

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas  
Carrera de Electricidad

**ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN PIEZOELÉCTRICA MEDIANTE EL  
ESTUDIO DE LAS FLUCTUACIONES DE PRESIÓN HIDRÁULICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

**AUTOR:**

Wilson Jefferson GUATEMAL Cobacango

**DIRECTOR:**

MSc. Julio Guerra

Ibarra- 2022



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1727534198		
APELLIDOS Y NOMBRES:	GUATEMAL COBACANGO WILSON JEFFERSON		
DIRECCIÓN:	TABACUNDO		
EMAIL:	wjguatemalc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	022 119 135	TELÉFONO MÓVIL:	099 164 9581

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN PIEZOELÉCTRICA MEDIANTE EL ESTUDIO DE LAS FLUCTUACIONES DE PRESIÓN HIDRÁULICAS
AUTOR (ES):	Guatemala Cobacango Wilson Jefferson
FECHA: DD/MM/AAAA	25/10/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Electricidad
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc.

#### 2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días del mes de octubre de 2022

EL AUTOR:

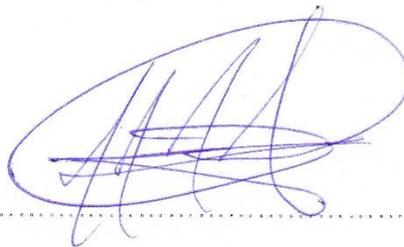
Guatemala Cobacango Wilson Jefferson

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Julio Esteban Guerra Masson en calidad de tutor del señor estudiante Guatemala Cobacango Wilson Jefferson, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN PIEZOELÉCTRICA MEDIANTE EL ESTUDIO DE LAS FLUCTUACIONES DE PRESIÓN HIDRÁULICAS”**.

Para obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal dotted line.

MSc. Julio Esteban Guerra Masson  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de grado está dedicado a mi familia pues ellos son el pilar fundamental para la formación de mi vida profesional, ayudándome con el apoyo moral y los recursos necesarios para continuar con mi formación educativa a fin de seguir adelante y no rendirme frente a las adversidades que se atraviesan en el camino.

A mis amigos y personas quienes aportaron en el camino de mi carrera universitario permitiéndome compartir maravillosos momentos y poder concluir la investigación aquí plasmada.

## **Agradecimiento**

Primero agradezco a Dios por permitirme formar parte de una familia maravillosa y tener una extraordinaria experiencia a través de mi carrera universitaria y personal, siendo esta una base fundamental para conseguir cada logro en mi vida.

Agradezco de manera especial al MSc. Julio Guerra, por ser un excelente guía en el proceso de investigación del trabajo de grado, por la dedicación y comprensión que me ha brindado mediante su dirección.

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte por permitirme ser parte de la carrera de electricidad, por haber sido un pilar fundamental en mi formación personal y profesional mediante docentes altamente capacitados.

Expreso mis agradecimientos para el MSc. Daniel Andagoya por el apoyo brindado durante mi trayectoria universitaria, por ser un gran docente y ayudarme con los conocimientos importantes en la rama de Ingeniería eléctrica, siendo él la persona que admiro y por la cual me motive para formar parte de esta hermosa carrera.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y amigos por los momentos de alegría vividos juntos durante todo este tiempo; en especial a Karen, Gregori, Jesús, Bryan y Santiago, por todo el apoyo moral y su gran amistad.

## Tabla de contenido

Dedicatoria .....	3
Agradecimiento .....	5
Tabla de contenido .....	6
Índice de Figuras .....	8
Índice de Tablas .....	9
Resumen .....	10
Abstract .....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
A1. Contextualización .....	12
A2. Problema .....	14
A3. Formulación del problema .....	14
A4. Justificación .....	15
A5. Alcance .....	15
A6. Objetivo General .....	16
A7. Objetivos Específicos .....	16
CAPÍTULO 1 .....	17
1.1. Piezoelectricidad .....	17
1.2. Efecto piezoeléctrico .....	17
1.3. Materiales Piezoeléctricos .....	21
1.3.1. Materiales Naturales .....	21
1.3.2. Materiales Artificiales .....	22
1.4. Tecnologías Piezoeléctricas .....	26
1.5. Conversión de energía mecánica a eléctrica .....	28
1.5.1. Fuentes de recolección de energía (Energy Harvesting) energías renovables .....	28
1.5.2. Fluctuación de presión hidráulica para generación de energía .....	30
1.5.3. Procesos de conversión .....	33
1.6. Sistemas piezoeléctricos .....	35
1.6.1. Dispositivos piezoeléctricos .....	37
1.6.2. Aplicaciones a sistemas eléctricos y mecánicos .....	39
CAPÍTULO 2 .....	41
2.1. Fluctuación Hidráulica para generación de energía por piezoelectricidad .....	41
2.1.1. Medición a partir de factores hidráulicos .....	42

