

Generation of electrical energy by the impact of water on piezoelectric plates in rainwater collection systems

Francis Yampol Arana Gaitán.¹; Jeiner Paúl Alcántara Ramos²; Luis Vásquez Ramírez, Dr³
Escuela Profesional de Ingeniería Hidráulica, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, faranag21_1@unc.edu.pe, jalcantarar21_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Abstract– This research explores the generation of electrical energy from the impact of rainwater on piezoelectric plates installed in stormwater pipes. It is based on the ability of piezoelectric materials to convert mechanical energy into electricity when deformed by an external force. The study was developed through an experimental model in which variables such as flow rate and water fall height were analyzed, using PVDF sensors. It is evident that the initial impact of the water causes greater activation and deformation on the piezoelectric plate, generating higher voltage, while electricity generation decreases with repetitive impacts due to the stabilization of the material. The results showed that the generated energy is approximately 0.01 V in continuous impacts, indicating low energy generation, but with great potential. However, there are ways to optimize the system through improvements in the arrangement of sensors and the configuration of the electrical circuit. The study concludes that, although the current system has limitations, its future development could contribute to the diversification of renewable sources in urban environments. It is recommended to continue research focused on storing the energy collected by piezoelectrics and increasing the system's efficiency for practical applications.

Keywords - Piezoelectricity, piezoelectric sensors, stormwater

Generación de energía eléctrica por el impacto del agua sobre placas piezoeléctricas en sistemas de recolección de aguas pluviales

Francis Yampol Arana Gaitán.¹; Jeiner Paúl Alcántara Ramos²; Luis Vásquez Ramírez, Dr³
Escuela Ingeniería Hidráulica Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, faranag21_1@unc.edu.pe,
jalcantara21_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Resumen– La presente investigación explora la generación de energía eléctrica a partir del impacto del agua de lluvia sobre placas piezoeléctricas instaladas en tuberías de aguas pluviales. Se basa en la capacidad de los materiales piezoeléctricos para convertir la energía mecánica en electricidad cuando son deformados por una fuerza externa. El estudio se desarrolló mediante un modelo experimental en el que se analizaron variables como el caudal y la altura de caída del agua, utilizando sensores PVDF. Se evidenció que el impacto inicial del agua provoca mayor accionamiento y deformación sobre el piezoeléctrico generando mayor voltaje, mientras que la generación de electricidad disminuye con impactos repetitivos debido a la estabilización del material. Los resultados mostraron que la energía generada es aproximadamente de 0.01 V en impactos continuos lo que indica una baja generación de energía, pero con un gran potencial. Sin embargo, existen maneras de optimización del sistema mediante mejoras en la disposición de los sensores y la configuración del circuito eléctrico. El estudio concluye que, si bien el sistema actual tiene limitaciones, su desarrollo futuro podría contribuir a la diversificación de fuentes renovables en entornos urbanos. Se recomienda continuar con investigaciones enfocadas en el almacenamiento de la energía recolectada por los piezoeléctricos y el aumento de la eficiencia del sistema para aplicaciones prácticas.

Palabras clave- Piezoelectricidad, sensores piezoeléctricos, aguas pluviales

I. INTRODUCCIÓN

Nuevas ideas surgen a través del conocimiento, nuevos retos por empezar y nuevas tecnologías para implementar serán las bases para el desarrollo continuo en el mundo en el que vivimos. Es así que la generación de energía eléctrica está tomando una nueva ruta que emplea fuentes renovables que contribuyen al medio ambiente. El papel fundamental que han adquirido las fuentes renovables para la generación de energía eléctrica ha influido en el desarrollo de soluciones sostenibles que enfrentan nuevos retos. En este contexto, los sistemas piezoeléctricos han emergido como una alternativa innovadora debido a su capacidad para convertir la energía mecánica en energía eléctrica a través de la perturbación o deformación de los materiales piezoeléctricos. Es así que Zambrano y Pereira [1] han realizado investigaciones acerca de la evolución histórica de estos materiales, destacando sus aplicaciones en sensores, actuadores y sistemas de recolección de energía. Esta propiedad de la piezoelectricidad ha sido utilizada en

aplicaciones que van desde la recolección de energía del tránsito vehicular hasta el diseño de dispositivos médicos y sistemas industriales. En tal sentido [2], indica que un sensor permite diferenciar la variación de un medio y replica a una saliente en el siguiente medio. De igual forma [3] y [4], señalan que el termino sensor se refiere a algo más desarrollado, el aumento de los fenómenos físicos y químicos dando en conocimiento respuestas en magnitudes físicas que son captados en forma natural. Por otro lado, el nombre de piezoelectricidad propuesto por Hankel y descubierto por los hermanos Curie, es un efecto en donde la compresión de cuarzo ocasiona el desplazamiento de la carga y su polarización generando chispas. El aprovechamiento de energía mecánica en energía eléctrica, se realiza a través del impacto en el sensor piezoeléctrico, en este sentido [5], define a la piezoelectricidad como un fenómeno de polarización eléctrica, que ocurre cuando se aplica una tensión mecánica a un material piezoeléctrico. También, [6], menciona que la piezoelectricidad es un material que tiene la propiedad de convertir la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. De tal modo, cuando se aplica una corriente eléctrica a un cristal piezoeléctrico se produce la distorsión en su estructura cristalina, la que provoca deformación mecánica. El cuarzo dentro de los piezoeléctricos está formado por cristales de silicio y oxígeno, el primero cargado positivamente y el segundo con carga negativa. De esta manera, cuando el cuarzo se encuentra en reposo los cristales se encuentran dispersos uniformemente, pero cuando es sometido a la compresión los cristales se desplazan hacia el lado en el que es ejercida la fuerza, generando así una diferencia de potencial. Los cristales naturales y sintéticos, cerámicos y polímeros son ejemplos de materiales piezoeléctricos. En tal sentido, en la ingeniería hidráulica el impacto del agua a materiales piezoeléctricos presenta un enfoque prometedor para aprovechar la energía cinética.

