SISTEMA AUTÓNOMO PARA RECOLECCIÓN DE BOLAS DE TENIS MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL

DAVID LEONARDO GAITÁN TABARES
HÉCTOR FABIO MARTÍNEZ ARCILA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2015

SISTEMA AUTÓNOMO PARA RECOLECCIÓN DE BOLAS DE TENIS MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL

DAVID LEONARDO GAITÁN TABARES
HÉCTOR FABIO MARTÍNEZ ARCILA

TUTOR:
ING. JOHN ALEJANDRO FORERO CASALLAS Ms.C.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2015

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Jurado 1

_____

Jurado 2

_____

Ms.C. John Alejandro Forero Casallas

Bogotá D.C. _____ de 2015

RESUMEN

En el presente documento, se da a conocer el diseño, programación y construcción de un sistema autónomo para recolección de pelotas de tenis utilizando un dispositivo de visión artificial y la plataforma robótica programable Lego® Mindstorms, cuya aplicación principal es levantar las bolas que quedan regadas en la periferia de la cancha durante los juegos entre dos personas (singles), o más competidores (doubles).

El objetivo del dispositivo elaborado es evitar que los jugadores o asistentes del juego, estén desplazándose de un lugar a otro a recoger las pelotas que quedan esparcidas en la cancha, y en lugar de ir ellos enviar al robot desde cierta distancia.

Para el desarrollo del proyecto se llevó a cabo la codificación del sistema en el lenguaje de programación suministrado por el software LabVIEW de la compañía norteamericana National Instruments.

Adicionalmente todos los materiales y unidades requeridos para llevar a cabo la ejecución del proyecto fueron comprados con la finalidad de facilitar el trabajo, y de dar a conocer los costos reales del equipo en la fecha que se efectuó.

ABSTRACT

In this document, it discloses the design, planning and construction of an autonomous system for collecting tennis balls using an artificial vision device and Lego® Mindstorms programmable robotic platform, whose main application is to raise the balls They are scattered on the periphery of the field during games between two people (singles) or more competitors (doubles).

The aim of the developed device is to prevent players or game attendees, are moving from one place to another to collect balls that are scattered on the floor, and instead of going they send the robot from a distance, to the location of target path.

For the project was conducted coding system in programming language LabVIEW software supplied by the US company National Instruments.

Additionally, all materials and units required to carry out the execution of the project were purchased in order to facilitate the work, and to make known the real costs of equipment at the time that was done.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN **4**
ABSTRACT **5**
INDICE DE TABLAS **7**
INDICE DE FIGURAS **8**
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **10**
2 ESTADO DEL ARTE **11**
3 JUSTIFICACIÓN **19**
4 OBJETIVOS **20**
4.1 Objetivo General 20
4.2 Objetivos Específicos 20
5 MARCO TEORICO **21**
5.1 Robot Recolector 21
5.2 Sistema de Visión Artificial 22
5.3 Lenguajes de Programación y LabVIEW 23
6 METODOLOGÍA DEL PROYECTO **26**
7 DESARROLLO **29**
7.1 Descripción del Dispositivo 29
7.1.1 Ficha Técnica Lego Mindstorms 31
7.1.2 Ficha Técnica Cámara 32
7.1.3 Ficha Técnica CPU 32
7.1.4 Lenguaje de Programación 32
7.2 Cancha de Pruebas 33
7.2.1 Dimensiones Según la ITF 33
7.2.2 Cancha Construida 35
7.3 Programación 36
7.3.1 Adquisición de la Imagen 37
7.3.2 Captura de la Imagen 37
7.3.3 Procesamiento de la imagen y definición de patrones 38
7.3.4 Determinación de sistema de coordenadas bidimensionales 40
7.3.5 Programación de Inteligencia Artificial 41

7.3.6 Programación de Servomotores 43
7.3.7 Interfaz de Usuario 44
8 DISEÑO EXPERIMENTAL 46
8.1 Pruebas de Validación.....46
8.1.1 Prueba 1: Calc. % de error prom/zona según ejes XY 48
8.1.2 Prueba 2: Tiempos de recolección por zona y % de pelotas recogidas 53
8.1.3 Prueba 2.1: Validación para estimar el tiempo de recolección y descarga de una pelota 55
8.1.4 Prueba 3: % de error de las coordenadas XY obtenidas por la cámara 59
9 COSTOS DEL PROYECTO.....62
10 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....63
10.1 Conclusiones.....63
10.2 Trabajos Futuros.....63
11 REFERENCIAS 64
ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados % de error promedio/zona para coordenadas X y Y.....50
Tabla 2. Resultados obtenidos en la prueba 2.....54
Tabla 3. Datos y resultados obtenidos de la prueba 2.1 57
Tabla 4. Resultados obtenidos de la prueba 3.....60
Tabla 5. Valores de artículos comprados para el desarrollo del proyecto.....62

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Recolector de pelotas manual propuesto por lee 12
Figura 2. Recolector de pelotas manual propuesto por Edward Frankel.....13
Figura 3. Recolector de pelotas automatizado propuesto por Kuang-Teng Tsai ..14
Figura 4. Recolector de pelotas automatizado diseñado en universidad internacional de la florida 15
Figura 5. Disposición de cámaras en el sistema Hawk Eye 18
Figura 6. Cámara de alta fidelidad empleada en el sistema de visión artificial Goal Control 4D 23
Figura 7. Esquema básico de estudio de la imagen 23
Figura 8. Compañía desarrolladora de LabVIEW.....25
Figura 9. Robot recolector de pelotas con Lego Mindstorms 29
Figura 10. Fragmento de programación de Robolab.....30
Figura 11. Bloque programable de Lego Mindstorms 31
Figura 12. Motor Grande Lego Mindstorms 31
Figura 13. Motor Mediano Lego Mindstorms.....31
Figura 14. Cámara Logitech C525 32
Figura 15. Pantalla de inicio de software LabVIEW 2014 (32bit) 32
Figura 16. Computador Portatil Asus K550D 32
Figura 17. Pista de Juego según reglamento de la ITF.....34
Figura 18. Cancha en construcción 35
Figura 19. Cancha Terminada 36
Figura 20. Fragmento de programación de video en tiempo real.....37
Figura 21. Fragmento de programación de almacenamiento de la imagen 38
Figura 22. Procesamiento de la imagen, en color a la izquierda y en escala de grises a la derecha.....39
Figura 23. Eje coordenado por defecto y nuevo origen en pixeles.....40
Figura 24. Coordenadas de restricción en la cancha en cm 42
Figura 25. Esquema típico de código de programación en LabVIEW mediante case structure referente a la inteligencia artificial.....43
Figura 26. Fragmento de programación de los motores y coordenadas 44

Figura 27. Interfaz de usuario software recolector de pelotas 45
Figura 28. Division de la cancha por zonas 47
Figura 29. Montaje experimental para el desarrollo de la prueba 1 48
Figura 30. Medidas tomadas para el calculo del % de error 49
Figura 31. Ubicación de las pelotas para la prueba 1 49
Figura 32. Diagrama de distancias tenidas en cuenta para la prueba 1 51
Figura 33. Montaje experimental para el desarrollo de la prueba 2 53
Figura 34. Ubicación de las pelotas para la prueba 2 54
Figura 35. Montaje experimental para la prueba 2.1 55
Figura 36. Ejemplo de la estimación de tiempos de recolección y descarga de pelotas 56

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día los avances tecnológicos son uno de los fenómenos que mueven el mundo y motivan la creatividad y el talento de la humanidad. Estar a la vanguardia de la tecnología se ha convertido en una de las herramientas más importantes del ingeniero, ya que de esta forma se pueden desarrollar modelos tecnológicos con mejoras en sus prestaciones, características técnicas, versatilidad, flexibilidad, entre otros. Es por ello que se ha planteado la tarea de desarrollar un sistema que sea práctico, tecnológico, moderno y sobre todo que sea de gran ayuda a las personas que practican el tenis.

El Proyecto se trazó teniendo en cuenta que el tenis es un deporte de gran acogida a nivel mundial que llama la atención de muchos deportistas y aficionados, quienes lo practican a nivel profesional o como hobby. En el campo de juego los tenistas a menudo interrumpen el juego para recoger las bolas de tenis o designan a una persona para que esté realizando la labor de recogerlas y llevarlas a una zona de servicio. En algunas ocasiones los deportistas aficionados que practican este deporte no consiguen un recogebolas bien sea por el horario de juego, el lugar donde se encuentra la cancha, o simplemente por los elevados costos que implica la contratación de una persona que realice esta labor.

Por lo anterior se ha evidenciado la necesidad de implementar un robot cuya función sea recoger las bolas de tenis que se encuentren fuera del área de juego y llevarlas a una zona destinada para el saque del jugador. Esto se debe hacer de manera parcialmente autónoma y eficiente sin interrumpir el juego para darle continuidad a los partidos o los entrenamientos evitando así los tiempos muertos que causa la recolección de bolas de tenis por los jugadores.

2 ESTADO DEL ARTE

Desde el inicio de la raza humana como especie inteligente y superior sobre las demás formas de vida existentes en el planeta tierra, se han desarrollado gran variedad de avances tecnológicos en beneficio del hombre; a lo largo de la historia se pueden encontrar elementos que van desde los más sencillos como realizar herramientas manuales fundidas en hierro hasta los transbordadores espaciales que se ven hoy en día.

Sin embargo los desarrollos no se dan de la noche a la mañana y no salen de la nada, por lo general, son investigaciones que dan continuidad a un adelanto previo; es por ello que toda nueva aplicación debe conocer sus bases y como consecuencia para el presente dispositivo se consultaron varios artículos relacionados con la idea propuesta para identificar que equipos similares existen en la actualidad y como han avanzado.

Por otro lado el ser humano es una forma de vida compleja que ha evolucionado de diferentes maneras; algo que está presente en muchas especies y en el homo sapiens de hoy, es la necesidad de entretenerse y jugar, por eso a lo largo de los años la humanidad ha desarrollado diversas actividades deportivas que satisfacen ese requerimiento.

El tenis, en resumen, es un deporte en el que interactúan al menos dos jugadores y un máximo de cuatro, según la modalidad de juego, el objetivo de este deporte es golpear una pelota desde uno de los lados de la cancha hacia el otro y lanzarla dentro del campo de juego contrario tratando de evitar que el disparo sea contestado por el adversario; es un deporte de origen francés, en sus inicios se jugaba golpeando una pelota con las manos tiempo después se implementaron las raquetas. En la actualidad el tenis se ha universalizado y es jugado en todo el mundo, siendo su competencia más representativa el Grand Slam de tenis.[1]

[1] VARAONA, Luis, Historias del Grand Slam, todo sobre el tenis y sus torneos más famosos, T&B editores, 2013.

Sin embargo este deporte no es solo practicado por jugadores profesionales, y como todos los demás deportes tiene jugadores aficionados que lo practican. En los partidos de liga, como ya se había mencionado con anterioridad, se suele contratar personal para recoger las pelotas de tenis que se esparcen en la pista de juego durante un partido y llevarlas a la zona de saque con el fin de lograr un juego fluido.

En los entrenamientos se suele emplear una gran cantidad de pelotas, y también es muy común ver como se dispersan por todo el campo de juego, en estos casos también existe personal autorizado que las recolecta.

Al inicio la tarea de recoger las pelotas se hacía de manera netamente manual, en esta forma la persona caminaba hasta donde se encontraba cada bola, se inclinaba y la recogida, con el paso del tiempo y con la finalidad de optimizar esta labor se han desarrollado dispositivos que asisten a esta tarea, es el caso de un dispositivo manual creado por Delbert Lee en 1982 (Ver Figura 1) que ayuda al recogebolas en el desarrollo de su actividad, consiste en una canastilla con un conjunto de rodillos acoplados a un eje común, los rodillos enfrentados unos con otros crean varias concavidades que halan las pelotas hacia el interior de la canastilla por el efecto del giro, de esta manera al pasar el mecanismo sobre las bolas de tenis se recolectan de manera rápida.[2]

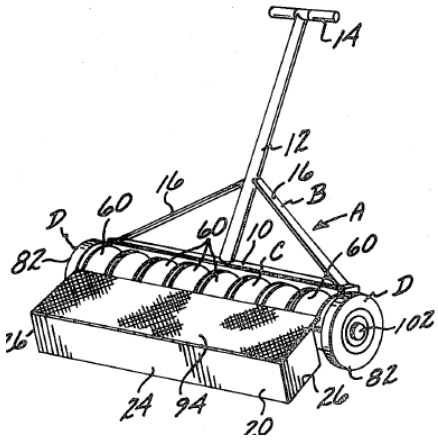


Figura 1. Recolector de Pelotas manual propuesto por Lee.

[2] LEE, Delbert, Tennis Ball Retrieving Device, United States Patent n. 4.318.654, California (USA). 1982.

Sin embargo ese sistema, aunque optimiza el procedimiento, aun depende de un operador humano que lo desplace sobre las pelotas en el campo de juego dado que éste no es del todo autónomo.

Se pueden encontrar otro tipo de innovaciones tecnológicas como la propuesta por Edward B. Frankel (Ver Figura 2) en su patente titulada *Device for retrieving and securely storing ball*[3]. Cumple con el mismo objetivo del dispositivo anterior pero la manera de recolectar las pelotas es diferente en este dispositivo no se cuenta con un rodillo que hale las pelotas, la canasta de recolección permanece aunque en una disposición diferente y en lugar del eje con rodillos se tienen dos palas laterales que recogen las bobas por arrastre hacia la canasta que las almacena.

Sin embargo así como el anterior el dispositivo, éste necesita ser empujado por una persona para realizar el arrastre de las pelotas ya que no lo hace por sí solo, únicamente asiste en la tarea de recolección.

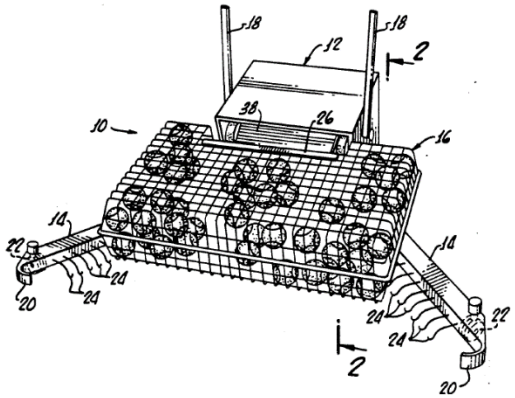


Figura 2. Recolector de Pelotas manual propuesto por Edward Frankel.

Existen dispositivos para aplicaciones similares como el recolector de pelotas de ping pong, presentado por Kuan-Teng Tsai en 2008 con número de patente US7674196 B2, este es un mecanismo robótico autónomo programado para

[3] FRANKEL, Edward, Device for retrieving and securely storing balls. United States Patent n. 5.147.100 California (USA). 1991

recolectar las bolas de tenis de mesa sin la ayuda de un ser humano, luego de la programación es totalmente autónomo pero recoge las pelotas de manera aleatoria o en una ruta previamente programada, cuenta con un sistema de paletas giratorias ancladas a un eje en la parte delantera, una rampa fija y una canastilla de almacenamiento, el robot está montado sobre un carro móvil de cuatro ruedas que impulsan el dispositivo[4] (Ver Figura 3).

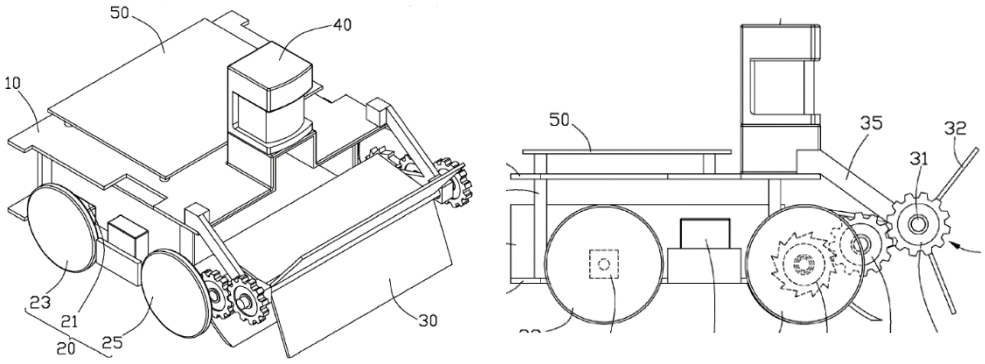


Figura 3. Recolector de Pelotas automatizado propuesto por Kuan-Teng Tsai.

La compañía LEGO en su línea mindstorms ofrece a sus compradores robots programables para distintos tipos de uso práctico o académico, muchos usuarios libres y aficionados a la robótica los utilizan para crear dispositivos diferentes a los robots bases para los que viene diseñado el paquete de piezas, en uno de los foros de la página de lego se puede encontrar un robot que permite recolectar las pelotas de tenis, éste cuenta con una cavidad de almacenamiento de 3 a 5 pelotas y una

[4] TSAI, Kuan-Teng, Robot for collecting table tennis balls, United States Patent n. 7.674.196 B2 Taipei (TW). 2010

brazo giratorio en la punta que empuja las bolas al interior, el robot realiza el proceso en línea recta sin seguir una ruta programada[5].