2.1.2.	Voltaje en función de la fuerza aplicada.....	46
2.2.	Diseño y construcción del prototipo de generador piezoeléctrico.....	47
2.2.1.	Herramientas de modelación computarizadas .....	47
2.2.2.	Desarrollo de Conexión del generador piezoeléctrico .....	48
2.2.3.	Almacenamiento de la energía del PEG .....	49
2.2.4.	Modelo de recolección PEG.....	50
2.3.	Desarrollo del generador piezoeléctrico.....	54
2.3.1.	Selección de material para construcción del prototipo .....	54
2.3.2.	Mediciones de datos.....	64
CAPÍTULO 3 .....		66
3.1.	Generación de electricidad mediante fluctuación de presión hidráulica .....	66
3.1.1.	Datos de generación.....	66
3.1.2.	Selección de prototipo viable de generación eléctrica.....	72
3.2.	Presupuesto del prototipo .....	74
3.2.1.	Valoración precio prototipo .....	74
3.2.2.	Proyección de aprovechamiento útil del PEG .....	76
3.3.	Factibilidad de generación .....	78
Conclusiones.....		80
Recomendaciones.....		81
Referencias .....		82
Anexos .....		85

## Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de polarización aplicado efecto piezoeléctrico directo.	18
Figura 2. Numeración de ejes en cerámica piezoeléctrica y dirección	19
Figura 3. Constante de carga piezoeléctrica aplicada por presión perpendicular	19
Figura 4. Constante de carga piezoeléctrica aplicada por presión paralela	20
Figura 5. Componentes principales de un sensor piezoeléctrico	27
Figura 6. Sensores piezoeléctricos de presión	28
Figura 7. Circuito Energy Harvesting	30
Figura 8. Carga generada a partir de una aplicación mecánica	33
Figura 9. Modelo zigzag con dos estructuras piezoeléctricas	34
Figura 10. Capas en zigzag para mejorar la deformación del material	34
Figura 11. Esquemático de un sistema de generación piezoeléctrico	37
Figura 12: Metodología de diseño y análisis	42
Figura 13. Conexionado de los prototipos en paralelo (Simulink)	49
Figura 14. Generación, rectificación y Filtrado del PEG para consumo y almacenamiento en la batería (Simulink)	50
Figura 15. Circuito Equivalente del PEG (Simulink)	50
Figura 16. (A) Vista frontal del primer prototipo. (B)	58
Figura 17. Prototipo ubicación paralela	58
Figura 18. (A)Vista frontal del prototipo 2.	59
Figura 19. Prototipo ubicación con recubierto termo retráctil	59
Figura 20. (A) Vista frontal tercer prototipo con recubrimiento impermeable (B)	60
Figura 21. Generador piezoeléctrico con recubrimiento impermeable	60
Figura 22. (A) Vista frontal del PEG recubierto por termo retráctil (B)	61
Figura 23. Generador PEG recubierto termo retráctil sin resistencia base	61
Figura 24. Circuito del prototipo integrado (Fritzing)	62
Figura 25. Diagrama e flujo del funcionamiento sensorial	63
Figura 26. Circuito de generación y almacenamiento del PEG	63
Figura 27. Instalaciones de Almacenamiento y distribución de agua	64
Figura 28. Mediciones del generador piezoeléctrico	65
Figura 29. Variaciones de voltaje con relación al caudal del primer prototipo	67
Figura 30. Variaciones de voltaje con relación al caudal del segundo prototipo	69
Figura 31. Variaciones de voltaje con relación al caudal del tercer prototipo	70
Figura 32. Variaciones de voltaje con relación al caudal del cuarto prototipo	71

## Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los materiales piezoeléctricos	24
Tabla 2. Valores de velocidad del agua por caudal	52
Tabla 3. Voltaje piezoeléctrico en condición de presión hidráulica por tubería	52
Tabla 4. Voltaje piezoeléctrico en condición de presión hidráulica por paredes	54
Tabla 5. Ponderación del Arduino para el desarrollo del prototipo	55
Tabla 6. Materiales que conforman el prototipo de generador piezoeléctrico	55
Tabla 7. Resultados de medición del primer prototipo	67
Tabla 8. Valores de medición del segundo prototipo	68
Tabla 9. Valores de medición del tercer prototipo	69
Tabla 10. Valores de medición del cuarto prototipo	71
Tabla 12. Ponderación de factibilidad en generación	73
Tabla 13. Costo y proyección de energía del PEG por espacio de instalación	75
Tabla 14. Tiempo de generación por equipo eléctrico	76
Tabla 15. Capacidad de almacenamiento y costo	77

## Resumen

El aumento de la población y la industria a nivel mundial ha generado un crecimiento en la demanda energética, por lo tanto; la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de captación de energía se ha convertido en un pilar fundamental para satisfacer las necesidades de la sociedad, adicionalmente es necesario que aquellas nuevas fuentes sean amigables con el medio ambiente y aprovechen todas las formas de producción posible. La generación piezoeléctrica se ha considerado como una alternativa eficiente para la generación de energía eléctrica, debido al aprovechamiento de la energía mecánica producida en el medio ambiente y por diversas actividades humanas para la producción de electricidad. Los procesos que generan energía cinética pueden ser convertidos en electricidad utilizando generadores piezoeléctricos, como pueden ser el aprovechamiento de las oscilaciones hidráulicas tanto de sistemas de tuberías como de depósitos naturales. En la presente investigación se desarrolla cuatro modelos piezoeléctricos de generación colocados en un sistema cerrado de tuberías de distribución de agua potable, donde el promedio de circulación del líquido es de 29 l/s, alcanzando un nivel de voltaje promedio por generador de 12.77 V en el primer, 11.90 V en el segundo, 9.16 V en el tercero y 14.28 V en el cuarto generador. A partir del análisis matemático y el desarrollo de los diferentes prototipos se realiza una proyección para el estudio de factibilidad de generación piezoeléctrica a partir de fluctuaciones hidráulicas, el sistema de generación trata de satisfacer pequeñas cargas de consumo de tal manera que la energía producida a partir del generador piezoeléctrico pueda ser aprovechada.

**Palabras Claves:** Energías Renovables, Factibilidad de generación, Generador piezoeléctrico, Piezoelectricidad.

## **Abstract**

The increase in population and industry worldwide has generated a growth in energy demand. Therefore, The search and development of new sources of energy capture have become a fundamental pillar to meeting the needs of society. It is also necessary that these new sources are friendly to the environment and take advantage of all possible forms of production. The piezoelectric generation has been considered an efficient alternative for generating electrical energy due to the use of mechanical energy produced in the environment and by various human activities for producing electricity. Processes that generate kinetic energy can be converted into electricity by piezoelectric generators, such as the use of hydraulic oscillations in both piping systems and natural reservoirs. In the present investigation, we present four piezoelectric generation models placed in a closed system of drinking water distribution pipes. The average circulation of the liquid is 29 l/s, reaching an average voltage level per generator of 12.77 V in the first., 11.90 V in the second, 9.16 V in the third, and 14.28 V in the fourth generator. From the mathematical analysis and the development of the different prototypes, a projection was developed for the feasibility study of piezoelectric generation from hydraulic fluctuations; the generation system tries to satisfy small consumption loads in such a way that the energy produced from the piezoelectric generator could be harnessed.

**Keywords:** Renewable Energies, Feasibility of generation, Piezoelectric generator, Piezoelectricity.

# INTRODUCCIÓN

## A1. Contextualización

El aumento de la población mundial ha llevado a un incremento en la demanda de energía en los últimos años, debido a esto el crecimiento de la demanda de energía eléctrica aumento un 10,87% entre los años 2015 al 2020, se espera que la demanda de electricidad aumente un 4,5% en 2021 (International Energy Agency, 2021). En la sociedad actualmente las personas presentan un gran incremento en la demanda de grandes recursos que generen energía, estos a su vez sean capaces de satisfacer las necesidades de producción de bienes y servicios (Rios & Fernández, 2017).

