

Piezoelectric Energy Generated by foot strike and biomechanical parameters associated with foot health: a pilot study with ergonomic validation

Autores

Ulloa Rubio, Bertha¹; Celis Velásquez, Nicole Shirley¹; Corales Aguilar, Evi Eliana¹; Abanto Zavaleta, Angel Adrian¹; Accha Toledo, Henry Denis¹; Llanos Huaman, Gustavo Enrique¹; Araujo Huamanchay, Jastin Lizbeth¹

Afiliación

¹Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú

Correos electrónicos

BULLOA@ucv.edu.pe; ncelisv@ucvvirtual.edu.pe; evcoralesag@ucvvirtual.edu.pe; anabantoza@ucvvirtual.edu.pe; haccha@ucvvirtual.edu.pe; jlaraujoa@ucvvirtual.edu.pe; gellanosl@ucvvirtual.edu.pe

Abstract — *The objective evaluation of foot function and the development of sustainable technologies are significant challenges in current biomedical engineering. In this context, piezoelectricity allows the transformation of mechanical energy generated during human gait into electrical energy, simultaneously integrating biomechanical analysis and micro-energy generation into a single system. This research was conducted to study the relationship between biomechanical measurements of the footprint and the voltage obtained from the piezoelectric system, and to validate the ergonomics of the piezoelectric tiles. The research was implemented as a pilot prototype with 100 university students, recording the time it took to place the foot on the tile and the voltage generated. The results were then obtained, yielding a correlation of $r = 0.82$ with a p -value < 0.001 , indicating a strong correlation and high significance in the biomechanical system's response to the electrical response. The instrument test also determined a reliability of $ICC = 0.88$ and a CV of 10%, demonstrating an adequate response with no variations during operation. In conclusion, piezoelectric tiles constitute a timely, innovative, viable, accessible, and sustainable alternative for functional foot assessment, as well as low-power energy generation, with the potential for future integration into intelligent systems. It is recommended to expand the study to include longitudinal scenarios and diverse populations to solidify its large-scale applicability.*

Keywords— *piezoelectric energy, gait biomechanics, foot health, ergonomic validation, sustainable technology.*

La energía piezoeléctrica generada por la pisada y parámetros biomecánicos asociados a la salud del pie: estudio piloto con validación ergonómica

Resumen– *La evaluación objetiva de la funcionalidad del pie y el desarrollo de tecnologías sostenibles constituyen desafíos relevantes en la ingeniería biomédica actual. En este contexto, la piezoelectricidad permite transformar la energía mecánica generada durante la marcha humana en energía eléctrica, integrando simultáneamente el análisis biomecánico y la microgeneración energética en un mismo sistema. La investigación se desarrolló con el objetivo de estudiar la relación entre parámetros que son medidas de biomecánicos del vestigio de la huella al pisar y el voltaje obtenido a partir del equipo sistema piezoeléctrico y se validó la ergonomía de las baldosas piezoeléctricas. La implementación de la investigación fue un prototipo a nivel de piloto donde participaron 100 estudiantes de nivel universitario se registró el tiempo de colocar el pie en la baldosa y el voltaje que generó. Luego se obtuvo los resultados y se obtuvo una correlación de $r = 0.82$ con una probabilidad $p < 0.001$ indica que si existe correlación fuerte y significancia alta respuesta del sistema biomecánico sobre la eléctrica también se determinó la prueba del instrumento con una confiabilidad de $ICC = 0.88$ y con $CV 10\%$ fue una respuesta adecuada sin variaciones cuando está en marcha. Obtuvimos como conclusión las baldosas piezoeléctricas constituyen. Se concluyó que las baldosas piezoeléctricas generan alternativa oportuna innovadora, viable, accesible y sostenible con la valoración funcional del pie, así como la generación de energía de baja potencia, pero con la viabilidad en lo sucesivo la composición de sistemas inteligentes. Se recomienda ampliar el estudio en escenarios longitudinales y poblaciones diversas para consolidar su aplicabilidad a gran escala.*

Palabras clave– *energía piezoeléctrica, biomecánica de la marcha, salud del pie, validación ergonómica, tecnología sostenible.*

I. INTRODUCCIÓN

La evaluación objetiva de la funcionalidad del pie constituye un área de interés prioritario en la ingeniería biomédica, la biomecánica y las ciencias de la salud, debido a su estrecha relación con trastornos musculoesqueléticos, alteraciones posturales, riesgo de caídas y deterioro funcional en diversas poblaciones. El pie es el principal mecanismo biomecánico entre el cuerpo humano y el entorno, por lo que las variaciones en el modo de apoyo y en la distribución de cargas plantares alteran considerablemente la eficiencia de la locomoción y por consiguiente la calidad de vida [1], [2].

En esta línea de pensamiento, la cuantificación de los parámetros funcionales como la presión plantar y el tiempo de contacto es de gran importancia para la identificación precoz de alteraciones funcionales del pie. Sin embargo, los sistemas tradicionales de análisis biomecánico tienen importantes limitaciones ligadas a su dispendio económico, su dificultad

para ser explotados y su escasa disponibilidad en los entornos clínicos y comunitarios, lo cual limita su alcance a los escenarios de salud pública [3], [4].