En este contexto, las placas piezoeléctricas han demostrado su eficacia en proyectos como el sistema Pavegen, que aprovecha el impacto de los pasos peatonales para generar energía eléctrica. Este enfoque nos inspira a la aplicación en tuberías de aguas pluviales que aprovechen el recurso hidráulico. Para ello contamos con la investigación de Dajes Dávalos [7], donde desarrolla el tema acerca de la generación de energía eléctrica a partir del paso de vehículos por un

reductor de velocidad de sección trapezoidal, el cual emplea un sistema de engranajes para el aumento de la velocidad y producción de energía eléctrica a través de la compresión del automóvil hacia el rompemuéle. Asimismo, Martínez [8], se basa en la generación y diseño de un prototipo que emplea el movimiento de las gotas de lluvia para generar energía a través de los fenómenos naturales (precipitaciones), sobre todo cuanto mayor sea la duración de la precipitación aumentara la generación de energía eléctrica, debido al tiempo expuesto del impacto de las gotas de lluvia. Esto se complementa con las investigaciones de [9] y [10], que se centran en analizar la energía generada por las gotas de lluvia de acuerdo a su posición y tipo del sensor. Por un lado, se obtuvo que para una mejor producción de energía el sensor debe estar empotrado. Por otro lado, es recomendable que el sensor sea del tipo PDVF “Meas LTD1-028k”, debido a la resistencia y adaptación al agua. Sin embargo [11], experimentan con una propuesta que emplea un alambre de cobre empotrado en cantiléver, mientras se coloca un imán debajo de este para aplicar el principio de electro magnetismo y generar energía eléctrica. Pues la poca información que se presenta acompañado del desconocimiento de los materiales empleados implica que no sea tan factible para la generación de energía eléctrica. De la misma forma [12], analizan las aspas de motores para sistemas de recolección de agua, de modo que el fluido (agua o aire) al pasar a través de ellas genere energía. La investigación analiza las variables de la geometría de las aspas, para poder proponer un diseño más eficiente. Resaltar que el estudio empleo caudal continuo y es un sistema que puede ser propuesto en canales que contenga estos micro generadores para generar energía. Recientemente en el año 2016, Tang [13], se encuentran investigando acerca de las celdas solares que transforman la energía del sol y las gotas de lluvia en energía eléctrica. Por esta razón, el profesor Qunwei Tang de la Universidad Oceánica de China, menciono que aún se encuentra en su etapa preliminar con un 6.5% de eficiencia a comparación de las celdas solares actuales con una eficiencia aproximada del 20%.

La investigación [14], desarrollo simulaciones con un grupo de científicos del CEA/Leti – Minatec un instituto en Grenoble, Francia. En donde, experimentaron con tamaños diferentes de gotas de lluvia, alturas y velocidades de caída. De esta forma, pudieron recuperar hasta 12 mili watts de energía, de una de las gotas más grandes. Rescatando de la investigación que el viento es un elemento a tener en cuenta, ya que frena la caída de las gotas. De igual forma [15], se encargaron de analizar el comportamiento de un arreglo de lámina piezoeléctrica de PVDF en cantiléver que se colocó en una zona de impacto a la mitad de su longitud. Cuando la gota cae sobre la lámina del piezoeléctrico, la empuja hacia abajo produciendo oscilaciones que se generan en la señal. Por lo que, se generó un voltaje máximo de 3.7 V con una altura de caída de 47 cm, entre las cargas de 2 y 3 Mega ohm.

En tal sentido, Menéndez Melé [16], realizó el desarrollo de un prototipo de una baldosa generadora de energía a partir del fenómeno de la piezoelectricidad. Se ideó un plan para

abastecer el consumo de diez farolas en una de las calles concurridas de Barcelona. De tal modo, se obtuvo que el diseño propuesto no es rentable por la poca generación de electricidad. Asimismo, constataron que las baldosas existentes en el mercado tampoco son rentables, ya que su inversión es mayor que el ahorro que suponen. Del mismo modo, el estudio de Tena Torrecilla [17], implemento sensores piezoeléctricos para generar energía bajo calzada en el aeropuerto de Barcelona. El proyecto se basó en el diseño de una baldosa piezoeléctrica implementados en el terminal del aeropuerto de Barcelona el Prat y en un carril bici en el mismo aeropuerto. Donde se calculó la cantidad de CO_2 que se dejan de omitir a la atmosfera. Resultando un bajo rendimiento del sistema, con un 8%, estando dentro del rango (5% - 15%) de este tipo de sistemas.

Hay que resaltar la gran diversidad de estudios y diseños que han sido realizados en diversos lugares del mundo empleando material piezoeléctrico. El primero de ellos, desarrollado por Psoma, Tzanetis y Tourlidakis [18], realizado en Grecia un guante piezoeléctrico (PVDF) que produce energía a través de la presión por los dedos en superficies planas generando 0.3236 W. El segundo estudio de Orrego [19], analizaron y evaluaron el movimiento (aleteo) de una bandera implementada con material piezoeléctrico (PVDF) que recolecta la energía eólica en Estados Unidos. En la investigación, se identificó que el rango de velocidades controladas del viento va desde los 5 a 9 m/s con una potencia de 1 – 5 mW y 2.5 a 4.5 m/s con una potencia de 0.1 – 0.4 mW. Una tercera investigación de Ulhoa [20], realizada en Brasil un estudio de la aplicación del material piezoeléctrico (PZT) en buques de carga para identificar la cantidad de energía que genera. La energía recolectada proviene de las frecuencias vibratorias de la sala de máquinas y de las olas en contacto con la superficie del casco del barco que deforman el material PZT. Por esta razón, desarrollaron un prototipo que genera energía por la vibración de un motor eléctrico de 12 V, donde se obtuvo una tensión máxima de 45.36 V, con una corriente de 5.04 mA, que corresponde a una potencia eléctrica de 0.22861 W. Finalmente, en el año 2016 el estudio de Viet, Xie, Liew, Banthia y Wang [21], se encargaron de desarrollar un transductor de energía flotante que emplea el efecto piezoeléctrico para almacenar energía de las olas en Dubái. En su interior están compuestos de resortes y una masa para transferir movimiento de onda a vibraciones mecánicas a dos piezoeléctricos para generar energía. Los resultados arrojan que es posible recolectar una potencia de 103W con una amplitud y periodo de una ola de 2 m y 6 s respectivamente, para un transductor de 100 kg con dimensiones de 1 m x 0.50 m x 1 m.

