

Electrical Model of a Piezoelectric System for Generating Energy Through the Force Applied in a Step

Modelo Eléctrico de un Sistema Piezoeléctrico para Generación de Energía a Través de la Fuerza Aplicada en un Paso

D.P. Chacon¹
J.M. Salinas¹

 0000-0002-7761-5287 M.A. Romero¹
 0009-0005-3270-7072 L.I. Culcay¹

 0009-0007-0326-4799
 0009-0003-8505-8251

¹Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación en Sistemas Mecatrónicos, Cuenca – Ecuador
E-mail: dchacon@ups.edu.ec, mromero@ups.edu.ec, jsalinasc4@est.ups.edu.ec, lculcayl@est.ups.edu.ec

Abstract

Piezoelectric systems have become important in exploring new methods of energy generation. When force is applied to a piezoelectric transducer, it undergoes mechanical deformation and generates a certain amount of energy. This energy can be used to transform the force exerted by a person's footsteps into electrical energy. Improving the efficiency of the mechanical-electrical conversion of piezoelectric materials could reduce our dependence on traditional energy sources. However, the lack of a specific model limits its practical application in energy storage. Although theoretical models exist, they are rarely validated against practical models. This document aims to simulate the operation of the PZT-51 piezoelectric transducer using its electrical model and considering its mechanical characteristics in energy storage applications. To validate the Simulink®-generated model, parameters such as dielectric permittivity, piezoelectric coefficient and loss factor were used, as provided by the manufacturer. This ensures that the results obtained are close to reality.

Resumen

Los sistemas piezoeléctricos han tomado relevancia al momento de explorar nuevos métodos de generación de energía. La deformación mecánica que se produce en un transductor piezoeléctrico al aplicar una fuerza sobre éste origina cierta cantidad de energía que puede emplearse para transformar la fuerza que ejerce una persona mediante una pisada en energía eléctrica. La eficiencia en la conversión mecánica-eléctrica del material piezoeléctrico puede reducir la dependencia de fuentes tradicionales. Sin embargo, la falta de un modelo específico limita la aplicación práctica en almacenamiento energético, aunque existen modelos teóricos su validación con modelos prácticos es casi nula. Este documento busca simular el funcionamiento del transductor piezoeléctrico PZT-51 a través de su modelo eléctrico tomando en consideración las características mecánicas, en aplicaciones de almacenamiento de energía. Para la validación del modelo generado en Simulink® se emplearon parámetros como la permitividad dieléctrica, el coeficiente piezoeléctrico y el factor de pérdida, proporcionados por el fabricante para garantizar que los resultados obtenidos se asemejan a la realidad.

Index terms— Piezoelectric, energy harvesting, force, real model.

Palabras clave— Piezoeléctrico, fuentes de energía, fuerza, modelo real.

Recibido: 10-11-2025, Aprobado tras revisión: 19-01-2026

Forma sugerida de citación: Chacon D.; Romero M.; Salinas J.; Culcay L.(2026) “Modelo Eléctrico de un Sistema Piezoeléctrico para Generación de Energía Través de la Fuerza Aplicada en un Paso”. Revista Técnica “*energía*”. No. 22, Issue II, Pp. El 114-121

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v22.n2.2026.737>

© 2026 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



1. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de fuentes energéticas sostenibles ha incentivado el desarrollo de tecnologías capaces de capturar y reutilizar energía ambiental. Entre estas, los sistemas piezoelectrivos han cobrado relevancia como una alternativa factible para la recolección de energía en entornos urbanos densamente poblados. Este enfoque se basa en la capacidad de ciertos materiales de generar electricidad cuando son sometidos a deformaciones mecánicas, lo cual, permite convertir vibraciones ambientales como las generadas por pisadas humanas en energía eléctrica [1].

Los materiales piezoelectrivos cerámicos, como el titanato zirconato de plomo (PZT), han demostrado un alto rendimiento en términos de densidad energética y fiabilidad. En particular, el modelo PZT-51 se destaca por su elevado coeficiente piezoelectrónico d33 su estabilidad bajo excitaciones cíclicas, y una buena relación entre su rigidez mecánica y sensibilidad eléctrica [2]. Estas propiedades lo convierten en un candidato ideal para aplicaciones donde la energía mecánica es de baja frecuencia, pero alta recurrencia como es el caso del tránsito peatonal urbano.