Al mismo tiempo, el avance de las tecnologías sostenibles ha motivado la investigación de soluciones capaces de sacar partido a fuentes de energía no convencionales. En este marco la recolección de energía a partir de la acción del cuerpo humano es una alternativa para poder alimentar dispositivos de baja potencia, principalmente en sistemas autónomos de control biomédico [5], [6].

En este sentido, la piezoelectricidad puede ser considerada una tecnología prometedora, al posibilitar la conversión directa de la energía mecánica generada por la pisada humana en energía eléctrica. Esto permite que se lleve a cabo la evaluación biomecánica y la microgeneración energética a través de una misma tecnología. Sin embargo, la evidencia experimental que respalde el uso de la piezoelectricidad en contextos de salud desde una perspectiva ergonómica y funcional es aún escasa, especialmente en estudios que se centraban en analizar directamente la relación entre los parámetros biomecánicos del apoyo plantar y la respuesta eléctrica generada [7], [8].

En este orden de ideas, las baldosas piezoeléctricas suponen una alternativa novedosa para la captura de manera simultánea de las variables biomecánicas y eléctricas en la marcha humana, ayudando así a la creación de instrumentos que aumentarán para la evaluación funcional del pie y de sistemas sostenibles de generación energética distribuida. Ahora bien, su aplicación requiere de procesos exigentes de validación ergonómica que aseguren las condiciones precisas en cuanto a estabilidad, confort y confiabilidad durante la interacción pie- suelo [9].

Además, la capacidad de esta tecnología va más allá del espectro experimental y se encuentra proyectada también en sistemas inteligentes de control biomecánico y en estructuras urbanas sostenibles, de acuerdo con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7: garantizar el acceso de todos a servicios de energía asequible y moderna [10].

Para este contexto específico, el presente proyecto piloto se enmarca en la exploración de la conexión entre el tiempo de contacto del pie en la superficie y el voltaje de un sistema de baldosas piezoeléctricas en un marco que incluye la evaluación biomecánica de la impresión plantar y la microgeneración de energía bajo un enfoque que ofrece el tratamiento de la validación ergonómica. Dicha visión multidisciplinar permitiría contribuir con evidencias experimentales con respecto a la relación entre las variables

biomecánicas y eléctricas en tiempo real, relación que se encuentra todavía muy limitada en la literatura al uso.

Hipótesis de investigación: Existe una relación directa y estadísticamente significativa entre el tiempo de contacto del pie con la superficie durante la marcha y el voltaje generado por un sistema de baldosas piezoeléctricas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Diseño del estudio

Se llevó a cabo un estudio piloto de carácter cuantitativo, mediante un diseño observacional, analítico y transversal, dirigido a comprobar la relación entre las variables biomecánicas del apoyo plantar y el voltaje obtenido mediante el sistema de baldosas piezoeléctricas durante el proceso de marcha humana. El carácter piloto del estudio permitió comprobar, únicamente de forma preliminar, tanto el desempeño funcional y ergonómico del sistema propuesto como el de su viabilidad en aplicaciones de evaluación biomecánica y de microgeneración. Las medidas se manejaron en un ambiente controlado, con condiciones estandarizadas y un protocolo de marcha diseñado para intentar reducir la variabilidad experimental y la reproductibilidad de las medidas.

B. Población y tamaño muestral

La muestra objeto de este estudio estuvo constituida por 100 adultos jóvenes con edades comprendidas entre (18-24 años), pertenecientes a la comunidad universitaria, seleccionados a través de un muestreo no probabilístico por conveniencia. Los participantes de la muestra fueron de ambas sexos, eran aparentemente sanos, con capacidad funcional para la marcha independiente y sin un diagnóstico previo de patologías del pie o alteraciones evidentes del patrón de marcha.

La muestra se calculó como adecuada para estudios correlacionales en ese grado de análisis, dado que permite detectar asociaciones de magnitud entre moderada a alta ($r \geq 0.30$) con un nivel de confianza del 95% y una potencia estadística por encima del 80%.

Los criterios de inclusión estimados fueron la ausencia de patologías musculoesqueléticas agudas y la capacidad para realizar una pisada autónoma sin asistencia. Se excluyeron participantes con antecedentes de cirugías recientes en miembros inferiores, trastornos neurológicos severos, uso de dispositivos ortopédicos o cualquier condición que pudiera alterar el patrón normal de la pisada.

Todos los participantes firmaron un consentimiento informado previo a su inclusión en el estudio, respetándose en todo momento los principios éticos de voluntariedad, confidencialidad y anonimato, de acuerdo con las normas éticas para investigaciones con seres humanos. Las características generales de los participantes incluidos en el estudio se presentan en la Tabla I.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MUESTRA (N = 100)

Característica	n (%) / Media $\pm$ DE ^a
Edad (años)	21.3 $\pm$ 1.8
Grupo etario	
18–20 años	42 (42 %)
21–22 años	36 (36 %)
23–24 años	22 (22 %)
Sexo	
Masculino	48 (48 %)
Femenino	52 (52 %)
Índice de masa corporal (kg/m²)	22.4 $\pm$ 2.1

^aNota: Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar para variables cuantitativas y como frecuencia absoluta y relativa para variables categóricas.