Las investigaciones han sido realizadas en diversos campos de acción, uno de ellos es la medicina. Donde podemos destacar que en el año 2013 la investigación de Fadhil y Saber [22], se ocupó de proveer energía eléctrica para el funcionamiento de implantes, como un marcapaso. El prototipo desarrollado está conformado por capas de material piezoeléctrico (PVDF) que recubre una arteria. Su finalidad es convertir la presión sanguínea en potencia eléctrica a través de las pulsaciones, con

lo que se logra una potencia de 60 nW. Incluso, el cuerpo en movimiento también fue empleado para la producción de energía, en el año 2018 Melgarejo Jiménez y Lozano López [23], basaron su investigación en diseñar e implementar un prototipo en una plantilla de calzado con dispositivos piezoeléctricos, para generar energía y para cargar la batería de un celular en la ciudad de México. Por tal motivo, se analizó la forma de las pisadas de las personas, con la finalidad de encontrar el punto de mayor presión y poder asegurar una zona eficiente para transmitir energía. Los resultados arrojaron que con 264 pasos el voltaje era de 0.17 V, con 274 pasos el voltaje era de 0.07 V y con 1100 pasos el voltaje es de 4.05 V. Asimismo, las pruebas de carga obtenidas fueron de 2%, 5%, 10 % y 15% en un tiempo de carga de 3 min, 7 min, 15 min y 20 min respectivamente. Finalmente [24], implementa un sistema de emisión y recepción con buzzers piezoeléctricos, donde el agente que generará dicho fenómeno será la propagación del sonido. Por lo que, el buzzer emisor se alimenta con una tensión variable que genera un sonido que se propaga, en donde el buzzer receptor captura las ondas de presión y las convierte en tensión.

La búsqueda de una solución innovadora y sostenible frente a los desafíos energéticos actuales, aprovechando la energía mecánica del agua, es un enfoque que promueve la integración de fuentes renovables en sistemas de tuberías existentes, como el de aguas pluviales. Además, la investigación se alinea con los objetivos de sostenibilidad, abriendo la puerta a la creación de sistemas energéticos híbridos y más eficientes que combinen diferentes fuentes renovables. Lo que representa una alternativa viable y económica frente a las fuentes convencionales de energía.

La falta de energía eléctrica es un acontecer en nuestros días. De esta manera, se plantea como objetivo desarrollar un prototipo para identificar la viabilidad, en el que emplee sensores piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica, para ello se plantea el tipo de circuito (serie, paralelo o mixto) más eficiente para generar y almacenar energía. De igual forma, se identifica el voltaje generado a través del impacto que desarrolla el flujo en el prototipo en donde debemos tener en cuenta los parámetros (**Caudal y Altura de caída**) y estudios previos que influirán en el desarrollo de la investigación. Con la presente investigación se busca generar el incentivo para el desarrollo de fuentes de energía renovables limpias contribuyendo al medio ambiente y empleando sus recursos naturales. Lo que se busca es innovar en la rama de la hidráulica, implementando nuevas tecnologías a las tuberías de aguas pluviales, dichas modificaciones ayudarán a absorber el verdadero potencial del recurso hídrico que al ser expuestas al constante movimiento del fluido será la fuente principal para la producción de energía. Por esta razón, el aumento de la eficiencia a través de mejoras impulsa a la creación de fuentes de reservas de energía limpia que a la larga serán empleadas con conciencia e inteligencia para el desarrollo social, ambiental y cultural. Nuestra investigación tiene el potencial de transformar el panorama energético, fomentando la innovación tecnológica

y el desarrollo de soluciones sostenibles para un futuro más respetuoso con el medio ambiente. No cabe duda, que el desarrollo de la investigación da un enfoque integral a la innovación tecnológica en conjunto con el compromiso ambiental, buscando marcar un avance significativo a sistemas energéticos sostenibles. Al analizar las ventajas, los desafíos y las diversas aplicaciones del material piezoeléctrico, serán de gran ayuda para empezar a generar nuevos sistemas que empleen el recurso hídrico, por tal razón se busca sentar las bases para futuras investigaciones orientadas a la implementación e innovación en ingeniería hidráulica.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se centra en la implementación de sensores piezoeléctricos del tipo PVDF, para la generación de energía eléctrica a través del flujo hidráulico en tuberías de aguas pluviales. La presente investigación es de tipo experimental, ya que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes para observar su efecto sobre las variables dependientes, bajo condiciones controladas. Se adopta un enfoque cuantitativo, ya que se recopilan y analizan datos numéricos para verificar si es posible generar electricidad por impacto de agua sobre piezoeléctricos en un sistema diseñado. Asimismo, el nivel de investigación es correlacional, pues se pretende determinar la relación existente entre variables dependientes e independientes.

El funcionamiento del sistema depende de la cantidad de precipitación (lluvia) que efectuará el impacto de caída sobre el modelo. Por lo que, su ejecución se desarrollará en trabajo de gabinete con la finalidad de evaluar las variables involucradas en el sistema. El análisis se desarrollará para identificar el efecto producido en la variable dependiente (Velocidad de caída) al manipular las variables independientes (altura y diámetro de la tubería), para ver la influencia sobre el material piezoeléctrico y cuantificar la energía que puede producir en el sistema. El diseño experimental contempló un circuito eléctrico que determina la disposición más eficiente en la generación y almacenamiento de energía.

