PROTOTIPO PARA ANALIZAR LA PRESIÓN PLANTAR EN LA MARCHA ATLÉTICA

PROTOTYPE TO ANALYZE PLANT PRESSURE IN RACE WALKING

LINA GERALDINE BOLIVAR GONZALEZ [1], GUSTAVO ADOLFO HIGUERA [2]

Resumen

El presente proyecto está enfocado en la implementación de un sistema de podobarometría electrónico, encaminado en el análisis plantar de deportistas de la modalidad marcha atlética, permitiendo realizar una evaluación de su gesto técnico, para posteriormente informar al deportista si se encuentra incumpliendo la normatividad, así mismo permite que el deportista y su entrenador evalúen como se está ejecutando el gesto deportivo, esto permitirá una disminución de lesiones y posibles descalificaciones. Este sistema está constituido por una plantilla sensorial de instrumentación, un microcontrolador conectado a la plantilla que se encarga de recibir las señales y transmitirlas a través del puerto COM y una interfaz gráfica para visualizar en el computador en tiempo real los puntos de apoyo plantar, finalmente se realiza el procesamiento de la información, para evaluar el gesto, se realizaron diversas pruebas en cuanto a material y sensores, con el fin de, identificar los más aptos para el proyecto, el sistema permite visualizar problemas técnicos.

Palabras clave: ciclo de la marcha, fotopodobarometría, LabVIEW, locomoción bípeda, marcha atlética, plantillas de instrumentación, piezoeléctricos.

Abstract

This project is focused on the implementation of an electronic podobarometry system, aimed at the plantar analysis of athletes in the athletic gait modality, allowing an evaluation of their technical gesture, to later inform the athlete if they are in breach of the regulations, as well It allows the athlete and their coach to evaluate how the sporting gesture is being executed, this will allow a decrease in injuries and possible disqualifications. This system consists of a sensory instrumentation template, a microcontroller connected to the template that is responsible for receiving the signals and transmitting them through a COM port and a graphic interface to view the plantar support points on the computer in real time. Finally, the information processing is carried out, to evaluate the gesture, various tests were carried out regarding material and sensors, in order to identify the most suitable for the project, the system allows to satisfactorily determine technical problems.

Keywords: bipedal locomotion, gait cycle, instrumentation templates, LabVIEW, piezoelectrics, photopodobarometry, race walking.

1. Introducción

La marcha atlética es una progresión de pasos ejecutados de modo que el atleta se mantenga en contacto con el suelo, a fin de que no se produzca perdida de tocamiento visible. La pierna que avanza debe estar recta, desde el momento del primer toque con el suelo, hasta que se halle en posición vertical[1], teniendo en cuenta las especificaciones técnicas, este proyecto evalúa por medio de una plantilla de instrumentación sensòrica los puntos de apoyo plantar al momento de realizar el gesto deportivo, haciendo uso de un sistema de podobarometría[2] electrónica que permite hacer una revisión más detallada de la técnica, lo que permite que jueces, entrenadores y deportistas observen gráficamente como se está ejecutando el movimiento. Este

proyecto plantea una solución a esta problemática, ya que, si el atleta hace uso de la plantilla previo a sus competencias, tendrá conocimiento de sus faltas técnicas y de esta manera, podrá trabajar en ellas para así disminuir el riesgo de descalificación, puesto que, por medio de estos parámetros se pueden evidenciar problemas técnicos y posibles causas de lesiones en deportistas de marcha atlética.

El proyecto está compuesto por una plantilla con sensores piezoeléctricos, los cuales permiten analizar los puntos de apoyo plantar en el momento de ejecutar el movimiento de la modalidad (Marcha Atlética) , una vez, se recibe la información de los sensores en el microprocesador , se realiza la comunicación con el computador, por medio del puerto COM, para luego visualizar los datos registrados en la interfaz gráfica creada en LabVIEW, por medio de ella, se pueden visualizar gráficamente los puntos en los que en ese momento se encuentra apoyada la planta del pie.

1.1. Aspectos fisiológicos del pie

a. Anatomía del pie

El pie humano y el tobillo son una fuerte y compleja estructura mecánica que contiene 26 huesos, 33 articulaciones, y más de 100 músculos, ligamentos y tendones. El pie se puede subdividir en tres partes: retropié, parte media y antepié[3].

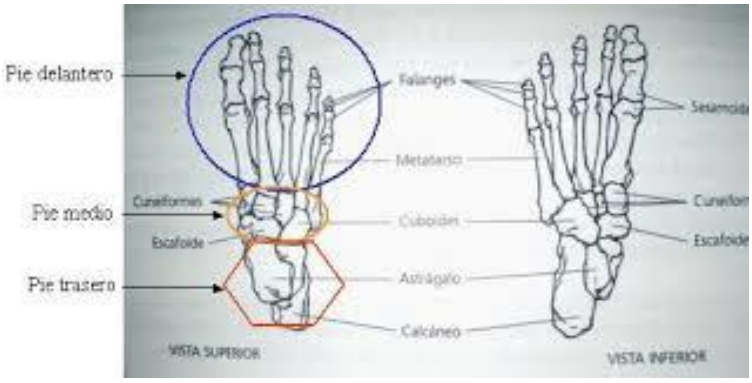


Figura 1 Anatomía del pie

b. Marcha Humana

La marcha humana es un modo de locomoción bípeda con actividad alternada de los miembros inferiores, que se caracteriza por una sucesión de doble apoyo y de apoyo unipodal, es decir que durante la marcha el apoyo no deja nunca el suelo, mientras que, en la carrera, como en el salto, existen fases aéreas, en las que el cuerpo queda suspendido durante un instante [4].

