

DISEÑO MECATRÓNICO DE UN PROTOTIPO DE PLANTILLA INTELIGENTE DE BAJO COSTE PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA PISADA DURANTE LA MARCHA

MECHATRONIC DESIGN OF A LOW-COST INTELLIGENT INSOLE PROTOTYPE FOR FOOTPRINT DIAGNOSIS DURING GAIT

Ing. Manuel A. Muñoz-Palomino, Ing. Aldair Ruano
Mag. Andrés Felipe Solis-Pino

Corporación Universitaria Comfacauca, Facultad de ingeniería, Grupo GISI.
Cl. 4 #Nº 8-30, Popayán, Cauca, Colombia.
E-mail: {manuelmunoz, aldairruano, asolis}@unicomfacauca.edu.co.

Resumen: Los trastornos del pie pueden afectar a la salud del ser humano, por lo que se han realizado diferentes esfuerzos para conocer la distribución de fuerzas en la planta del pie, para lograr el diagnóstico y tratamiento de diferentes patologías. Este artículo describe el desarrollo e implementación de una plantilla inteligente para el análisis de patologías del pie, utilizando elementos de diseño mecatrónico y metodologías de co-diseño. La propuesta se valida mediante un estudio de caso en el que usuarios y profesionales sanitarios utilizan la plantilla y la evalúan. Los resultados sugieren un prototipo funcional que apoya el diagnóstico de diferentes afecciones del pie a partir de la estimación de la presión plantar, suponiendo una alternativa de bajo coste, con elementos a mejorar como la salubridad y las características físicas. La propuesta desarrollada muestra potencial como producto de bajo costo; aunque se identifican algunas limitaciones relacionadas con la usabilidad y el dominio de aplicación.

Palabras clave: Plantilla inteligente, distribución presión plantar, diseño mecatrónico.

Abstract: Foot disorders can affect the health of the human being, therefore different efforts have been made to know the distribution of forces in the sole, to achieve the diagnosis and treatment of different pathologies. This article describes the development and implementation of an intelligent insole for the analysis of foot pathologies, using mechatronic design elements and co-design methodologies. The proposal is validated through the use of a case study in which users and healthcare professionals use the insole and evaluate it in context. The results suggest a functional and operable prototype that supports the diagnosis of different foot conditions from the estimation of plantar pressure, assuming a low-cost alternative, with elements to improve such as healthiness and physical characteristics. The developed proposal shows potential as a low-cost product, however, some limitations related to usability and application domain were identified.

Keywords: Intelligent insole, plantar pressure distribution, mechatronic design.

1. INTRODUCCIÓN

La bipedestación estática es el acto de soportar el peso del cuerpo en posición vertical, es una

actividad natural y necesaria que ofrece beneficios físicos y psicológicos (Rey *et al.*, 2018). Diversos estudios han demostrado que estar de pie ayuda a prevenir el desarrollo de úlceras, a mejorar la

función intestinal y vesical, la osteoporosis, las contracciones musculares y la circulación sanguínea, entre otros beneficios (Ragnarsson, 2008).

Las alteraciones en la fisonomía del pie pueden afectar la calidad de vida de las personas y, en consecuencia, a los beneficios de la bipedestación (Lafontaine *et al.*, 2021), por este motivo, se han diseñado sistemas de medición de la distribución de la presión plantar para diagnosticar patologías del pie como el pie plano, el pie valgo, el pie cavo y otras afecciones. En concreto, el pie plano es una patología que presenta una disminución del arco longitudinal o bóveda plantar y desviación del talón en valgo, provocando alteraciones en el pie y el tobillo, así como en otras estructuras más proximales, en forma de molestias, dolor, lesiones o disfunciones articulares, capsulares, ligamentosas o musculares, así como diversos síntomas derivados de la disminución de la eficiencia energética durante la marcha (McKearney *et al.*, 2019). El estudio de la distribución de la presión plantar juega un papel importante en la evaluación de la deformidad del pie, el seguimiento de los tratamientos protésicos, la evaluación funcional pre y postquirúrgica del pie, la medicina deportiva y la evaluación de las plantillas, entre otros factores importantes (Broström *et al.*, 2012).