No obstante, la transición del laboratorio a aplicaciones reales presenta obstáculos fundamentales. Uno de ellos es la ausencia de modelos eléctricos validados y específicos para el material PZT-51 que permitan simular su respuesta de forma precisa bajo condiciones reales de carga, geometría y excitación. La mayoría de las aproximaciones disponibles utilizan modelos generalistas que no integran los parámetros físicos reales del material, lo que limita la capacidad predictiva y la eficiencia de los sistemas desarrollados [3].

Para abordar este vacío, el presente trabajo se fundamenta en el modelo eléctrico detallado en el documento técnico “Modelo de circuito equivalente Butterworth Van Dyke para transductores piezoelectrivos” [4], donde se describe el comportamiento de materiales piezoelectrivos mediante un circuito equivalente RLC en paralelo. En dicho modelo, la capacitancia representa la permitividad dieléctrica del material, la resistencia modela las pérdidas dieléctricas internas y la inductancia se asocia a la inercia mecánica equivalente del sistema. Este marco teórico permite aproximar el comportamiento dinámico del material piezoelectrivo con mayor precisión que modelos idealizados no paramétricos.[6]

Proyectos como E-STEP, desarrollado por Ibáñez García [5], han demostrado que el diseño ergonómico de pavimentos inteligentes puede convertir el tránsito peatonal en una fuente de energía renovable, útil para iluminación de emergencia, sensores inalámbricos e incluso la carga de dispositivos móviles [10]. Estos prototipos integran materiales piezoelectrivos en estructuras modulares que aprovechan la fuerza vertical

de la pisada para generar pulsos eléctricos. La validación experimental de E-STEP subraya la importancia de adaptar el diseño estructural y la configuración eléctrica del sistema a las características del material piezoelectrónico utilizado, reforzando la necesidad de simulaciones específicas y precisas para optimizar su rendimiento en condiciones reales.[7]

La presente investigación, busca generar la respuesta de un modelo piezoelectrónico, aplicando características propias de la fuerza que se ejerce al momento de realizar las pisadas, lo cual permite obtener una respuesta más cercana al funcionamiento real del dispositivo.

Las soluciones comerciales que se encuentran en el mercado son sistemas cerrados que no permiten escalabilidad, el modelo que se plantea con este documento corresponde a una arquitectura adaptable y abierta, planteándose como una plataforma conceptual que puede escalarse a modelos que se adapten a los contextos y realidades de su aplicación.

Con base en ese enfoque, se ha desarrollado una simulación del comportamiento eléctrico del material PZT-51 en el entorno Simulink, utilizando parámetros reales proporcionados por el fabricante He-Shuai Ltd. como permitividad dieléctrica, factor de perdida dieléctrica y coeficiente piezoelectrónico. El objetivo principal es validar un modelo que permita optimizar la captación y almacenamiento de energía eléctrica en edificios mediante configuraciones de celdas en serie y paralelo. Se analiza también la viabilidad de escalar el sistema para alcanzar corrientes del orden de 1 amperio, mediante el uso coordinado de múltiples unidades piezoelectrivas.

El documento se estructura para presentar primero la caracterización del material piezoelectrónico PZT-51 mediante un modelo eléctrico RLC basado en parámetros reales. También se definen las condiciones de operación simulando pisadas humanas como fuente de excitación mecánica. Posteriormente se describe el modelado en Simulink, donde una fuente de corriente controlada alimenta un circuito RLC que representa la celda piezoelectrónica, se detalla la señal de excitación utilizada, un impulso tipo campana diseñado para reproducir el impacto de una pisada humana sobre el material.

2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PZT-51:

Según el modelo eléctrico estándar de materiales piezoelectrivos descrito en el documento “Modelo de circuito equivalente Butterworth Van Dyke para transductores piezoelectrivos,” se considera una red RLC en paralelo como representación funcional del comportamiento eléctrico.[8]

Los parámetros técnicos proporcionados por el fabricante para el material piezoelectrónico son:



- Permitividad dieléctrica (ϵ_{33}^t): 2250 [adimensional]
- Coeficiente piezoelectrónico (d_{33}): 460 pC/N
- Factor de pérdida dieléctrica ($\tan\delta$): 0.017

2.1 Condiciones de Operación

Para el modelo generado se toma en consideración las siguientes condiciones de operación:

- Carga mecánica simulada: 67.9 kg (masa de una persona promedio)
- Frecuencia de excitación: 3 Hz (simulando el ritmo de pisadas humanas)
- Capacitores:
 - a) $C_1 = 4.78 \text{ nF}$ (modela la capacitancia intrínseca del PZT-51)
 - b) $C_2 = 1.20 \text{ nF}$ (capacitancia parásita)
- Resistencia: $R = 1.57 \text{ M}\Omega$ (pérdidas dieléctricas)
- Inductancia: $L = 2.7 \mu\text{H}$ (inerzia mecánica del sistema)

Cuando una persona camina, su cuerpo interactúa dinámicamente con el suelo en cada paso. Aunque pueda parecer que simplemente transfiere su peso de un pie al otro el proceso es mucho más complejo. La pisada no solo aplica una fuerza vertical hacia el suelo, sino que involucra aceleraciones, frenado, despegue y deformación de materiales como el calzado, la superficie o incluso los músculos y articulaciones. Esta interacción genera energía mecánica pero gran parte de ella se dispersa o se pierde. Parte de la fuerza se convierte en calor, parte se amortigua en materiales que no transfieren correctamente la energía, y solo una pequeña fracción se canaliza de forma útil, por ejemplo, hacia un sistema piezoelectrónico. El cuerpo humano no fue diseñado para generar energía, sino para desplazarse de manera eficiente, lo que significa que su fuerza al caminar se distribuye en muchas direcciones y formas. Por eso, cuando se intenta captar esa energía, se debe reconocer que se está tomando solo un fragmento de todo lo que realmente se está generando [5].

Una persona de 68 kg con un 15 % de grasa corporal almacena alrededor de 384 MJ de energía química [11]. Durante la actividad de caminar, puede generar hasta 67 W de potencia mecánica a una frecuencia de 2 pasos por segundo. Suponiendo una velocidad de 1.5 m/s, esto equivale a una fuerza mecánica de aproximadamente 44.7 N. [5]

2.2 Cálculos para la Simulación Eléctrica del Piezoelectrónico PZT-51

Para realizar la simulación eléctrica del piezoelectrónico PZT-51 se requiere calcular ciertos parámetros como la permeabilidad del material empleando la fórmula (1):

$$\epsilon_{33}^t = 2250$$

$$\text{Permitividad del vacío } \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

$$(\text{factor de pérdida dieléctrica}) \tan\delta = 0.017$$

$$\epsilon_{material}^t = \frac{\epsilon_{material}}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_{material} = \epsilon_{33}^t \times \epsilon_0$$

$$\epsilon_{material} = 2250 \times 8.854 \times 10^{-12}$$

$$\epsilon_{material} = 1.99 \times 10^{-8} \text{ F/M}$$

Capacitancia: Para el cálculo de la capacitancia piezoelectrónica se emplea la ecuación 2.

$$C_p = \epsilon_{33}^t \frac{A}{h} \quad (2)$$

Donde:

A corresponde al área superficial de los electrodos, h distancia entre los electrodos.

$$A = 3 \text{ cm}^2 = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$h = 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m}$$

reemplazando se obtiene

$$C_p = 1.99 \times 10^{-8} \frac{3 \times 10^{-4}}{0.001}$$

$$C_p = 5.97 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$C_p = 5.97 \text{ nF}$$

$$C_1 = 80\% C_p = 4.78 \text{ nF}$$

$$C_2 = 20\% C_p = 1.20 \text{ nF}$$

Resistencia:

Los datos proporcionados por el fabricante permiten conocer los valores para una frecuencia de excitación de 1kHz, en este caso de estudio, la frecuencia de pasos de una persona es de 1-3Hz. La resistencia R_p modela las pérdidas internas a través de la ecuación (3), si la respuesta eléctrica tiene un ancho de banda alto, aunque el estímulo sea lento la respuesta eléctrica es rápida.

$$R_p = \frac{1}{2\pi f C_p \tan\delta} \quad (3)$$



Donde,

f corresponde a la frecuencia de excitación,

C_p capacitancia piezoelectrica

$\tan\delta$ factor de pérdida dieléctrica

$$R_p = \frac{1}{2\pi \times 1000 \times 5.97 \times 10^{-9} \times 0.017}$$

$$R_p = 1.57 M\Omega$$

Impedancia: La impedancia del modelo de piezoelectrico puede calcularse a partir de la formula (4).