Figura 2 Marcha Humana

c. Ciclo de la marcha humana

El ciclo de marcha comienza cuando el pie contacta con el suelo y termina con el siguiente contacto con el suelo del mismo pie. Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo (60% del ciclo) y la fase de balanceo (40% del ciclo) [5].

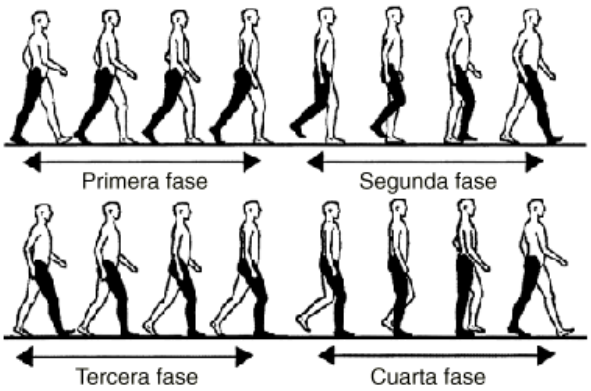


Figura 3 ciclo de marcha

2. Aspectos Teóricos

2.1. Piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos pueden convertir la tensión mecánica en electricidad, y la electricidad en vibraciones mecánicas. El cuarzo es un ejemplo de un cristal piezoeléctrico natural[6].

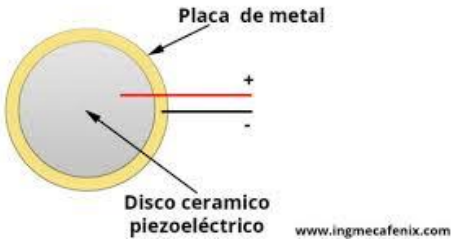


Figura 4 Piezoeléctrico

2.2. Psoc

El Psoc 5LP es el SoC programable más integrado de la industria, combinando periféricos analógicos y digitales de alta precisión y programables con un CPU[7].

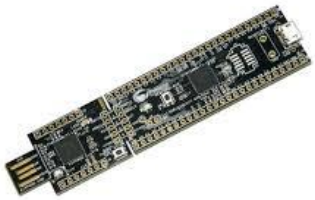


Figura 5 Microcontrolador Psoc

2.3. LabVIEW

LabVIEW es un entorno de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medidas y presentaciones de datos[8].

Figura 6 LabVIEW

2.4. Comunicación Serial

La comunicación se realizó con el bloque UART en Psoc, Este módulo de usuario es un transmisor y receptor universal asíncrono (UART) compatible con el protocolo de comunicación RS232 en modo full dúplex, está compuesto por dos bloques digitales los cuales son utilizados uno para transmisión (Tx) y el otro para recepción (Rx) que funcionan independientemente [9].

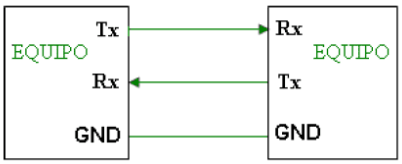


Figura 7 Comunicación Serial

2.5. Marcha Atlética

La necesidad de caminar es un instinto que el hombre posee desde finales del período neolítico y la marcha es la actividad atlético - deportiva que con más fidelidad reproduce esta cualidad intuitiva del ser humano[10].

Figura 8 Marcha Atlética

3. Metodología de diseño

Para el desarrollo de la plantilla, se diseñaron las siguientes etapas: Plantilla sensorica, acondicionamiento de las señales, comunicación e interfaz gráfica.

- **Plantilla sensorica:**

  Se implemento por medio de 18 sensores piezoeléctricos de los cuales se obtiene una diferencia de potencial.

- **Acondicionamiento de las señales:**

  se realizó el acondicionamiento de las señales por medio de resistencias para un divisor de voltaje, diodos de rectificación y finalmente diodos Zener de alta conmutación para garantizar que el sistema no exceda los 5 V.

  Comunicación e interfaz:

  Por medio de la Psoc se realizó una multiplexación y amplificación de las señales, las cuales posteriormente se dividen en las tres zonas de contacto tenidas en cuenta para evaluar el gesto deportivo (contacto inicial, fase de propulsión, fase de vuelo), finalmente se trasmite la información por comunicación serial y se recibe a través del puerto COM en la plataforma LabVIEW. En las figuras 9 y 9.1 se puede observar el diagrama de bloques implementado.