En la actualidad, existen diversos métodos y dispositivos para el estudio y medición de las distribuciones de presión plantar como son las plataformas de presión (Rey *et al.*, 2018), la podobarografía (Herzen *et al.*, 2020), los podómetros (Harris *et al.*, 2018) y las plantillas instrumentadas (Leal-Junior *et al.*, 2019), entre otras opciones, que permiten el diagnóstico de las enfermedades mencionadas. Las diferentes dinámicas que ofrece la ingeniería en la actualidad permiten crear variedad de equipos de bajo costo que, a su vez, intentan satisfacer las necesidades de esta área de estudio. Para ello, se han utilizado metodologías como el diseño mecatrónico (Flores-Hernández *et al.*, 2017) para obtener productos funcionales con mejor sinergia que los desarrollados convencionalmente (Ji *et al.*, 2020).

En diversos estudios se han utilizado los sensores de fuerza o presión (FSR) como instrumento principal de detección de la presión plantar, estos permiten tomar datos, analizar magnitudes y sacar conclusiones durante el proceso de bipedestación. Este es el caso de Martínez *et al.* en (Martínez-Martí *et al.*, 2014), quienes desarrollaron un sistema inalámbrico de medición de presiones

plantares, empleando sensores para detectar las presiones durante la marcha. Asimismo, Arévalo y Sangumira (Arévalo Márquez y Sangurima Tenepaguay, 2020), expresan la importancia de la detección de variaciones y anomalías durante la marcha para la detección de úlceras en el pie diabético, utilizando una plantilla instrumentada que capta magnitudes como la presión plantar, el ángulo de la rosca y la temperatura del pie. Ahora bien, en el dominio deportivo, Huang (Huang *et al.*, 2021) indica la importancia de los pies en la biomecánica corporal y su relación con la salud de los seres humanos, por lo que emplean un sensor piezoresistivo con una estructura porosa y una placa de circuito de adquisición de datos, para monitorizar dinámicamente la presión plantar y mostrar los cambios de la misma en tiempo real, brindando una solución de monitorización de la presión biomecánica deportiva de bajo coste. Finalmente, Rathnayaka *et al.* en (Rathnayaka *et al.*, 2018) proponen el uso de este tipo de instrumentos de medición de la presión plantar para monitorizar y recoger información sobre la pisada en diferentes escenarios deportivos como la halterofilia, el atletismo o el salto.

Los estudios descritos se centran en la detección de alteraciones en la pisada para prevenir las lesiones que puedan producirse y afectar a usuarios de larga duración como deportistas, pacientes y personas mayores. Es por ello que se considera que el valor añadido de esta investigación es ampliar el área de conocimiento a través de un prototipo de bajo costo tomando elementos del diseño mecatrónico, con el fin de lograr la detección de la dinámica del pie y así apoyar a los profesionales en el diagnóstico de patologías del pie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de la distribución de la presión plantar es importante para prevenir lesiones que afectan la calidad de vida de las personas. Para solucionar este problema, se propone el desarrollo de una plantilla instrumentada que capte las magnitudes de presión y fuerza en diferentes zonas del pie, apoyando el diagnóstico de cualquier patología en esta zona. Para obtener un prototipo funcional que resuelva la problemática expuesta, se han tomado elementos del diseño mecatrónico (Flores-Hernández *et al.*, 2017) y de la metodología de co-diseño de hardware y software (Zeng *et al.*, 2019) para obtener un producto sinérgico que armonice las diferentes áreas de conocimiento requeridas (diseño electrónico, diseño 3D, programación,

linealización y caracterización de sensores). Finalmente, para la validación de los resultados en pacientes, se realizó un estudio de caso siguiendo algunas pautas reportadas en (Lin *et al.*, 2016). Puntualmente, en la ejecución de este instrumento de validación, un fisioterapeuta experto en patologías plantares analizó la contribución de la herramienta para el diagnóstico de este tipo de afecciones mediante el uso de encuestas de satisfacción, como se ha reportado en (Abdul Razak *et al.*, 2012). Ahora bien, entre los principales materiales utilizados en la construcción de la propuesta se encuentran LabVIEW para la interfaz gráfica, Matlab y PAST (Solis *et al.*, 2021) para el procesamiento de datos, SolidWorks para el Diseño Asistido por Computador (CAD), y Arduino como controlador del prototipo.