$$f_r = \frac{1}{2\pi(\sqrt{L_p C_1})} \quad (4)$$

Donde para el cálculo de la frecuencia resonante (f_r) se emplea la inercia mecánica equivalente (5).

$$N_{33} = 1410$$

$$f_r = \frac{N_{33}}{h} \quad (5)$$

$$f_r = \frac{1410}{0.001} = 1.41 MHz$$

$$L_p = \frac{1}{(2\pi \times 1.41 \times 10^6)^2 4.78 \times 10^{-9}}$$

$$L_p = 2.7 \times 10^{-6} H$$

Corriente generada:

El cálculo de la corriente que genera un piezoelectrico (ec. 6) corresponde a la relación electromecánica entre la corriente generada y la fuerza aplicada en el piezoelectrico.

$$I = \lambda \times F \quad (6)$$

Donde:

λ corresponde al desplazamiento mecánico total y se calcula empleando la ecuación (7).

$$\lambda = d_{33} \times \frac{A}{h} \quad (7)$$

Donde,

d_{33} corresponde a la constante piezoelectrica del material que indica cuanta deformación ha sufrido.

A corresponde al área superficial de los electrodos,

h distancia entre los electrodos.

$$\lambda = 460 \times 10^{-12} \frac{3 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-3}}$$

$$\lambda = 1.38 \times 10^{-10} C/N$$

$$I = 1.38 \times 10^{-10} \times 664.1$$

$$I = 9.16 \times 10^{-9} A$$

2.3 Frecuencia de Resonancia y Antirresonancia

En dispositivos piezoelectricos, la frecuencia de resonancia corresponde al punto donde la impedancia eléctrica es mínima lo que favorece una máxima conversión de energía mecánica en eléctrica. Esto ocurre cuando la reactancia inductiva y capacitativa se anulan generando una corriente elevada ante una excitación de frecuencia coincidente.

La frecuencia de antirresonancia, en cambio, se caracteriza por una impedancia máxima. En este estado, la transferencia energética se reduce drásticamente, ya que la reactancia se vuelve predominantemente capacitativa o inductiva. En discos cerámicos piezoelectricos, suele ubicarse ligeramente por encima de la resonancia y delimita la banda de operación eficiente.[9]

Ambas frecuencias dependen de las propiedades físicas y geométricas del material. En modelos eléctricos tipo RLC, se identifican como puntos críticos en la respuesta de amplitud del sistema detectables mediante un barrido de frecuencia clave para optimizar la captación energética.

Frecuencia de resonancia (8):

$$fr = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{Lem \cdot Cem}} \quad (8)$$

$$fr = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2.7 \mu H \cdot 0.78 nF}} = 1.402 MHz$$

Donde,

Lem corresponde a la inductancia electromecánica y,

Cem a la capacitancia electromecánica.

Ctotal capacitancia total (9)

$$Ctotal = \frac{Cem \cdot Cp}{Cem + Cp} \quad (9)$$

$$Ctotal = \frac{4.78 nF \cdot 1.20 nF}{4.78 nF + 1.20 nF} = 0.9599 nF$$

$$= 0.9599 \times 10 - 9$$

Frecuencia de antirresonancia (9):

$$fa = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{Lem \cdot Ctotal}} \quad (10)$$

$$fa = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2.7 \mu H \cdot 0.9599 nF}} = 3.126 MHz$$

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO RLC (BUTTERWORTH-VAN DYKE)

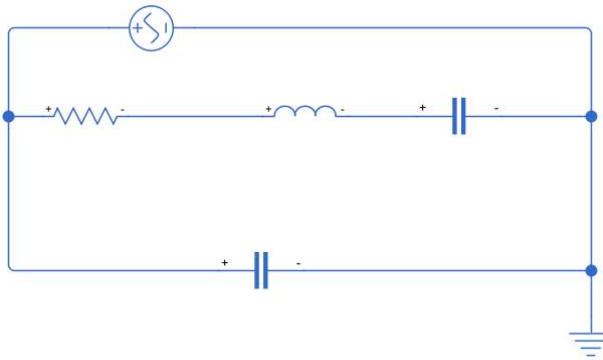


Figura 1: Circuito RLC Equivalente de un Piezoelectrónico

El circuito implementado en la simulación representa una única celda piezoelectrónica mostrado en la figura 1, modelada como un generador de corriente controlada que alimenta una red pasiva compuesta por una resistencia, una inductancia y una capacitancia conectadas en paralelo (modelo RLC). Esta configuración corresponde a una representación estándar del comportamiento eléctrico de un material piezoelectrónico polarizado transversalmente tal como se establece en modelos de equivalencia eléctrica ampliamente aceptados en la literatura técnica.