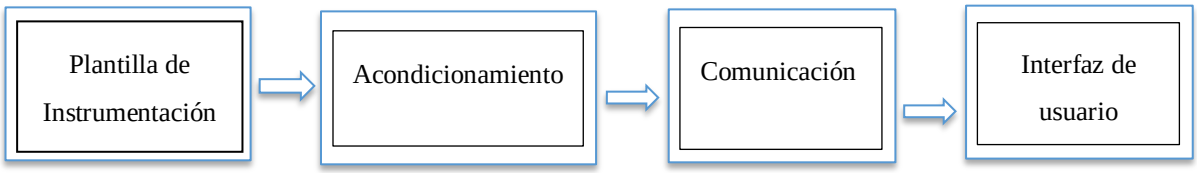


Figura 9 Diagrama de Bloques (Autor)

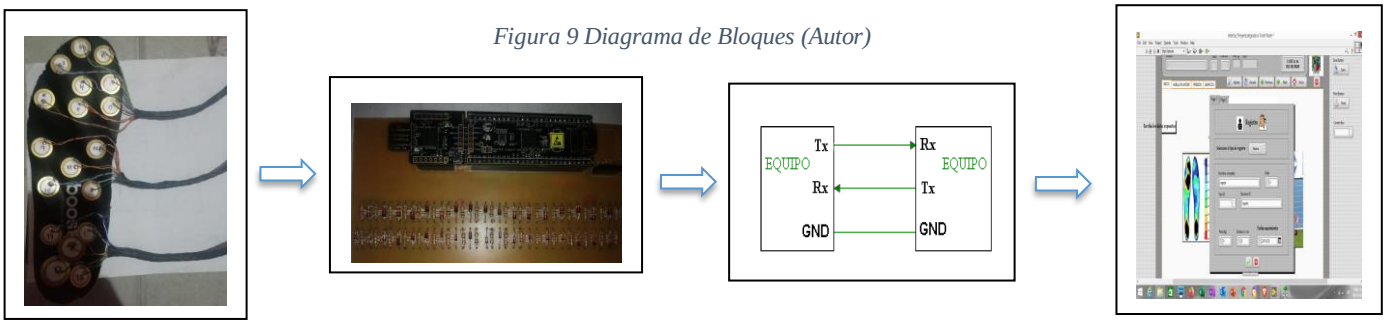


Figura 9.1 Diagrama de Bloques (Autor)

3.1. Hardware

El diseño del hardware se encuentra dividido en 3 partes, las cuales se muestran a continuación:

- La plantilla de instrumentación se implementó con 18 sensores piezoeléctricos a través de toda el área de una plantilla de zapato común, como se observa en las figuras 10 a, b y c luego esta se puso dentro del zapato del deportista, obteniendo así los puntos de apoyo durante la ejecución de la modalidad.

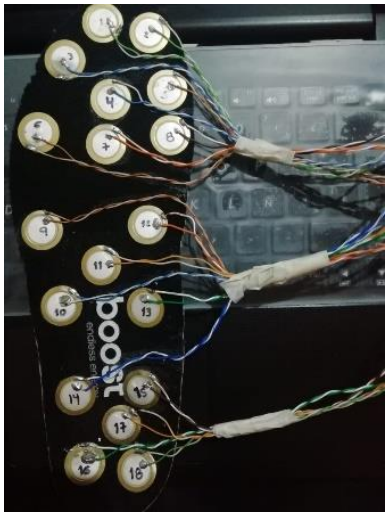


Figura 10 Plantilla (Autor)

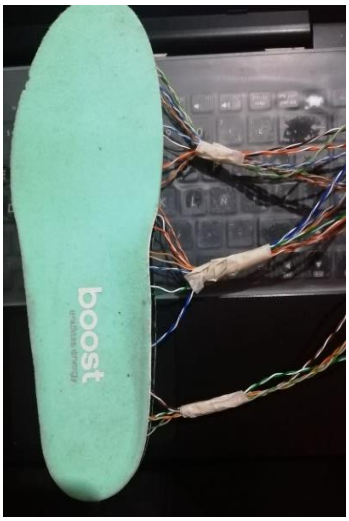


Figura 10.a Prototipo Final (Autor)

Figura 10.b Prototipo final (Autor)

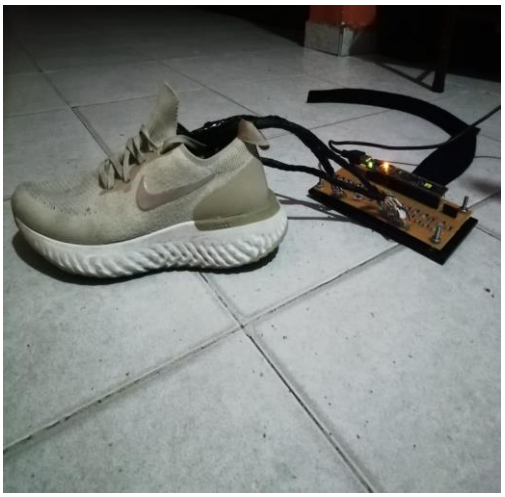


Figura 10.c Prototipo final(Autor)

- El circuito de acondicionamiento se encarga de recibir las señales y adecuarlas para ser leídas por el microcontrolador.
- El microcontrolador (Psoc) se encarga de recibir las señales análogas del sistema, luego estas señales son multiplexadas para posteriormente pasar por una amplificación (PGA), seguido se hace uso del ADC para finalmente enviar la información a la interfaz gráfica del computador, como se observa en la figura 13.