En la Figura 1, se expone un esquema genérico con las fases más importantes del diseño e implementación del prototipo propuesto.

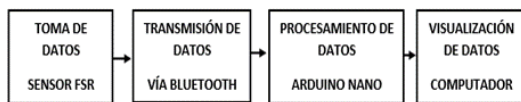


Fig. 1. Diagrama general del prototipo propuesto

2.1 Instrumentación de la plantilla inteligente propuesta

Determinar la viabilidad de su uso en este prototipo, entre ellos se analizó el material Velostat, los sensores de presión mini Bf350 y los sensores FSR 402. Durante el análisis se evaluaron aspectos como las características geométricas del sensor, el rango de medición, la cantidad de sensores a utilizar y la disponibilidad en el mercado. Lo anterior, limitado a la incomodidad del usuario, por lo que la usabilidad de este tipo de dispositivos juega un rol fundamental.

En el caso de los sensores de presión mini Bf350, se concluyó que tienen un buen rango de medición y disponibilidad en el mercado, pero se cuestionó su uso en el prototipo debido a su pequeño tamaño ya que esto requeriría el uso de un gran número de sensores para capturar los datos de las zonas de interés en el pie. Por otra parte, el Velostat es un material conductor que, aunque podría cubrir toda la zona del pie, la señal tendría que ajustarse manualmente, lo que supondría una pérdida de resolución y exactitud de las presiones detectadas. Finalmente, se consideró que el sensor más adecuado para el prototipo son los sensores FSR 402 ya que se pueden distribuir fácilmente por las

zonas del pie donde interesa captar las señales, tienen buena disponibilidad de adquisición en caso de que se desee replicar las mediciones, además, son susceptibles de reparaciones rápidas o cambios de plantilla en caso de que se requieran.

2.2 Diseño electrónico y diseño asistido por computadora

Utilizando la metodología de diseño mecatrónico (Y. Zeng *et al.*, 2019) en conjunto con la ingeniería concurrente, se decidió utilizar el diseño CAD para obtener una visión del prototipo final (Figura 2), además de permitir la simulación de las presiones sobre el material utilizado. El prototipo desarrollado tiene tres componentes principales: cajas de circuito y recepción de señales, además del prototipo de plantilla inteligente.

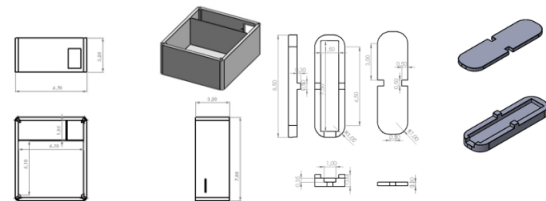


Fig. 2. Diagrama general del prototipo propuesto en software CAD

Los sensores FSR funcionan como dos capas de un material conductor que están separadas por otra capa de aire que al aplicar presión sobre ellas generan una señal (Lee y Son, 2021), estos sensores están ubicados en diferentes zonas del pie según (Naderi *et al.*, 2020), donde al momento de caminar se genera la mayor actividad en el pie, es así como se realiza la medición de magnitudes como la fuerza y la presión, convirtiendo así los cambios de resistencia eléctrica en señales que son procesadas por un microcontrolador Arduino Uno y luego enviadas a la computadora coordinada por el puerto serial. La adquisición de datos se realiza mediante la lectura de tensión analógica.

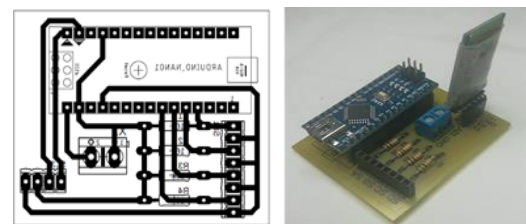


Fig. 3. Diseño eléctrico y electrónico del prototipo de plantilla inteligente

El prototipo cuenta entonces con 4 sensores FSR, cada uno de ellos está conectado a un divisor de voltaje que adecua la señal para trabajar, toda la información es procesada en el microcontrolador, y luego por medio de señales Bluetooth, los datos son transmitidos a una computadora donde pueden ser analizados a distancia y por el profesional de la salud (Figura 3).