Las fuentes de energía en la actualidad se encuentran divididas en dos grandes grupos, tanto las energías renovables como no renovables, estas se encuentran distribuidas en diferentes elementos e implementaciones para la producción de electricidad (Nieto & Sotelo, 2018). Para el año 2020, el total de suministro de energía primaria mundial se mostró fragmentado en varios recursos tales como, el petróleo tomando un mayor índice de consumo con un 31,4%, el carbón con un 26%, el gas natural con un 23% (Statista, 2020). Del total de recursos extraídos de dichos materiales no renovables, un 65,24% fue utilizado con fines de generación eléctrica en todo el mundo (Agencia Internacional de Energía, 2016). Los recursos renovables en los cuales se destaca la hidráulica con un 2,3% se encuentran en crecimiento, las energías que generar menos impacto ambiental como el caso de la fotovoltaica y eólica han aumentado con respecto al año 2012 del 1.1% al 2,3%, se espera que este índice continúe incrementando para el año 2030 a 4,3% de suministro de energía primaria en el mundo (Statista, 2020).

En el caso del Ecuador la demanda de electricidad incremento en un 24,21% con respecto a los años 2015 y 2019, este acontecimiento es notorio en todas las partes del mundo, el avance de la tecnología ha generado un gran incremento en el consumo eléctrico (OutWordinData, 2020). Para el año 2020 en el Ecuador se observó un incremento en la producción de energía eléctrica por parte de las energías renovables con el fin de reducir el

consumo de los combustibles fósiles, el total de producción de energía renovable en el país es de 78,89%, las cuales se encuentran conformadas por la energía hidráulica, eólica, fotovoltaica, biomasa y biogás, por otro lado, tenemos la producción de energía no renovable con un 21.08% (Arconel, 2020).

La emisión de gases de efecto invernadero genera un impacto negativo en el ecosistema, las industrias de energía eléctrica a partir de fuentes fósiles son las que presentan un mayor índice de emisión con un 25% (Jenniches, 2018). Mediante el incremento del consumo se presentará mayor emisión de los gases de efecto invernadero por la quema de combustibles, debido a esto existe una mayor presión a nivel internacional en adaptaciones de nuevas fuentes de energía renovables (Yajure & Yaismir, 2017).

Las nuevas fuentes renovables están enfocadas en la parte de transformación de energía, las cuales pueden realizar acciones en la generación eléctrica, con el fin de proteger el ecosistema, la aplicación de los nanomateriales en las energías renovables permiten generar esa transformación, por parte de la nano generación existen tres tipos de materiales los cuales son más relevantes para la producción de electricidad como son los piezoeléctricos, piroeléctricos y triboeléctricos capaces de generar energía aprovechando las condiciones y acciones de dichos materiales presentes en la naturaleza, siendo estas expuestas a diferentes factores de esfuerzo mecánico y variaciones en diferentes medios, como el movimiento del agua, el auge peatonal, el movimiento de los vehículos, entre otros (Sánchez, 2018).

La generación de energía eléctrica a partir de los materiales piezoeléctricos va tomando mayor relevancia debido a que son fuente de energía mucho más amigables con el ambiente, que a la vez puedan ser capaces de generar electricidad en el futuro de una manera óptima. Sin embargo, todavía no se presenta mucha información respecto a la implementación de dichos dispositivos en espacios estratégicos (Aleman, 2016). La variación de los fluidos consta del movimiento continuo o la regulación de la presión producida por el agua, dicho factor no genera ninguna aplicación relevante para la producción de electricidad,

estos se muestran como una acción necesaria para el movimiento adecuado del mismo (Fischer, 2018).

## **A2. Problema**

En los últimos años, el crecimiento de la población y la industria ha generado un aumento en la demanda de energía eléctrica. Este crecimiento ha llevado a varios problemas relacionados, tales como la reducción de los recursos no renovables utilizados para la producción de electricidad; también el impacto medioambiental y el aumento del costo de mantenimiento de los materiales para su generación. Por medio de los altos costos de producción de las energías eléctrica por parte de las fuentes renovables, y baja información en aprovechamiento de estas por diferentes condiciones y elementos, las energías no renovables todavía siguen siendo la mayor fuente de producción para la generación de energía eléctrica. Debido a esta problemática, las investigaciones están orientadas a la búsqueda y generación de nuevas alternativas de energía eléctrica, las cuales sean sustentables y sostenibles.

En el medio ambiente se genera diversos fenómenos o actividades naturales, los cuales realizan acciones constantes como las fluctuaciones del agua producidas por los ríos, mares, lagos e incluso en los sistemas de distribución de agua, estas acciones producen presión hidráulica en su entorno, las cuales generan energía mecánica debido a diferentes condiciones, las mismas que son desaprovechadas para la producción de energía eléctrica.

## **A3. Formulación del problema**

¿Cuál es la factibilidad técnica del aprovechamiento de las fluctuaciones en la presión hidráulica, producidas en los reservorios de distribución de agua en una zona de consumo en el cantón Pedro Moncayo, para la obtención de energía eléctrica utilizable, mediante elementos piezoeléctricos?