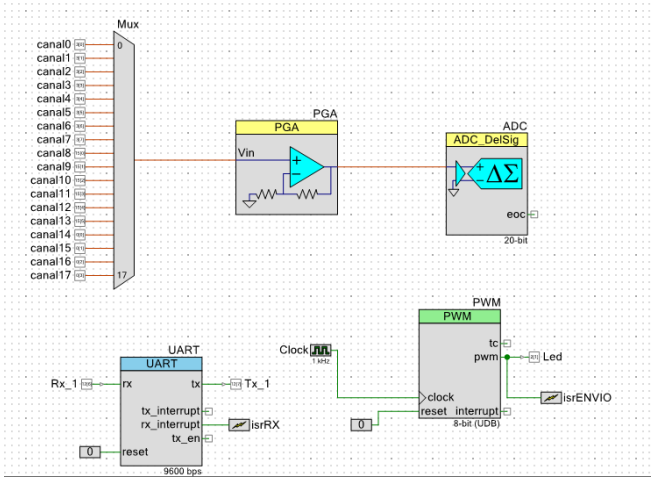


Figura 11 Programa Microcontrolador (autor)

3.2. Software

La interfaz gráfica se implementó en la plataforma LabVIEW, en donde se reciben los datos en tiempo real y posteriormente se grafican, para que el usuario pueda visualizar las siguientes variables, zonas de presión, puntos de apoyo y las señales del sistema. En la figura 14 se muestra la pantalla inicial de la interfaz implementada, en dónde se pide al usuario que ingrese algunos datos personales como nombre, edad, peso y estatura.

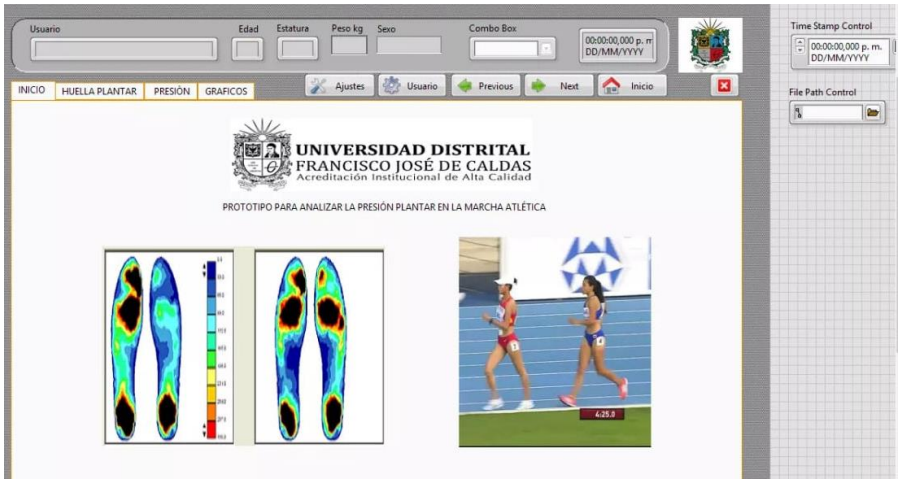


Figura 12 Pantalla inicial (Autor)

En la figura 15 se muestra la pestaña número dos, en donde, por medio de leds se puede observar los puntos de apoyo y la zona en la que el deportista tuvo contacto.

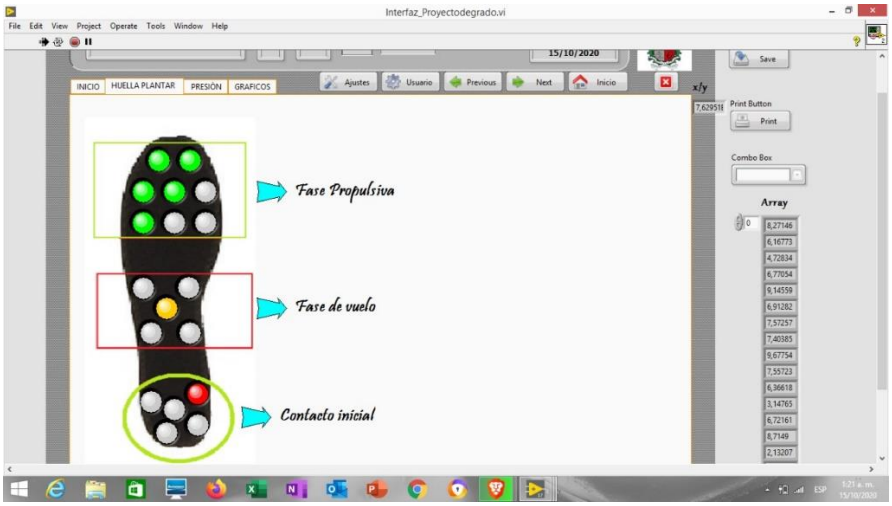


Figura 13 Segunda pestaña (Autor)

La pestaña número tres se muestra en la figura 16, en ella, por medio de un tanque, se observa la presión total ejercida por el deportista.