En el departamento de ingeniería mecánica y de materiales de la Universidad Internacional de Florida en Miami (Estados Unidos), por parte de los estudiantes: Neha Chawla, Wuqayan Alwuqayan, Ahmed Faizan, Sabri Tosunoglu, se llevó a cabo el desarrollo del proyecto titulado *Robotic Tennis Ball Collector,* en este trabajo se plantea la propuesta para construir un dispositivo que reemplace las tareas humanas de recoger las pelotas en un campo de tenis, el dispositivo planteado por los estudiantes emplea un mecanismo de reconocimiento de objetos cercanos y está programado para evitarlos e identificar las pelotas de tenis y recoger solo éstas, pero no emplea ningún tipo de visión asistida[6] (Ver Figura 4).

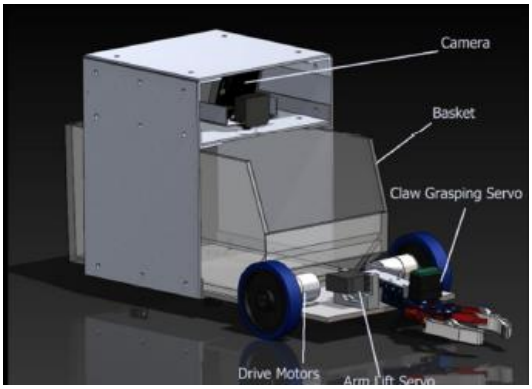


Figura 4. Recolector de Pelotas Automatizado diseñado en Universidad Internacional de la Florida

Los sistemas de reconocimiento visual o de visión artificial son elementos usados hoy en día de manera común, se utilizan desde los celulares para escanear y editar textos, hasta sistemas globales satelitales que son capaces de identificar objetivos

[5] LEGO, MINDSTORMS, Tennis ball picker uppe, http://www.us.lego.com/en-us/mindstorms/community/robot?projectid=7bdb7066-986d-4467-ad64-342f029e3840, Consultado 1 de Agosto de 2015.

[6] CHAWLA, Neha, ALWUQAYAN, Wuqayan, FAIZAN, Ahmed, TOSUNOGLU, Sabri, Robotic Tennis Ball Collector, Florida International University. Miami. 2012

puntuales, los fines de su uso pueden ser ilimitados, estos sistemas básicamente están compuestos de un sensor que recibe las señales visuales del medio en el que se va a utilizar, una cámara fotográfica es la primera opción para emplear como sensor, esta señal se envía a una unidad de procesamiento como una computadora donde según el fin para el que se vaya a usar la imagen, se genera un código de programación especifico, finalmente la unidad de procesamiento envía una señal codificada al actuador que en este caso es el dispositivo de recolección de pelotas de tenis.

Christope Rosenberg en conjunto con Bruno Emile y Helene Laurent, estudiantes de la Universidad de Orleans en Francia, realizaron un proyecto que consiste en el filtrado de imágenes, se describe un sistema de visión artificial para el control de calidad de las cerezas mediante un software de procesamiento de imágenes que determina tres tipos de información describiendo la calidad de la fruta: el color como un indicador de la madurez, la presencia de defectos tales como grietas, y el tamaño.

La clasificación de cerezas condicionadas por todos estos criterios se lleva a cabo a una alta velocidad (unas 20 cerezas / s). Se requiere por tanto de un procesamiento de imágenes en tiempo real.

Un simple sensor se utiliza para sincronizar el procesamiento y la clasificación de cerezas. Actuadores de aire se utilizan para expulsar las cerezas defectuosas después de efectuar el control de calidad por visión.[7]

En la escuela superior de ingenieros de Sevilla el estudiante de pregrado Francisco Javier Romero Galey en su proyecto titulado *Integración de Sistema de Visión*

[7] ROSENBERGER Christophe, EMILE, Bruno, LAURENT Helene, Calibration and quality control of cherries by artificial visión, http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1098283#1%e2%80%83Introduction, Consultado 31 de Julio de 2015.

Artificial y Robot en la Aplicación Tipo Pick & Place. Plantea un robot selector utilizado en el sector de alimentos que mediante un mecanismo de reconocimiento visual identifica y compara los objetos que pasan sobre una banda transportadora y los selecciona rechazando los que se encuentren defectuosos, con esto se consigue que el producto final sea de calidad evitando que se pasen por alto alimentos alterados.[8]

El instituto politécnico nacional, es una reconocida institución pública mexicana de educación superior ubicada en el distrito federal de dicho país. Allí el aspirante al título de maestría Víctor Vargas Baeza, presento su trabajo denominado *Sistema de Visión Artificial para el control de calidad en piezas cromadas;* En el documento plantea el desarrollo de un dispositivo capaz de inspeccionar visualmente el estado final de piezas recubiertas con cromo en una línea de producción con lo que busca optimizar el proceso de certificación de calidad y eficacia en la revisión de las piezas.

Para su desarrollo empleo el software de programación LabVIEW que fabrica la compañía National Instruments y un robot manipulador de seis grados de libertad marca ABB, en su interfaz gráfica de usuario final adiciona la capacidad al programa de generar informes de errores de piezas defectuosas utilizando Microsoft Excel.[9]

En la actualidad en los campos de tenis se utiliza una tecnología que permite a los jueces tomar decisiones en jugadas dudosas y aprobar o no un punto a favor de alguno de los deportistas, esta tecnología se conoce como *Hawk Eye* (Ver Figura 5) o en español Ojo de Halcón, se usa cuando algunas pelotas rápidas golpean a gran velocidad el suelo muy cerca de las líneas que delimitan el campo y no se percibe con claridad si es anotación o no. El sistema se compone de una red periférica de cámaras de alta resolución y velocidad dispuestas alrededor del campo

[8] ROMERO, Francisco, VARGAS, Manuel, CASTAÑO, Luis. Integración De Sistemas De Visión Artificial, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. España.

[9] BAEZA, Victor, Sistema de Visión Artificial para el control de calidad en piezas cromadas, Instituto Politécnico Nacional. México D.F. 2009

de juego que captan la posición y movimiento de la bola y con la ayuda de un algoritmo de gran complejidad se calcula la trayectoria que ésta seguirá lo cual permite con mucha precisión determinar si la pelota golpea sobre, dentro o fuera de la línea.[10]

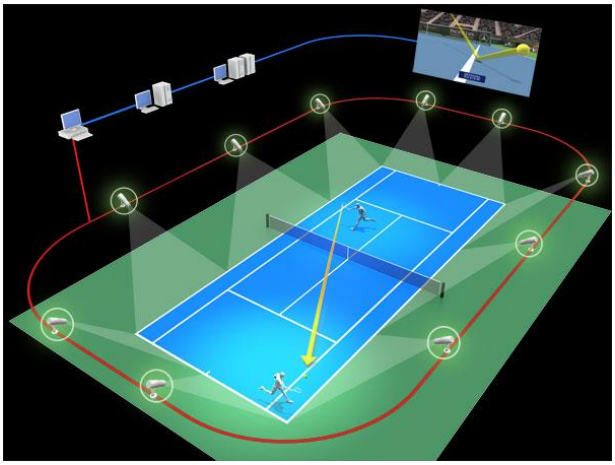


Figura 5.Disposicion de cámaras en el sistema Hawk Eye

Esta tecnología también ha sido recientemente introducida en el futbol; la FIFA ha tenido cierta desconfianza al aprobar ayudas tecnológicas que asistan en la toma de decisiones de los jueces durante los partidos, pese a ello, para el mundial de Brasil 2014 y en la copa Audi desarrollada en el estadio alemán Allianz Arena en 2015, se autorizó el uso de un sistema similar al usado en el tenis denominado Goal-Control 4D, que emplea siete cámaras dirigidas a cada arco (en total 14 camaras) que captan la trayectoria espacial del balón y con base en este movimiento, una inteligente y avanzada programación recrea el escenario en 3dimensiones obteniendo con exactitud la imagen del balón con respecto a la línea de meta, lo que apoya la decisión del árbitro al determinar una marcación.[11]

[10] SINGHBAL, Baljinder, Sport Science Review, Hawk Eye: A Logical Innovative Technology Use In Sports for Effective Decision Making, Varsovia, 2012.

[11] FIFA, Hawk-Eye confirmed as goal-line technology provider for Canada 2015, http://www.fifa.com/womensworldcup/news/y=2015/m=3/news=hawk-eye-confirmed-as-goal-line-technology-provider-for-canada-2015-2580727.html, Consultado 7 de Agosto de 2015

3 JUSTIFICACIÓN

En las canchas de tenis a menudo se observa que los jugadores deben parar el juego para recoger las pelotas que han quedado fuera de la zona de juego, en otras ocasiones contratan a un caddy para realizar esta labor. Algunas veces los jugadores prefieren horarios nocturnos o lugares de juego que se encuentran en zonas campestres y alejadas de la ciudad, es por ello que resulta difícil conseguir un caddy o los costos para su contratación son elevados. Por lo anterior, se propone diseñar el prototipo de un dispositivo autónomo para recoger bolas de tenis que se encuentren fuera del área de juego, sin interrumpir las actividades deportivas al interior de ésta, para llevarlas a una zona especificada y de esta forma evitar pérdidas de tiempo de los jugadores y sobrecostos en sus horas de juego.

Con este proyecto se busca que los partidos o entrenamientos no se vean interrumpidos y que los jugadores puedan ubicar fácilmente las pelotas que se encuentren en la zona dispuesta para tal fin. Además se logrará un desarrollo tecnológico parcialmente autónomo que funcionará con la ayuda de un sistema de visión artificial bajo condiciones de iluminación controlada. El prototipo será ideal para operar en canchas de concreto y se desplazará a una velocidad promedio ideal para realizar su labor. Para la validación del dispositivo se harán pruebas en media cancha construida a escala. Con la ayuda del sistema de visión artificial se ubicarán los objetivos y se tendrá la posibilidad de reconocer cuál es la pelota más cercana para desplazarse hasta allí.

Uno de los beneficios que ofrecerá el proyecto está relacionado con el aspecto económico, debido a que no se tendrá que incurrir en gastos adicionales para la contratación de un caddy, el cual cobra en promedio $ 15.000/hora, además, si la cancha está ubicada en las afueras de la ciudad o los horarios son nocturnos se generarán más gastos por parte de los jugadores.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema autónomo para recolección de bolas de tenis mediante visión artificial.

4.2 Objetivos específicos

- Diseñar un robot para recolección de pelotas de tenis.
- Construir un prototipo autónomo a partir de la plataforma LEGO® para recolectar pelotas de tenis.
- Seleccionar el sistema de visión artificial para el prototipo.
- Programar los algoritmos del robot, sistema de visión artificial y el control general.
- Implementar el prototipo.
- Desarrollar un análisis financiero de los costos del proyecto.

5 MARCO TEORICO

A lo largo de la historia, el hombre ha desarrollado cada día más tecnología siempre con la intención de mejorar lo ya realizado, desde la revolución industrial en el siglo XVIII el ser humano dejo de hacer los procedimientos de fabricación manuales y comenzó a emplear mecanismos que le resultaban más eficientes sin esforzarse tanto, al comienzo la máquina de vapor hizo la diferencia y era utilizada por una gran parte de las fábricas de la época, optimizando los medios de transporte y modelos de producción industrial.

Hoy en día la automatización es la base de las industrias, esto debido al descubrimiento y dominio de la electricidad que ha complementado a los dispositivos netamente mecánicos desarrollados en la antigüedad, la sistematización y desarrollo de lenguajes de programación ha contribuido enormemente para facilitar mediante el uso de algoritmos la designación de tareas específicas a dispositivos robóticos, esto permite el acceso a un mundo ilimitado de aplicaciones que van desde un simple sensor de control de luces hasta robots recolectores de objetos o más complejos aún como los que asisten a médicos en cirugías de alto nivel.

5.1 Robot Recolector

Los sistemas autónomos de recolección, son dispositivos diseñados con la finalidad de recoger algún tipo de objeto, por lo general son utilizados en la industria para seleccionar piezas, tomarlas y llevarlas de un lugar a otro u organizar objetos. Los robots están dispersos por todas las ciencias y todas las aplicaciones posibles, los más empleados actualmente son usados en el sector industrial en plantas automatizadas, pero también se pueden encontrar, aunque en menor cantidad, en

el área de la medicina, la biología, la agricultura[12], los hogares con aplicaciones domésticas y el sector deportivo no es una excepción, de hecho en los mundiales de futbol más recientes y en partidos de alta relevancia se ha empleado un dispositivo controlado a distancia que sobrevuela el estadio, éste dispone de cuatro hélices y una cámara de alta definición para la transmisión de los juegos.

En el tenis existen robots recolectores de bolas que realizan la labor de alzar las pelotas que se encuentran en el campo, aun estos dispositivos son algo rústicos y se pueden mejorar. La recolección de objetos se utiliza ampliamente en el sector industrial para realizar tareas comparativas en las que un brazo o manipulador selecciona una pieza, un sistema adicional la compara con una biblioteca de datos y con base en los resultados el robot decide si la rechaza o no.

5.2 Sistema De Visión Artificial

La visión artificial es un mecanismo automatizado que se desarrolla con el fin de procesar imágenes y dar alguna orden a un dispositivo con base en las fotografías o videos procesados como el goal control 4D (Ver Figura 6).

El sistema consta básicamente de un sensor una unidad de procesamiento CPU y dependiendo de lo que se desee hacer, un actuador particular, el sensor encargado de percibir la señal visual es una cámara, que obedeciendo a la exactitud y precisión de lo que se requiera puede variar, se pueden utilizar cámaras de baja resolución (2 a 5 megapíxeles a 30 cuadros por segundo) hasta cámaras de alta velocidad y resolución (15 a 160 megapíxeles de hasta 20000 cuadros por segundo) siendo estas últimas las más adecuadas a la hora de procesar imágenes en movimiento.

[12] ASME, Smart Robots For Picking Fruit, https://www.asme.org/engineering-topics/articles/robotics/smart-robots-for-picking-fruit, Consultado 31 de Julio de 2015.



Figura 6.Camara de alta fidelidad empleada en el sistema de visión artificial GOAL Control 4D

Adicionalmente cuando las tareas a desempeñar no son muy complejas y el procesamiento de datos es mínimo se pueden utilizar micro controladores de bajo costo y programarlos para tal fin, mientras que si la labor a realizar es más robusta y requiere de mayor exactitud se suelen utilizar computadoras con software especializado.

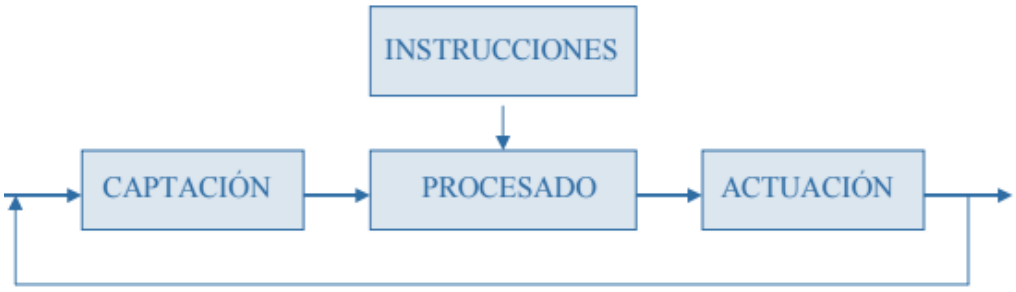


Figura 7. Esquema básico de estudio de la imagen

En varios dispositivos el procedimiento de análisis se da de la siguiente manera: en primer lugar se captura la imagen mediante la cámara dispuesta para ello, luego es enviada a una computadora donde un software determinado la analiza, para ello se puede filtrar según los requerimientos, en algunos casos la imagen se filtra en escala de grises o blanco y negro lo que reduce el nivel de información a procesar,

también se ejecutan filtros por tamaños o por figuras geométricas determinadas así se simplifica la tarea al momento de encontrar o analizar el objeto deseado, se emplean diferentes tipos de algoritmos para realizar el trabajo deseado y finalmente el procedimiento concluye con la ejecución de la orden mediante el actuador (ver Fig 7).[13]

5.3 Lenguajes De Programación Y LabVIEW

Un lenguaje de programación se denomina como la unión de símbolos y reglas que permiten el diseño y construcción de programas con los que el ordenador puede realizar tareas o resolver problemas de manera eficiente. Estos son diseñados para llevar procesos en máquinas o computadoras. Actualmente la electrónica digital tiene usos en todos los campos desde los elementos de uso cotidiano hasta los sistemas industriales más complejos, los lenguajes de programación permiten de manera intuitiva dar y almacenar las órdenes a los dispositivos para que realicen una tarea específica, además muchos de los lenguajes están diseñados con estructuras semánticas y condicionales que permiten una fácil interacción hombre-máquina, dado que estas plataformas se ejecutan de manera muy similar al comportamiento humano.

Clasificación de los lenguajes de programación:

- *Lenguaje de Maquina:* En este lenguaje las instrucciones son directamente entendibles por la computadora y no necesitan traductor para que la CPU (unidad de procesamiento central) pueda entender y ejecutar el programa. Utiliza un código binario (0 y 1), se basa en bits.
- *Lenguaje de Bajo Nivel (ensamblador):* Las instrucciones se escriben en códigos alfabéticos conocidos como mnemotécnicos.