De tal modo, se empleará sensores piezoeléctricos PVDF adaptados para resistir el impacto del agua. Asimismo, se ensamblaron resortes estabilizados con un soporte sobre el sensor para asegurar la deformación mecánica transmitida desde un punto fijo hacia el sensor piezoeléctrico. De la misma forma, se contará con instrumentos de medición, como multímetros que ayudarán a registrar el voltaje generado. Al igual, que los modelos físicos de tuberías serán configurados para replicar las condiciones reales de flujo de aguas pluviales. La investigación fue planteada en tres etapas, el cual se fundamenta en la conversión de energía cinética en energía mecánica.

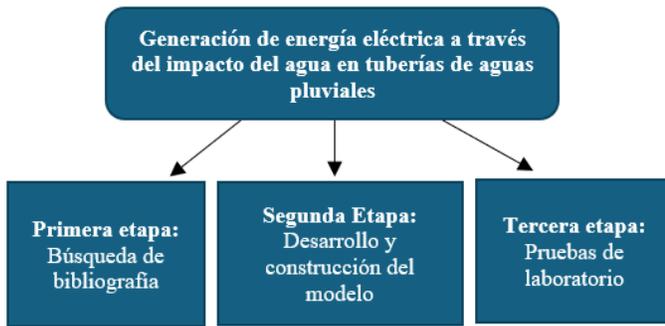


Fig. 1 Etapas del desarrollo de la investigación.

Primera etapa: Recolección de información, diseño y planificación experimental

Se revisaron investigaciones previas sobre materiales piezoeléctricos y aplicaciones similares. Con base en esta información, se diseñó un sistema experimental que integra sensores piezoeléctricos para el aprovechamiento del flujo hidráulico. Por tal motivo, se planteó un diseño experimental para analizar la interacción entre las variables del sistema. La investigación consideró el efecto de las variables independientes, como la altura de caída y el diámetro de la tubería, sobre la variable dependiente, la velocidad del flujo. En esta etapa se incluyó los sensores piezoeléctricos PVDF dentro del diseño propuesto, por su capacidad de conversión de energía mecánica en eléctrica. Asimismo, se efectuó la planificación del circuito eléctrico para la generación y almacenamiento de la energía eléctrica.

Segunda etapa: Desarrollo y construcción del modelo

Se diseñaron formas para simular las condiciones reales de flujo de aguas pluviales. Este modelo fue configurado para trabajar de acuerdo a la cantidad de flujo de aguas pluviales y a las condiciones climáticas de la zona. La adaptación de los sensores piezoeléctricos PVDF conjuntamente con los resortes, se colocaron en puntos estratégicos para soportar el impacto hidráulico, garantizando su resistencia y durabilidad.

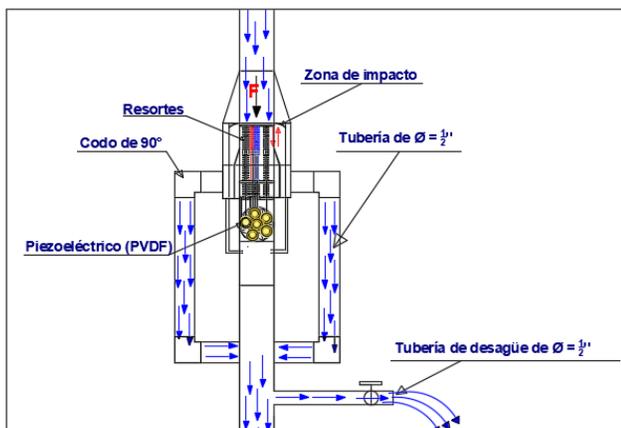


Fig. 2 Partes del sistema diseñado

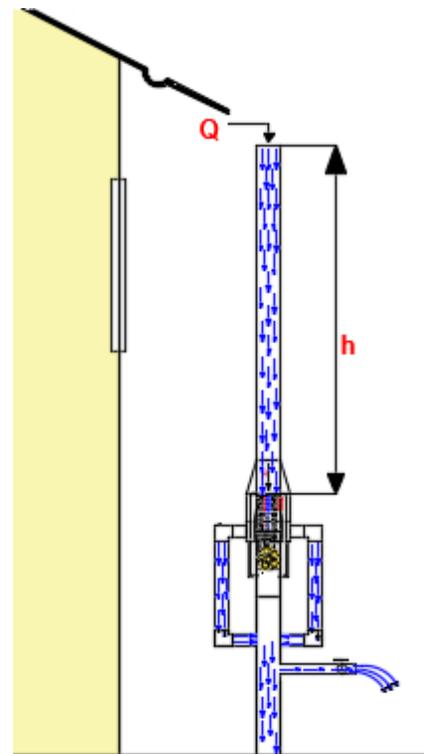


Fig. 3 Diseño geométrico del modelo

Tercera etapa: Pruebas de laboratorio

Las pruebas se llevaron a cabo en un entorno controlado, donde se variaron los parámetros como la altura de caída y el diámetro de la tubería. A la vez, se emplearon instrumentos de medición, como multímetros, para registrar el voltaje generado por los sensores piezoeléctricos. Los datos recolectados permitirán estimar la cantidad de energía generada por el sistema y determinar el tiempo necesario para que el almacenamiento de energía alcance niveles óptimos para su aprovechamiento. Asegurando así que la energía generada sea suficiente y pueda ser utilizada de manera eficaz, para cumplir las necesidades del entorno. Los sensores PVDF que han sido implementados en el diseño del modelo físico con enfoque experimental, busca asegurar el sistema en funcionamiento al estar en contacto con el agua provenientes de las precipitaciones (Lluvias). Las pruebas realizadas en laboratorio y gabinete, permiten verificar la viabilidad del sistema para generar y almacenar energía eléctrica. Es así que se brindan las bases para el desarrollo de sistemas sostenibles, que emplee la energía del agua y la transforme en electricidad.