Dicho modelo, también conocido como circuito equivalente Butterworth–Van Dyke (BVD), es utilizado de manera recurrente para describir la respuesta dinámica de materiales piezoelectrónicos tanto en régimen transitorio como en estado estable. En este enfoque, la capacitancia simboliza la permitividad dieléctrica del material bajo campo constante, la resistencia representa las pérdidas internas debidas a disipación dieléctrica y efectos parásitos, mientras que la inductancia modela la inercia mecánica y resonancia estructural del sistema bajo excitación periódica.

Esta abstracción no solo permite emular de forma precisa el acoplamiento entre el estímulo mecánico y la salida eléctrica, sino que también facilita el análisis en plataformas de simulación como Simulink, donde los bloques eléctricos pueden relacionarse directamente con parámetros físicos extraídos del material real. En consecuencia, el uso del modelo BVD proporciona una base robusta para el diseño y validación de sistemas de captación energética basados en materiales piezoelectrónicos, asegurando coherencia entre los resultados simulados y el comportamiento esperado bajo condiciones reales de operación.

3.1 Análisis de la Señal de Salida

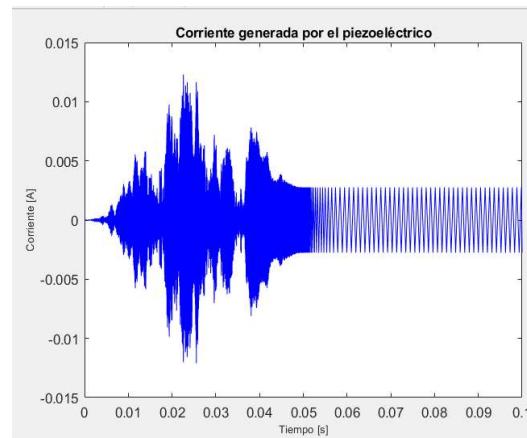


Figura 2: Corriente Generada por un Piezoelectrónico

La Figura 2 muestra la señal de corriente generada por una celda piezoelectrónica PZT-51 sometida a una excitación mecánica periódica simulada. Esta respuesta fue obtenida a partir de un modelo eléctrico equivalente tipo RLC excitado por una fuente de corriente proporcional a una señal tipo campana, representando una pisada humana breve sobre la superficie del transductor.

La señal de excitación empleada se ha generado a la frecuencia de resonancia calculada empleando una señal tipo campana para obtener una simulación más real tomando en consideración una fuente mecánica irregular con impactos repetitivos.

Se observa una respuesta transitoria inicial caracterizada por un crecimiento rápido de la amplitud de corriente, con múltiples oscilaciones de alta frecuencia superpuestas. Este comportamiento refleja el acoplamiento dinámico entre la fuerza aplicada y la respuesta resonante del sistema piezoelectrónico. La corriente alcanza picos de aproximadamente ± 0.012 A durante los primeros 22 milisegundos, momento en el cual la excitación alcanza su máximo valor.

A partir de los 0.04 segundos, se evidencia un amortiguamiento progresivo en la señal, producto de la disipación interna del sistema modelada por la resistencia equivalente en el circuito. La fase final muestra una oscilación decreciente con frecuencia estable, lo que indica que el sistema entra en una etapa dominada por su respuesta natural, ya sin influencia de la fuente externa.

Este resultado valida el modelo eléctrico adoptado, mostrando un comportamiento realista ante cargas dinámicas, y confirma que una sola celda puede generar corrientes en el orden de miliamperios durante eventos breves. Además, permite inferir que la integración de múltiples celdas en paralelo puede escalar esta salida hacia magnitudes más útiles para sistemas de recolección energética urbana.



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo eléctrico implementado en Simulink representa una aproximación funcional y físicamente coherente del comportamiento piezoeléctrico del material PZT-51 bajo excitación mecánica periódica. La configuración general consiste en una fuente de corriente controlada que inyecta una señal proporcional a la fuerza externa aplicada, alimentando una red RLC en paralelo. Esta topología se corresponde con el modelo eléctrico equivalente clásico de un transductor piezoeléctrico polarizado transversalmente.