[13] MINISTERIO DE EDUCACION DE ESPAÑA, Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales, España, 2012

- *Lenguaje de Alto Nivel:* Es semejante al lenguaje humano (por general ingles), lo que facilita la elaboración y comprensión del programa. Por ejemplo Visual Basic, C++, o java.[14]

National Instruments (ver figura 8) es una compañía Estadounidense con sede en Austin, Texas es una empresa dedicada a la producción de software para la instrumentación y automatización industrial, se fundó en 1970 por parte de James Truchard, Jeff Kodosky y Bill Nowlin, y su principal producto es LabVIEW, este último es su producto principal y es una plataforma de desarrollo basada en un tipo de programación visual, el lenguaje grafico se llama G.

El lenguaje de programación (ver figura 8) utilizado en LabVIEW, también conocido como G, es un flujo de datos de programación del lenguaje. La ejecución está determinada por la estructura de un diagrama de bloques (gráfica) en el que el programador conecta diferentes nodos dibujando cables. Estos alambres propagan las variables y cualquier nodo puede ser ejecutado tan pronto como se disponga de todos los datos de entrada. Dado que podría darse el caso de que varios nodos se activen simultáneamente, G es intrínsecamente capaz de ejecutarse en paralelo.[15]

Figura 8. Logotipo de Compañía Desarrolladora de LabVIEW

[14] CORONA NAKAMURA, Maria Adriana, ANCONA VALDEZ, Maria de lo Angeles, Diseño de Algoritmos y su codificación en lenguaje C.
[15] LAJARA VIZCANO, José Rafael, PELEGRI SEBASTIA, José, LabVIEW Entorno Gráfico de Programación 2 ed. Barcelona, 2011.

6 METODOLOGIA DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto en descripción, es desarrollar un robot autónomo para recolectar bolas de tenis con la ayuda de un sistema de visión artificial. El desarrollo de este proyecto se logrará mediante la integración de varios pasos que serán fundamentales para la construcción de un prototipo que sea capaz de recoger pelotas de tenis ubicadas fuera de la zona de juego y llevarlas a una zona especificada para dejarlas allí de tal manera que los jugadores puedan hacer uso de ellas.

El dispositivo debe ser autónomo en el sentido de que la programación del sistema de visión artificial permita la ubicación de las bolas que se encuentran en la cancha, y seleccione las que están fuera del área de juego determinando cuál es la más cercana al robot, seguido a esto el prototipo se accionará por el usuario, realizando el recorrido para la recolección de la bola; cada vez que el operador ejecute el programa tomando una nueva fotografía, se actualizarán las coordenadas de la pelota más cercana al equipo.

Las fases que se seguirán para el desarrollo del proyecto son:

En primer lugar se seleccionó la cámara que será el componente principal del sistema de visión artificial, cuyas especificaciones se pueden observar en el numeral 7.1.2. También se escogió la plataforma programable LEGO® para el diseño del robot, pues fue el que se ajustó a los requerimientos, y costos estimados del proyecto, ver especificaciones técnicas en el numeral 7.1.1

Después se hizo un estudio de campo donde se reconoció el área de operación del equipo, a partir de ello se dimensionó y construyó media cancha a escala, de acuerdo a las medidas reglamentadas por la International Tennis Federation (ITF).

Se trabajó en media cancha por efectos de facilidad en la realización de las pruebas y debido a la resolución de la cámara con la cual contamos (1600x896 pixeles).

Con la cancha hecha a escala y la cámara seleccionada, el siguiente paso fue poner el sistema principal de visión artificial a una altura adecuada para el reconocimiento de las pelotas y del patrón geométrico del robot.

El montaje de la cámara se dispuso de tal forma que ésta quedara enfocando toda la cancha de pruebas y con el lente paralelo al piso, así se podrán obtener las coordenadas de las pelotas y del equipo con mayor grado de exactitud. Otro parámetro importante en el montaje de la cancha de pruebas fue la condición de iluminación controlada.

Uno de los aspectos importantes para la implementación del prototipo fue el diseño del mismo en la plataforma LEGO®. Se realizó una configuración física del robot de tal forma que fuera apto para funcionar sobre una superficie sólida y dura como la de la cancha de pruebas siendo capaz recolectar las pelotas adecuadamente.

Teniendo el montaje de la infraestructura y la configuración del prototipo, se continuó con la programación de los algoritmos. Primero se programó el sistema de visión artificial, el cual, como se explicó con anterioridad, cumple la función de reconocer la posición de las pelotas ubicadas en la cancha y elegir por cual debe ir el robot.

Después se codifico el algoritmo del robot, enviando la información de los movimientos que los motores deben hacer para que el equipo se mueva hacia donde está la bola y tenga la capacidad de recogerla llevándola a una zona especificada para su disposición final.

El proceso de programación finalizó cuando se vinculó el programa de la cámara con el del robot generando el algoritmo del control general para que el dispositivo

estuviera en la capacidad de cumplir la tarea para la cual fue diseñado. Esta programación se hizo mediante el software LabVIEW.

Finalmente se diseñaron varias pruebas de validación para el equipo y el sistema de visión artificial, en las que se corrigieron algunos errores de calibración del robot y de la cámara. Otra finalidad de las pruebas de validación fue determinar a partir de datos estadísticos la viabilidad del prototipo para su funcionamiento en la cancha de pruebas y la implementación futura de un robot final en una cancha real.

Adicionalmente al proceso de diseño, construcción y programación del robot se hizo un análisis de los costos reales que tuvo el proyecto, ya que es necesario conocerlos a la hora de estudiar la viabilidad comercial del dispositivo, para establecer una relación costo/beneficio que determine si el proyecto es viable o no.

7. DESARROLLO

7.1 Descripción del Dispositivo

Todos los sistemas automatizados se componen de tres partes fundamentales, sensores que envían señales percibidas en el medio, procesadores que realizan la tarea de pensar y tomar decisiones según lo que se requiera, y actuadores que ejecutan la tarea para la que se diseña el sistema.

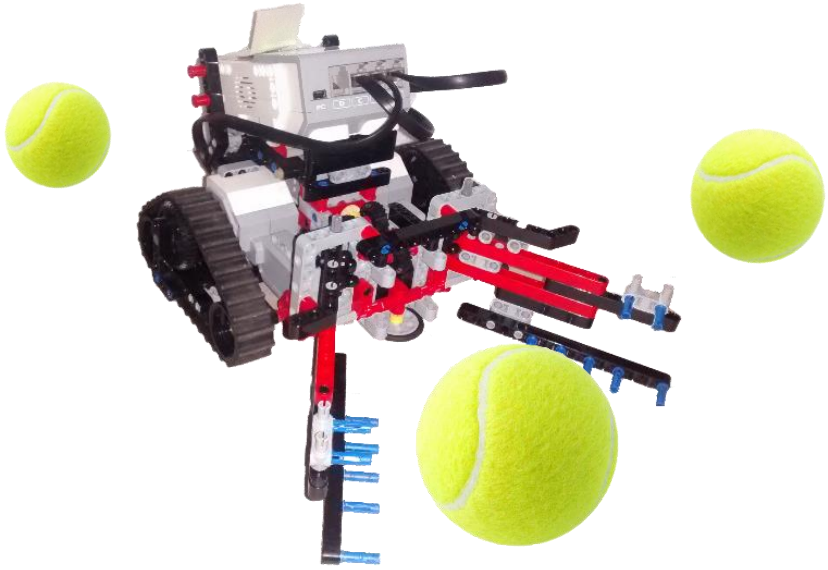


Figura 9. Robot Recolector de Pelotas
Con Lego® Mindstorms

La solución planteada para el equipo recolector de pelotas (Ver Figura 9 y anexo 1) se basa en el principio anteriormente mencionado, fue desarrollada con la ayuda del dispositivo Mindstorms Ev3 que fabrica la compañía danesa Lego®, el equipo señalado es una plataforma robótica programable que trae un lenguaje propio de programación conocido en sus primeras versiones como Robolab (Ver Figura 10) dicho software es proporcionado a la compañía europea por National Instruments;

dado que la compañía que provee el software a Lego es la misma que fabrica LabVIEW, este último posee un complemento que lo hace completamente compatible con el Ev3.

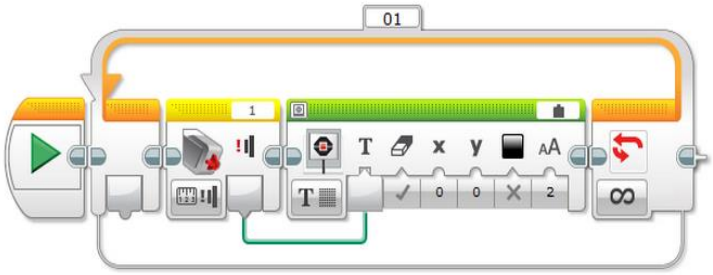


Figura 10. Fragmento de programación de Robolab

El mecanismo de recolección diseñado con las piezas desmontables del mindstorms se basa en una pinza accionada por un motor mediano, con el que se consigue un movimiento de un grado de libertad (GDL); adicionalmente todo el dispositivo está montado en un sistema de tracción que emplea orugas para un mejor agarre sobre cualquier superficie.

Como el prototipo funciona con visión artificial se requiere de un sensor que capte imágenes continuas (Video) ya que se debe conocer la posición que tiene el robot sobre la cancha en tiempo real, en consecuencia se seleccionó y empleó una cámara web estándar con sensor CCD[16] Logitech de alta definición.

Finalmente y una de las cosas más importantes a la hora de diseñar un robot total o parcialmente autónomo, es lograr reproducir la capacidad humana de pensar y tomar decisiones, para este caso la inteligencia artificial y el procesamiento de las señales enviadas desde la cámara se hacen con la ayuda del software LABVIEW en un equipo portátil Asus K550D.

[16] CCD: Charge coupled device o en español dispositivo de carga acoplada, es un circuito integrado que se usa en la mayoría de dispositivos de captura digital, éste es un sensor con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen, entre mayor sea el número de celulas en el CCD mayor será la calidad de la imagen.

7.1.1 Ficha Técnica Lego Mindstorms

El modelo empleado para el desarrollo del prototipo fue el Lego Mindstorms EV3 descrito a continuación:

Bloque

Modelo: Bloque programable ev3
Procesador: ARM 9 a 300 MHz
Memoria: 64 MB
Conectividad: Bluetooth



Figura 11. Bloque Programable de Lego® Mindstorms

Motor Grande

Precisión de Giro: 1°
Frecuencia: entre 160 rpm y 170 rpm
Torque de Rotación: 20 N·cm
Torque de Rotor Bloqueado: 40 N·cm

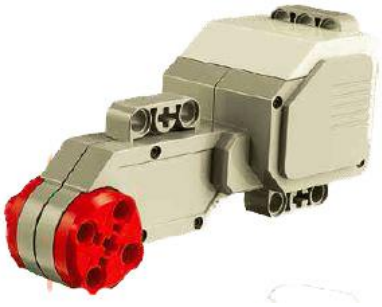


Figura 12. Motor Grande Lego® Mindstorms

Motor Mediano

Precisión de Giro: 1°
Frecuencia: entre 240 rpm y 250 rpm
Torque de Rotación: 8 N·cm
Torque de Rotor Bloqueado: 12 N·cm



Figura 13. Motor Mediano Lego® Mindstorms

7.1.2 Ficha Técnica Cámara

Marca: Logitech
Modelo: C525
Resolución Máx. Fotografías: 8 MPx
Resolución Máx. Video: HD (1280×720 Pixeles)



Figura 14. Cámara Logitech C525

7.1.3 Ficha Técnica CPU

Marca: Portatil Asus
Modelo: K550D
Procesador: AMD A8 de 2.1 GHz
Memoria RAM: 8 GB
Sistema Operativo: Windows 8

7.1.4 Lenguaje de Programación

Compañía: National Instruments
Software: LabVIEW 2014
Versión: 32 bit



Figura 15. Pantalla de Inicio de Software LabVIEW 2014 (32 bit).



Figura 16. Computador Portatil Asus K550D

7.2 Cancha De Pruebas

Dado el tamaño del prototipo y teniendo en cuenta la cantidad de pruebas que se debían realizar para conseguir un dispositivo completamente funcional, se decidió trabajar en una cancha a escala, la relación proporcional entre una de tamaño verdadero y la construida es de 1:11.

7.2.1 Dimensiones Según la ITF

Las dimensiones de la cancha fueron tomadas del reglamento oficial provisto por la ITF (International Tennis Federation) que indica lo siguiente[17]:

La pista o cancha será un rectángulo de 23,77 m (78 pies) de largo por 8,23 m (27 Pies) de ancho. Para los partidos de dobles la pista será de 10,97 m (36 pies) de La pista estará dividida en su mitad por una red suspendida de una cuerda o un cable metálico cuyos extremos estarán fijados a la parte superior de dos postes o pasarán sobre la parte superior de dos postes a una altura de 1,07 m (3 ½ pies). La red estará totalmente extendida de manera que llene completamente el espacio entre los dos postes de la red y la malla debe ser de un entramado lo suficientemente pequeño para que no pase la pelota de tenis. La altura en el centro de la red será de 0,914 m (3 pies), en donde estará sostenida mediante una faja. Habrá una banda cubriendo la cuerda o el cable metálico y la parte superior de la red. La faja y la banda serán blancas por todas partes.

Las líneas que limitan los extremos de la pista se denominan líneas de fondo y las líneas que limitan los costados de la pista se denominan líneas laterales.

[17] ITF, Federación Internacional de Tenis, Reglas del Tenis, 2013

A cada lado de la red y paralela a ella, se trazarán dos líneas entre las líneas laterales a una distancia de 6,40 m (21 pies) a partir de la red. Estas líneas se llaman líneas de saque o de servicio.

A cada lado de la red, el área entre la línea de servicio y la red será dividida por una línea central de servicio en dos partes iguales llamadas cuadros de servicio. La línea central de servicio se trazará paralelamente a las líneas laterales de individuales y equidistante a ellas (Ver Figura 17).

Todas las medidas de la pista se tomarán por la parte exterior de las líneas. Todas las líneas de la pista serán del mismo color para que contrasten claramente con el color de la superficie.

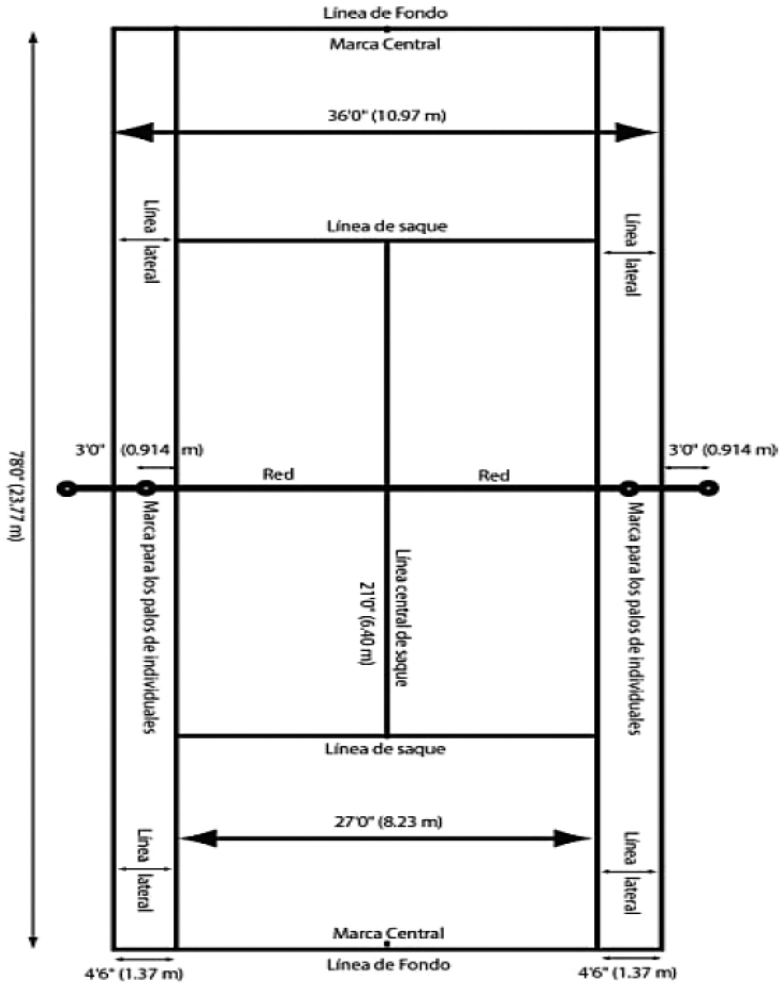


Figura 17. Pista de juego según reglamento de la

7.2.2 Cancha Construida

La cancha de trabajo y ensayos fue construida en cartón piedra, para su construcción se unieron varias láminas de material, se adiciono una capa de plástico adhesivo transparente para darle resistencia y unir las piezas, finalmente se cubrió con papel de color azul con lo que se le dio el aspecto de una cancha real.

Las demarcaciones y linderos se realizaron con cinta fina de color blanco con lo que se consiguió un contraste ideal y realista en lo que respecta a una cancha profesional.



Figura 18. Cancha en construcción

El espacio de trabajo finalmente quedo con unas dimensiones periféricas de 2.1 m x 2 m y la zona de movimiento del robot de 1.63 x 1.63 m. (Ver Figuras 18 y 19)

Adicionalmente la cámara que es el sensor principal y componente fundamental del sistema de visión artificial, se situó a una altura de 2.5 m paralela al suelo.

