. 8, 1972.

[5] D. D. E. I. Eléctrica and J. P. S. V, “Desarrollo de software para inspección técnica de una aplicación CPM,” 2017.

[6] S. C. C. Navarrete, “Control avanzado de un sistema de refrigeración,” 2019.

[7] "Measures of controlled system performance." [Online]. Available: http://www.online-courses.vissim.us/Strathclyde/measures_of_controlled_system_pe.htm. [Accessed: 20-Nov-2020].

[8] Á. Valera Fernández, *Modelado y control en el espacio de estados*. 2016.

[9] O. A. Esquivel Flores, "Análisis de observabilidad y controlabilidad para sistemas diferenciaslmente planos. Aplicación a un sistema de oscilaciones de calcio," p. 107, 2007.

[10] J. Ángel and S. Blanco, "Diseño en el Espacio de Estados," pp. 1–9, 2017.



CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

RESEÑA DE INVITADOS INTERNACIONALES

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

CONFERENCISTA INAUGURAL:

EDUARDO CUAUHTÉMOC GUÍZAR SAINZ



Recientemente, en el marco de la *Cumbre Mundial del Conocimiento* realizada en México, fue galardonado con el *Doctorado honoris causa en Ciencia y Tecnología*, otorgado por el Colegio Internacional de Profesionistas, el Senado de la República y la Cámara de Diputados Mexicanos. Es Ingeniero Industrial, y especialista en robótica.

En el año 2007 colabora con la Administración Nacional de Aeronáutica y de Espacio en Estados Unidos (NASA), en el área de robótica, para la misión *Mars Science Laboratory*, desarrollando los motores que van contenidos en las ruedas del *Curiosity,* robot que actualmente se encuentra explorando Marte.

Gracias a su labor humana y educativa, en su estado de origen Sinaloa - ex alumno del Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica (CONALEP),- como en distintos

estados de la república mexicana; desarrolla proyectos educativos relacionados con la electrónica y la ingeniería. En este tópico, desarrolla y lanza a la estratosfera -en diferentes instituciones educativas- satélites amateurs educativos, conocidos como 8:30-10 A.M.

Los satélites cuentan con cámaras fotográficas y de video de alta definición, rastreadores GPS, comunicación control remoto y un paracaídas para su regreso. Pueden volar hasta ocho horas continuas, alcanzaría una altura de más de 30.480 metros, alcanzando la estratósfera, y después descendería a una velocidad promedio superior a los 300 kilómetros por hora.

Conferencia:

EL CIELO YA NO ES EL LÍMITE

JACKELYNNE SILVA MARTÍNEZ



Actualmente trabaja en el Centro Espacial Johnson de la NASA en la Estación Espacial Internacional y en las Operaciones de Planificación de la Misión de Exploración dentro de la Dirección de Operaciones de Vuelo.

Es licenciada de la Universidad de Rutgers en Ingeniería Mecánica y Aeroespacial, y en Traducción e Interpretación en Español. Es MSc. En Ciencias Aeronáuticas con concentración en Factores Humanos Aviación / Sistemas Aeroespaciales de la Universidad Aeronáutica Embry-Riddle; y en Ingeniería Aeroespacial con concentración en Integración de Sistemas Espaciales en el Instituto de Tecnología de Georgia.

En 2015 fue seleccionada para la misión Human Exploration Research Analog en la Nasa, estudiando el comportamiento y estado anímico durante una posible misión a un asteroide;

a finales del mismo completó una segunda misión analógica como oficial ejecutiva en la Estación de Investigación Mars Desert (MDRS) en Utah; y en 2017 desarrolló pruebas de investigación en la que participó con el robot Curiosity que viajó al planeta Marte.

Conferencia:

HUMAN SYSTEMS INTEGRATION

TERRENCE L. CHAMBERS



Actualmente ejerce la Cátedra Donald & Janice Mosing BORSF en Ingeniería Mecánica, y dirige el Centro de Eficiencia Energética y Energía Sostenible (EESE) de la Universidad de Louisiana en Lafayette.

Ingeniero Mecánico, y PhD. En Ingeniería Mecánica de la Universidad de Brigham Young.

Profesor y director del Laboratorio de Investigación y Pruebas Aplicadas (START) de Louisiana Solar Technologies; se ha desempeñado como Decano Asociado de Ingeniería en la Universidad de Louisiana –Lafayette-; ha enseñado durante casi 20 años, y dirigido el Departamento de Ingeniería Mecánica provisionalmente.