2.3 Adaptación e implementación de los sensores FSR a la plantilla

En la propuesta, se utiliza una plantilla en la que cada sensor se sitúa en los lugares en los que el pie ejerce presión con frecuencia durante la pisada. Estas localizaciones se obtienen analizando imágenes podográficas que muestran la distribución de la presión de un pie sano y también la de un pie con patología de pie plano, pie cavo y pie valgo (Libotte, 2007) (Figura 4).

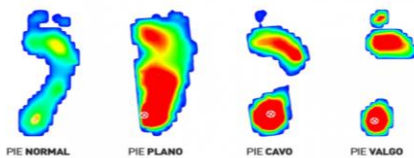


Fig. 4. Mediciones y estimaciones de las presiones plantares a partir de fotopodogramas

Se pudo observar que las zonas donde un pie normal hace presión, por lo que se procedió a colocar los sensores en la plantilla (Figura 5), asegurándose con velcro para mantenerlos sujetos. Las conexiones se hacen empleando cables que se colocan debajo de la plantilla, teniendo especial cuidado de no afectar a la comodidad del usuario.



Fig. 5. Distribución de los sensores en el prototipo de plantilla inteligente propuesto

2.4 Calibración de los sensores en la plantilla inteligente

El proceso de calibración de los sensores juega un papel fundamental en la correcta identificación de las presiones plantares durante la bipedestación.

Para ello, se tomaron diferentes muestras con cada sensor utilizando diferentes pesos entre 1 y 7 kilogramos, para comparar la fuerza aplicada sobre el sensor con el voltaje, la resistencia y la conductancia, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 1: Valores de voltajes entregados para la linealización de la plantilla inteligente

Masa (Kg)	Fuerza (N)	Voltaje (V)			
		A	B	C	D
1	9.8	4.01	3.53	3.49	3.48
2	19.6	4.2	4.12	4.10	4.10
3	29.4	4.29	4.26	4.15	4.28
4	32.9	4.34	4.31	4.23	4.29
5	49	4.35	4.33	4.25	4.31
6	58.8	4.36	4.35	4.27	4.34
7	68.6	4.37	4.37	4.28	4.36

Tabla 2: Valores de resistencia entregados para la linealización de la plantilla inteligente

Masa (Kg)	Fuerza (N)	Resistencia (Ω)			
		A	B	C	D
1	9.8	1240	2900	3055	3027
2	19.6	740	934	1230	1230
3	29.4	552	611	919	547
4	32.9	418	489	765	489
5	49	386	424	638	426
6	58.8	369	388	589	383
7	68.6	352	358	567	349

Tabla 3: Valores de conductancia entregados para la linealización de la plantilla inteligente

Masa (Kg)	Fuerza (N)	Conductancia (μS)			
		A	B	C	D
1	9.8	806.5	344.8	327.3	325.6
2	19.6	1351.4	1070.7	813.0	813.0
3	29.4	1811.6	1636.7	1088.1	1797.4
4	32.9	2392.3	2045.0	1307.2	1811.6
5	49	2590.7	2358.5	1567.4	2045.0
6	58.8	2710.0	2577.3	1697.8	2761.7
7	68.6	2840.9	2793.3	1763.7	2828.9

Utilizando el Matlab y PAST se realizaron cálculos de regresión logarítmica comparando el voltaje de salida con la fuerza aplicada en la calibración, obteniendo gráficos que describen el comportamiento de cada sensor en función de la fuerza aplicada. Por efectos de extensión del artículo, se realiza una demostración de la linealización del sensor C del prototipo de la plantilla inteligente propuesta. A continuación, se

puede apreciar el modelo estadístico (Ecuación 1) de ajuste de curvas logarítmicas:

$$y = a + b \ln(x) \quad (1)$$

Para encontrar b se aplicó la siguiente expresión matemática.

$$b = \frac{n(\sum x' y) - (\sum x')(\sum y)}{n \sum (x')^2 - (\sum x')^2} \quad (2)$$

Donde n = es el número de datos, \bar{y} y \bar{x} son las medias. La Tabla 4 refleja los datos encontrados para el sensor C.