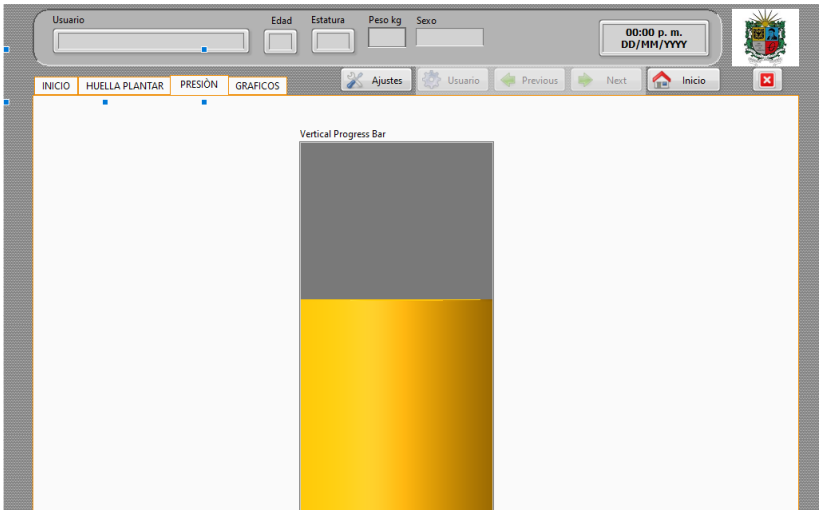


Figura 14 Tercera Pestaña (Autor)

Finalmente, en la pestaña cuatro, se observan las señales de las tres zonas de contacto que se tienen en cuenta en la evaluación del gesto deportivo de la marcha atlética, ver figura 17.

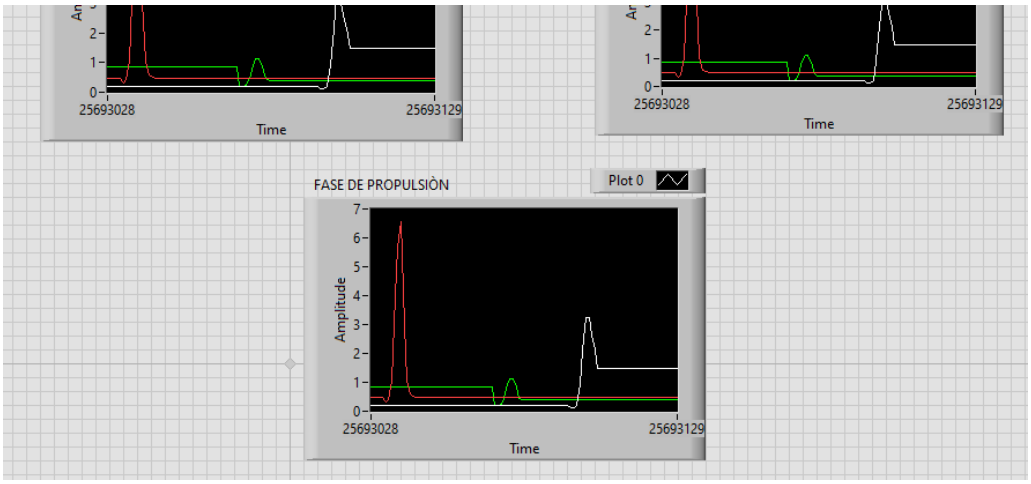


Figura 15 Cuarta Pestaña (Autor)

4. Resultados obtenidos

En medio de la investigación se realizaron pruebas con distintos materiales y sensores, una de las primeras pruebas que se realizo, fue hacer uso de la pintura conductiva para la creación de la plantilla de instrumentación, como se observa en la tabla 1, se realizaron diferentes prototipos.

Diseño	Material	Tipo de sensor	Valor
	Cartulina	Resistivo	50 □ 130.7 □ 70 □
	Acetato	Resistivo	195.67 □ 420 □
	Acetato	Capacitivo	$\pm 300\ mV$

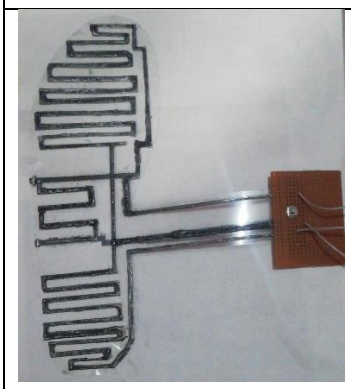
	Papel	Resistivo	12 K□
	Acetato	Resistivo	18 K□
	Acetato	Capacitivo	$\pm 500mV$
	Acetato	Resistivo	24,6 K□ 32,6 K□ 33,4 K□

Tabla 1 Pruebas (Autor)

Luego de realizar pruebas con cada diseño, se concluyó que, aunque la pintura se comporta muy bien, no permite obtener un valor veraz y acertado, puesto que, su resistencia varia fácilmente y a pesar de que su deformación es adecuada, no recupera su forma inicial de manera inmediata, por lo tanto, no es apto para trabajar el prototipo; Continuando con la investigación se hizo uso de piezoeléctricos, los cuales tuvieron un comportamiento adecuado, de acuerdo a los requerimientos del proyecto, puesto que, en el momento de presionar, genera un voltaje aproximado de 600 mV a 5 V por sensor y en el instante en el que se levanta el pie vuelve a cero inmediatamente, lo que permite observar que puntos se están presionando en el mismo instante, es por esto, que se tomó la decisión de realizar el prototipo con sensores piezoeléctricos.