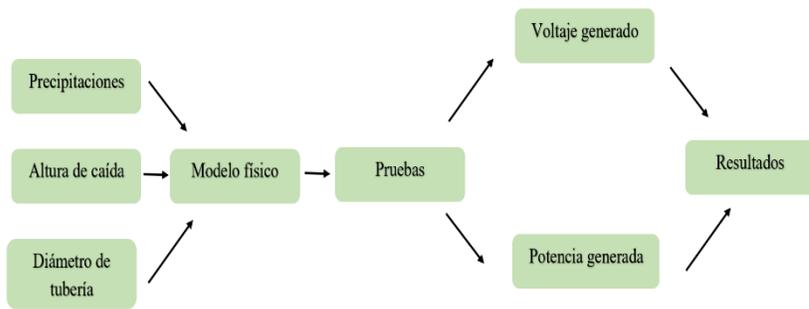


Fig. 4 Metodología para la estimación del voltaje y potencia producida por el impacto del agua.

Para la obtención del voltaje producido por la perturbación en el material piezoeléctrico se emplearon fórmulas matemáticas, las cuales nos brindaron la información para ser tratada y ver que tan eficiente puede ser el sistema realizado. En tal sentido [25], nos proporciona la fórmula para poder determinar la tensión provocada por la deformación del material.

$$V = - \left(G_{33} * h * \frac{f}{\pi * d^2} \right) \quad (1)$$

La ecuación define la tensión que puede alcanzar una carga mecánica sobre el área del piezoeléctrico, donde V: representa la tensión provocada por la deformación del material (V); G_{33} : es la constante piezoeléctrica (Vm/N); H: grosor del piezoeléctrico (mm); F: fuerza aplicada al piezoeléctrico; d: diámetro del piezoeléctrico (m); finalmente A: representa el área del piezoeléctrico (m²)

En tal sentido, se puede determinar la potencia producida por el dispositivo piezoeléctrico, ya que resultara del producto de la tensión de salida por la intensidad de corriente. Por ello según [25], nos proporciona la fórmula para poder determinar la potencia generada por el piezoeléctrico.

$$P = V * I \quad (2)$$

Donde las variables; V: representa al voltaje (V); I: intensidad de corriente eléctrica (A) y P: potencia generada por el dispositivo piezoeléctrico (W).

No obstante, para la fuerza ejercida sobre el piezoeléctrico se hará uso de la segunda ley de Newton, la cual nos dice que la fuerza es igual al producto de la masa por la gravedad. Hay que resaltar que se tomara en cuenta un volumen de control en la tubería para obtener el peso del líquido en kg y poder identificar

la fuerza con la que actuara sobre el material piezoeléctrico. De tal modo [25], nos indica la expresión para poder determinar la fuerza ejercida por el agua sobre el piezoeléctrico.

$$F = m * g \quad (3)$$

Donde se debe conocer; m: masa del volumen de control (kg) y g: gravedad equivalente a 9.81 m/s^2 .

Finalmente, se conocerá el área de contacto en el piezoeléctrico, es decir, el área del cerámico que estará en contacto con la fuerza aplicada por el fluido. Por lo cual [25], nos proporciona la fórmula para determinar el área de contacto en el piezoeléctrico.

$$A = \frac{A_p^2 * AC * \pi}{4} \quad (4)$$

En donde; A_p : área de acción del disco; A_c : área del piezoeléctrico (m²) y π : valor constante igual a 3.1416.

La selección del resorte será de gran importancia en la deformación del material del piezoeléctrico, ya que su operación se basa en hacer que regrese a su posición original cuando será deformada, lo que prepara al modelo para el siguiente volumen de agua que impactara sobre el piezómetro.

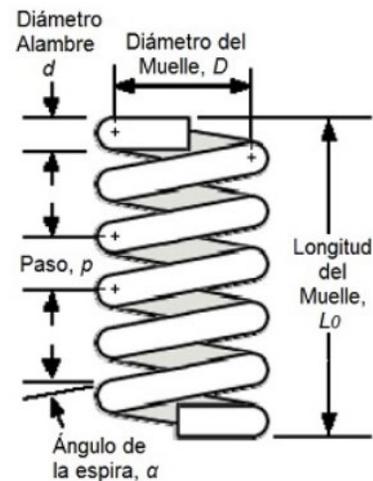


Fig. 5 Referencia de dimensiones de un resorte.

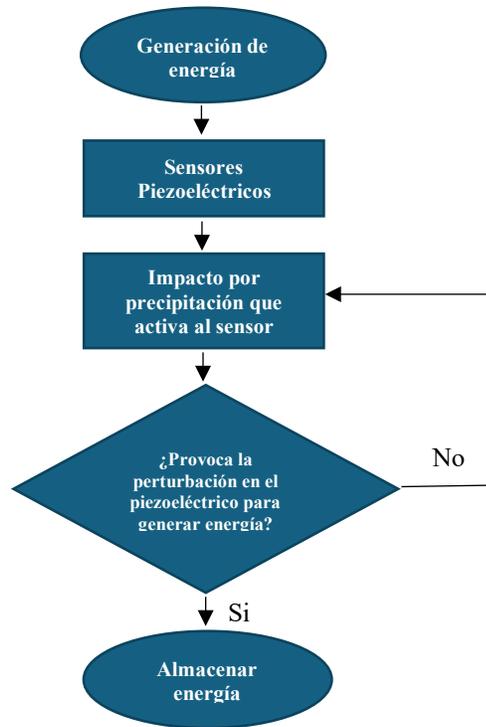


Fig. 6 Diagrama de flujo para la generación de energía por impacto de agua en sensores piezoeléctricos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada en Cajamarca, Perú, caracterizada por un régimen de precipitaciones variables, con intensidades que fluctúan entre 14.56 mm/h y 30 mm/h, valores que fueron tomados como base para simular las condiciones de impacto en el modelo experimental. Esta variabilidad climática es típica de la región andina, donde se registran eventos de lluvia moderada a intensa durante temporadas específicas del año. En tal sentido, el modelo desarrollado permitió el eficiente direccionamiento del caudal de agua por el sistema de tuberías para su posterior desagüe, sin afectar el núcleo del sistema piezoeléctrico implementado. Con la finalidad, de que el chorro de agua impacte directamente sobre el núcleo protegido y sea desplazado por un sistema de descarga. Por ello, los volúmenes de agua que ingresan serán direccionados sin que afecten al sistema diseñado, especialmente al núcleo. De esta manera, se logró tener un equilibrio en el sistema, entre las entradas y salidas de caudal, para poner analizar un volumen de control al poner en funcionamiento el sistema con piezoelectricidad.