Sus intereses de investigación incluyen energías alternativas, realidad virtual, optimización e inteligencia artificial.

Es autor de más de 60 publicaciones y ha recibido una alta cantidad de recursos en becas de investigación financiadas con fondos externos; junto con numerosas subvenciones de la industria y agencias estatales como: NSF, DOE, NASA, USDA y ED.

Conferencia:

DIRECT NORMAL IRRADIANCE FORECASTING USING MULTIVARIATE GATED RECURRENT UNITS

MARCO AURELIO CÁRDENAS JUÁREZ



Actualmente adscrito como docente asociado la Ingeniería de Telecomunicaciones en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí –UASLP-, coordinador de la Licenciatura en Ingeniería de Telecomunicaciones.

Miembro del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos –IEEE-, miembro del Sistema Nacional de Investigadores –SIN- del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología –CONACYT- de México.

Licenciado en Ingeniería Electrónica -especialidad en comunicaciones- por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP); M.Sc. En Ingeniería Electrónica -especialidad en Telecomunicaciones- por el Instituto Monterrey de Tecnología y Educación Superior

(ITESM) campus de Monterrey; Ph.D. En Procesamiento de Señales para Comunicaciones por la Universidad de Leeds, Reino Unido.

Con cerca de 20 años de experiencia docente universitaria tanto a nivel público como privado en áreas de Electrónica y Telecomunicaciones; ha escrito numerosos artículos *JCR*, conferencista permanente en IEEE CONIELECOMP; pare evaluador en numerosas revistas IEEE, IET, Elsevier,

Conferencia:

RETOS Y OPORTUNIDADES DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES DURANTE LA PANDEMIA POR COVID-19

JUAN IGNACIO PASTORE



Actualmente Profesor Asociado al Laboratorio de Procesamiento de Imágenes (LPI) de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE), Universidad Nacional de Mar del Plata - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Doctor en Ingeniería orientación Electrónica (UNMDP, 2009). Profesor Adjunto (FI-UNMDP).

Investigador Adjunto, CONICET. Codirector del Laboratorio de Procesamiento de Imágenes del ICYTE. Temas de investigación: Procesamiento de imágenes y videos.

El Grupo de Procesamiento Digital de Imágenes tiene una trayectoria de más de 15 años dedicados a la investigación pura y aplicada en el área de procesamiento de imágenes, incluyendo aplicaciones en bioingeniería, forensica, etc. Actualmente se realizan actividades

de investigación en áreas tales como aplicaciones de diagnóstico médico, análisis automático de estructura de plantas para fenotipado, análisis de señales spekle, entre otras.

Conferencia:

AGRICULTURA DE PRECISIÓN: DE LA INTUICIÓN A LA TOMA DE DECISIONES BASADAS EN DATOS REALES

KARY RITTER



Actualmente adscrito a la Universidad de Louisiana en Lafayette, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería. Director del *Cleco Alternative Energy Center*

Doctor de la Universidad de Ingeniería Mecánica de Louisiana en Lafayette; M.S. en Ingeniería en Energía Solar, Universidad Högskolan Dalarna; y B.S. en Ingeniería Mecánica de la Universidad Estatal de Louisiana.

Investigador Científico en áreas de Concentración de Energía Solar, Centro de Energía Alternativa Cleco Laboratorio de Realidad Virtual de Ingeniería Mecánica.

Tiene publicaciones de alta citación en: Energía Solar Virtual; Mantenimiento de plantas de Energía Solar de concentración de colectores cilindro-parabólicos de pequeña escala; Medición y evaluación de la suciedad de espejo de colectores cilindroparabólicos en una

planta de CSP operativa; Modelo numérico y validación del rendimiento de una central termosolar de concentración de pequeña escala; Descripción general y evaluación de los kits de herramientas de Unity para aplicaciones de realidad virtual; Juegos educativos y uso para explicar tecnologías de energía alternativa; Evaluación de rendimiento multinivel de Nvidia Grid VCA utilizando motores de renderizado Iray y V-Ray en 3DS Max Design.

Conferencia:

ENTORNOS MODELADOS TRIDIMENSIONALES VERSUS PANORAMAS DE 360 GRADOS PARA ENTRENAMIENTO DE REALIDAD VIRTUAL MÓVIL

VLADIMIR ESPARTACO ROBLES BYKBAEV



Actualmente adscrito a la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, director de la carrera de Ingeniería de sistemas sede Cuenca.