Uno de los parámetros importantes para tener en cuenta en el sistema, es la ergonomía y comodidad de la plantilla, puesto que, esto es de gran interés, debido que, las pruebas realizadas en la modalidad son de largo aliento y sobrepasan los 30 minutos en su gran mayoría. finalmente se realizaron diversas pruebas en dos deportistas de diferentes categorías, el resultado obtenido se puede visualizar en la tabla 2, en donde se muestra el sensor que fue presionado y su zona.

	Sensor																	
Prueba	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
fase de propulsión	■	■	■		■	■				■								
	■			■	■	■			■									
	■				■	■	■	■		■								
		■	■	■	■	■	■			■								
	■	■	■				■		■	■								
	■			■	■	■	■		■									
	■	■	■		■	■	■			■								
	■	■		■	■	■	■		■	■								
	■	■	■		■	■	■			■								
		■	■	■	■	■	■			■								

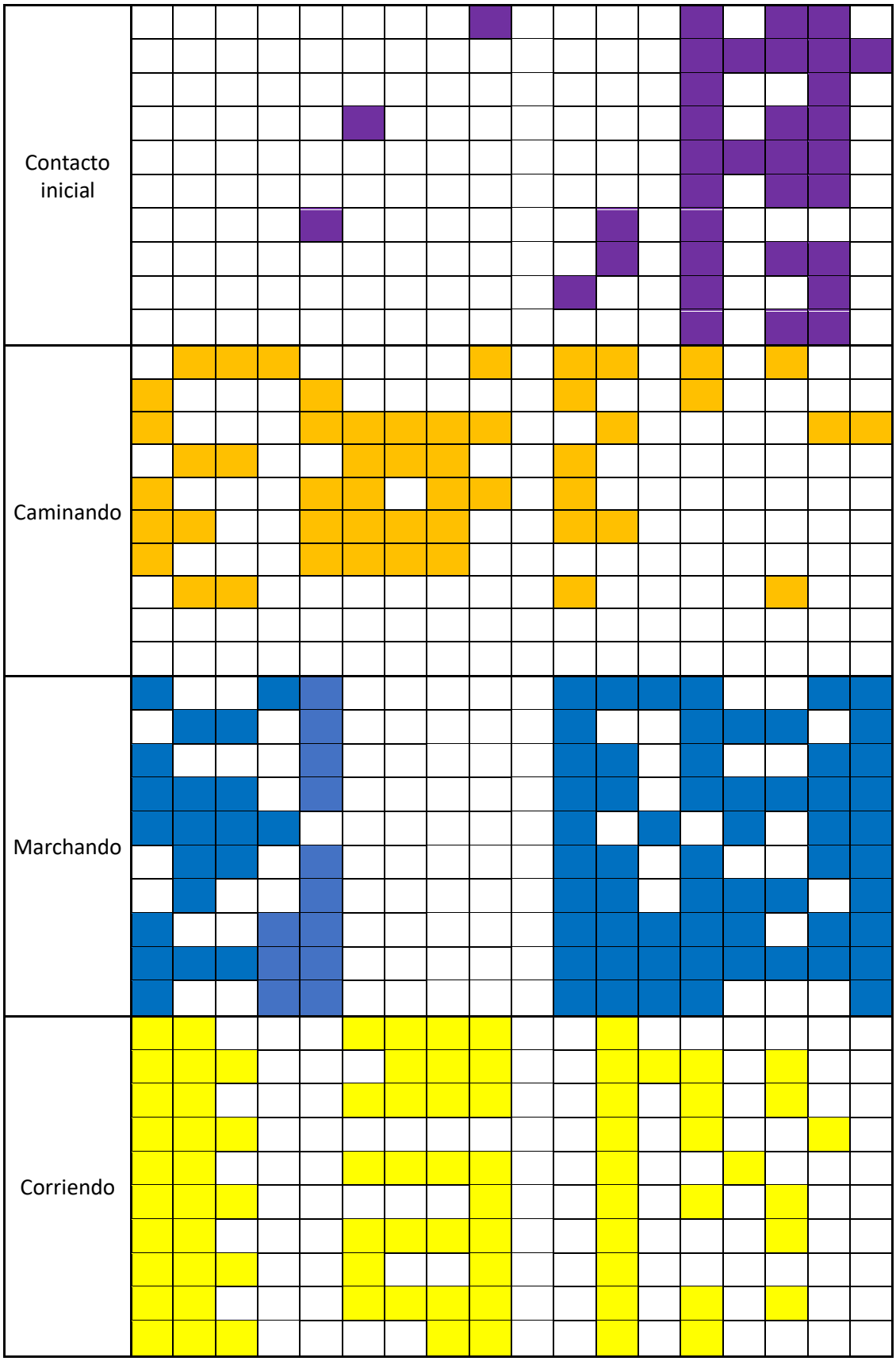


Tabla 2 Pruebas del sistema

Según los deportistas el resultado fue muy satisfactorio, ya que, la plantilla además de ser cómoda les permitió observar problemas técnicos en su pisada. En las figuras 17, 18, 19 y 20 se observan algunas de las pruebas realizadas.