La fuente de corriente simulada está conectada a un arreglo paralelo de:

- Una resistencia que representa las pérdidas dieléctricas internas del material calculada como $R = 1.57 \text{ M}\Omega$
- Una capacitancia equivalente a la permitividad dieléctrica del material

$$C = 4.78 \text{ nF}$$

- Una inductancia que modela la inercia mecánica equivalente de la estructura deformada $L=2.7 \mu\text{H}$

Estas magnitudes fueron calculadas directamente a partir de los parámetros físicos reales del material PZT-51 suministrados por el fabricante He-Shuai Ltd. lo que garantiza que el modelo simulado no se basa en supuestos arbitrarios sino en características específicas del compuesto piezoeléctrico empleado.

La fuerza mecánica de entrada es generada por una onda senoidal con frecuencia de 3 Hz y amplitud de 666 N, que simula el impacto rítmico de una pisada humana. Esta entrada es transformada en una corriente de excitación mediante una constante de proporcionalidad basada en la relación: $I(t)=d_{33}A\cdot F(t)$ donde $d_{33}=460 \text{ pC/N}$ y A es el área efectiva de carga del sensor. Esta transformación asegura que la magnitud de la corriente generada esté en el rango de microamperios, tal como se observa en estudios experimentales de dispositivos piezoeléctricos bajo carga dinámica.

El voltaje resultante, medido en los extremos del arreglo RLC, presenta un comportamiento oscilatorio amortiguado cuya amplitud varía entre 1.2 y 2 V en régimen estacionario. Esta respuesta es consistente con los valores esperados en sistemas piezoeléctricos de baja frecuencia operando en condiciones similares, lo que refuerza la validez del modelo. Además, las formas de onda generadas reflejan la interacción armónica entre la reactancia inductiva, la capacitancia y la disipación resistiva del material.

4.1 Descripción de la Señal de Excitación Utilizada en la Simulación

Para modelar la carga mecánica aplicada sobre la celda piezoeléctrica se diseñó una señal temporal de tipo campana que simula la pisada humana, caracterizada por un impulso breve y localizado en el tiempo.

El vector de tiempo t abarca desde 0 hasta 1 segundo, con un paso temporal de 1 milisegundo, lo que proporciona una resolución adecuada para capturar la dinámica transitoria del sistema frente a la excitación.

La señal de fuerza se define mediante una función gaussiana centrada en 0.2 segundos con un ancho que produce una duración aproximada de 60 milisegundos para la pisada.

Esta forma de señal permite reproducir un estímulo suave y realista, representando cómo la fuerza ejercida por el paso humano varía en el tiempo durante el contacto con el material piezoeléctrico.

Los vectores de tiempo y fuerza se combinan en una matriz que se emplea como entrada directa para la simulación en Simulink, facilitando la aplicación dinámica de la carga sobre el modelo eléctrico equivalente.

4.2 Configuración del Sistema Piezoeléctrico:

Una vez determinados el voltaje y la corriente generados por el único elemento piezoeléctrico, procedemos a analizar la configuración más

adecuada para alcanzar el objetivo de energía. En este análisis determinamos que el voltaje inducido es significativamente mayor que la corriente obtenida, por lo tanto, se optó por implementar una conexión en

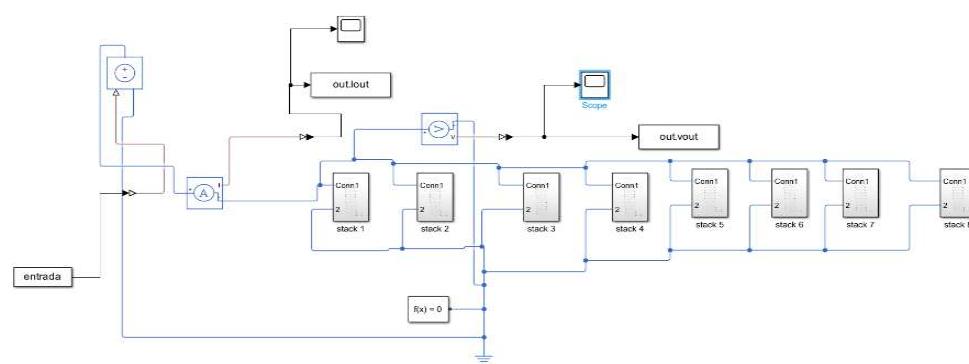


Figura 3: Representación del Sistema

paralelo entre múltiples elementos piezoeléctricos, lo que nos permitió incrementar la corriente total del sistema. La configuración eléctrica del sistema piezoeléctrico influye directamente en su rendimiento. Cárdenas Ramírez [6] concluye que la conexión en paralelo entre múltiples celdas permite escalar la corriente generada, optimizando así la captación energética en aplicaciones urbanas.