La conexión del dispositivo de video a la unidad de procesamiento se hizo de forma alámbrica mediante un cable USB, y la vinculación del dispositivo recolector al computador se efectuó de forma inalámbrica utilizando conectividad bluetooth.



Figura 19. Cancha Terminada

7.3 Programación

La programación del dispositivo fue realizada en el lenguaje ofrecido por el software LabVIEW de National Instruments aprovechando la compatibilidad que tiene con el dispositivo de hardware utilizado (Lego Mindstorms Ev3), y se estructuro de la siguiente manera:

- Adquisición de la Imagen.
- Captura de la imagen
- Procesamiento de la Imagen y definición de patrones.
- Determinación de sistema de coordenadas bidimensionales.
- Programación de Inteligencia Artificial.
- Programación de movimiento en los servomotores
- Diseño de Interfaz de Usuario

7.3.1 Adquisición de la imagen

La adquisición de la imagen se realiza mediante la cámara Logitech C525, descrita anteriormente y en LabVIEW se emplean los componentes de IMAQ Vision[18] para la detección de la cámara y obtención del video en tiempo real. (ver figura 20)

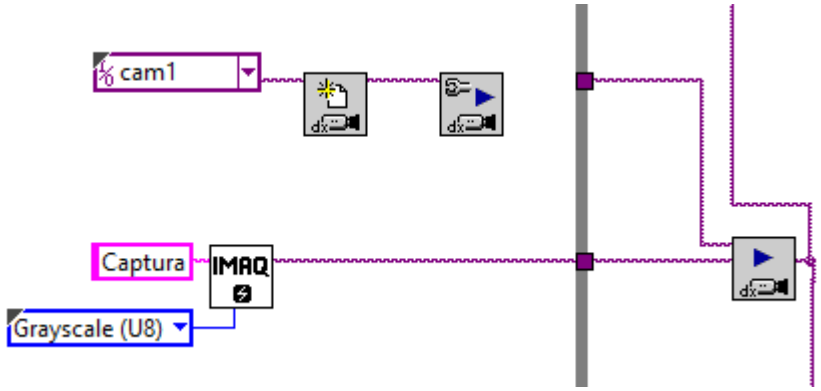


Figura 20. Fragmento de Programación de video en tiempo real.

7.3.2 Captura de la Imagen

Para determinar posteriormente una posición estática de una de las bolas en la cancha se requiere almacenar una fotografía, esto con el fin de que las pequeñas variaciones en la luz no incidan sobre de la medición de un objeto y por ejemplo para la obtención de las coordenadas no se vea afectación alguna.

[18] KLINGER, Thomas, Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision, 1 ed. USA, 2003

Adicionalmente se requiere de la ubicación en tiempo real del robot que se encuentra en movimiento, por ello simultáneamente se toman mediciones con las imágenes dinámicas que se obtienen de la cámara.

Para el caso de la fotografía, se emplea un IMAQ write file 2 (ver figura 21) que permite al software almacenar una imagen que se activa mediante uno de los push buttons del panel frontal de usuario.

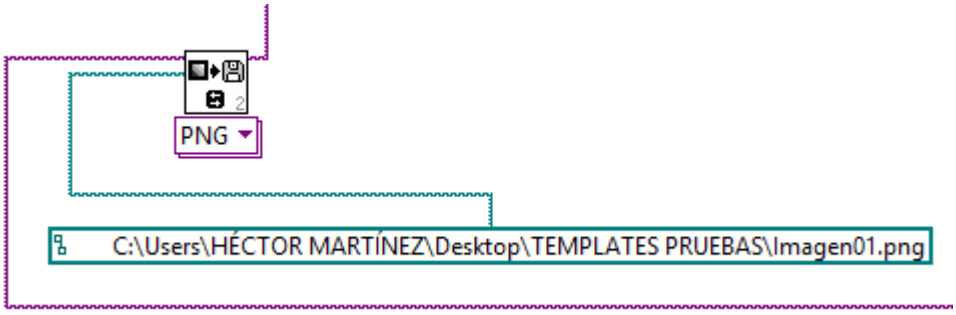


Figura 21. Fragmento de Programacion: Almacenamiento de la imagen.

7.3.3 Procesamiento de la Imagen y definición de Patrones

Para reconocer un objeto con LabVIEW es necesario asignar alguna o varias características que sean identificables por el software, se pueden emplear varias como el color o una forma geométrica determinada.

Para este caso se empleó como primera medida el color, pero se evidencio que la sensibilidad del programa a las variaciones de luz ocasiona alteraciones en el funcionamiento del software, esto debido a que las sombras provocadas modifican los tonos y el contraste de los objetos.

En consecuencia se trabajó con la determinación de patrones; las bolas de tenis son percibidas por la cámara como circunferencias, lo que las ubica fácilmente; para la ubicación del robot se definió una forma geométrica irregular (una flecha) que se ubicó en la parte superior del mismo.

El uso de reconocimiento por patrones requiere de un filtrado previo, ya que no admite imágenes a color de 32 bit, fue necesario convertir la imagen tomada a una en escala de grises de 8 bit, este procedimiento fue realizado mediante el complemento Vision Assistant que permite el empleo de varios filtros o procesos según la necesidad (Ver Figura 22).

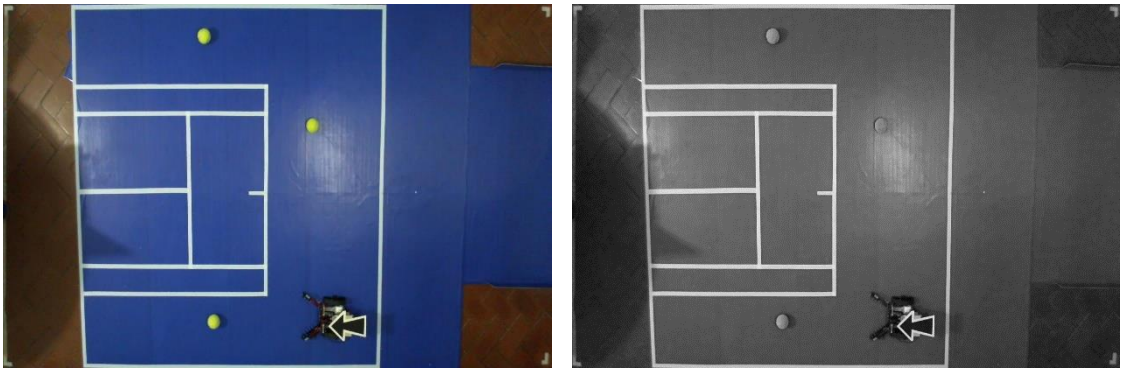


Figura 22. Fragmento de Programacion: Procesamiento de la imagen, en color (32 bit) a la izquierda y en escala de grises (8 bit) a la derecha

7.3.4 Determinación De Sistema De Coordenadas Bidimensionales

Luego de realizar el procesamiento de la imagen se extrae un eje coordenado, por defecto el sistema lo arroja en pixeles, para el caso de la cámara que empleamos es 1600 x 896 (ver Figura 23), el punto A es el origen suministrado y se requiere obtener por sistema de referencia relativo el punto B que se usara como región de partida. En primer lugar se cambiaron las unidades de referencia convirtiendo los pixeles a centímetros. Dado que la cámara capta verticalmente1600 x 896 pixeles y eso es proporcional a una medida real de 291 x 163 cm se obtuvo un factor de conversión de la siguiente manera:

$$Fc = \frac{X\ pixeles}{X\ Centimetros} = \frac{896}{163} = 5{,}49 \approx 5{,}5\ {}^{Px}/_{cm} \qquad \textit{Ecuación 1}$$

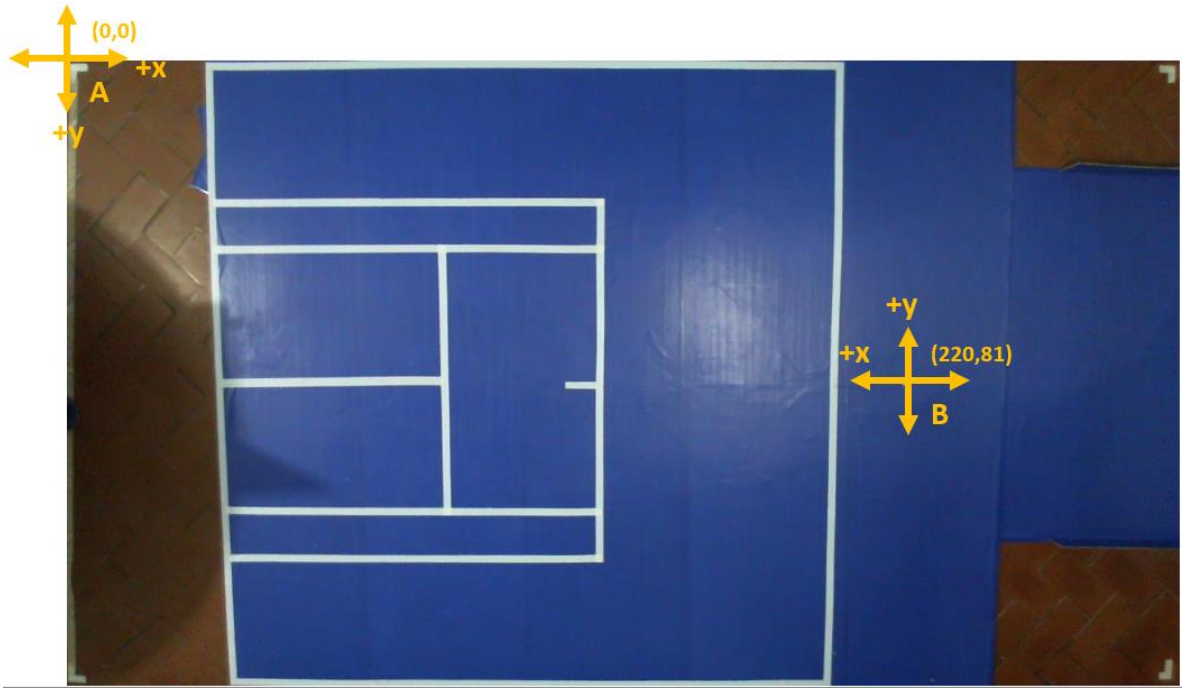


Figura 23. Eje coordenado por defecto y nuevo origen en centímetros

Empleando dicho factor el nuevo origen está situado a 220 cm en X y a 81 cm en Y (equivalente a 1232, 453 pixeles) desde el 0,0 inicial. Para determinar la posición exacta de los objetos en el plano desde el nuevo plano de referencia se programó un algoritmo que utiliza los siguientes elementos matemáticos:

Sea,

$x_A = Coordenada\ x\ desde\ el\ origen\ por\ defecto$

$y_A = Coordenada\ y\ desde\ el\ origen\ por\ defecto$

$x_B = Coordenada\ x\ desde\ el\ nuevo\ origen$

$y_B = Coordenada\ y\ desde\ el\ nuevo\ origen$

$$x_B = 220 - x_A \qquad \textit{Ecuación 2}$$

$$y_B = 81 - y_A \qquad \textit{Ecuación 3}$$

7.3.5 Programación de Inteligencia Artificial.

El robot recolector se proyectó con una autonomía parcial, y para conseguirla se realizó una programación de inteligencia artificial (ver Fig. 24) que le permite al dispositivo seleccionar una de las pelotas, eligiendo la bola que está más cerca de él y fuera de la zona de juego.

Ecuaciones Matemáticas para determinar la cercanía de la pelota:

Sea,

$x_{Pn}: Coordenada\ x\ desde\ el\ origen\ B\ de\ la\ Pelota\ n$

$y_{Pn}: Coordenada\ y\ desde\ el\ origen\ B\ de\ la\ Pelota\ n$

$x_R: Coordenada\ x\ desde\ el\ origen\ B\ al\ Robot$

$y_R: Coordenada\ y\ desde\ el\ origen\ B\ al\ Robot$

$d_n: Distancia\ que\ recorrera\ el\ robot\ a\ la\ pelota\ n$

$$d_x: Dist.x\ de\ robot\ a\ pelota \qquad d_x = |x_R - x_{Pn}| \qquad \textit{Ecuación 4}$$

$$d_y: Dist.\ y\ de\ robot\ a\ pelota \qquad d_y = |y_R - y_{Pn}| \qquad \textit{Ecuación 5}$$

$$d_n = x_{Pn} + y_{Pn} \qquad \textit{Ecuación 6}$$

En las ecuaciones 4 y 5, se toma el valor absoluto pues se requiere de la distancia real que hay desde el robot a la bola sin importar la posición de uno respecto al otro.

Finalmente el algoritmo evaluara cuál de las distancias arrojadas por la ecuación 6 (según el número de pelotas) es la más corta, tomando el d_n con menor magnitud diferente de cero. Si la bola con la distancia más pequeña se encuentra dentro de la zona de juego, será ignorada e inmediatamente se evaluara cual es la más cercana de las que se encuentran por fuera.

Para definir las restricciones se utilizó la siguiente lógica:

$$Si \quad 80 \leq \ x_{Pn} \leq \ 183 \quad y \quad 0 \leq |y_{Pn}| \leq 48{,}5 \quad \Rightarrow \quad d_n = 0$$

$$Si \quad x_{Pn} < 20 \quad \Rightarrow \quad d_n = 0$$

Al definir la distancia a recorrer como cero según las condiciones previas el robot ignorara ese objetivo y escaneara el siguiente, si todos son ignorados el robot no se moverá pues sus salidas no tendrán valor y en consecuencia no habrá que avanzar.

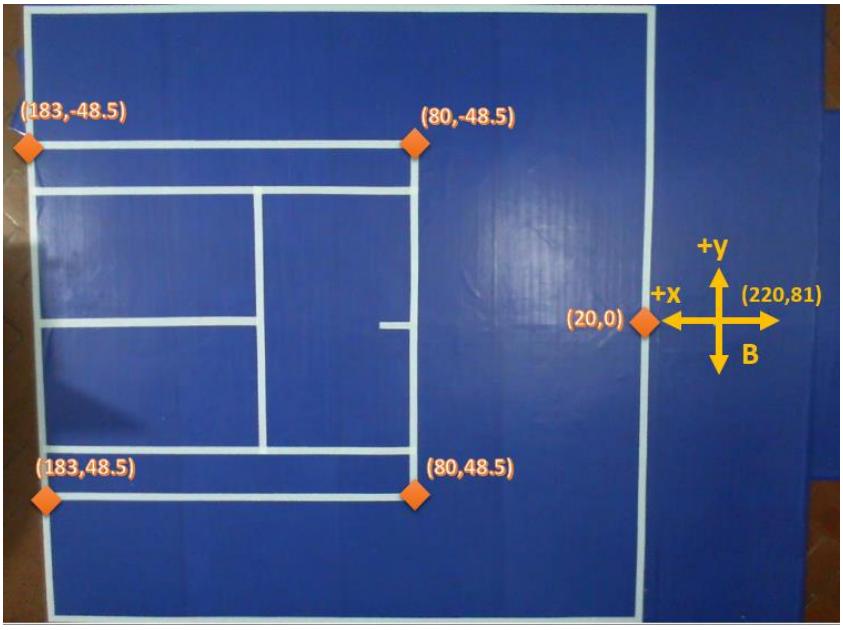


Figura 24 Coordenadas de restricción en la cancha en cm

Cuando se codifico la inteligencia artificial en LabVIEW se emplearon estructuras conocidas como “Case Structure” (ver figura 25), que permiten la toma de decisiones según un caso particular, como los expuestos anteriormente[19]. En el Anexo 2 se puede evidenciar el diagrama de flujo que se desarrolló y empleo en la programación.

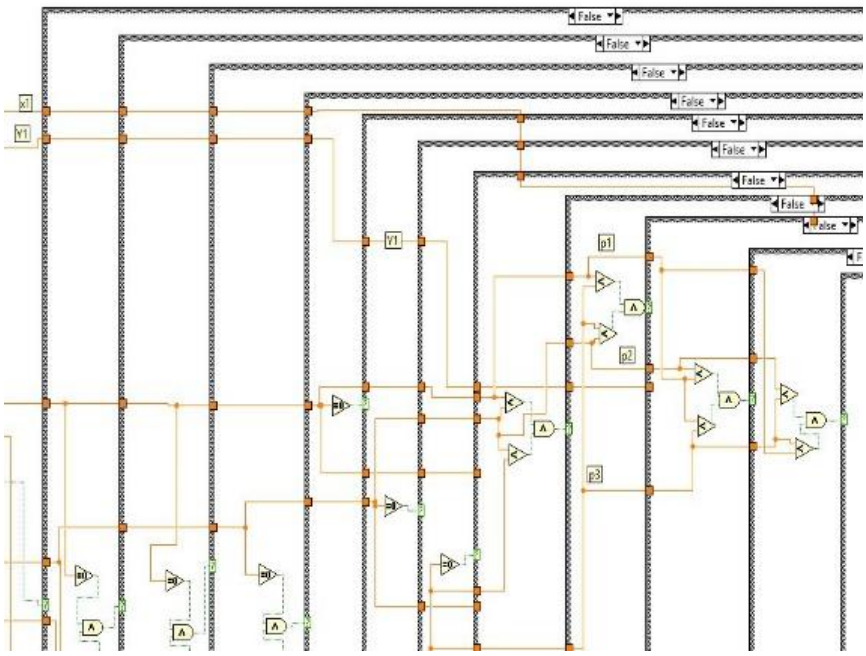


Figura 25 Esquema típico de código de programación en labview mediante case structure referente a la inteligencia artificial

7.3.6 Programación de servomotores

Los motores del lego mindstorms son los actuadores finales que le dan vida al sistema, para conseguir un movimiento a escala real de lo que se requiere, se calibraron de acuerdo con la frecuencia de giro y el avance lineal que el dispositivo tiene con las orugas, determinándose como velocidad máxima de funcionamiento 14,46 cm/s

[19] LAJARA VIZCANO, José Rafael, PELEGRI SEBASTIA, José, LabVIEW Entorno Gráfico de Programación 2 ed. Barcelona, 2011.