Figura 16 Prueba Apoyo Contacto inicial (Autor)

Figura 18.1 Prueba Apoyo Completo(Autor)

Figura 17 Atleta 1 marchando

Figura 19.1 Atleta 1 marchando

Figura 20 Atleta 2 Marchando

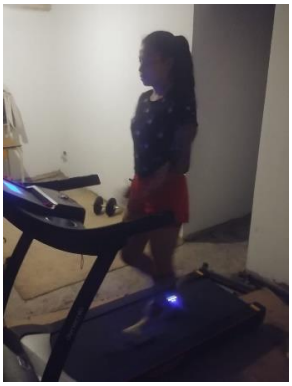


Figura 20.1 Atleta 2 Marchando

5. Conclusiones

- Por medio de los sensores piezoeléctricos se logro capturar las señales producidas en el momento en el que el deportista hace contacto con la plantilla, para posteriormente ser enviadas, haciendo uso de la comunicación serial y finalmente, se revisaron estos puntos en los que se realizó el apoyo de forma gráfica.
- Haciendo uso de la Psoc, fue posible realizar el tratamiento y el envió de las señales, puesto que, se hizo uso de amplificadores para darle una ganancia a la señal y que esta fuera un poco más grande, así mismo se hizo uso del bloque ADC para la conversión de datos análogos a digitales y finalmente se usó el bloque UART para el envió de los datos por serial.
- La interfaz gráfica, fue realizada en la plataforma LabVIEW, en la cual, por medio del Ni Visa se recibe el número de bits producido al presionar el sensor, posteriormente se realiza el manejo de los datos recibidos para representarlos y analizarlos de forma gráfica, esto permite que el usuario observe en el pc, cuáles de las tres zonas (propulsión, vuelo, contacto inicial) está presionando al marchar y si la incidencia es en la zona de vuelo el deportista está cometiendo errores técnicos, ya que según la norma solo se debería ver apoyo en la zona de propulsión y contacto inicial.
- Luego de realizar las pruebas se notó que para el deportista es mucho más cómodo que la salida de los sensores se encuentre por el borde externo del pie y no por el interno, puesto que, el microcontrolador se encuentra ubicado en la parte externa del cuerpo, sin embargo, con la ejecución de las pruebas no se tiene ninguna dificultad en cuanto a ergonomía y comodidad para el deportista.

- Con la pintura conductiva se obtuvieron datos significativos, sin embargo, no fue útil para este prototipo, debido que, al momento de ejercer presión se deforma, pero tarda mucho tiempo en volver a su estado inicial, por lo que, no permite que se obtengan datos verídicos.
- Es importante tener en cuenta el tipo de cable con el cual se suelda el sensor, puesto que, este es muy delicado y si el cable es muy rígido se quiebra con gran facilidad, al momento de ejercer presión, por lo que, en este caso se soldó con un cable flexible que permitió al sensor funcionar de manera adecuada. Así mismo hay que ser muy delicado a la hora de soldar, ya que, el calor derrite la parte cerámica (positiva) del sensor.

6. Trabajo futuro

El proyecto implementado cuenta con características genéricas aceptables para la aplicación, sin embargo, pueden mejorarse aspectos como el diseño de la plantilla, la presentación de la interfaz gráfica y la comunicación para que sea de tipo inalámbrica.

- Se planea realizar una calibración, que certifique las mediciones de la plantilla.
- Se pretende realizar la comunicación de forma inalámbrica.
- Se pretende mejorar el diseño y llevar a todas las instancias del deporte.
- Se planea modificar la interfaz gráfica y realizarla en una plataforma que permita la comercialización del sistema.
- Se pretende implementar un sistema que permita al usuario evaluar la flexión de rodilla y sus grados junto con los apoyos plantares.
- Para el ciclo de ingeniería se desea continuar con el prototipo y mejorar su ergonomía como su funcionalidad, permitiendo aumentar el número de datos conocidos sobre el gesto ejecutado.

Reconocimientos

La realización de este proyecto de investigación fue posible, en primer lugar, gracias a mi familia quien me dio todo su apoyo durante este proceso de formación, agradezco a la universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, por todos los conocimientos impartidos, también quisiera agradecer al grupo de investigación Roma y su semillero Siro, pues allí di mis primeros pasos en la investigación, de igual modo quiero dar un agradecimiento especial al profesor Gustavo Higuera quien fue mi mentor durante todo este proceso, quiero agradecer a cada maestro y compañero con el cual compartí en las aulas, pues cada uno de ellos aporto en algo, quiero agradecer a los deportistas y entrenadores que me permitieron realizar las pruebas, sin ellos no hubiera obtenido los datos necesarios para el sistema, por último se agradece a todas aquellas personas que en forma directa o indirecta contribuyeron a que este trabajo de investigación pudiera llevarse a cabo.