La configuración final del sistema consiste en un Stack formado por 10 transductores piezoeléctricos PZT-51 conectados en paralelo y replicando en un conjunto total de 8 Stack para captar el máximo de energía bajo condiciones lo más reales posibles de excitación mecánica.

En la figura 3 representamos el modelo eléctrico utilizado para simular el voltaje inducido por una baldosa piezoeléctrica bajo condiciones de excitación mecánica. Incluye componentes equivalentes como fuentes de corriente, capacitancias parásitas y elementos de carga, los cuales permiten evaluar la respuesta dinámica en tensión ante variaciones de frecuencia y amplitud de la excitación. Esta configuración posibilita el estudio detallado del comportamiento transitorio, resonancia y eficiencia energética del sistema piezoeléctrico dentro de un entorno controlado y reproducible.

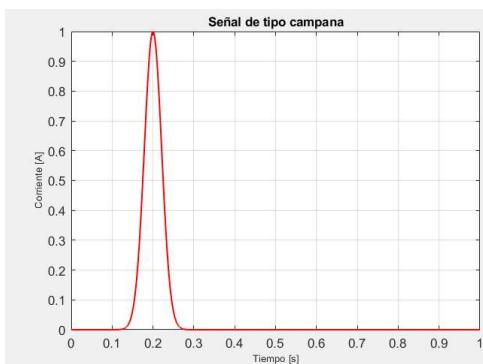


Figura 4: Señal de Corriente Generado por el Sistema de 8 Stacks de Piezoeléctricos

En la figura 4 podemos ver la señal de corriente generada durante la simulación en el eje vertical y en el eje horizontal que es el tiempo podemos visualizar el comportamiento del sistema final, el valor máximo de la corriente registrada.

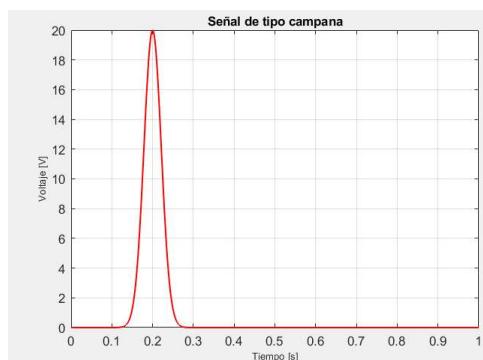


Figura 5: Señal de Voltaje Generado por el Sistema de 8 Stacks de Piezoeléctricos.

La figura 5 muestra la evolución temporal del voltaje generado en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal del sistema final. Se observa un pulso agudo correspondiente al pico de tensión máximo, indica el instante de mayor generación de energía por el sistema final.

Los resultados obtenidos al trabajar con un sistema de elementos piezoeléctricos constituyen a un modelo generado bajo condiciones ideales, considerando que la excitación en cada pisada tendrá el mismo impacto en todas las celdas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo presenta un modelo eléctrico simplificado del material piezoeléctrico PZT-51 basado en parámetros reales, y su implementación en un entorno de simulación. Los resultados obtenidos indican que, bajo condiciones dinámicas similares al paso humano, el material es capaz de generar señales de voltaje de 20 voltios con corrientes de hasta 1 amperio pudiendo emplearse para aplicaciones de captación energética.

En este estudio se ha logrado demostrar que la generación de energía mediante transductores piezoeléctricos es factible y eficiente cuando se diseña un modelo eléctrico adecuado y se simulan lo más cercano a las condiciones realistas de excitación mecánica. A partir del análisis de un solo transductor y su posterior disposición final del sistema basada en stacks se alcanzó una corriente de salida cercana a 1 A. Estos resultados no solo evidencian el potencial del enfoque adoptado, sino que también nos permite aplicar en futuros proyectos orientadas a la generación y almacenamiento de energía renovable, especialmente en entornos urbanos o de alto tránsito peatonal, donde la integración de este tipo de tecnologías puede contribuir a soluciones sostenibles, autosuficientes y de bajo impacto ambiental.