Tabla 4: Datos de regresión logarítmica sensor C

Fuerza(x)	Voltaje (y)	$x' = \ln(x)$	$x' * y$	x'^2
9,8	3,49	2,28	7,97	5,21
19,6	4,1	2,98	12,20	8,85
29,4	4,15	3,38	14,03	11,43
39,2	4,23	3,67	15,52	13,46
49	4,25	3,89	16,54	15,15
58,8	4,27	4,07	17,40	16,60
68,6	4,28	4,23	18,10	17,88
Σ sumatorias	28,77	24,50	101,75	88,58

$$b = \frac{7(101,75) - (24,50)(28,77)}{7(24,50) - (24,50)^2} = 0.37179$$

$$a = 4,11 - 0.3718(3,5) = 2.808 \quad (3)$$

$$y = b \ln(x) + a$$

Finalmente, el conjunto de Ecuaciones 3 refleja los datos de regresión logarítmicas encontrados.

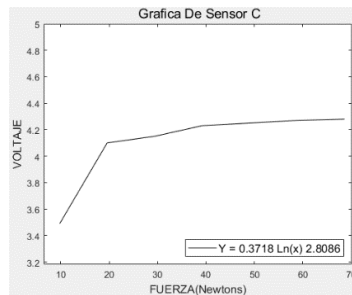


Fig. 6. Curva de regresión que refleja el comportamiento del sensor C

La gráfica generada con MATLAB (Figura 6) muestra el comportamiento logarítmico y también la ecuación de la recta comprobando la demostración planteada con anterioridad.

2.5 Interfaz visual para la plantilla inteligente

La interfaz gráfica es una parte fundamental del prototipo, ya que es aquí donde el profesional de la salud puede determinar el comportamiento de la dinámica del pie del paciente durante el diagnóstico.

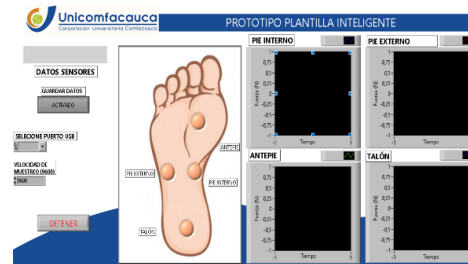


Fig. 7. Interfaz visual que observa el profesional de la salud

Los paneles muestran los valores numéricos de la fuerza en newtons que se obtienen al accionar los sensores, además de tener la opción de habilitar o deshabilitar el guardado de datos para ser exportados automáticamente. Asimismo, la Figura 7 muestra la ubicación de los sensores, y su nivel de brillo refleja la presión que están recibiendo en tiempo real. Por último, se muestra la reacción en tiempo real de cada sensor mediante el trazado de gráficos de fuerza (N) frente al tiempo (S).

2.6 Interfaz de análisis de datos

La interfaz de análisis de datos (Figura 8) permite tomar la información de la presión ejercida por el pie, previamente exportada para que el profesional pueda observar e interpretar las diferentes variaciones de la magnitud física en megapascuales.

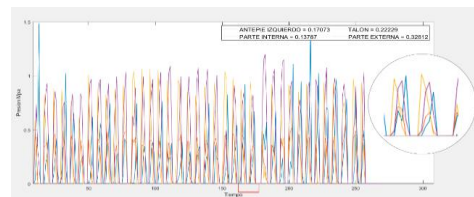


Fig. 8. gráficas que muestran la actividad total del pie durante la pisada

Estas gráficas se pueden manipular de tal forma que el profesional de la salud pueda ampliar o disminuir el tamaño para tener un mayor rango de visión de los datos expuestos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El principal resultado de esta investigación es un prototipo funcional de una plantilla inteligente (Figura 9) que permite determinar cuáles son las presiones plantares en diferentes zonas del pie, sirviendo de apoyo para que los profesionales de la salud tengan más elementos para diagnosticar correctamente las diferentes patologías que pueden afectar a este tipo de extremidades. Los resultados demuestran que es un prototipo viable que fue probado a través de un estudio de caso, permitiendo determinar que el diseño mecatrónico ayudó a integrar las diferentes áreas del conocimiento y la metodología de co-diseño es implementable en este prototipo propuesto. Asimismo, identificaron algunas limitaciones que pueden ser corregidas con nuevas iteraciones de la propuesta.