Es Doctor en Tecnologías de la información y las comunicaciones, cuarto nivel, Universidad de Vigo. Master universitario en inteligencia artificial, reconocimiento de formas e imagen digital, Universidad Politécnica de Valencia; Ingeniero de sistemas Universidad Politécnica Salesiana.

Es investigador de los grupos GAME LAB-UPS y de Inteligencia Artificial y Tecnologías de Asistencia (GI-IATa) en la Universidad Politécnica Salesiana.

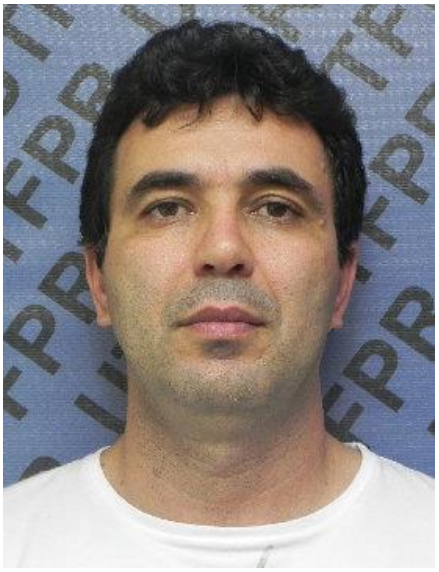
Ha documentado numerosas investigaciones en Redes Sociales Inteligentes Y Tecnologías De Asistencia Para La Terapia Del Lenguaje; el Aprendizaje De Las Ciencias Básicas; Ecosistemas Interactivos; Sistemas Hospitalarios Y Quirúrgicos Para Unidades Móviles

Para Atención De Poblaciones Desfavorecidas; Sustentabilidad De Jóvenes Con Discapacidad desde Las Mypimes Y El Soporte Basado En Tics; entre toras.

Conferencia:

WEBINAR PARA SIMULACIÓN DE ROBOTS UTILIZANDO LA PLATAFORMA WEBOTS INCLUYENDO CONTROLADORES DIFUSOS: APLICACIÓN EN PANDEMIA

ANGELO MARCELO TUSSET



Actualmente es Profesor Asociado de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná; y miembro del Comité Ejecutivo del Comité de Fenómenos No Lineales y Caóticos, de la Asociación Brasileña de Ingeniería y Ciencias Mecánicas (ABCM).

Licenciado en Matemáticas por la Facultad Estatal de Filosofía, Ciencias y Letras de la União da Vitória, Licenciado en Ingeniería de Control y Automatización - Mecatrónica por la Universidad del Contestado, Maestría en Modelado Matemático por la Universidad Regional del Noroeste Rio Grande do Sul, y Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad Federal de Rio Grande do Sul; y Postdoctorado de la Universidad Estatal Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil, becario: Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo, FAPESP, Brasil.

Sus áreas de interés se centran en Control de Sistemas Dinámicos, actuando en los siguientes temas: Control SDRE, Caos, Control de Retroalimentación Lineal, Control Activo, Control Pasivo, Robótica y Control Óptimo.

Tiene una prolífica producción de artículos científicos, solo en 2020 los temas se relacionaron con: análisis de caos y dinámica no lineal en captación de energía; Análisis numérico y de Control de retroalimentación en microscopía de fuerza atómica (AFM); Catalizadores magnéticos Sol-gel Fe /TiO_2 aplicados; Captación y recolección de energía de modelos piezoeléctricos de voltaje y carga no lineal; Control de posición de un sistema de giro flexible por el método de optimización del enjambre de partículas; Análisis y control dinámico de elevadores de alta velocidad; y en general Modelos matemáticos y análisis integral dinámico de sistemas aplicados a bioquímica y a plataformas suspendidas, entre otros.

Conferencia:

DYNAMICS AND CONTROL OF NONLINEAR MICRO-ELECTROMECHANICAL SYSTEMS INCLUDING FRACTIONAL-ORDER

MIGUEL A. PADILLA CASTAÑEDA



Actualmente es miembro del prestigioso ICAT, de la UNAM, donde colabora en diversos proyectos de investigación y desarrollo tecnológico en temas relacionados con procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones en biomedicina, visualización, simulación, realidad virtual y sistemas hápticos con aplicaciones médicas**.**

Es Doctor en Tecnologías de la Innovación y Robótica, por la Escuela Superior Sant' Anna de Pisa, Italia; con Maestría en Ciencias de la Computación e Ingeniería en Computación, ambas con Mención Honorífica por la UNAM.