C. Descripción del sistema piezoeléctrico

El sistema experimental estuvo constituido por un conjunto de baldosas piezoeléctricas diseñadas para el registro simultáneo de variables biomecánicas y eléctricas durante la marcha humana. Cada baldosa incorporó módulos piezoeléctricos de tipo PZT (zirconato-titanato de plomo, $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$), material cerámico ampliamente utilizado en aplicaciones biomédicas e industriales debido a su elevada sensibilidad piezoeléctrica y estabilidad mecánica.

Los módulos PZT convierten la energía mecánica generada durante la pisada humana en señales eléctricas proporcionales a la deformación aplicada. El voltaje generado fue conducido hacia un circuito de acondicionamiento eléctrico y posteriormente registrado mediante un sistema de adquisición de datos para su análisis cuantitativo.

El sistema incluyó un circuito de acondicionamiento compuesto por un rectificador de onda completa, un filtro pasivo RC para estabilización de señal y un módulo de almacenamiento basado en capacitores. La señal eléctrica fue posteriormente digitalizada mediante un sistema de adquisición de datos con conversión analógica-digital (ADC), permitiendo su procesamiento y análisis cuantitativo. Esta arquitectura permitió mejorar la calidad de la señal, reducir pérdidas energéticas y garantizar la estabilidad de las mediciones. Esta configuración es consistente con arquitecturas utilizadas en sistemas de recolección energética de baja potencia reportados en la literatura reciente[11].

La Fig. 1 muestra el montaje experimental completo empleado para la adquisición simultánea de señales biomecánicas y eléctricas durante la marcha humana.

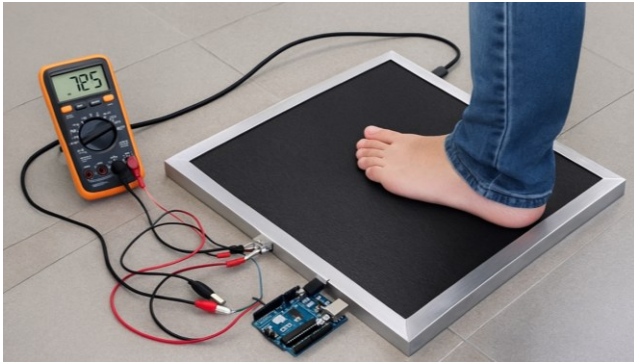


Fig. 1 Montaje experimental empleado para la adquisición de señales biomecánicas y eléctricas.

La configuración general del sistema experimental y la disposición de sus componentes se ilustran en la Fig. 2.

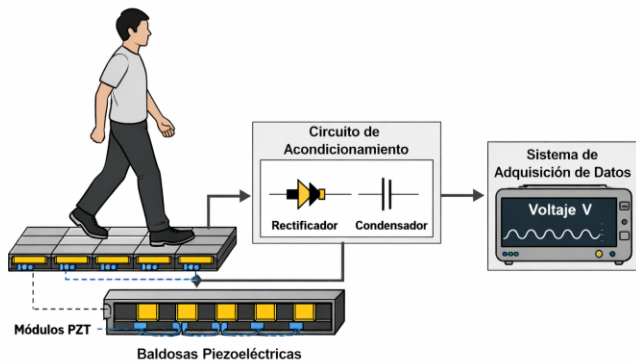


Fig. 2 Esquema del sistema de baldosas piezoeléctricas para la evaluación biomecánica y generación de energía durante el vestigio.

D. Construcción de la baldosa piezoeléctrica

Se diseñó una estructura multicapa orientada a garantizar una adecuada transferencia de carga, estabilidad mecánica y protección del sistema durante la interacción pie-superficie.

La base estructural fue elaborada con un material polimérico rígido (por ejemplo, acrílico o policarbonato), proporcionando soporte mecánico y aislamiento eléctrico. Sobre esta base se dispusieron los módulos piezoeléctricos tipo PZT en configuración uniforme, optimizando la captación de deformaciones mecánicas durante la pisada.

Los módulos piezoeléctricos se conectaron en una configuración serie-paralela, con el objetivo de aumentar la tensión de salida mientras mantiene el sistema estable. La capa superior estaba hecha de una superficie flexible y antideslizante (como caucho o elastómero), diseñada para extender el peso de la planta de manera uniforme y asegurar condiciones cómodas durante el funcionamiento.

El diseño de la baldosa tuvo en cuenta la resistencia mecánica, el confort del usuario y la reproducibilidad experimental, lo que permite su uso seguro en las evaluaciones biomecánicas, como se muestra en la Fig. 3. También se incluyeron criterios de optimización estructural diseñados para maximizar la transferencia de energía mecánica a módulos piezoeléctricos.

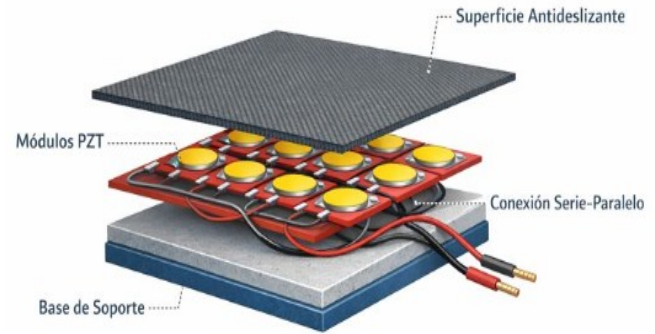


Fig. 3 Configuración interna de la baldosa piezoeléctrica: se detalla el chasis de soporte, el esquema de montaje de los elementos PZT y la interfaz de contacto para la planta del pie.