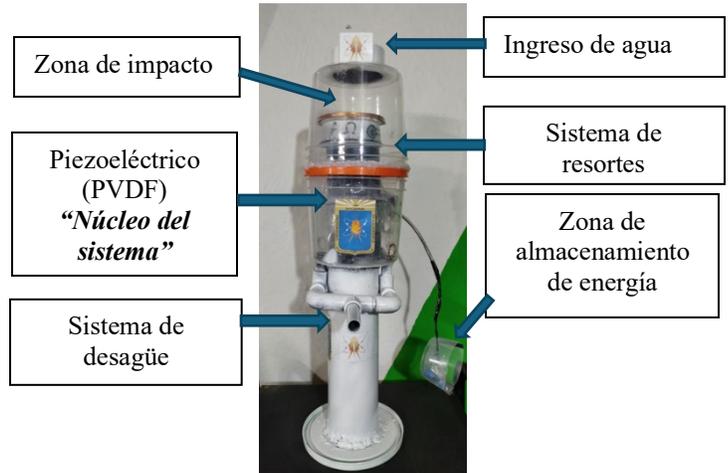


Figura 7: Modelo para la generación de electricidad por impacto del agua en piezoeléctricos.

Como es posible visualizar en la Fig.7, se observa el centro del sistema a base de piezoeléctricos implementados en el modelo diseñado, el cual permite el paso del flujo sin ser afectado por el agua al impactar sobre ella. De esta manera, el choque o impacto generado será transmitido directamente al centro del sistema, en donde será accionado produciendo una pequeña deformación en su interior que será convertida en energía eléctrica para su posterior almacenamiento y aprovechamiento.

Almacenamiento de energía experimental en modelo físico de laboratorio:

Puesto en funcionamiento el modelo diseñado, se verificó que cumple las condiciones en que fue desarrollado, es decir que impacte el caudal de agua sobre el sistema piezoeléctrico y sea desaguado por una red de tuberías hacia un punto en específico. Por lo tanto, se procedió al desarrollo experimental en donde las variables que fueron modificadas para el análisis respectivo son el caudal y la altura. Por esta razón, se desarrolló la experimentación para diferentes altura y caudales dentro de un rango establecido a través de mediciones realizadas en tiempo real de caudales para cada precipitación (lluvias).

TABLA I
REGISTRO DE CAUDALES (Q) PARA CADA
INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN (I_{PP}) PARA
SIMULACIÓN EN EL MODELO

Fecha	A (m2)	T (PP) h	LPP (mm)	I (PP) mm/h	V (l)	T (s)	Q (l/s)
25/01/2025	20	0.2078	4.5	21.66	3	167	0.0180
25/01/2025	20	0.1031	1.5	14.56	0.6	100	0.0060
25/01/2025	20	0.1167	3.5	30.00	0.9	15.33	0.0587
28/01/2025	20	0.0289	3	103.85	4	-	-
28/01/2025	20	0.1667	3.5	21.00	4	-	-

En la tabla I, se muestran los resultados de los caudales que serán simulados en el modelo desarrollado. Se puede visualizar que el valor máximo y mínimo son de 0.0587 l/s para una intensidad de precipitación de 30 mm/h y 0.0060 l/s para una precipitación de 14.56 mm/h, respectivamente. Lo que implica el rango de caudales a establecer para su funcionamiento, con caudales semejantes a la realidad. Donde:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (5)$$

$$I = \frac{LPP}{t} \quad (6)$$

Siendo: V: el volumen de agua, t: Tiempo de llenado del recipiente y LPP: lámina de precipitación

Los ensayos en el modelo físico fueron desarrollados para alturas entre los 0.5 m hasta los 5 m, aumentado 0.5 m para cada registro. Generando de esta manera 100 ensayos experimentales obtenidos del modelo físico de laboratorio, en donde se variará la altura para caudales dentro del rango establecido e identificar el voltaje máximo y mínimo con su respectivo almacenamiento producido por el impacto del agua.

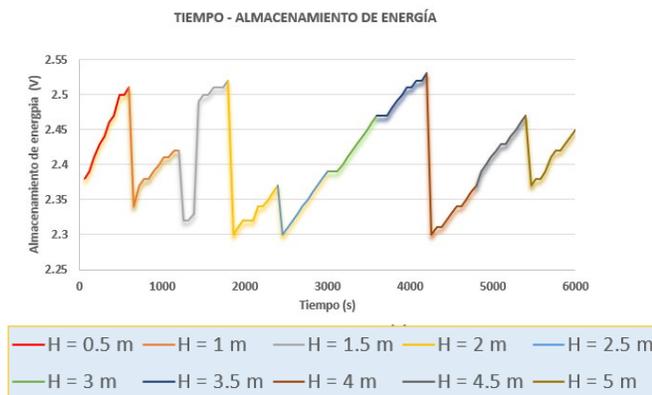


Figura 8: Gráfica del almacenamiento de energía generado para cada altura.

En la Fig. 8. Los resultados generados indican que el almacenamiento producido por cada caudal en accionamiento, para un tiempo de 60 segundos es de 0.01 V, valor que fue registrado a través de un instrumento de medición denominado

multítester. Teniendo en cuenta que los valores registrados de voltaje máximo a la que llega a almacenar son de 2.53 V, a partir de ese registro, se mantiene constante, por lo cual se optó por descargar la batería a 2.30 V para empezar a registrar nuevos cálculos.