Investigador visitante (Postdoctorado) en el Laboratorio de Robótica Perceptual (PERCRO) de la Escuela Sant' Anna de Pisa, Italia, donde desarrolló sistemas de realidad virtual, robótica, hápticos y técnicas de interacción humano-computadora para estudios en percepción multisensorial, neurociencia y aplicaciones en rehabilitación.

Ha sido, igualmente, investigador visitante en el Grupo de Computación Gráfica de la Universidad de Granada, España; el Departamento de Ingeniería de la Innovación de la Universidad del Salento, Italia; el Laboratorio de Ciencias de la Cognición y Comportamiento de la Universidad de Pisa, Italia; así como el Instituto de Rehabilitación de la Universidad de Toronto, Canadá.

Sus áreas de investigación se centran en Imagenología Biomédica; Visualización y Simulación 3D en Medicina y Cirugía; Robótica, Haptics e Interacción Humano-Computadora; Realidad Virtual en Percepción y Neurociencia. Sistemas de Asistencia Médica y Rehabilitación.

Es un prolífico autor de artículos científicos, conferencista internacional, autor de libros, así como activo docente de pregrado y posgrado.

Conferencia:

SIMULACIÓN QUIRÚRGICA POR COMPUTADORA PARA LA MEJORA DEL ENTRENAMIENTO Y PLANEACIÓN EN NEUROCIRUGÍA

GERARDO ABEL LAGUNA SÁNCHEZ



Actualmente es Profesor Investigador en el Departamento de Sistemas de Información y Comunicaciones, de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma, y miembro del Área de Investigación en Sistemas de Información y Ciencias Computacionales.

Técnico en Electrónica por el CECYT "Wilfrido Massieu", del Instituto Politécnico Nacional (IPN); Ingeniero en Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa (UAM-I); Maestro en Ingeniería, en Investigación de Operaciones, de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Doctor en Ciencias de la Computación por el Centro de investigación en Computación (CIC) del IPN.

Sus intereses de investigación incluyen las comunicaciones digitales, la inteligencia computacional y la aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento digital de señales y las ciencias de la computación a las comunicaciones digitales.

Posee múltiples artículos científicos, libros, dirección de tesis y participaciones en congresos internacionales. Las temáticas abarcan desde Compensación digital de Distorsiones no lineales; Implementación en tiempo real de un Monitor de Estabilidad; Implementación de un algoritmo de evolución diferencial en paralelo; Construcción de cursos en línea con Google Course Builder; Monitor de estabilidad para reactores de agua en ebullición basado en la descomposición en modo empírico multivariante; Distribuciones alfa-estables para modelado de ruido en PLC; entre muchas más.

Conferencia:

DISEÑO Y REALIZACIÓN PRÁCTICA DE UNA MÁQUINA DE POST MEJORADA

JOSÉ IGNACIO CASTILLO



Actualmente es profesor tiempo completo en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Recibió los grados de Lic. En Electrónica por la FCE con mención honorífica; MSc. En Ciencias de la Electrónica, ambos por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Ha trabajado por más de 20 años en las industrias de computación y telecomunicaciones [Datacenter Dynamics, RedUno-TELMEX, IFE, DICINET], así como en universidades públicas y privadas como profesor titular o invitado [UDEFA, UACM, BUAP, UPAEP, UTM].

Es Senior Member, “Ponente Distinguido” 2015-2017, en seguridad cibernética, computación en la nube, centros de datos y ciudades inteligentes para la IEEE Computer

Society. Allí ha sido miembro del Consejo Directivo, Presidente del comité de auditoría; y Secretario Regional para Latinoamérica.

Ha participado en numerosos proyectos nacionales e internacionales como miembro o líder de equipo en posiciones tanto técnicas como de gestión en áreas de energía, telecomunicaciones y centros de datos. Participa en el comité ISO/IEC 27000 por parte de México (National Board), docente de pregrado y postgrado, y prolífico escritor y árbitro de artículos para revistas y congresos de alto impacto.

Conferencia:

INTERNET Y LAS REDES AVANZADAS: INTERNET EXPERIMENTAL Y LA INTERNET COMERCIAL; LA INTERNET 2 COMO SOPORTE A LAS REDES NACIONALES DE EDUCACIÓN E INVESTIGACIÓN; INTERNET INTERPLANETARIA DE LA SIGUIENTE GENERACIÓN

CONGRESO INTERNACIONAL
DE ELECTRÓNICA, CONTROL
Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá -Colombia-

MARCELO R. FERREYRA



Consultor en DM & BI con 19 años de experiencia en el análisis de datos y el desarrollo de modelos de predicción para la industria financiera y bancaria.