Asimismo, la configuración geométrica y la disposición de los módulos fueron definidas considerando criterios de distribución de carga plantar y eficiencia en la conversión de energía mecánica a energía eléctrica

E. Variables e instrumentos

Las variables del estudio fueron clasificadas en términos biomecánicos y eléctricos. La variable biomecánica principal fue el tiempo de contacto del pie con la superficie (s), mientras que la variable eléctrica principal fue el voltaje eficaz (RMS) generado por el sistema piezoeléctrico (V), ambas registradas de manera continua.

El voltaje registrado corresponde al valor eficaz (RMS) de la señal generada durante cada evento de pisada. La resistencia del circuito (R) se mantuvo constante durante todos los ensayos experimentales. La energía eléctrica generada fue estimada a partir del voltaje eficaz registrado y del tiempo de contacto del pie con la superficie, de acuerdo con la expresión:

$$E = (V^2 / R) \cdot t_c \quad (1)$$

donde E representa la energía eléctrica generada (J), V el voltaje eficaz (V), R la resistencia del circuito (Ω) y t_c el tiempo de contacto del pie con la superficie (s).

Los instrumentos empleados incluyeron baldosas piezoeléctricas con módulos PZT, un sistema de adquisición de datos para el registro del voltaje generado y un protocolo estandarizado de vestigio para el control de las condiciones experimentales.

F. Procedimiento experimental

Cada participante realizó el recorrido sobre el sistema de baldosas piezoeléctricas siguiendo un protocolo de marcha estandarizado, manteniendo una velocidad de marcha autoseleccionada y constante y un patrón de caminata natural. Se realizaron cinco repeticiones en el sistema, que mantuvo una marcha con una velocidad constante controlada de manera estandarizada. Las mediciones se llevaron a cabo en un entorno controlado donde se minimizaban las influencias externas que pudieran provocar variabilidad de los datos. Antes de empezar a registrar, se dieron instrucciones a los

participantes de forma clara y estandarizada para intentar reducir la influenciabilidad que podía tener la ejecución del vestigio. En la Fig. 4 se presenta de forma esquemática el ciclo de marcha que se ha considerado para interpretar los picos eléctricos generados por los módulos PZT en las diferentes fases del apoyo plantar.

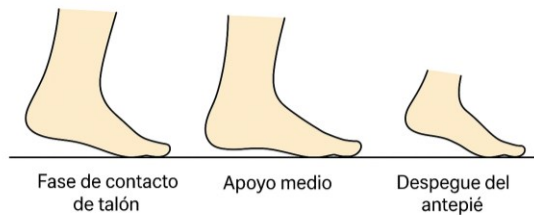


Fig. 4 Representación del ciclo de marcha utilizado para interpretar los picos eléctricos generados por el PZT.

Se realizaron múltiples repeticiones por participante con el fin de asegurar la consistencia de las mediciones y minimizar el efecto de valores atípicos. La captura de las variables biomecánicas y eléctricas se realizó en tiempo real durante los ensayos, lo que facilitó el posterior análisis de correlación entre ambos conjuntos de datos.

G. Análisis estadístico

Se llevó a cabo el análisis y procesamiento de los datos con software estadístico especializado. Inicialmente, se aplicó estadística descriptiva, calculándose medidas de tendencia central (media) y dispersión (desviación estándar), así como intervalos de confianza al 95 %.

La normalidad de las variables cuantitativas fue evaluada mediante la prueba de Shapiro–Wilk, verificándose una distribución aproximadamente normal ($p > 0.05$), lo que justificó el uso de pruebas paramétricas. Posteriormente, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la fuerza y dirección de la relación entre el tiempo de contacto del pie con la superficie y el voltaje generado por el sistema piezoeléctrico.

Se asumió un nivel de significancia estadística de $\alpha = 0.05$. El uso del coeficiente de correlación de Pearson fue justificado debido a la distribución normal de las variables y a la naturaleza continua de los datos analizados, y se verificó el cumplimiento de los supuestos de linealidad y homocedasticidad.

Adicionalmente, se aplicó un modelo de regresión lineal simple con el objetivo de determinar la capacidad predictiva del tiempo de contacto sobre el voltaje generado por el sistema piezoeléctrico. Se reportaron el coeficiente de regresión, el coeficiente de determinación (R^2) y el nivel de significancia estadística ($p < 0.05$). Se efectuó un análisis de residuos con el objetivo de comprobar la idoneidad del modelo y descartar la existencia de heterocedasticidad o patrones sistemáticos.

El software IBM SPSS Statistics versión 29.0 (IBM Corp., Armonk, NY, EE. UU.) se utilizó para llevar a cabo el análisis estadístico.

H. Evaluación de la fiabilidad y la capacidad de repetición del sistema

Se llevaron a cabo mediciones sucesivas del voltaje producido en pasos consecutivos de un subgrupo aleatorio de participantes para evaluar la estabilidad y confiabilidad del sistema de baldosas piezoeléctricas. Cada participante realizó cinco repeticiones con una velocidad de marcha constante en condiciones controladas de vestigio.