En tal sentido, se pudo consignar que por más altura y caudal que se le produzca el almacenamiento producido será el mismo, con un valor de 0.01 V. Por lo cual, se señala que el primer impacto genera mayor cantidad de voltaje. Luego de cierto tiempo el impacto del agua es leve, ya que el caudal empieza a impactar de manera constante, generando una deformación mínima. Cabe destacar, que las vibraciones del sistema en funcionamiento son transmitidas al sistema piezoeléctrico influenciando en la generación de energía. De esta manera, se obtiene un valor de 0.01 V como valor mínimo y valores máximos de 0.22 V, para un caudal de 0.03016 m³/s en el primer impacto

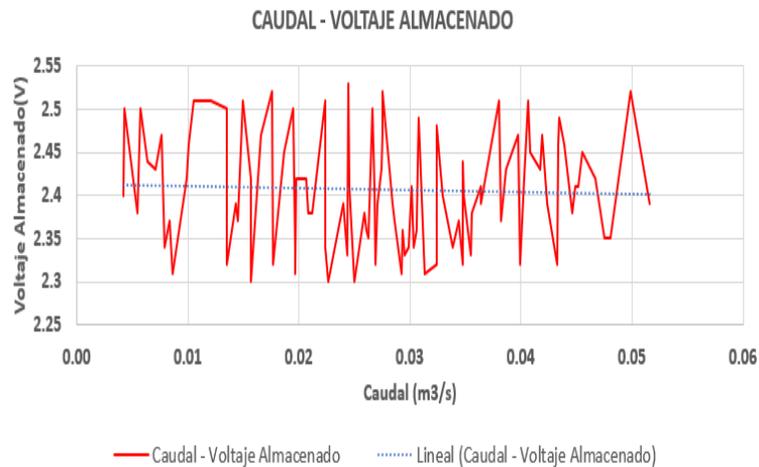
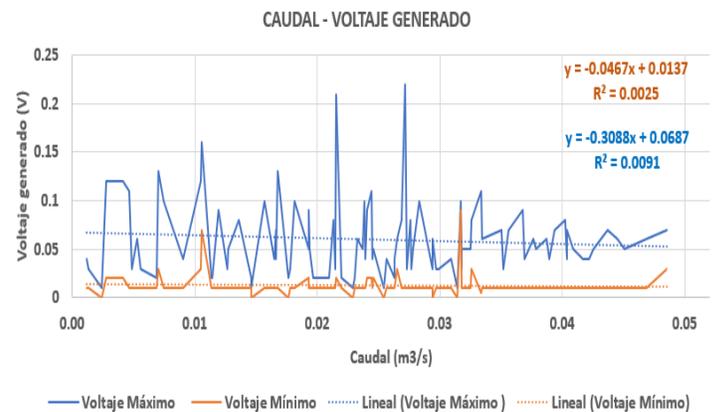


Figura 9. Gráficos del caudal versus el voltaje generado

En la Fig. 9. Se muestran los registros obtenidos en los ensayos realizados, los cuales indican los voltajes máximos y mínimos producidos por el impacto para cada caudal dentro del rango

establecido. Los valores de voltajes máximos y mínimos registrados por el accionamiento del agua sobre el piezoeléctricos fueron de 0.22 V y 0.00 V respectivamente.

De la misma manera, la gráfica del caudal – voltaje almacenado muestran los valores del voltaje que se almacenara para cada caudal con un valor máximo de 2.53 V y un mínimo de 2.30 V. Sin embargo, cuando el sistema se encuentra en funcionamiento por el accionamiento o manipulación de una persona, el valor del voltaje es superior a comparación con el impacto del agua, por la misma fuerza que se ejerce sobre el núcleo y la transmite a los piezoeléctricos.

Las pruebas experimentales incluyeron 100 ensayos, variando los caudales dentro de un rango de 0.00417 l/s hasta 0.0587 l/s y alturas desde 0.5 m hasta 5 m, con incrementos de 0.5 m. Durante los experimentos, se verificó que el voltaje almacenado en la batería de 3V alcanzó un valor máximo de 2.51V, con una generación estable de 0.01V en condiciones de impacto continuo. La confiabilidad de la información de laboratorio obtenida en el modelo físico fue verificada con el método de Split–halves, donde el coeficiente de Spearman Brown es: $r_{tt} = 0.50136$, que nos indica la confiabilidad media.

Estos resultados obtenidos reflejan similitud a los estudios previos sobre sistemas piezoeléctricos en medios hídricos. Por ejemplo, investigaciones como las de [7] y [8] han demostrado que la energía generada por impactos de gotas de lluvia tiende a estabilizarse con el tiempo debido a la reducción progresiva en la deformación del material. Del mismo modo, [15] señala que la eficiencia en la conversión de energía depende de la posición y tipo de sensor, indicando que los arreglos en cantiléver mejoran la captación de energía vibracional.

La investigación también coincide con estudios como los de [16] y [17], en los que se analizaron baldosas piezoeléctricas para generar energía eléctrica en espacios urbanos. En esos casos, se encontró que la energía recolectada no era suficiente para aplicaciones de alto consumo debido a la baja eficiencia del sistema. En el presente estudio, se observó un comportamiento similar, donde el impacto inicial del caudal produjo la mayor generación de voltaje, pero al mantenerse el flujo constante, la deformación del material se estabilizó, limitando la generación de energía adicional.

Sin embargo, el sistema propuesto presenta un enfoque prometedor para el aprovechamiento de energía en sistemas de drenaje urbano y redes de aguas pluviales. Investigaciones como la de [21], han explorado la generación de energía a partir del movimiento del agua en cuerpos flotantes, encontrando que el diseño del transductor es clave para mejorar la eficiencia del sistema. De manera similar, la optimización de la configuración del sistema piezoeléctrico podría incrementar el voltaje generado y mejorar la viabilidad del modelo propuesto.