Adicionalmente el sistema ha sido mejorado implementando una calibración por giro en caso de ser necesaria; esto para optimizar el acercamiento del robot a la pelota (Ver Figura 26).

Se tomaron en cuenta tres casos para definir los avances diferentes del robot, el primero en el que la bola se encuentra al lado derecho de éste, el segundo a la izquierda y el tercero en línea; para que el robot sepa cual de las programaciones debe seleccionar se realizó una programación de inteligencia adicional cuyo diagrama se puede apreciar en el anexo 2B y le indica a qué lado se ubica la pelota.

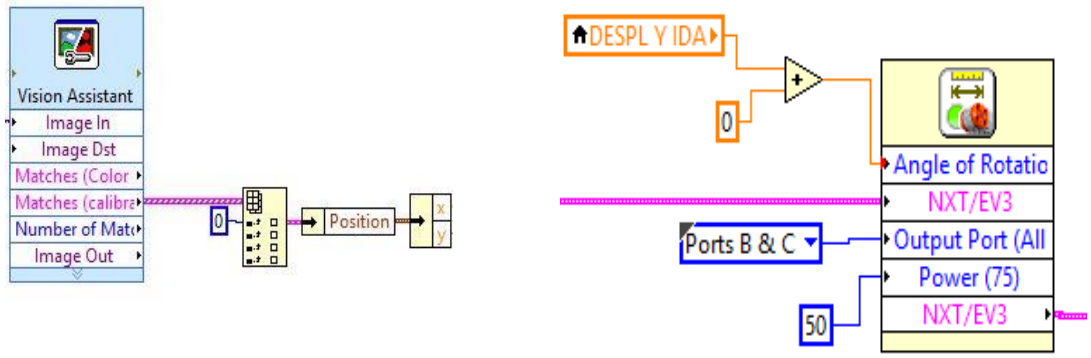


Figura 26 Fragmento de programación de los motores a la derecha y sistema coordenado a la izquierda

7.3.7 Interfaz de usuario

La interfaz gráfica de usuario fue desarrollada pensando en la simplicidad máxima que podría tener el software, para ello se utilizaron solamente indicadores que den a conocer la información necesaria, y los botones de ejecución del programa.

Como se evidencia en la Fig. 27 el panel de usuario presenta en la zona izquierda de la pantalla dos botones: uno que captura una imagen con el fin de ubicar las pelotas en el campo de juego, procesar la información y tomar la decisión, y otro botón que ordena al robot ejecutar la tarea de recoger la pelota seleccionada.

En la parte derecha se encuentra un conjunto de indicadores que muestran las distancias (en centímetros), que hay desde la posición del robot hasta la pelota que debe recoger; y la distancia desde dicha bola a la zona de partida del dispositivo, de tal manera que el sistema siempre llegara a la región de inicio definida sin importar donde se encuentre.

Finalmente en el centro se encuentra una pantalla virtual que muestra el movimiento en tiempo real del robot, y debajo de la misma un indicador de nivel de carga de las baterías del equipo, para conocer el estado de las mismas. La interfaz gráfica fue diseñada con un tema alusivo al tenis en tonos de contraste verde que le da un aspecto visualmente atractivo.

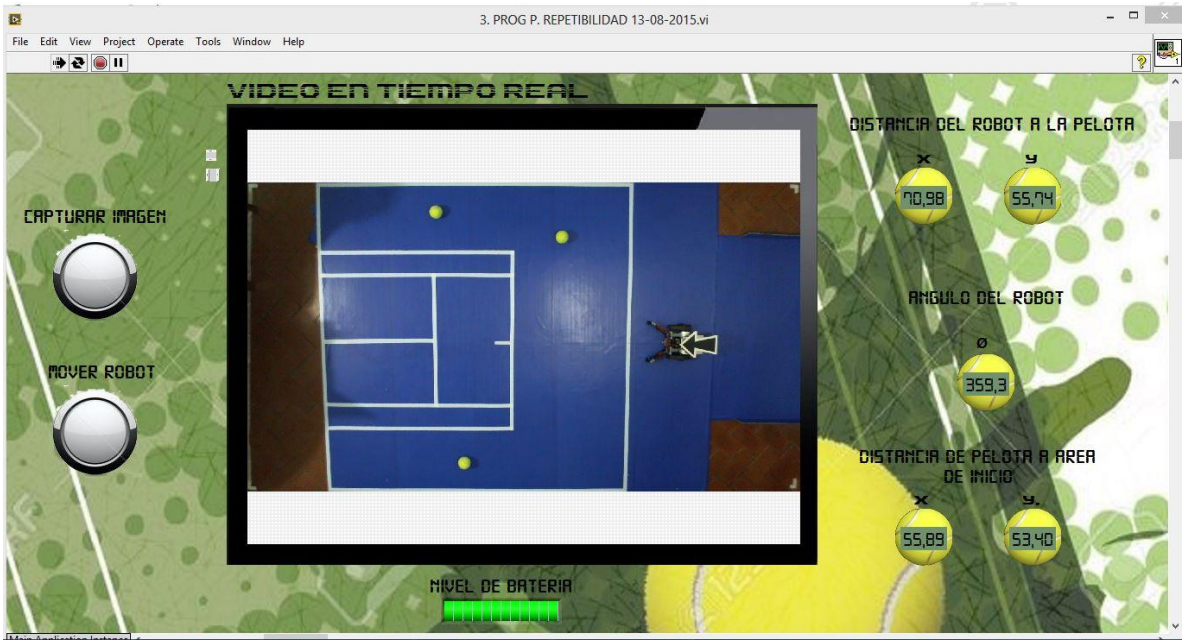


Figura 27. Interfaz de Usuario Software Recolector de Pelotas

8. DISEÑO EXPERIMENTAL

8.1 Pruebas de Validación

Éstas, son pruebas a las cuales se sometió el prototipo para tomar muestras de datos, sacando a partir de ellos resultados estadísticos que permitieron concluir si el robot estaba en la capacidad de cumplir la función para la cual fue diseñado en la cancha de pruebas. Dichos ensayos fueron útiles para hacer mediciones reales y proyectar el prototipo a posibles cambios futuros que contribuyan a mejorar las características técnicas del dispositivo, su funcionalidad y eficiencia.

Algunos proyectos basados en visión artificial y robótica han sido sometidos a pruebas de validación y experimentos en tiempo real, con el fin de hacer mediciones y validar los equipos determinando qué tan funcionales son y cómo se pueden mejorar. Uno de los proyectos en los cuales se recurrió a este tipo de pruebas fue en titulado A visión based control platform for Industrial Robot Rehabilitation[20] desarrollado en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos en la ciudad de México, donde se hicieron pruebas de validación del controlador implementado y se llevaron a cabo experimentos en tiempo real con el control basado en visión. Las tres partes fundamentales de cada prueba fueron: selección del punto objetivo, posicionamiento del manipulador y medición del error.

Otro trabajo en el cual se involucraron pruebas para validar robots fue el titulado ROSPHERE: Diseño, Construcción y Aplicación de una Esfera Robótica[21]. El autor del proyecto, Juan David Hernández Vega, desarrolló un prototipo con un sistema de tracción no convencional y lo sometió a un conjunto de 4 pruebas que permitieron validar las características del robot, éstas fueron: validación de movimientos y

[20] GARCÍA, Marco, CÁRDENAS, Antonio, RENDÓN, Juan, MENDÉZ, Mauro, A visión based control platform for Industrial Robot Rehabilitation, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca Mexico, 2008.
[21] HERNANDÉZ, Juan, ROSPHERE: Diseño, Construcción y Aplicación de una Esfera Robótica, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2012.

adquisición sensorial, interacción segura con personas, versatilidad y adaptabilidad a diferentes terrenos y desempeño global en tareas de monitorización de variables ambientales.

En el presente proyecto, se diseñaron cuatro pruebas para hacer la validación del prototipo. La cancha se dividió en tres zonas (Ver Figura 28), tomando datos y obteniendo resultados para cada una. El motivo por el cual se hizo este seccionamiento, fue por la necesidad de saber cuáles eran las regiones críticas, en función de la posición de la cámara, su resolución y la distancia hasta el área de salida del robot; de esta forma se obtuvo información de las zonas a las cuales se debía prestar especial atención para la programación del equipo y si el prototipo era funcional para operar en la cancha de pruebas.

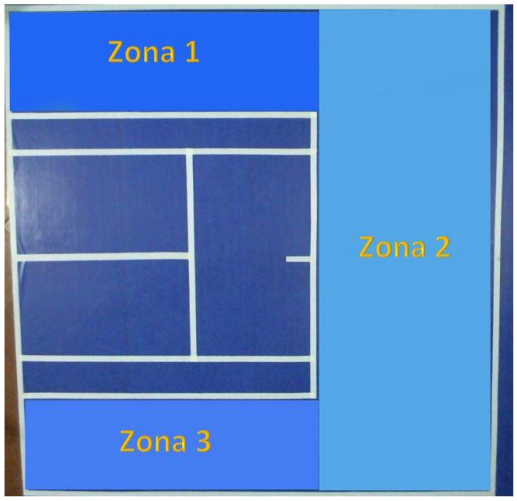


Figura 28. División de la cancha por zonas.

Se hicieron tres pruebas de validación:

- Prueba 1: Cálculo del % de error promedio por zona según ejes coordenados XY.
- Prueba 2: Tiempos de recolección por zona y % de pelotas recogidas.
- Prueba 2.1: Validación para estimar el tiempo de recolección y descarga de una pelota.

- Prueba 3: % de error de las coordenadas XY obtenidas por la cámara

8.1.1 Prueba 1: Cálculo de % error promedio/zona según ejes coordenados XY

El % de error promedio/zona se refiere al porcentaje de diferencia que tiene el robot entre la coordenada X o Y a la cual debe llegar con la coordenada X o Y a la cual realmente llegó, esto para una zona determinada

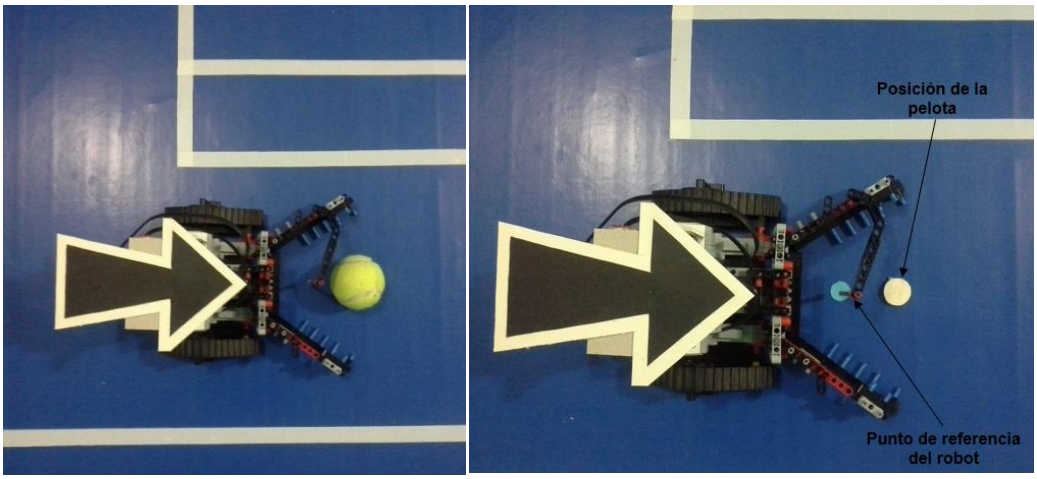


Figura 29. Montaje experimental para el desarrollo de la prueba 1

Con este ensayo se buscó calcular el porcentaje de error promedio de llegada del robot a la pelota, calculándolo para la desviación en X y en Y discriminadamente debido a que el prototipo se mueve en estos ejes coordenados. La finalidad de la prueba fue validar si el robot estaba en la capacidad de recoger las bolas de tenis en las diferentes zonas de recolección.

La prueba consistió en tomar un punto de referencia del equipo ubicado en el área útil de recolección de la pinza y enviarlo cinco veces a la misma ubicación de una pelota (Ver Figura 29). Después de que el robot hizo su movimiento de acercamiento a la bola se tomaron las medidas de las distancias X y Y, desde el punto de referencia en la pinza hasta la ubicación del centro de la pelota (ver Figura 30) y se

tabularon los datos. Esta prueba se repitió para seis ubicaciones diferentes de la pelota en las regiones hábiles de recolección (Ver Fig. 31), es decir dos por cada zona.

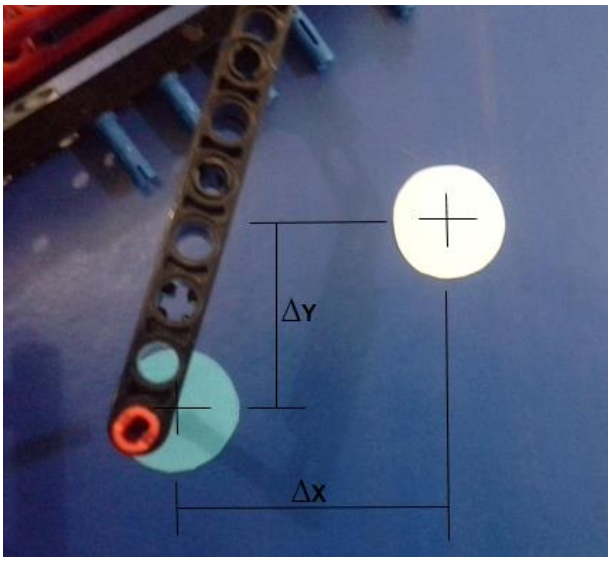


Figura 30. Medidas tomadas para el cálculo del % de error

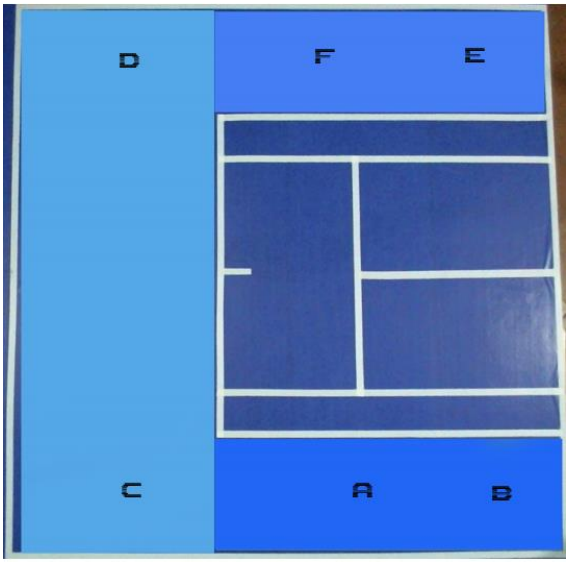


Figura 31. Ubicación de las pelotas para la prueba 1

De la Figura 30, ΔX corresponde a la diferencia entre la coordenada X de la ubicación de la pelota y la coordenada X del punto donde llegó el robot, con respecto al punto de salida del robot. Con el promedio de los ΔX de las mediciones hechas para una zona se hizo el cálculo del % de error prom/zona para la coordenada X (Ver Ecuación 2). En el caso del cálculo del % de error para la coordenada Y se siguió el mismo procedimiento tomando la diferencia ΔY.

Las letras A a F de la Figura 31 hacen referencia a las ubicaciones de las pelotas. Se dispusieron dos pelotas por zona. Los datos registrados y los resultados obtenidos se muestran con detalle en la Tabla A del Anexo 3.

Después tabular los datos, se calculó el % de error promedio de desviación del robot con respecto a la pelota por cada zona (Ver Tabla 1). Para este cálculo se tuvieron en cuenta las siguientes variables: coordenadas X y Y de la pelota, coordenadas X

y Y de la ubicación del punto de referencia del robot antes de que este cierre la pinza para tomar la bola. La Ecuación 7, se utilizó para el cálculo en descripción.

ZONA	MUESTRA	% ERROR PROM/ZONA COORD X	% ERROR PERMIS/ZONA COORD X	% ERROR PROM/ZONA COORD Y	% ERROR PERMIS/ZONA COORD Y
1	10	1,98	4,20	6,89	11,11
2	10	7,52	11,07	3,88	11,07
3	10	3,26	4,39	4,60	10,98

Tabla 1. Resultados % de error promedio/zona para coordenadas X y Y

$$\%_{error_{promedio/zona}} = \frac{|Valor_{\ Teo} - Valor_{real}|}{Valor_{\ Teo}} \qquad \textit{Ecuación 7}$$

Sustituyendo en la Ecuación 7 las variables que se requirieron para hallar el % de error promedio/zona se obtuvo:

- % de error promedio/zona para la coordenada X

$$\%_{error_{promedio/zona}} = \frac{|Coordenada\ X_P - \bar{X}_R|}{Coordenada\ X_P} \qquad \textit{Ecuación 8}$$

Donde:

$Coordenada\ X_P$: Es la coordenada X de la pelota medida desde el punto de inicio del robot[22], es decir que esta es la coordenada teórica a la cual debió llegar el prototipo. (Ver Figura 32).