Se utilizó el coeficiente de correlación intraclase (ICC), con un modelo de efectos mixtos bidireccional, y el coeficiente de variación (CV%), que se calculó con las mediciones repetidas del voltaje, para determinar la repetibilidad del sistema. Se clasificaron como marcadores de alta confiabilidad del sistema de medición aquellos valores de CV que estaban por debajo del 10 % y los ICC que estaban por encima de 0.80. Los valores obtenidos de ICC y CV% fueron interpretados como indicadores de estabilidad y repetibilidad del sistema, permitiendo validar su desempeño bajo condiciones de medición repetida y reforzando la consistencia del sistema propuesto.

I. Consideraciones éticas

Tal como ocurre en la mayoría de los trabajos de investigación, el estudio se llevó a cabo de acuerdo con los principios que estipula la Declaración de Helsinki para estudios en seres humanos. Se cuenta con la aprobación del protocolo de estudio por el pertinente comité de ética institucional, garantizando el consentimiento informado, así como la confidencialidad y el anonimato de los encuestados.

III. RESULTADOS

El sistema de baldosas piezoeléctricas permitió la medición continua y simultánea de las variables biomecánicas y eléctricas que se registraron específicamente a lo largo de la ejecución del protocolo de marcha. A través de todas las pruebas que se realizaron, el sistema pudo funcionar sin interrupciones en la obtención de datos, así como tampoco presentó errores relacionados con las estructuras eléctricas que lo conforman, evidenciando así la estabilidad funcional de la misma durante los momentos de control que da lugar un ensayo piloto.

A. Resultados eléctricos

Los módulos piezoeléctricos mostraron generación de voltaje ante cada evento de pisada. Los datos provenientes de los módulos piezoeléctricos presentaron variabilidad interindividual, como consecuencia de variaciones en el patrón de marcha del sujeto, la huella de tipo toma de contacto del pie con la superficie y la distribución de la carga plantar. No obstante esta variabilidad, los valores de los registros de voltaje se dieron en rangos dependientes entre los sujetos.

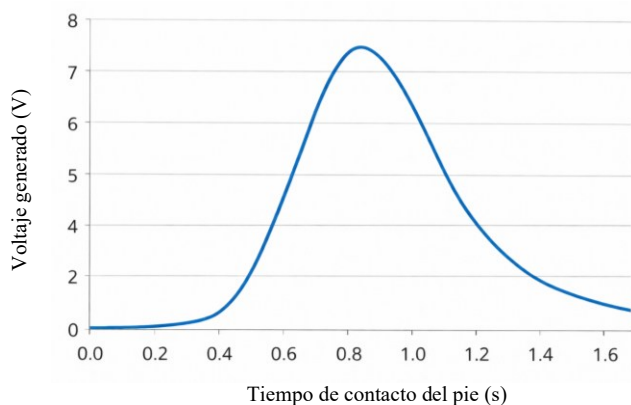


Fig. 5 Señal de voltaje generada por el sistema piezoeléctrico durante una pisada representativa.

La imagen que se reproduce en la Fig. 5 ilustra la representación de una señal típica de voltaje obtenida durante una pisada típica donde podemos distinguir con claridad las tres fases que se manifiestan a medida que el pie avanza a través del ciclo de la pisada: la fase de inicio del contacto del pie, la fase de apoyo medio y la fase de despegue del pie. Los valores promedios de voltaje y energía eléctrica, estimada por pisada se han resumido en la Tabla II donde podemos observar que la respuesta eléctrica está por debajo de la interacción mecánica que existe en la pisada.

TABLA II
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES BIOMECÁNICAS Y ELÉCTRICAS

Variable	Media	Desviación estándar	IC 95%
Tiempo de contacto (s)	0.62	0.11	0.60 – 0.64
Voltaje generado (V)	4.16	0.85	4.00 – 4.32

Nota: Los resultados descriptivos evidencian una variabilidad moderada en ambas variables, compatible con diferencias interindividuales en el patrón de marcha.

Desde un punto de vista eléctrico, la respuesta del sistema mantuvo una definición del rango de operación estable, sin observarse fenómenos de saturación o comportamientos no lineales de los módulos PZT a lo largo del rango de cargas examinado.

B. Resultados biomecánicos

Las diferencias en el tiempo de contacto en el pie en apoyo a la superficie son evidentes en algunos participantes, en los que llevan a cabo un patrón de apoyo diferente en el ciclo de marcha, y esto conlleva a ser capaz de observar diferencias tanto en el tiempo de contacto como en la forma de la señal eléctrica que queda registrada y que nos permite evidenciar la variabilidad que existe en el contacto.

Tampoco se produjeron diferencias en los patrones de pisada, en los cuales se identificaron configuraciones de

pisada neutra y pisada neutra con tendencia a la pronación, que es capaz de llegar a presentar valores de voltaje generado diferentes. Estas variaciones se mantuvieron consistentes a lo largo de las repeticiones realizadas por cada participante.

C. Relación entre variables biomecánicas y eléctricas

El análisis estadístico evidenció una relación lineal positiva entre el tiempo de contacto del pie con la superficie y el voltaje generado por el sistema piezoeléctrico ($r = 0.82$; $p < 0.001$). El modelo de regresión lineal simple explicó el 67 % de la variabilidad del voltaje generado ($R^2 = 0.67$).