Los resultados obtenidos demuestran que la generación de energía a partir del impacto del agua en materiales

piezoeléctricos es factible, pero la eficiencia a gran escala sigue siendo un reto. Factores como la configuración del circuito (serie, paralelo o mixto), la optimización de la disposición de los sensores y el almacenamiento eficiente de la energía recolectada deben ser considerados en futuras investigaciones para mejorar la aplicabilidad del sistema en entornos reales.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto demostró que es posible generar energía a partir del agua de lluvia usando sensores piezoeléctricos. Aunque los resultados iniciales muestran una producción de energía pequeña (alrededor de 0.01 V en impactos continuos), se logró probar que la idea funciona. Esto significa que existe potencial para desarrollar sistemas más eficientes que aprovechen algo tan común como la lluvia, para generar electricidad. El modelo demostró su funcionalidad frente al accionamiento de los piezoeléctricos con impacto del agua, pero con un rendimiento bajo por la cantidad de capas impermeabilizantes que fueron colocadas como protección del núcleo del sistema, el cual implica en el accionamiento del piezoeléctrico, ya que la transmisión de la fuerza de impacto se reduce. Por ende, al impermeabilizar el modelo se tendrá contacto directo con el piezoeléctrico y aumentará la generación de energía para almacenarla. El modelo diseñado puede estar complementado con sistema de registro de las mediciones de intensidades de precipitación, el cual permita medir la lámina de agua en todo el periodo de duración de la precipitación, ayudando en la toma de registros para ser almacenados en una base de datos. La investigación, puede tomar un impulso en el desarrollo de mecanismos que funcionen con piezoelectricidad, una vanguardista propuesta para brindar grandes cambios empleando como fuente de energía los fenómenos meteorológicos como las precipitaciones, que desde ahora será vista como un recurso aprovechable que beneficiara al ámbito ambiental, social y económico.

REFERENCIAS

- [1] M. V. Zambrano y A. A. Pereira, “Historia de los materiales piezoeléctricos. Efecto piroeléctrico, electro-strictivo y electro – óptico. Proceso de fabricación de cerámicas piezoeléctricas,”
- [2] Grant, S. (2020). *DEWEsoft*. Madrid, España. Recuperado de <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-sensor#what-do-sensors-do>.
- [3] Balcells, J., y Romeral, J. (1997). *Automatas programables*. Barcelona, España: Marcombo.
- [4] Pallas, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona, España: Marcombo Boixareu.
- [5] B. Jimenez, *Materiales piezoeléctricos*, 1.ª ed. Madrid: Editorial Complutense, 2006.
- [6] Galeano, F., & Enrique, A. (2018). Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza (Doctoral dissertation).
- [7] Dajes Dávalos, L. M. Generación de energía eléctrica a partir del paso de vehículos por un reductor de velocidad de sección trapezoidal ("rompemuelle").
- [8] Martínez, J. S. C. (2021). Diseño de un sistema que utilice las gotas de lluvia para generar energía (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México).

- [9] Ros, J., y Barrera, Ó. (2011). *Sistemas eléctricos y de seguridad y confortabilidad*. Madrid, España: Ediciones Paraninfo.
- [10] F. Viola, P. Romano, R. Miceli, et al.: Int. Conf. on Clean Electrical Power (2013)
- [11] Morarka, A., Ghaisas, S., & Date, A. (2016). Design of a High sensitivity fluid energy harvester. Lst International Conference on Energy and Power, ICEP2016. Melbourne: Elsevier.
- [12] Rosmin, N., Jauhari, A., Mustaamal, H., Husind, F., & Hassane, M. Y. (2014). Experimental study for the single-stage and double-stage two-bladed Savonius micro-sized turbine for rain water harvesting (RWH) system. *2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*. Malaysia: Elsevier.
- [13] Tang, Q., Wang, X., Peizhi, & He, B. (2016). A Solar Cell That Is Triggered by Sun and Rain. *Angewandte Chemie*, 5243-5246.
- [14] Zyga, L. (2008). Rain Power: Harvesting Energy from the Sky. *phys.org*.
- [15] Adnan, M., & Swingler, J. (2015). Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts. Elsevier.
- [16] Menéndez Melé, A. (2022). Desarrollo de un prototipo de baldosa generadora de energía eléctrica a partir de la piezoelectricidad y almacenamiento de la energía producida (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [17] Tena Torrecilla, K. (2017). Implementación de sensores piezoeléctricos para la generación eléctrica bajo calzada: aplicaciones en el Aeropuerto de Barcelona (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [18] Psoma, S. D., Tzanetis, P., & Tourlidakis, A. (2017). ScienceDirect Symposium on Flexible Organic Electronics A practical application of energy harvesting based on piezoelectric technology for charging portable electronic devices. *Materials Today: Proceedings*, 4(7), 6771–6785. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.004>
- [19] Orrego, S., Shoel, K., Ruas, A., Doran, K., Caggiano, B., Mittal, R., & Hoon, S. (2017). Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag. *Applied Energy*, 194, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.016>
- [20] Ulhoa, F. C. P., Magalhaes, P. A. A., De Souza Floriano, R. A., & Coutinho, V. N. (2017). Electric power generation with piezoelectricity for cargo ships. 2017 12th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2017. <https://doi.org/10.1109/EVER.2017.7935884>
- [21] Viet, N. V., Xie, X. D., Liew, K. M., Banthia, N., & Wang, Q. (2016). Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester. *Energy*, 112, 1219–1226. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.019>
- [22] Fadhil, N., & Saber, D. (2013). Energy Harvesting Using Nano Scale Dual Layers PVDF Film for Blood Artery. *IEEE*, 2–7. <https://doi.org/10.1109/LISAT.2013.6578250>
- [23] Melgarejo Jiménez, I. R., & Lozano López, D. A. Sistema de generación de energía eléctrica en una plantilla de calzado para la carga de una batería de un celular.
- [24] Chacón, C. A., Cortés, J. D., Giral, D. A., & Romero, R. R. (2012). Piezoelectricidad en un BUZZER. *Tecnura*, 16, 111-119.
- [25] Alvarado Calle, E. J., & Verdezoto León, C. A. (2023). Desarrollo de alfombra recolectora de energía mediante la aplicación de cosecha de energía (ENERGY HARVESTING) utilizando dispositivos piezoeléctricos para el ahorro de consumo de energía eléctrica (Bachelor's thesis).