Fig. 9. Ejemplo de implementación del prototipo de plantilla inteligente en el estudio de caso

Para evaluar la validez del prototipo, se realizó un estudio de caso en el que se probó a 10 personas con la plantilla inteligente y en el que un profesional de la salud evaluó el prototipo y su usabilidad. A continuación, los sujetos de la prueba recibieron una encuesta de satisfacción para evaluar aspectos como la seguridad, la higiene, la comodidad y la funcionalidad de la propuesta. Las pruebas se realizaron con personas al azar que no habían sido diagnosticadas con patologías del pie; durante la prueba, tuvieron que realizar un recorrido de 10 metros utilizando el prototipo durante 5 minutos. Algunos de los resultados de las pruebas pueden observarse en la siguiente figura.

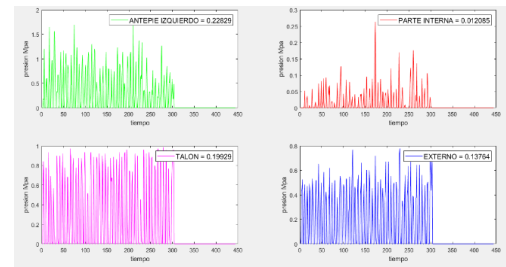


Fig. 10. Pruebas de presión plantar realizadas a los pacientes analizados

Los resultados promedio de los encuestados se exponen empleando un histograma (Figura 11), el cual indica la existencia de una tendencia asimétrica hacia la derecha en los rubros con mejores calificaciones, ordenando la puntuación de mayor a menor frecuencia, en primer lugar, se tiene las calificaciones 4 y 5 con un porcentaje de 46%, y para la nota 3 con 9%, cabe destacar que las opciones de respuesta para 1 malo y 2 regular no fueron marcadas. Lo anterior refleja que en general el prototipo tuvo una buena aceptación entre los encuestados en los rubros evaluados (comodidad, higiene, funcionalidad, entre otros).

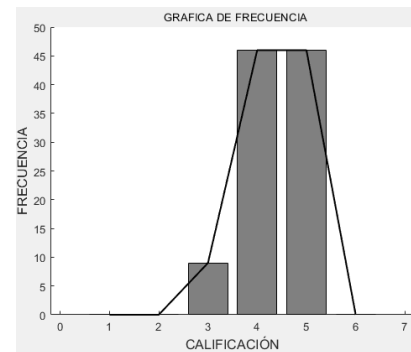


Fig. 11. Histograma resultante de las evaluaciones de los pacientes que utilizaron el prototipo

Un análisis más detallado de los ítems evaluados se realiza empleando un gráfico de medias (Figura 12), donde de acuerdo a los criterios evaluados se obtuvieron las siguientes percepciones: los ítems con la media más alta fue confort con 4,60, higiene con 4,44 y seguridad con 4,44. Por otro lado, las opciones con la media más baja fueron 4,20 correspondientes a funcionalidad y calidad, con una desviación estándar de 0,78 y 0,63 respectivamente. Los ítems evaluados por los encuestados con mayor desviación estándar son la funcionalidad y la seguridad, lo que indica que la percepción de los encuestados para estos rubros no es la mejor, por lo que el prototipo debería centrarse en mejorar este aspecto para obtener un

producto funcional con mayor aceptación entre el público objetivo. Por el contrario, los ítems de adaptabilidad y comodidad muestran una alta aceptación entre los usuarios de la plantilla, lo que refleja que son aspectos positivos del prototipo.

En cuanto a la opinión del profesional de la salud, se puede indicar que manifestó que es un prototipo funcional y viable, que ayuda a detectar patologías del pie permitiendo determinar de acuerdo a los gráficos y en base a sus conocimientos posibles enfermedades plantares, logrando ser un apoyo más para el diagnóstico de patologías. Por otro lado, menciona que es necesario mejorar elementos como la higiene de la plantilla ya que el uso de esta por diferentes personas puede ocasionar problemas relacionados con bacterias u otras afecciones en el pie.