La ecuación de regresión obtenida fue:

$$V = 1.37(tc) + 3.31 \quad (2)$$

Donde V representa el voltaje generado (V) y tc el tiempo de contacto del pie con la superficie (s). El modelo fue estadísticamente significativo ($R^2 = 0.67$; $p < 0.001$). Estos resultados corresponden a un estudio piloto y deben interpretarse dentro del contexto de las condiciones experimentales controladas empleadas.

TABLA III
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CORRELACIÓN Y REGRESIÓN

Parámetro	Valor
Coefficiente de correlación (r)	0.82
Coefficiente de determinación (R^2)	0.67
Pendiente del modelo (β_1)	1.37
Intercepto (β_0)	3.31
Valor p	< 0.001

Nota: El modelo de regresión lineal simple resultó estadísticamente significativo ($p < 0.001$).

La Tabla III presenta los resultados del análisis de correlación y regresión, incluyendo el coeficiente de correlación de Pearson (r), el coeficiente de determinación (R^2), los parámetros del modelo (β_0 , β_1) y el nivel de significancia estadística (p).

Se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión lineal, evidenciándose distribución aleatoria de residuos y ausencia de patrones sistemáticos, lo que respalda la validez del modelo. Esta relación se representa gráficamente en la Fig. 6

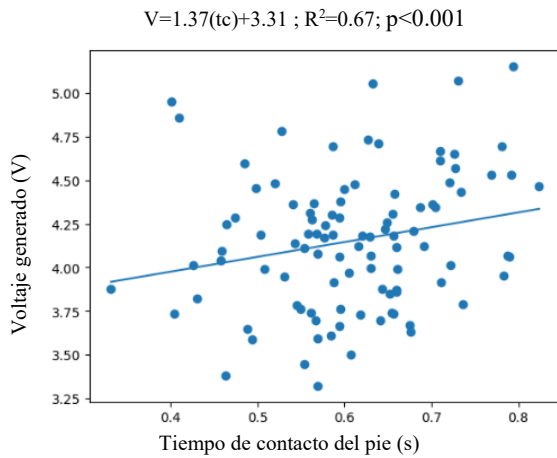


Fig. 6 Diagrama de dispersión entre el tiempo de contacto del pie con la superficie y el voltaje generado por el sistema piezoeléctrico. La línea representa el modelo de regresión lineal ajustado.

Adicionalmente, se evaluó la confiabilidad y repetibilidad del sistema de baldosas piezoeléctricas a partir de mediciones repetidas del voltaje generado durante la pisada. Los resultados evidenciaron baja variabilidad entre mediciones repetidas.

TABLA IV
CONFIABILIDAD Y REPETIBILIDAD DEL SISTEMA
PIEZOELÉCTRICO

Parámetro	Media (V)	DE	CV (%)	ICC
Voltaje generado por pisada	4.16	0.85	6.4	0.88

Nota: CV: coeficiente de variación; ICC: coeficiente de correlación intraclass.

Posteriormente, se realizó un análisis exploratorio del voltaje generado en función del patrón de pisada observado durante la marcha, clasificándose a los participantes en pisada neutra y pisada con tendencia a la pronación.

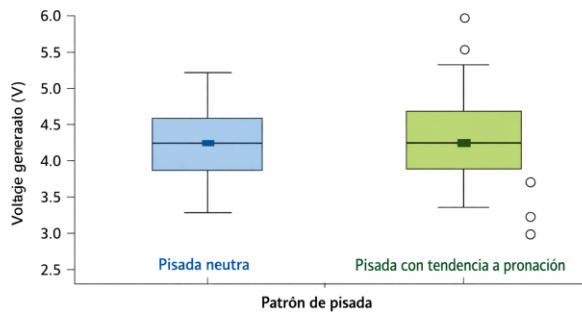


Fig. 7 Distribución del voltaje generado por el sistema piezoeléctrico según el patrón de pisada (neutra y con tendencia a la pronación).

Como se observa en la Fig. 7, los participantes con pisada neutra presentaron una distribución del voltaje más homogénea, mientras que aquellos con tendencia a la pronación mostraron una mayor dispersión de los valores

registrados. Se observaron diferencias en la distribución del voltaje entre los patrones de pisada analizados.

D. Análisis de la respuesta ergonómica y funcional

Los resultados de la evaluación perceptual evidenciaron niveles elevados de confort, estabilidad y seguridad durante el uso del sistema en la mayoría de los participantes. No se registraron eventos adversos ni interrupciones del protocolo asociadas a incomodidad, fatiga o inestabilidad durante la pisada sobre las baldosas piezoeléctricas.

Los valores fueron similares a aquellos observados en trabajos previos del estado del arte de la recolección de energía usando la pisada. Al mismo tiempo, el patrón natural del caminar no se vio alterado por la interacción con el sistema.

IV. DISCUSIÓN

Esta investigación pone de manifiesto la viabilidad técnica y biomecánica de un sistema de baldosas piezoeléctricas para la obtención de energía eléctrica de la pisada del ser humano, y a la vez permite integrar, en condiciones experimentales de laboratorio direccionalmente controladas, variables eléctricas y biomecánicas. Los resultados mostraron un funcionamiento estable del sistema, una relación entre el tiempo de contacto del pie sobre la superficie -alérgico a la pisada- y el voltaje generado fiable en la experimentación. Esta investigación ofrece pruebas experimentales preliminares que combinan, por un lado, la evaluación biomecánica del pie, y por otro, la microgeneración de energía, un aspecto que la literatura actualmente no aborda de manera suficiente.