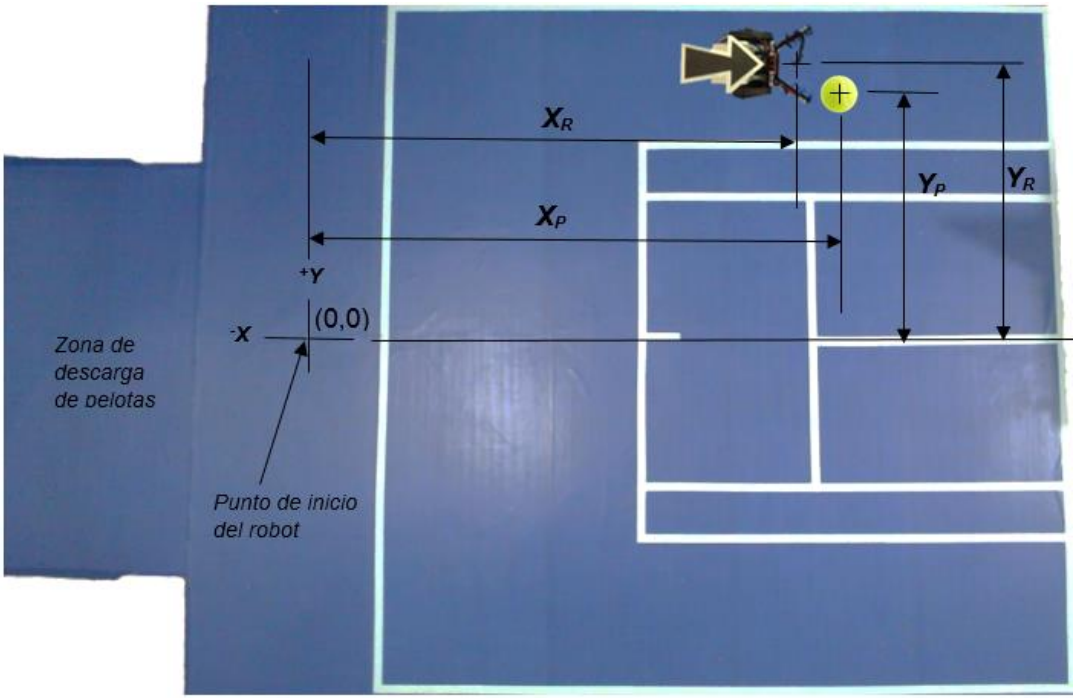


Figura 32. Diagrama de distancias tenidas en cuenta para la prueba 1

$\bar{X}_R$: Promedio de las coordenadas X a las cuales llegó el robot de las muestras tomadas para cada zona. Donde:

$$\bar{X}_R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_{Ri} \qquad \textit{Ecuación 9}$$

X_{Ri}: Coordenada X a la cual llegó el robot en cada medición.

n: Número de muestras X_{Ri} tomadas

[22] El punto de partida del robot es el origen del eje de coordenadas de la cancha, a partir de éste se miden todas las distancias necesarias para las pruebas y es el punto ideal desde donde el dispositivo parte para recoger las pelotas.

- % de error promedio/zona para la coordenada Y

$$\%_{error_{promedio/zona}} = \frac{|Coordenada\ Y_P - \bar{Y}_R|}{Coordenada\ Y_P} \qquad \textit{Ecuación 10}$$

Donde:

$Coordenada\ Y_P$: Es la coordenada Y de la pelota medida desde el punto de partida del robot, es decir que ésta es la coordenada teórica a la cual debió llegar el prototipo para la recolección de su objetivo. (Ver Figura 32).

$\bar{Y}_R$: Promedio de las coordenadas Y a las cuales llegó el robot de las muestras tomadas para cada zona.

$$\bar{Y}_R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_{Ri} \qquad \textit{Ecuación 11}$$

Y_{Ri}: Coordenada Y a la cual llegó el robot en cada medición.

n: Número de muestras Y_{Ri} tomadas

Los datos completos recolectados en la prueba y los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Tabla A del Anexo 3.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 1 se observa que el % de error promedio/zona de la llegada del dispositivo a la pelota fue diferente para cada una de las zonas y también difiere según el eje coordenado. Esto se debe principalmente por la resolución de la cámara que se utilizó (1600 x 896 Px), lo cual hace que las distancias que ésta arroja al robot para su movimiento tengan un error.

A pesar de que en cada zona haya un porcentaje de error, el robot fue apto para realizar su tarea de recolección de pelotas de tenis en la cancha de pruebas, ya que

el % de error promedio/zona calculado en la prueba está por debajo del límite máximo del % error permisible (Ver Tabla 1).

8.1.2 Prueba 2: Tiempos de recolección por zona y % de pelotas recogidas



Figura 33. Montaje experimental para el desarrollo de la prueba 2

El montaje experimental se muestra en la Figura 33. Los objetivos de esta prueba fueron hacer una estimación de los tiempos Máximo, Medio y Mínimo de recolección de pelotas del robot en cada zona de la cancha de pruebas y calcular el % de pelotas recogidas, con el fin validar la eficiencia de la velocidad y la eficacia del prototipo.

La prueba consistió en enviar el robot desde el área de inicio a recoger aproximadamente siete pelotas por zona dispuestas en diferentes ubicaciones (Ver Figura 34) y tomar la medida del tiempo que tardó en recoger cada bola y dejarla en la zona de descarga. También se determinó si el robot recogió o no la pelota para calcular el % de pelotas recogidas.

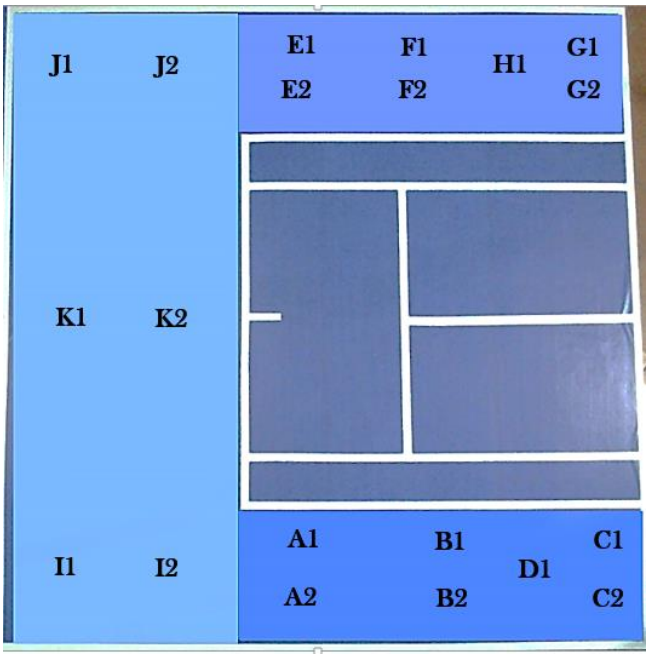


Figura 34. Ubicaciones de las pelotas para la prueba 2

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos. Para observar los datos completos de las mediciones hechas en la prueba Ver la Tabla B del Anexo 3

ZONA	POSICIÓN PELOTA	POSICIÓN EN ZONA	T MAX [s]	T MED [s]	T MIN [s]	RECOGE LA PELOTA	% DE RECOL DE PELOTAS
1	A	MIN	75,67	65,28	54,24	SI	90
						SI	
	B	MED				SI	
						SI	
	C	MAX				SI	
						SI	
	D					SI	
2	I	MAX	58,42	42,03	22,05	SI	
						SI	
	J	MAX				SI	
						SI	
	K	MIN				SI	
						NO	
3	E	MIN	75,65	66,14	54,94	SI	
						SI	
	F	MED				SI	
						SI	
	G	MAX				NO	
						SI	
	H					SI	

Tabla 2. Resultados obtenidos en la prueba 2.

Las zonas 1 y 3, tienen tiempos de recolección similares, esto debido a que son simétricas con respecto al punto de origen ubicado en el área de inicio del dispositivo, y los tiempos de la zona 2 son más cortos en comparación con 1 y 3 debido a su cercanía con el área de salida del robot. El tiempo máximo que tarda el robot en recoger una pelota es de 75,67 segundos (Zona 1) y el tiempo mínimo es de 22,05 segundos (Zona 2). Los tiempos calculados fueron útiles para estimar cuánto puede tardar el robot en realizar su labor de recolección de pelotas (Ver Prueba 2.1).

De acuerdo a los datos obtenidos se demostró que el prototipo sería lento para funcionar en una cancha de tenis a escala real, debido a las características técnicas propias de los motores y del equipo en general, por lo tanto se sugiere para una aplicación real de este proyecto, que el robot debería desplazarse a una velocidad promedio de una persona trotando (2,08 a 3,05 m/s)

Otro dato de suma importancia fue el % de pelotas recogidas por el dispositivo (90%), lo cual indicó que el prototipo es funcional y apto para realizar la labor de recolección de bolas en la cancha de pruebas.

8.1.3 Prueba 2.1: Validación para estimar el tiempo de recolección y descarga de una pelota.

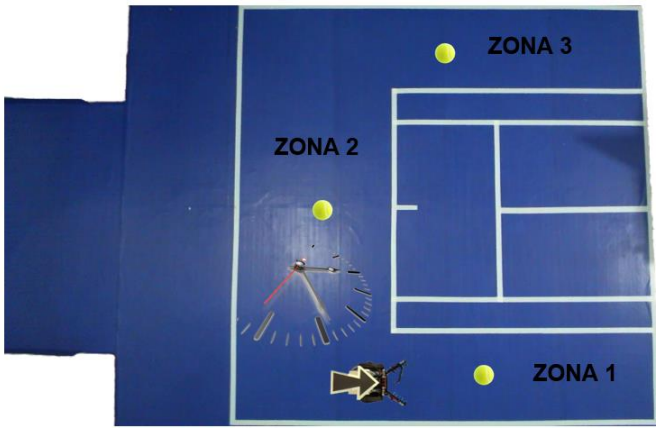


Figura 35. Montaje experimental para la prueba 2.1.

La Figura 35 muestra el montaje experimental para la Prueba 2.1, cuya finalidad fue demostrar que los datos de la Tabla 2 (T. MAX, T. MED y T. MIN) se pueden aplicar para estimar de una manera rápida el tiempo de recolección y descarga del dispositivo de una o más pelotas.

Para realizar este ensayo se colocaron tres pelotas, dispuestas de acuerdo a la Figura 35. Después se envió el robot a recoger cada bola y se midió el tiempo de recolección y descarga con un cronómetro. A continuación se recurrió a la Tabla 2 y se hizo una estimación de los tiempos que tardó el prototipo en hacer su tarea con cada pelota, como se muestra en la Figura 36.
En la Tabla 3 se tabularon los datos obtenidos, se calculó el % de error por prueba y el % de error promedio de todas las pruebas para determinar qué tan confiable resulta aplicar la Tabla 2 en la cancha de pruebas, y como una aproximación para una cancha real.

ZONA	POSICIÓN PELOTA	POSICIÓN EN ZONA	T MAX [s]	T MED [s]	T MIN [s]
1	A	MIN	75,67	65,28	54,24
	B	MED			
	C	MAX			
	D				
2	I	MAX	58,42	42,03	22,05
	J	MAX			
	K	MIN			
3	E	MIN	75,65	66,14	54,94
	F	MED			
	G	MAX			
	H				

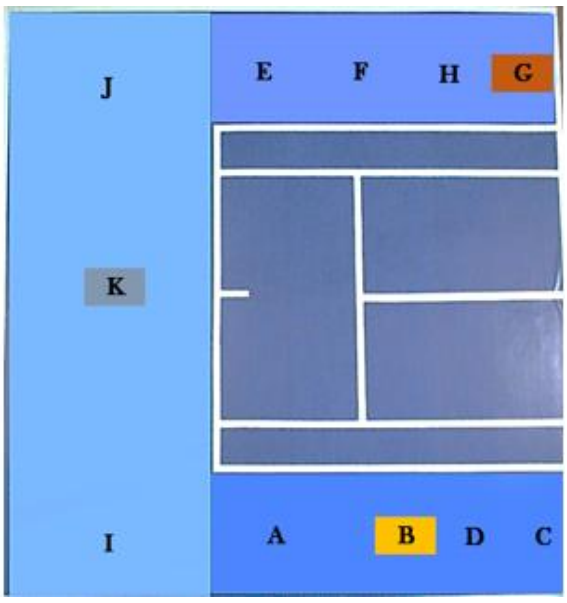


Figura 36. Ejemplo de la estimación de tiempos de recolección y descarga de pelotas

Para la estimación del tiempo de recolección de una o más pelotas se recurrió al método utilizado en la Figura 36. Para efectos de este ejemplo se tomó el caso resaltado en color amarillo. Si el usuario deseara saber aproximadamente cuanto puede tardar el robot en recoger y descargar una pelota ubicada en la región B, debe referenciar la zona (Zona 1 para el ejemplo), después analizar cuál es la posición aproximada de la pelota (columna 2) y la posición en zona (MED para el ejemplo). A partir de la posición en zona (MIN, MED Ó MAX), se busca el tiempo correspondiente (65,28 segundos), es decir, si la posición en zona fue MED, el tiempo estimado de recolección y descarga será T MED. La misma metodología se sigue para los ejemplos resaltados en color azul y anaranjado.

PRUEBA	TIEMPO DE RECOLECCIÓN Y DESCARGA MEDIDO CON EL CRONÓMETRO [s]			TIEMPO DE RECOLECCIÓN Y DESCARGA ESTIMADO CON LA TABLA 2 [s]			% ERROR/PRUEBA PELOTA 1	% ERROR/PRUEBA PELOTA 2	% ERROR/PRUEBA PELOTA 3	% ERROR PROMEDIO
	PELOTA 1	PELOTA 2	PELOTA 3	PELOTA 1	PELOTA 2	PELOTA 3				
1	62,27	20,05	60,39	65,28	22,05	54,94	4,61	9,07	9,92	
2	70,49	53,53	65,50	75,67	58,42	66,14	6,85	8,37	0,97	
3	63,53	53,62	73,68	65,28	58,42	75,65	2,68	8,22	2,60	6,15
4	57,92	54,42	72,00	54,24	58,42	75,65	6,78	6,85	4,82	
5	62,08	23,98	58,67	65,28	22,05	54,94	4,90	8,75	6,79	

Tabla 3. Datos y resultados obtenidos de la prueba 2.1

A continuación se detalla la explicación de la obtención de los datos de la Prueba 1 registrada en la Tabla 3:

Como se había explicado con anterioridad se ubicaron 3 pelotas en la cancha de pruebas, es decir, una por zona (Ver Figura 35), y se envió el robot desde el área de inicio a recoger cada bola. Después se midió el tiempo (con un cronómetro) requerido por el dispositivo para recoger y descargar cada pelota, que para la prueba 1 fue: Pelota 1 62,27 s, Pelota 2 = 20,05 s y Pelota 3= 60,39 s. A continuación se recurrió a la Tabla 2 para hacer una estimación del tiempo que tardaría el robot en recoger cada bola, y se obtuvieron los siguientes datos: Pelota 1= 65,28 s, Pelota 2= 22,05 s y Pelota 3=54,94 s. Esta estimación del tiempo está en función de la zona y la ubicación dentro de ésta de la pelota (Ver Figura 36). Con los anteriores

datos registrados, se calculó el % de error por prueba a partir de la Ecuación 12 y el % de error promedio con la Ecuación 13, dando los siguientes resultados para el % Error/Prueba: Pelota 1= 4,61 %, Pelota 2= 9,07 % y Pelota3=9,92 %. Con estos datos termina la primera prueba y se procede a desarrollar las cuatro restantes de la misma forma pero ubicando las pelotas en posiciones diferentes y sin olvidar que se debe poner una pelota por zona; El % Error Promedio fue de 6,15 para la prueba 2.1 en general.

$$\%_{\text{error/prueba}} = \frac{|T_{EP_i} - T_{CP_i}|}{T_{EP_i}} \qquad \textit{Ecuación 12}$$

Donde:

T_{EP_i}: Es el tiempo estimado de la Tabla 2 que tarda el robot en recoger y descargar la pelota P_i

T_{CP_i}: Es el tiempo medido con el cronómetro que tarda el robot en recoger y descargar la pelota P_i

La Pelota P_i debe estar en la misma ubicación con respecto al robot para el registro del tiempo con el cronómetro y con la Tabla 2.

$$\%\ error\ promedio = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \%_{\text{error/prueba}_i} \qquad \textit{Ecuación 13}$$

Donde:

n: Es el número de datos del % de error/Prueba ($n = 15$)

$\sum_{i=1}^{n} \%_{\text{error/prueba}_i}$: Es la sumatoria de todos los porcentajes de error/prueba

De acuerdo a los resultados obtenidos de la Tabla 3, se concluyó que el % de error promedio fue bajo (6,15 %), lo cual permitió demostrar que es confiable utilizar la Tabla 2 para estimar el tiempo de recolección de una o varias pelotas en cualquiera de las tres zonas de la cancha de pruebas.