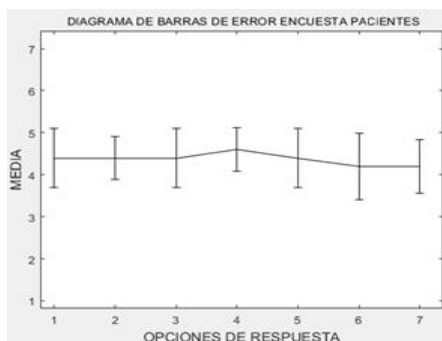


Fig. 12. Barras de error de la media y la desviación estándar de las evaluaciones realizadas

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un prototipo de plantilla inteligente compuesta por diferentes sensores de presión ubicados en distintas zonas del pie, que permite estimar magnitudes como la fuerza y la presión, logrando la captura de estos datos de forma inalámbrica para que posteriormente puedan ser procesados y mostrados con una interfaz a un profesional de la salud para su interpretación. Los resultados obtenidos sugieren que el prototipo cumple con la función de apoyar el diagnóstico de la pisada durante la marcha mostrando las variaciones de presión que se producen en las 4 zonas del pie donde se dispusieron, pero existe una limitación en cuanto a la sensación de seguridad y funcionalidad de la plantilla inteligente, por lo que son elementos en los que se debe trabajar para futuras iteraciones.

Los sensores FSR pueden constituirse como elementos de detección de presión precisos en este

contexto específico, logrando un buen desempeño y excelente durabilidad, además de no generar incomodidad en los usuarios, siendo estos una opción viable para utilizarse en este dominio de aplicación.

Finalmente, entre los principales trabajos futuros se encuentra el uso de un mayor número de sensores en diferentes zonas del pie, lo que proporcionaría un mayor rango de datos sobre la dinámica de la pisada, permitiendo una mayor fiabilidad en el apoyo al diagnóstico de los profesionales.

REFERENCIAS

- Abdul Razak, A. H., Zayegh, A., Begg, R. K., & Wahab, Y. (2012). Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review. *Sensors*, 12(7), 9884–9912. <https://doi.org/10.3390/s120709884>
- Arévalo Márquez, J. D., & Sangurima Tenepaguay, C. X. (2020). Prototipo de plantilla instrumentada para la adquisición de presión plantar y parámetros de marcha orientada a la prevención de úlceras en pie diabético [B.S. thesis].
- Broström, E. W., Esbjörnsson, A.-C., von Heideken, J., & Iversen, M. D. (2012). Gait deviations in individuals with inflammatory joint diseases and osteoarthritis and the usage of three-dimensional gait analysis. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 26(3), 409–422. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2012.05.007>
- Flores-Hernández, D. A., Palomino-Resendiz, S., Lozada-Castillo, N., Luviano-Juárez, A., & Chairez, I. (2017). Mechatronic design and implementation of a two axes sun tracking photovoltaic system driven by a robotic sensor. *Mechatronics*, 47, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.09.014>
- Harris, T., Kerry, S. M., Limb, E. S., Furness, C., Wahlich, C., Victor, C. R., Iliffe, S., Whincup, P. H., Ussher, M., Ekelund, U., Fox-Rushby, J., Ibison, J., DeWilde, S., McKay, C., & Cook, D. G. (2018). Physical activity levels in adults and older adults 3–4 years after pedometer-based walking interventions: Long-term follow-up of participants from two randomised controlled trials in UK primary care. *PLOS Medicine*, 15(3), e1002526. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002526>