Los voltajes registrados por pisada fueron estables y reproducibles, sin saturación ni comportamientos no lineales en los módulos PZT, como otros estudios en la recolección de la energía asociada a la marcha humana. Esto se debe a que operar dentro del rango elástico de los materiales piezoeléctricos es clave para asegurar la eficiencia y la durabilidad de la recogida de energía.

Al igual que en los modelos teóricos de recolección energética también bien descritos en la literatura, la eficiencia del sistema basado en estas interacciones mecánicas es función de la interrelación entre la deformación mecánica del material y la respuesta eléctrica de los materiales piezoeléctricos [11], [12]. Los enfoques clásicos de los sistemas de recolección de energía en sistemas embebidos han demostrado la posibilidad de usar fuentes mecánicas de baja intensidad, como la marcha humana [13], [14]. Esto también es claro en el estudio de Zuo y Tang [15], que destaca el potencial que tienen este tipo de sistemas para aplicaciones a mayor escala.

En el área de biomecánica, las variaciones registradas en el tiempo de contacto del pie presentan diferencias interpersonales para el patrón de marcha y para el tipo de distribución de la carga plantar. Dichas variaciones se vieron afectadas por los cambios exhibidos en la señal eléctrica

registrada, lo que hace evidente el vínculo tan estrecho que se encuentra establecido entre la mecánica del movimiento humano y la respuesta registrada en un sistema piezoeléctrico. También, la diferenciación entre patrones de pisada neutra y en tendencia a pronación exhibe comportamientos eléctricos diferentes, lo que permite obtener una información relevante a la hora de poder diseñar superficies inteligentes ajustadas a la población heterogénea.

La correlación y la regresión lineal demostraron tener una fuerte correlación positiva ($r=0.82$, $R^2=0.67$) entre el tiempo de contacto y voltaje generado, lo que viene a señalar que el tiempo en la fase de apoyo explica una buena parte de la varianza del voltaje. Este hallazgo resalta la importancia del componente temporal del contacto pie-superficie como variable clave en la optimización de sistemas de recolección energética, diferenciándose de enfoques previos centrados principalmente en la magnitud de la carga.

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos sobre sistemas de recolección energética basados en la marcha humana, donde se ha reportado una relación directa entre la dinámica del apoyo plantar y la respuesta eléctrica de materiales piezoeléctricos, como lo descrito por Zhao et al. [5]. Asimismo, estudios como el de Selim et al. [8] han evidenciado la viabilidad de sensores piezoeléctricos activados por la pisada; sin embargo, a diferencia del presente estudio, estos enfoques no integran de manera simultánea el análisis biomecánico detallado ni la evaluación ergonómica del sistema.

En este sentido, el presente trabajo aporta un enfoque integrador que combina la medición de variables biomecánicas, el análisis eléctrico y la validación funcional del sistema, lo que representa un avance respecto a investigaciones previas centradas únicamente en la generación energética.

Con respecto al sistema de confiabilidad, los resultados obtenidos de coeficiente de variación con el valor de $CV < 10\%$ y el coeficiente de correlación intraclase de $ICC = 0.88$ evidencian una gran repetibilidad y estabilidad de las medidas, lo que indica que el sistema también es fiable con un uso repetido y puede ser útil en el ámbito clínico, educativo y de las infraestructuras peatonales.

Desde la óptica de la ergonomía, los niveles altos de confort, estabilidad y seguridad que describen los participantes, así como el hecho de no observar cambios en el patrón natural de la marcha, evidencian que el propio sistema permite que puedan realizarse evaluaciones funcionales del pie sin incurrir en importantes modificaciones biomecánicas.

No obstante, este trabajo presenta limitaciones derivadas de su carácter piloto y del reducido tamaño muestral, lo que restringe la generalización de los resultados. En este sentido, futuras investigaciones deberían considerar diseños longitudinales que permitan la evaluación de la fatiga mecánica de los módulos piezoeléctricos tras múltiples ciclos de carga; además de, incorporar sensores de presión de alta

resolución que mejoren la caracterización de la distribución plantar.

Por otro lado, la incorporación de algoritmos de machine learning supone una vía de incierta de recorrido, pues comporta la clasificación automática del patrón de marcha y la posibilidad de realizar detecciones de forma temprana de anomalías biomecánicas en el ciclo del paseo, todo ello en el mismo tiempo de espera. Así mismo, la evaluación del ciclo de vida de los materiales que se integran en los elementos del sistema contribuye para alcanzar una buena sostenibilidad del sistema desde el punto de vista de las posibilidades ambientales.

El presente estudio propone una forma de unificar los parámetros biomecánicos del pie con variables eléctricas en tiempo real, que también incluye criterios de confiabilidad y validación desde el punto de vista ergonómico de los sistemas piezoeléctricos, que normalmente se han limitado a la generación de energía.

En su totalidad, los resultados que proporciona este estudio piloto ayudan a corroborar la aplicación adecuada de principios biomecánicos junto con principios piezoeléctricos para la producción de energía de forma remota a partir de la marcha humana y compatible con la sostenibilidad. Estos resultados se alinean con el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) lo que augura la posibilidad de emplear su aplicación para la instalación de redes urbanas inteligentes, con el control biomecánico en tiempo real. Sin embargo, los resultados deben considerarse dentro del contexto de un estudio piloto realizado con condiciones controladas.