Experiencia de 30 años en el diseño, desarrollo e implementación de sistemas de computación como así también en la docencia y capacitación en las áreas de Ciencias, y Tecnologías de la Información. Cofundador de PTI Inc., empresa creada con Dorian Pyle para el desarrollo de Powerhouse, software de Data Mining basado en la Teoría de la Información de Shannon.

Fundador y director de Dataxplore, empresa dedicada al desarrollo, capacitación y consultoría en tecnología de la información, particularmente en la transformación digital empresarial para la optimización de los procesos y la maximización del valor de los datos.

Conferencia:

RESURGIMIENTO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL: APRENDIZAJE AUTOMÁTICO USANDO PYTHON Y SUS APLICACIONES

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia:
Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

FERNANDO ARÁMBULA COSÍO



Actualmente coordinador del Laboratorio de Imagenología Biomédica del Centro de Ciencia Aplicada y Desarrollo Tecnológico (CCADET-UNAM).

Ingeniero Mecánico-eléctrico de la Facultad de Ingeniería de la UNAM; MSc. En diseño y aplicación en instrumentación electrónica, de la Universidad de Manchester, Inglaterra; y PhD. En robótica avanzada en el Imperial College de Londres.

Coordinador del Posgrado en Ciencias e Ingeniería de la Computación de la UNAM,

Conferencia:

ANÁLISIS DE IMÁGENES MÉDICAS CON MODELOS ESTADÍSTICOS DE FORMA Y DE APARIENCIA

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

JOSÉ IGNACIO HUERTAS CARDOZO



Actualmente profesor de tiempo completo del departamento de Ingeniería Mecánica del Tecnológico de Monterrey, ITESM, México. Investigador del Grupo de Investigación Energía y Cambio Climático. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y del Sistema Nacional de Investigadores.

Es investigador de la Escuela de Ingeniería y Ciencias. Fue director de la Maestría en Ingeniería Automotriz-MIR y Director del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz-CIMA. Gestor y ejecutor de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico en el área de combustibles, combustión y control de la polución del aire. Profesor de los cursos: Mecánica de fluidos, Transferencia de Calor, Termodinámica, Dinámica, Dinámica de vehículos, Vibraciones mecánicas, Fundamentos de los procesos de combustión y motores de combustión interna.

Ingeniero mecánico de la Universidad de Los Andes, Colombia; MSc. En Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes; y MSc. de Washington, St. Louis, Estados Unidos; Doctor en Ciencias por la Universidad de Washington.

Trabaja liderando un equipo del Grupo de Investigación de Energía y Cambio Climático de la Facultad de Ciencias e Ingeniería del Tecnológico de Monterrey. Actualmente. Es miembro del sistema nacional de investigadores tanto en México (SNI 2) como en Colombia (Senior).

Conferencia:

SISTEMA DEMOSTRATIVO DE MOVILIDAD INTELIGENTE EN DISTRITOS UNIVERSITARIOS. CASO TECNOLÓGICO DE MOTERREY

CONGRESO INTERNACIONAL DE ELECTRÓNICA, CONTROL Y TELECOMUNICACIONES

El rol de la tecnología en tiempos de Pandemia y Post-Pandemia: Innovación y Desarrollo de sectores Sociales y Productivos estratégicos

26 y27 de noviembre de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá -Colombia-

ALEJANDRO JIMÉNEZ MORALES



Actualmente docente de la Universidad ESAN, en Lima; Ejecutivo Senior, Magister en Administración de ESAN (MBA).

Posee reconocida experiencia gerencial y de dirección en instituciones públicas y privadas líderes en su ramo; Coach con certificaciones ICC y Human Coaching Network. Árbitro de conciencia del Centro de Arbitraje de la Cámara de Comercio de Lima. Business Advisor de empresas extranjeras en Perú

Dirige la Cámara de Comercio de India en PERU – INCHAM; y es Director Gerente en All Business Solutions SAC.

Es Consultor en Gestión de Talento y Liderazgo Empresarial, y el área de interés académica se centra en Regulación de Telecomunicaciones, Prevención y Gestion de Crisis, Relaciones Comunitarias y Programas Sociales.

Conferencia:

BRECHA DIGITAL: AGENDA PÚBLICO-PRIVADA PARA AMPLIAR COBERTURA Y CONECTIVIDAD. DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS PARA LATINOAMERICA