Referencias

[1] Rfea, “Definición de Marcha Atlética,” vol. 1, no. c. p. 7, 2015, [Online]. Available: http://www.rfea.es/jueces/ExamenJA_ JN/Marcha.pdf.

[2] A. Hurtado Padilla, “Uso de la baropodometría,” *Medigraphic*, vol. 2, no. 4, pp. 255–261, 2006.

[3] S. ALMAGRO GUTIERREZ, “Anatomía funcional del pie.,” *Med. Cir. Guerra*, vol. 19, no. 6, pp. 345–351, 1957.

[4] J. Sánchez-Lacuesta, “Biomec{á}nica de la marcha humana normal,” *Biomec{á}nica la marcha humana Norm. y patol{ó}gica. Val. General. Valencia.*, pp. 19–112, 1993.

[5] A. Martín Nogueras, J. L. Calvo Arenillas, J. Orejuela Rodríguez, F. J. Barbero Iglesias,

and C. Sánchez Sánchez, “Fases de la marcha humana,” *Rev. Iberoam. Fisioter. y Kinesiol.*, vol. 2, no. 1, pp. 44–49, 1999, [Online]. Available: https://www.elsevier.es/es-revista-revista-iberoamericana-fisioterapia-kinesiologia-176-articulo-fases-marcha-humana-13012714 ER.

[6] Informal National stem Education network, “Efecto Piezoeléctrico:,” p. 1, 2013, [Online]. Available: http://www.nisenet.org/sites/default/files/catalog/uploads/spanish/12194/electricsqueeze_images_13nov13_sp.pdf.

[7] A. T. Pattnayak and G. Thanikachalam, “Please note that Cypress is an Infineon Technologies Company . The document following this cover page is marked as ‘ Cypress ’ document as this is the company that originally developed the product . Please note that Infineon will continue to offer the pro.”

[8] National Instruments, “Instrumentación Virtual con LabVIEW,” *Instrumentación Virtual*, p. 89, 2013, [Online]. Available: http://www.etitudela.com/entrenadorcomunicaciones/downloads/labviewcursodeinstrumentacion.pdf.

[9] I. T. de Queretaro., “Comunicaciones Digitales : Protocolos seriales (uC) ¿ Qué es la comunicación serial ?,” 2019.

[10] “Orígenes y evolución histórica de la Marcha Atlética,” 2019.

[11] H. Montaña Quintero, “Sistema de Captura de Movimiento Humano SCMH,” 2011.

[12] A. Forner Cordero, E. Ferrús, F. Matey González, and J. V. Hoyos Fuentes, “Medición de presiones en puntos anatómicos singulares mediante sensores individuales,” Rev. Biomecánica, vol. 20, pp. 31–35, 1998.

[13] S. A. Avella Escandón, “‘SWIMETRIX’ Sistema de sensores y adquisición de datos para movimientos de (en) nadadores.,” Pontificia Universidad Javeriana, 2011.

[14] J. S. Pico Tibasosa and E. A. Rey Pulido, “Diseño e implementación de una plataforma baropodométrica para medición de puntos de presión plantar en bipedestación con visualización en ordenador a partir de un sistema de adquisición,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.

[15] M. H. Valencia and J. H. Osorio, “Caracterización de variables cinemáticas de la marcha humana mediante un sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas: parámetros angulares de rodilla,” Rev. la Fac. Med., vol. 62, no. 1, pp. 71–79, 20

[16] I. Técnica, “T E C N O L O G Í A Sistema Biofoot / IBV,” 2012.

[17] E. Camargo C., Y. Garzón G., and V. A. Camacho P., “Sistema portátil de captura de movimiento para el análisis cinemático de la marcha humana,” *Rev. Tecnura*, vol. 16, no. 34, p. 67, 2012, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.4.a05.

[18] L. J. Alvarado, D. R. Leopoldo, and R. Huerta, “Propuesta de Sistema de Sensado Plantar,” 2018.

[19] L. H. Camargo, P. Riaño, and R. Vázquez, “Visualizacion de la presión plantar en software libre,” *CICIC 2011 - Conf. Iberoam. Complejidad, Inform. y Cibern. Memorias*, pp. 1–3, 2011.

[20] L. F. García Muriel, C. A. Dìaz, A. Torres, and R. A. Torres, “Sistema de plantillas instrumentadas ‘PIEZOMED’ destinadas a la valoración del calzado,” *IFMBE Proc.*, vol. 18, pp. 797–800, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-74471-9_185.

[21] C. Guerra, G. Montes, F. M. Pineda, and D. Benítez, “Diseño e Implementación de un Sistema de Baropodometría,” vol. 5, no. 1, p. 10, 2011, [Online]. Available: http://journal.espe.edu.ec/index.php/maskay/article/view/120/122.

[22] C. Lescano, R. Rodrigo, and S. Rodrigo, “Desarrollo de un sistema de registro dinámico de presiones plantares,” *Rev. Iberoam. Ing. mecánica*, vol. 19, no. 1, pp. 49–58, 2015.

[23] M. Mosqueira Ouréns and J. L. Saleta Canosa, “Cinemática y cinética del pie y su relación con el rendimiento y las lesiones en atletas de resistencia,” 2014.