V. CONCLUSIONES

El presente estudio piloto tuvo como objetivo la viabilidad de un sistema de baldosas piezoeléctricas para la conversión de la pisada humana en energía y el registro simultáneo de variables biomecánicas y eléctricas de manera controlada. El sistema se caracteriza por ofrecer un comportamiento estable, reproducible y funcional durante la marcha.

Se encontró una correlación directa y estadísticamente significativa entre el tiempo de contacto del pie con la superficie y el voltaje inducido ($r = 0.82$; $p < 0.001$), confirmando así que el componente temporal de la postura plantar representa un parámetro biomecánico significativo en la optimización de los sistemas de recolección energética.

La variabilidad interindividual observada demuestra la sensibilidad del sistema para detectar diferencias en el patrón de apoyo plantar y, por tanto, da muestra del gran potencial que también puede tener como herramienta complementaria en la evaluación funcional del pie dentro de estudios clínicos y de investigación.

Bajo una perspectiva ergonómica, las altas percepciones de confort, estabilidad y seguridad obtenidas, así como la libertad de la alteración del patrón natural de la marcha,

validan la compatibilidad del sistema a su uso en evaluaciones biomecánicas.

En resumen, estos hallazgos sitúan al sistema propuesto como una solución potencial para el desarrollo de tecnología en ingeniería biomédica así como la energía verde. Sin embargo, al ser este un trabajo piloto, se necesitan estudios futuros con muestras más extensas y condiciones de uso reales para comprobar que efectivamente se aplica a gran escala.

Igualmente, la posible interacción con sensores de más resolución y algoritmos de aprendizaje automático podría optimizar una de las configuraciones de Biomech, donde el objetivo sería su propia utilización como herramienta diagnóstica en sistemas de monitoreo biomecánico en tiempo real.

Los hallazgos corroboran el potencial de la presente solución como una plataforma tecnológica integrada para la evaluación funcional del pie y la generación de energía distribuida, así como favorecer el desarrollo de soluciones inteligentes, accesibles y sostenibles para la salud y para las infraestructuras urbanas.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la institución universitaria por la ayuda para llevar a cabo la presente investigación formativa y a los docentes asesores por su orientación académica, acompañamientos metodológicos y contribuciones durante las fases de la investigación. También se agradece públicamente a los estudiantes voluntarios que participaron en el estudio piloto, ya que su aportación fue necesaria para poder llevar a cabo el protocolo experimental. Por último, se agradece el apoyo técnico para la implementación y validación del sistema piezoeléctrico que contribuyó a que el desarrollo de todas las pruebas que nos ocupan fuese el adecuado.

REFERENCES

- [1] World Health Organization, "Falls," WHO Fact Sheets, Dec. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>
- [2] B. Dewig, A. Evans-Pickett, B. G. Pietrosimone, and J. T. Blackburn, "Comparison of discrete and continuous analysis approaches for evaluating gait biomechanics," *Gait & Posture*, vol. 100, pp. 261–267, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2023.01.012>
- [3] H. K. Kim, X. Dai, S.-H. Lu, T.-W. Lu, and L.-S. Chou, "Discriminating features of ground reaction forces during walking," *Gait & Posture*, vol. 94, pp. 166–172, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.03.012>
- [4] R. Stepancikova, R. Olejnik, J. Matyas, M. Masar, B. Hausnerova, and P. Slobodian, "Pressure-driven piezoelectric sensors and energy harvesting," *Sensors*, vol. 24, no. 4, p. 1275, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24041275>
- [5] B. Zhao, F. Qian, A. Hatfield, L. Zuo, and T.-B. Xu, "A review of piezoelectric footwear energy harvesters: Principles, methods, and applications," *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 5841, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23135841>
- [6] S. Gupta, M. Kumar, G. Singh, and A. Chanda, "Development of a novel footwear based power harvesting system," *E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 3, p. 100115, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100115>
- [7] H. He, "A piezoelectric heterostructure scavenging mechanical energy from human foot strikes," *Micromachines*, vol. 13, no. 8, p. 1353, 2022. <https://doi.org/10.3390/mi13081353>

- [8] K. K. Selim, I. H. Smaili, H. M. Yehia, M. M. R. Ahmed, and D. A. Saleeb, "Piezoelectric sensors pressed by human footsteps for energy harvesting," *Energies*, vol. 17, no. 10, p. 2297, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17102297>
- [9] B. Çavuş and S. Akkaya Oy, "Energy harvesting from floor integrated piezoelectric sensor," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2023. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1279082>
- [10] C. L. Sandoval-Rodríguez et al., "Analysis of a piezoelectric energy harvester system from footsteps of passersby," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 103–111, 2025. <https://doi.org/10.21533/pen.v11.i1.81>
- [11] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*. Boston, MA, USA: Springer, 2004. <https://doi.org/10.1007/b138783>
- [12] A. Erturk and D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting*. Chichester, U.K.: Wiley, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781119991151>
- [13] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, no. 1, pp. 18–27, 2005. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2005.9>
- [14] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies*. New York, NY, USA: Springer, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>
- [15] L. Zuo and X. Tang, "Large-scale vibration energy harvesting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 24, no. 11, pp. 1405–1430, 2013. <https://doi.org/10.1177/1045389X13486707>