- Herzen, G. I., Lazarev, I. A., & Gorban, D. A. (2020). Parameters of podobarography after hip total endoprosthesis at different surgical accesses. *Journal of Education, Health and Sport*, 10(1), 70–78. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2020.10.01.008>
- Huang, H., Wang, Z., Zhao, W., Zhu, Z., Lin, W., & Peng, Z. (2021). A Facile Low-Cost Wireless Self-Powered Footwear System for Monitoring Plantar Pressure. 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 1096–1101. <https://doi.org/10.1109/NEMS51815.2021.9451304>
- Ji, J., Qi, Y., Liu, J., & Lee, K.-M. (2020). Reconfigurable Impedance Sensing System for Early Rehabilitation following Stroke Recovery. 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 1131–1136. <https://doi.org/10.1109/AIM43001.2020.9158969>
- Lafontaine, V., Lapointe, P., Bouchard, K., Gagnon, J.-M., Dallaire, M., Gaboury, S., da Silva, R. A., & Beaulieu, L.-D. (2021). An open vibration and pressure platform for fall prevention with a reinforcement learning agent. *Personal and Ubiquitous Computing*, 25(1), 7–19. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01416-0>
- Leal-Junior, A. G., Díaz, C. R., Marques, C., Pontes, M. J., & Frizzera, A. (2019). 3D-printed POF insole: Development and applications of a low-cost, highly customizable device for plantar pressure and ground reaction forces monitoring. *Optics & Laser Technology*, 116, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.035>
- Lee, S. H., & Son, J. (2021). Development of a Safety Management System Tracking the Weight of Heavy Objects Carried by Construction Workers Using FSR Sensors. *Applied Sciences*, 11(4), 1378. <https://doi.org/10.3390/app11041378>
- Libotte, M. (2007). Análisis dinámico de las presiones plantares. *EMC - Podología*, 9(3), 1–7. [https://doi.org/10.1016/S1762-827X\(07\)70706-X](https://doi.org/10.1016/S1762-827X(07)70706-X)
- Lin, F., Wang, A., Zhuang, Y., Tomita, M. R., & Xu, W. (2016). Smart Insole: A Wearable Sensor Device for Unobtrusive Gait Monitoring in Daily Life. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(6), 2281–2291. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2585643>
- Martínez-Martí, F., Martínez-García, M. S., García-Díaz, S. G., García-Jiménez, J., Palma, A. J., & Carvajal, M. A. (2014). Embedded sensor insole for wireless measurement of gait parameters. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 37(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s13246-013-0236-7>
- McKearney, D. A., Stender, C. J., Cook, B. K., Moore, E. S., Gunnell, L. M., Monier, B. C., Sangeorzan, B. J., & Ledoux, W. R. (2019). Altered Range of Motion and Plantar Pressure in Anterior and Posterior Malaligned Total Ankle Arthroplasty: A Cadaveric Gait Study. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 101(18), e93. <https://doi.org/10.2106/JBJS.18.00867>
- Naderi, A., Baloochi, R., Rostami, K. D., Fourchet, F., & Degens, H. (2020). Obesity and foot muscle strength are associated with high dynamic plantar pressure during running. *The Foot*, 44, 101683. <https://doi.org/10.1016/j.foot.2020.101683>
- Ragnarsson, K. T. (2008). Functional electrical stimulation after spinal cord injury: Current use, therapeutic effects and future directions. *Spinal Cord*, 46(4), 255–274. <https://doi.org/10.1038/sj.sc.3102091>
- Rathnayaka, A. M. A. I., Perera, W. N. D., Savindu, H. P., Madarasingha, K. C. M., Ranasinghe, S. P., Thuduwege, H. G. T. V., Kulathilaka, A. U., Silva, P., Jayasinghe, S., Kahaduwa, K. T. D., & De Silva, A. C. (2018). A Customized System to Assess Foot Plantar Pressure: A Case Study on Calloused and Normal Feet. 2018 IEEE Region Ten Symposium (Tensymp), 202–206. <https://doi.org/10.1109/TENCONSpring.2018.8691898>
- Rey, E. A., Pico, J. S., & Luengas, L. A. (2018). Plataforma baropodométrica PIPLAB. *Revista Vínculos*, 15(2), 139–149. <https://doi.org/10.14483/2322939X.13861>
- Solis, A. F., Revelo luna, D. A., Campo Ceballos, D. A., & Gaviria López, C. A. (2021). Correlación del contenido de clorofila foliar de la especie Coffea arabica con índices espectrales en imágenes. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 51–68. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1536>

Zeng, Y., Xing, L., Zhang, Q., & Jia, X. (2019). An analytical method for reliability analysis of hardware-software co-design system. *Quality and Reliability Engineering International*, 35(1), 165–178. <https://doi.org/10.1002/qre.2389>