Para el análisis de la Tabla 3 se observó que el % error/prueba máximo se presentó en la Prueba 1 con la pelota 3, el cual está resaltado en color anaranjado, sin embargo este porcentaje de error representa 5,45 segundos, lo cual no es un problema a la hora de hacer un estimado en la cancha de pruebas porque es una estimación temporal y no genera mayores alteraciones cuando se deba tomar como referente dicho tiempo; por ejemplo, si se deseara apreciar un tiempo de recolección de *n* número de pelotas y tomar un descanso simultaneo o hacer otra actividad donde el tiempo de duración sea el estimado, se podría hacer la apreciación del tiempo por este método.

8.1.4 Prueba 3: % de error de las coordenadas XY obtenidas por la cámara

Las coordenadas de las pelotas fueron calculadas con la ayuda del sistema de visión artificial. Éstas se obtuvieron según se explicó en los numerales 7.3.4 y 7.3.5. La finalidad de esta prueba fue validar la fiabilidad de las coordenadas X y Y de las pelotas con respecto al punto de salida del robot, que se muestran en la interfaz gráfica de usuario, es decir que se comprobó que tan confiables son estos datos con los cuales el usuario interactúa. Los resultados de la Prueba se pueden observar en la Tabla 4 y los datos de las mediciones completos en la Tabla B del Anexo 3.

Para el desarrollo de la prueba se ubicó una pelota en la cancha de pruebas y se registró en la quinta y sexta columna de la Tabla C del Anexo 3 el dato de las coordenadas X y Y de la bola después de tomar la foto. A continuación se midieron, con la ayuda de un flexómetro, las distancias X y Y entre la pelota y el punto de salida del robot. Lo ideal era que las medidas tomadas con el flexómetro y el dato leído en la interfaz gráfica de usuario fueran iguales, sin embargo éstas difieren un poco.

Después de registrar los datos, haciéndose 10 mediciones por zona (En cada medición la pelota debía estar en coordenadas diferentes), se procedió a calcular el % de error promedio por zona para las coordenadas X y Y con la Ecuación 14

$$\%_{\text{error prom Coor X /Zona}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\%\ error\ coord\ X/Prueba)_{\ i} \qquad \textit{Ecuación 14}$$

$$\%\ error\ coord\ X/Prueba = \frac{|(Coord\ X_{i\ real} - Coord\ X_{i\ cam}|}{Coord\ X_{i\ real}} \qquad \textit{Ecuación 15}$$

Donde:

$\%_{\text{error Coor X prom/Zona}}$: Es el porcentaje de error promedio de la coordenada X en cada una de las zonas. Es decir que se calcularon tres de estos datos.

$\%\ error\ coord\ X/Prueba$: Es el porcentaje de error de la coordenada X entre la medida tomada con el flexómetro y el dato leído en la interfaz gráfica de usuario, de cada una de las pruebas (Ver Tabla C del Anexo 3).

$Coord\ X_{i\ real}$: Es la coordenada X entre la pelota y el robot medida con el flexómetro

$Coord\ X_{i\ cam}$: Es la coordenada X entre la pelota y el robot leída en la interfaz gráfica de usuario

Para el cálculo de los porcentajes de error en el eje Y por Zona se desarrolló el mismo procedimiento, con la diferencia que se tomó la distancia sobre el eje Y del robot a la pelota.

ZONA	% ERROR COORD X/ZONA	% ERROR COORD Y/ZONA
1	1,75	2,21
2	2,66	3,48
3	0,53	5,25

Tabla 4. Resultados obtenidos de la prueba 3

De acuerdo a los resultados obtenidos (Tabla 4), se pudo deducir que las coordenadas leídas en la interfaz gráfica de usuario varían un poco con respecto a las coordenadas reales medidas con el flexómetro. Esto se debió a la resolución de la cámara utilizada (1600 X 896 Px). Si se hubiera utilizado una cámara de mejor resolución el % de error disminuiría, debido a que el detalle del dispositivo mejora. Sin embargo los porcentajes de error calculados son permitidos ya que tienen una repercusión mínima en los desplazamientos del robot para recoger su objetivo; esto se demostró en la prueba 2, donde el robot se envió 20 veces a recoger pelotas ubicadas en diferentes regiones de la cancha de pruebas; de las 20 pelotas, el dispositivo recogió 18, es decir un porcentaje de recolección de pelotas del 90%, lo cual es una buena probabilidad para el presente proyecto, debido a los recursos con los cuales se contó (Ver numeral 7.1), los cuales no son robustos en cuanto a tecnología, sobre todo el sistema de visión artificial que está conformado solo por una cámara de baja resolución.

9 COSTOS DEL PROYECTO

En el desarrollo del proyecto, se realizó una inversión económica que permitió construir un prototipo tangible y funcional.

Como se indicó con anterioridad se emplearon dispositivos de diferentes fabricantes y costos, además se consideró importante mencionar los valores reales del proyecto para tomarlos como base en el desarrollo de un producto final, o del perfeccionamiento del dispositivo actual utilizando alguna otra plataforma robótica o tipo de software.

CANT.	ARTICULO	VALOR (COP)
1	LEGO MINDSTORMS EV3	$1.500.000
1	CAMARA LOGITECH HD 8 MP	$150.000
12	LAMINA CARTON PARA CANCHA	$40.000
1	ROLLO DE PAPEL ADHESIVO AZUL	$42.000
2	ROLLOS DE CINTA ADHESIVA TRANSPARENTE	$10.000
3	BOLAS DE TENIS	$10.000
1	COMPUTADOR PORTATIL ASUS K550D	$1.400.000
1	LICENCIA BÁSICA DE LABVIEW	$2.500.000
	TOTAL	**$5.652.000**

HORAS	PROCEDIMIENTO	VALOR (COP)
24	CONSTRUCCION DE LA CANCHA	$120.000
320	PROGRAMACION DEL DISPOSITIVO	$3.000.000
10	HORAS DE CONSULTORIA	$250.000
8	ELABORACION DEL ROBOT CON LEGO	$40.000
	TOTAL	**$3.410.000**

	Costo Total del Proyecto:	**$9.062.000**
	Costo para la venta del prototipo + 30 % Utilidad	**$11.780.600**

Tabla 5. Valores de Artículos comprados y procesos para el desarrollo del proyecto

En la tabla 5 se relacionan los costos asociados a los materiales y dispositivos empleados a la fecha del desarrollo de este proyecto.

Los precios establecidos anteriormente pueden ser fluctuantes dado que varían según el proveedor, momento de compra, lugar de importación o calidad de los artículos.

10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

10.1 Conclusiones

Dado el proyecto terminado, las pruebas de validación hechas al sistema autónomo para recolección de pelotas de tenis y los resultados obtenidos se concluyó que:

- ✓ El robot está en la capacidad de realizar la labor para la cual fue diseñado, calculando la posición de la pelota mediante el sistema de visión artificial y desplazándose hasta ésta de manera autónoma después de la activación desde la interfaz gráfica del usuario.
- ✓ El sistema de inteligencia artificial es capaz de seleccionar la pelota más cercana al robot para que ésta sea su primer objetivo. Además identifica si la bola se encuentra en la zona de restricción donde el dispositivo no puede entrar, dada dicha situación el robot no realiza ninguna acción hasta que haya una pelota en la zona hábil de recolección.
- ✓ Se implementó un algoritmo de calibración del equipo en algunos movimientos, de tal forma que autónomamente el dispositivo se corrija cuando el sistema de visión artificial detecte que no seguirá la trayectoria adecuada.
- ✓ Se hizo un prototipo en plataforma LEGO®, útil para realizar su labor de recolección de pelotas de tenis en la cancha de pruebas, en el cual se diseñaron los siguientes sistemas: un tren de rodaje tipo oruga, una pinza con 1 grado de libertad para sujetar la pelota, un patrón geométrico de reconocimiento y un bastidor sobre el cual se montaron los anteriores elementos.
- ✓ El robot es capaz de desplazarse a una velocidad promedio de 0,15 m/s.
- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de validación el robot tiene una eficacia del 90%.

- ✓ Sin importar que el equipo se encuentre desviado del área de salida, el sistema de visión artificial puede detectar la posición relativa entre el robot y la pelota para su posterior recolección.
- ✓ Según los resultados de las pruebas de validación el sistema de visión y el prototipo operan con un error permisible de las coordenadas calculadas y la llegada a la pelota respectivamente, sin embargo el sistema realiza su labor adecuadamente.
- ✓ El valor estimado del proyecto fue de COP $ 9.062.000.

10.2 Trabajos Futuros

El proyecto actual puede tener mejoras significativas como las que se mencionan a continuación:

- ✓ El robot puede mejorarse utilizando una plataforma robótica programable más robusta como DaNI (Robot elaborado por National Instruments), y una cámara de alta velocidad con mejor resolución de video (FHD o 4K).
- ✓ Con un número mayor de cámaras colocadas en lugares estratégicos y en posición angular se podría disminuir el error del cálculo de las coordenadas del robot y la pelota por parte del sistema de visión artificial.
- ✓ Para una aplicación en una cancha real (Escala 1:1) la velocidad del robot se debe mejorar, aumentándola a la velocidad promedio de una persona trotando 2,08 m/s a 3,05 m/s; el dispositivo debe estar en la capacidad de recoger varias pelotas almacenándolas en un depósito y se podría emplear un sensor magnético para el posicionamiento del robot, evitando el patrón geométrico de reconocimiento.
- ✓ Si el dispositivo fuera a ser comercializado, su costo de venta podría disminuir si se fabrica en masa.

11 REFERENCIAS

[1] VARAONA, Luis, Historias del Grand Slam, todo sobre el tenis y sus torneos más famosos, T&B editores, 2013.

[2] LEE, Delbert, Tennis Ball Retrieving Device, United States Patent n. 4.318.654, California (USA). 1982.

[3] FRANKEL, Edward, Device for retrieving and securely storing balls. United States Patent n. 5.147.100 California (USA). 1991

[4] TSAI, Kuan-Teng, Robot for collecting table tennis balls, United States Patent n. 7.674.196 B2 Taipei (TW). 2010

[5] LEGO, MINDSTORMS, Tennis ball picker uppe, http://www.us.lego.com/en-us/mindstorms/community/robot?projectid=7bdb7066-986d-4467-ad64-342f029e3840, Consultado 1 de Agosto de 2015.

[6] CHAWLA, Neha, ALWUQAYAN, Wuqayan, FAIZAN, Ahmed, TOSUNOGLU, Sabri, Robotic Tennis Ball Collector, Florida International University. Miami. 2012

[7] ROSENBERGER Christophe, EMILE, Bruno, LAURENT Helene, Calibration and quality control of cherries by artificial visión, http://electronicimaging.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1098283#1%e2%80%83Introduction, Consultado 31 de Julio de 2015.

[8] ROMERO, Francisco, VARGAS, Manuel, CASTAÑO, Luis. Integración De Sistemas De Visión Artificial, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. España.

[9] BAEZA, Victor, Sistema de Visión Artificial para el control de calidad en piezas cromadas, Instituto Politécnico Nacional. México D.F. 2009

[10] SINGHBAL, Baljinder, Sport Science Review, Hawk Eye: A Logical Innovative Technology Use In Sports for Effective Decision Making, Varsovia, 2012.

[11] FIFA, Hawk-Eye confirmed as goal-line technology provider for Canada 2015, http://www.fifa.com/womensworldcup/news/y=2015/m=3/news=hawk-eye-confirmed-as-goal-line-technology-provider-for-canada-2015-2580727.html, Consultado 7 de Agosto de 2015

[12] ASME, Smart Robots For Picking Fruit, https://www.asme.org/engineering-topics/articles/robotics/smart-robots-for-picking-fruit, Consultado 31 de Julio de 2015.

[13] MINISTERIO DE EDUCACION DE ESPAÑA, Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales, España, 2012

[14] CORONA NAKAMURA, Maria Adriana, ANCONA VALDEZ, Maria de lo Angeles, Diseño de Algoritmos y su codificación en lenguaje C.

[15] LAJARA VIZCANO, José Rafael, PELEGRI SEBASTIA, José, LabVIEW Entorno Gráfico de Programación 2 ed. Barcelona, 2011.

[16] ITF, Federación Internacional de Tenis, Reglas del Tenis, 2013

[17] KLINGER, Thomas, Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision, 1 ed. USA, 2003

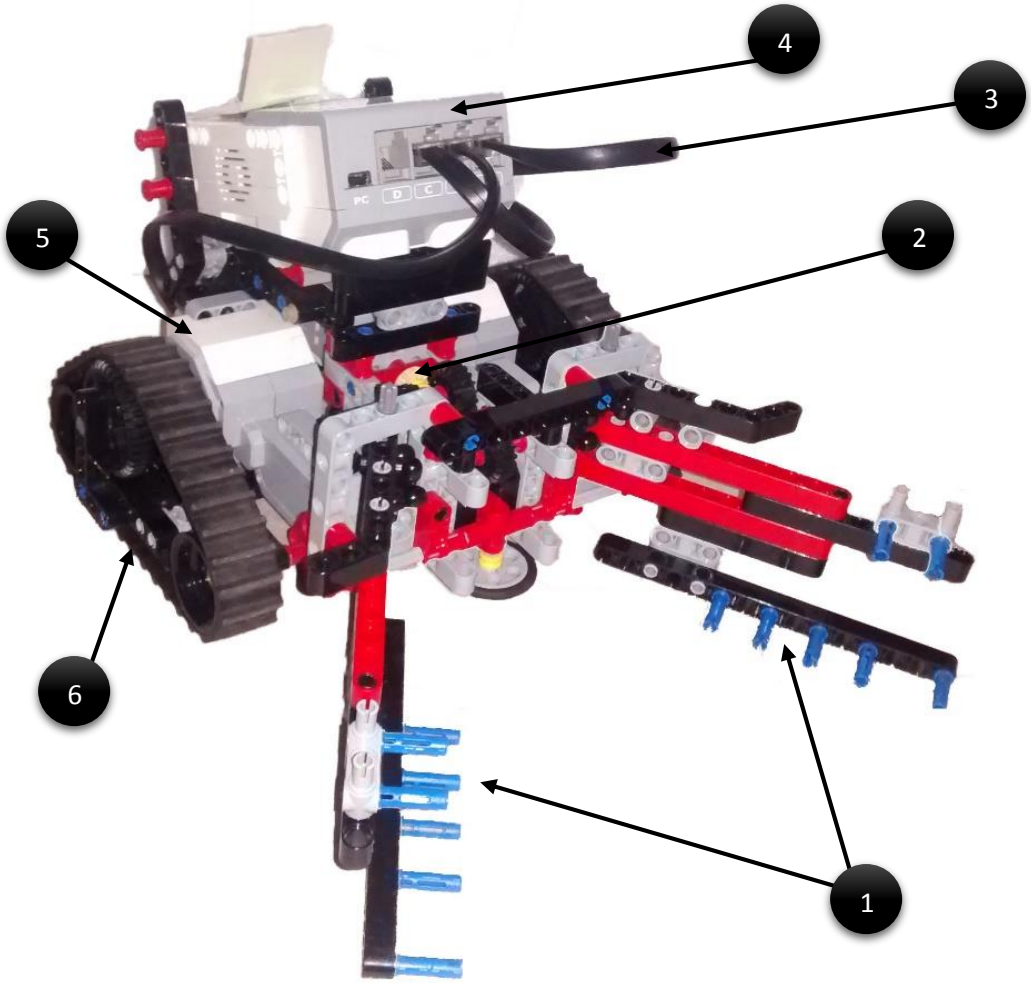
[18] GARCÍA, Marco, CÁRDENAS, Antonio, RENDÓN, Juan, MENDÉZ, Mauro, A visión based control platform for Industrial Robot Rehabilitation, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca Mexico, 2008.

[19] HERNANDÉZ, Juan, ROSPHERE: Diseño, Construcción y Aplicación de una Esfera Robótica, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2012.