El modelo, aunque limitado, permite aproximarse a una validación conceptual del diseño sin requerir prototipos físicos en la etapa inicial. Se recomienda ampliar el modelo a sistemas acoplados mecánico-eléctricos completos, e incluir validación experimental para ajustar la predicción a condiciones reales.

En trabajos posteriores debe realizar un estudio minucioso de las características mecánicas del piezoeléctrico, de tal manera que puedan incluirse en un estudio completo del modelo planteado en el presente documento.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. Leí, B. X. Tian y Q. Feng. "Recolección de energía piezoeléctrica a partir de la marcha humana mediante un mecanismo de amplificación de dos etapas". ScienceDirect. Accedido el 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219318353>



- [2] B. Zubair, P. Riffat Asim y Q. Faisal. "Generación de energía eléctrica utilizando material piezoelectrico de titanato de circonato de plomo (PZT-5A) : Verificaciones analíticas, numéricas y experimentales". Home page. Accedido el 28 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible: https://iris.uniroma1.it/bitstream/11573/1019687/1/Elahi_Generation_2016.pdf
- [3] M. Farnsworth, A. Tiwari y R. Dorey. "Modelización, simulación y optimización de un recolector de energía piezoelectrica". ScienceDirect. Accedido el 9 de abril de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114009718>
- [4] A. Kevin and S. Ordoñez, "Modelo de circuito equivalente Butterworth Van Dyke para transductores piezoelectricos," CD 12360, Documento técnico interno, 24 de agosto de 2022.
- [5] J. Ibáñez García, E-STEP: Generador piezoelectrico. Aplicación a escaleras, Proyecto Final de Carrera, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [6] A. Menéndez Melé y A. Arribalzaga Jové. "Desarrollo de un prototipo de baldosa generadora de energía eléctrica a partir de la piezoelectricidad y almacenamiento de la energía producida". UPCommons :: Inici. Accedido el 18 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/b3c5ad59-ae56-4cb6-9792-f5930bab4eaf/content>
- [7] J. Cardenas Ramirez. "Configuración, material y eficiencia de sistemas piezoelectricos para la generación de energía eléctrica". repositorio.ucv. Accedido el 18 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/107176/Cardenas_RJ-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [8] N. Martínez, "Energía piezoelectrica: Aprovechando el movimiento humano para generar electricidad," Renovables Verdes, [En línea]. Disponible: <https://www.renovablesverdes.com/energia-piezoelectrica-convierte-movimiento-humano-en-electricidad/>
- [9] M. A. Salazar Lozano, L. G. Butzmann Álvarez, O. A. García Cano y M. Parra Escobedo, "Walking Energy: Generador de energía por pisada," Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango, México, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.eumed.net/uploads/articulos/e9f1501a443fc2252f99b6e9dce62c8a.pdf>
- [10] M. Martínez Euklidiadas, "Piezoelectricidad: usando las pisadas de los ciudadanos para generar energía," Tomorrow.City, 16 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.tomorrow.city/es/piezoelectricidad-generar-energia-con-movimiento/>
- [11] Starner, T., & Paradiso, J. A. (2004). Human generated power for mobile electronics. Low-power electronics design, 45, 1-35.



Diego Paul Chacón Troya. - Nació en Loja, Ecuador en 1976. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2000; de Máster en Domótica y Hogar Digital de la Universidad Politécnica de Madrid, en 2012; y de Maestro en Administración de Energías y sus Fuentes Renovables en 2016, en el Instituto Tecnológico de Monterrey, México.



Mónica Alexandra Romero Sacoto. - Nació en Azogues en 1987. Recibió su título de Ingeniera Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana en 2012; de Máster en Mecatrónica y Robótica en el Universidad de Investigación de Moscú, Instituto de Energía de Moscú.



Josselin Maribel Salinas Cañar. - Nació en Cuenca, Ecuador. Actualmente cursa el séptimo nivel de la carrera de Mecatrónica en la Universidad Politécnica Salesiana.



Leslie Iveth Culcay Lozano. - Nació en Cuenca, Ecuador. Actualmente cursa el séptimo nivel de la carrera de Mecatrónica en la Universidad Politécnica Salesiana.