ANEXOS

ANEXO 1

PARTES DEL ROBOT



1 Mecanismo de recolección de pelota

2 Motor mediano accionador de la pinza

3 Cables de conexión

4 Bloque programable EV3

5 Motor grande del tren de rodaje

6 Orugas

ANEXO 2 A

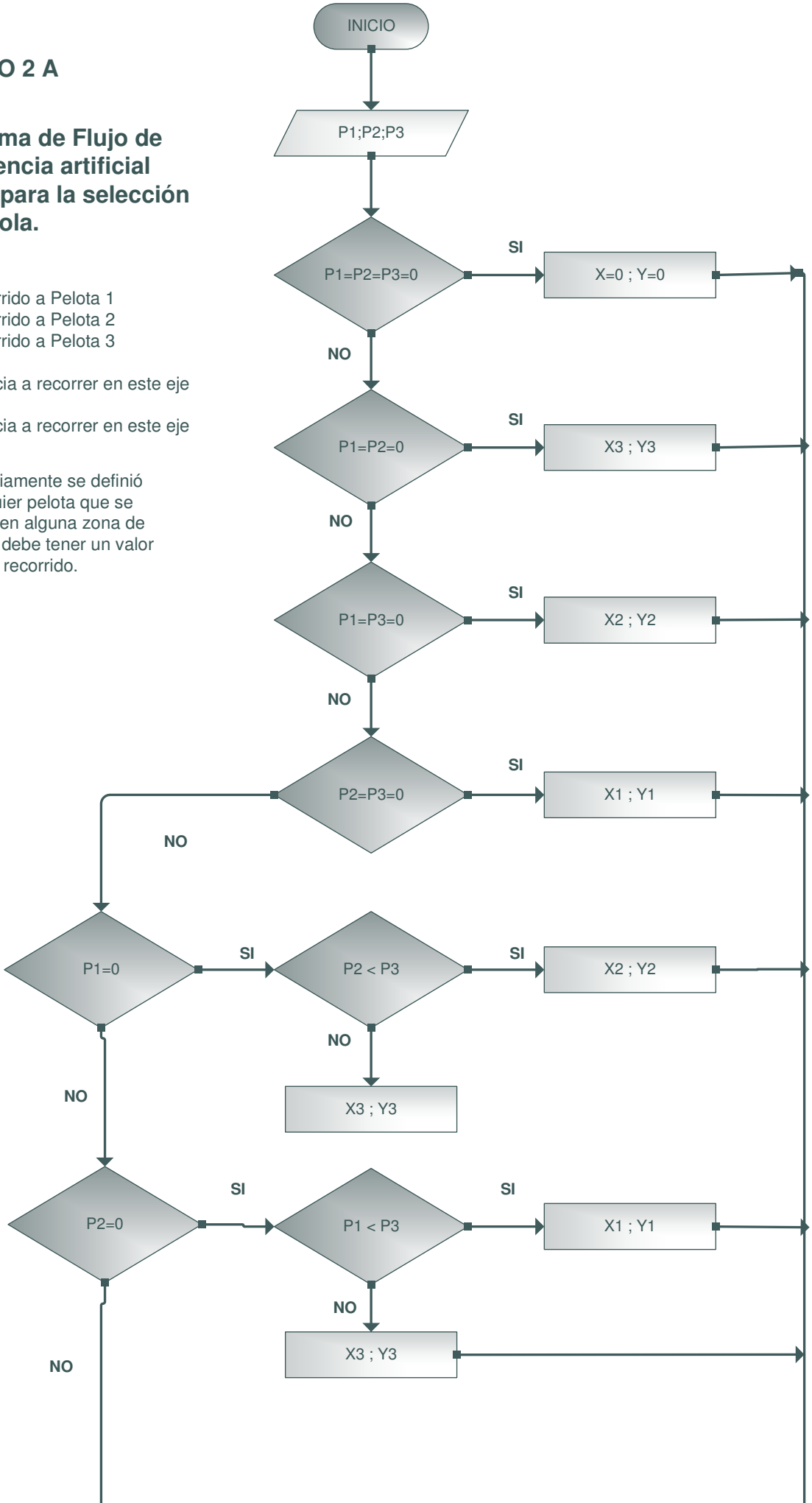
Diagrama de Flujo de Inteligencia artificial usado para la selección de la bola.

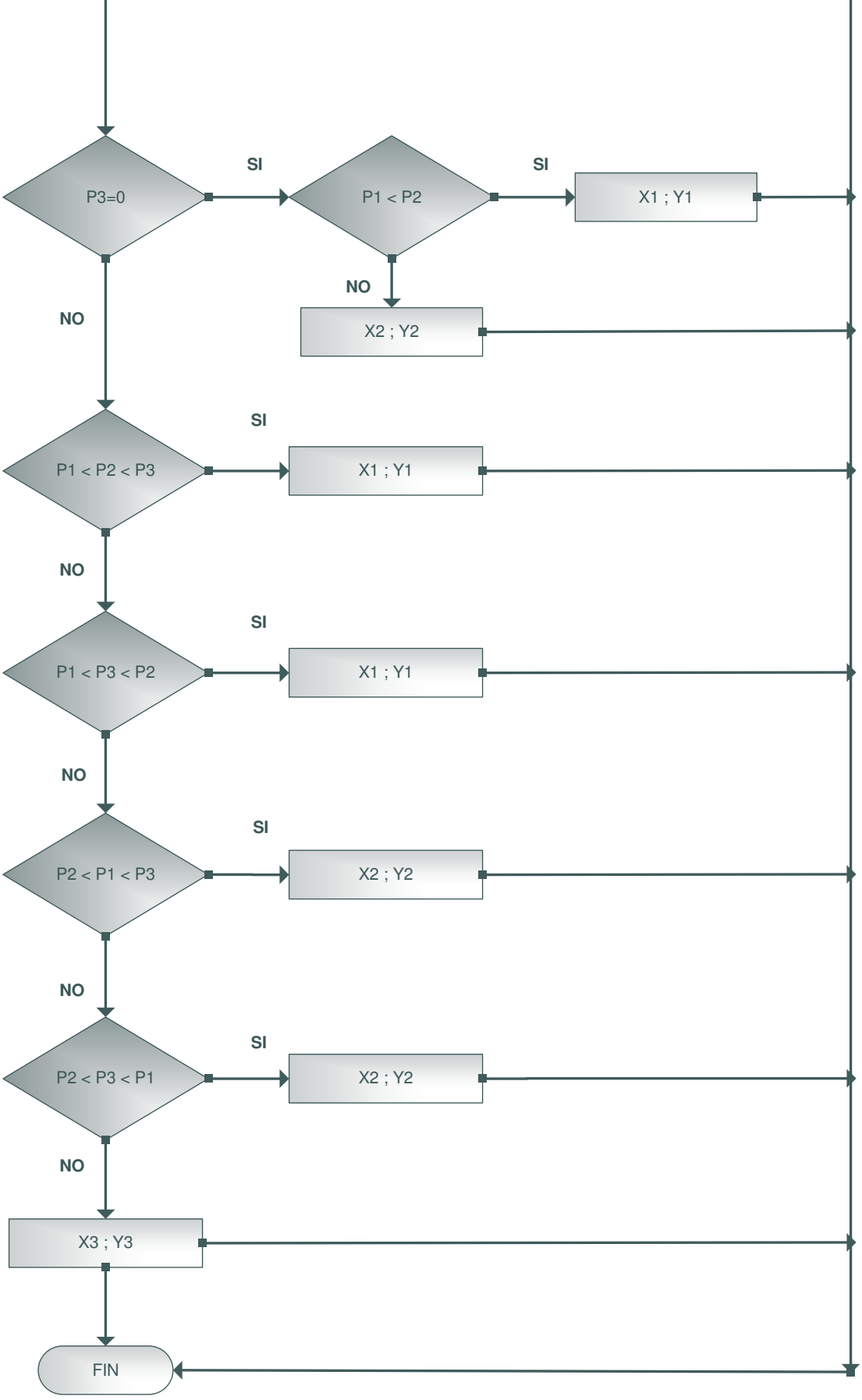
P1= Recorrido a Pelota 1
P2= Recorrido a Pelota 2
P3= Recorrido a Pelota 3

X= Distancia a recorrer en este eje

Y= Distancia a recorrer en este eje

Nota: Previamente se definió que cualquier pelota que se encuentre en alguna zona de restricción debe tener un valor de 0 en su recorrido.




P3=0
SI
P1 < P2
SI
X1 ; Y1
NO
X2 ; Y2
NO
P1 < P2 < P3
SI
X1 ; Y1
NO
P1 < P3 < P2
SI
X1 ; Y1
NO
P2 < P1 < P3
SI
X2 ; Y2
NO
P2 < P3 < P1
SI
X2 ; Y2
NO
X3 ; Y3
FIN

ANEXO 2 B

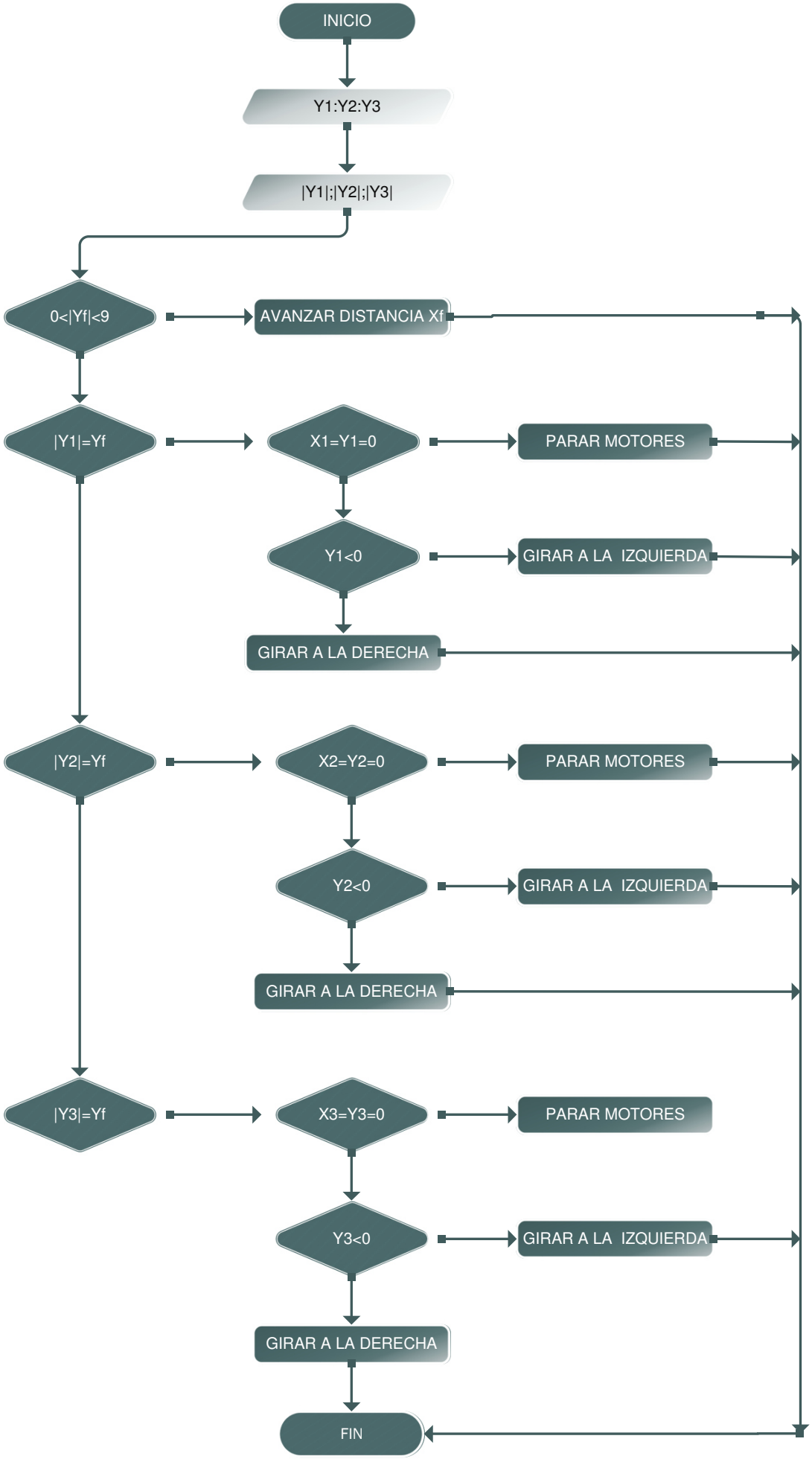
Diagrama de Flujo Para la toma de decisión de giro

Y1,Y2,Y3= Coordenadas en eje Y de cada una de las pelotas.

|Y1|,|Y2|,|Y3|= Valor Absoluto de la coordenada Y de cada pelota

X1,X2,X3= Coordenadas en eje X de cada una de las pelotas.

Yf y Xf: Coordenadas de pelota seleccionada por inteligencia artificial.



ANEXO 3

TABLA A. PRUEBA DE % DE ERROR PROMEDIO POR ZONA SEGÚN EJES COORDENADOS

ZONA	POSICIÓN PELOTA	COORD X PELOTA REAL	COORD Y PELOTA REAL	DIST X ROBOT P.	DIST Y ROBOT P.	PROM % ERROR X REAL/POS PELOTA	% ERROR PROM X /ZONA	% ERROR PROM Y/ZONA
1	A	124	62,5	0	1,5	3,19	1,98	6,89
1	A	124	62,5	4,5	7,5			
1	A	124	62,5	8,3	7,5			
1	A	124	62,5	1,5	2			
1	A	124	62,5	5,5	5,4			
1	B	168,5	63,5	1	5,5	0,77		
1	B	168,5	63,5	1	3,5			
1	B	168,5	63,5	0	0			
1	B	168,5	63,5	2	2,5			
1	B	168,5	63,5	2,5	8			
2	C	55,5	63,5	6,5	0,5	7,75	7,52	3,88
2	C	55,5	63,5	5	2			
2	C	55,5	63,5	4,5	1			
2	C	55,5	63,5	5,5	0			
2	C	55,5	63,5	0	0			
2	D	53	63	10,3	3	7,28		
2	D	53	63	0,5	7,5			
2	D	53	63	5,5	2			
2	D	53	63	3	5,5			
2	D	53	63	0	5,5			
3	E	162,8	63,5	0	0	2,27	3,26	4,60
3	E	162,8	63,5	8	5,3			
3	E	162,8	63,5	2,5	4			
3	E	162,8	63,5	3,5	3			
3	E	162,8	63,5	4,5	0			
3	F	118	64	6	6,5	4,24		
3	F	118	64	0,5	0,5			
3	F	118	64	6	0,5			
3	F	118	64	0	3,5			
3	F	118	64	12,5	6			

ANEXO 3

TABLA B. DATOS DE PRUEBA DE TIEMPOS DE RECOLECCIÓN POR ZONA Y % DE RECOLECCION DE BOLAS

ZONA	POSICIÓN PELOTA	TIEMPO RECOLECCIÓN Y DESCARGA [s]	T MAX [s]	T MED [s]	T MIN [s]	RECOGE LA PELOTA	% DE RECOL DE PELOTAS
1	A1	52,23	60,02	57,48	52,23	SI	90
1	A2	53,25				SI	
1	B1	58,61				SI	
1	B2	59,08				SI	
1	C1	60,1				NO	
1	C2	60,02				SI	
1	D1	59,09				SI	
2	E1	49,35	49,35	39,98	22,08	SI	
2	E2	49,24				SI	
2	F1	48,2				SI	
2	F2	49,01				SI	
2	G1	22,08				SI	
2	G2	22,01				SI	
3	H1	53,41	60,05	58,16	53,41	SI	
3	H2	54,03				SI	
3	I1	60,02				SI	
3	I1	59,53				SI	
3	J1	60,05				SI	
3	J2	60,05				NO	
3	K1	60,02				SI	

ANEXO 3

TABLA C. DATOS OBTENIDOS DE PRUEBA % DE ERROR DE LAS COORDENADAS XY OBTENIDAS POR LA CÁMARA

PRUEBA	ZONA	COORD X REAL	COORD Y REAL	COORD X CÁMARA	COORD Y CÁMARA	% ERROR COORD X/PRUEBA	PROM % ERROR X/POS PELOTA	PROM % ERROR X/ZONA	% ERROR COORD Y/PRUEBA	PROM % ERROR Y/POS PELOTA	PROM % ERROR Y/ZONA
1	1	124	62,5	126,67	60,84	2,15	2,45	1,75	2,66	2,21	2,21
2	1	124	62,5	127,27	61,45	2,64			1,68		
3	1	124	62,5	126,49	61,25	2,01			2,00		
4	1	124	62,5	127,18	61,58	2,56			1,47		
5	1	124	62,5	127,58	61,85	2,89			1,04		
6	1	168,5	63,5	170,79	62,04	1,36	1,05		2,30		
7	1	168,5	63,5	170,54	61,43	1,21			3,26		
8	1	168,5	63,5	170,3	61,63	1,07			2,94		
9	1	168,5	63,5	168,9	62,05	0,24			2,28		
10	1	168,5	63,5	170,85	61,91	1,39			2,50		
11	2	55,5	63,5	56,49	62,16	1,78	1,40	2,66	2,11	3,48	3,48
12	2	55,5	63,5	55,82	60,89	0,58			4,11		
13	2	55,5	63,5	56,44	61,77	1,69			2,72		
14	2	55,5	63,5	56,46	62,13	1,73			2,16		
15	2	55,5	63,5	56,06	61,77	1,01			2,72		
16	2	53	63	54,84	60,35	3,47	3,91		4,21		
17	2	53	63	55,06	60,56	3,89			3,87		
18	2	53	63	55,18	60,52	4,11			3,94		
19	2	53	63	55,22	60,46	4,19			4,03		
20	2	53	63	55,07	59,9	3,91			4,92		
21	3	162,8	63,5	161,76	60,38	0,64	0,74	0,53	4,91	5,25	5,25
22	3	162,8	63,5	160,77	60,36	1,25			4,94		
23	3	162,8	63,5	161,93	59,83	0,53			5,78		
24	3	162,8	63,5	161,16	60,03	1,01			5,46		
25	3	162,8	63,5	162,39	59	0,25			7,09		
26	3	118	64	117,74	61,14	0,22	0,32		4,47		
27	3	118	64	118,15	61,05	0,13			4,61		
28	3	118	64	118,14	60,76	0,12			5,06		
29	3	118	64	118,84	60,49	0,71			5,48		
30	3	118	64	117,53	61	0,40			4,69		