#### **A4. Justificación**

El presente trabajo de investigación se plantea realizar un análisis de la factibilidad de generación eléctrica a partir de materiales piezoeléctricos, enfocados en la fluctuación de la presión hidráulica producida en los reservorios de almacenamiento y distribución de agua en una zona del cantón Pedro Moncayo, estos a su vez generen menos contaminación y provee de una fuente de energía utilizable para diferentes aplicaciones de medición cotidianas, de tal manera que presente una forma alternativa para la reducción del consumo de recursos fósiles, generando grandes ventajas de análisis para la producción eléctrica.

Existen temas o campos de estudio referente a los materiales piezoeléctricos, sin embargo, existe pocos análisis respecto a su aprovechamiento y su posible aplicación para la generación de electricidad tomado mediante la fluctuación de la presión hidráulica en un contexto real.

Esta investigación busca determinar la viabilidad de la implementación de nuevas tecnologías, como son los materiales piezoeléctricos, las cuales son capaces de generar y recolectar energía eléctrica para ser usadas en espacios específicos donde se produce presión hidráulica, de esta manera se promueve la generación de energía limpia y sostenible capaz de proteger el medio ambiente.

#### **A5. Alcance**

El presente trabajo de titulación está enfocado en un estudio investigativo sobre el aprovechamiento de la fluctuación de la presión hidráulica producida en los reservorios de almacenamiento y distribución de agua en una zona del cantón Pedro Moncayo, con la idea de generar un análisis técnico de los materiales piezoeléctricos para generación de energía eléctrica.

Para el desarrollo de investigación, se realizará un análisis de las condiciones de presión en los diferentes entornos de fluctuación del líquido para la generación de energía eléctrica, así como un análisis del comportamiento de los materiales piezoeléctricos que

existen en el mercado, con el fin de seleccionar los productos con mayor eficiencia y viabilidad.

Por medio del estudio del comportamiento de la presión hidráulica, así como los factores que generan dicha presión en los reservorios, se pretende desarrollar un planteamiento experimental a partir de cálculos matemáticos y una modelación de su sistema eléctrico para determinar la cantidad de energía producida por el factor mecánico de la presión hidráulica y el material piezoeléctrico para su transformación en energía eléctrica.

Se realizará una evaluación de la infraestructura viable para su posible aplicación, con la finalidad de obtener cálculos estimados de los equipos de este sistema eléctrico. Se proyectará su diseño tomando en cuenta las delimitaciones del lugar y sus condiciones de fluctuación de agua.

#### **A6. Objetivo General**

Realizar un análisis técnico para la generación de energía eléctrica a través de los dispositivos piezoeléctricos mediante las fluctuaciones en la presión hidráulica, producida en los reservorios de almacenamiento y distribución de agua en una zona del cantón Pedro Moncayo.

#### **A7. Objetivos Específicos**

- Analizar las tecnologías y sistemas de generación eléctrica por medio de la conversión de los materiales piezoeléctricos.
- Determinar los parámetros técnicos para el aprovechamiento de la presión del agua para la generación de electricidad, a través de materiales piezoeléctricos.
- Determinar la factibilidad técnica para la generación de electricidad mediante la utilización de las fluctuaciones de presión de agua.

# CAPÍTULO 1

## Tecnologías y sistemas de generación piezoeléctrico

### 1.1. Piezoelectricidad

Existen diferentes tipos de sistemas de generación de energía como son los materiales piezoeléctricos, piroeléctricos, triboeléctrico y electroestáticos; los cuales aprovechan las propiedades de los elementos para poder producir energía eléctrica, la corriente generada por el material es conducida dentro del generador los cuales utilizan la corriente de desplazamiento principalmente como una fuerza la cual llega a transformar la energía mecánica en energía eléctrica (Lin, 2020).

La piezoelectricidad es un fenómeno físico que se presenta en ciertos cristales de la naturaleza, es la interacción electromecánica lineal que se llega a producir por la acción mecánica y la propiedad eléctrica de un material (Matínez, 2020). Las propiedades de los piezoeléctricos permiten que los materiales se polaricen eléctricamente y genere una diferencia de potencial en su superficie, es decir, por un lado, se va a tener cargas negativas y, por otro lado, cargas positivas, a esta acción se le conoce como efecto piezoeléctrico directo.

### 1.2. Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico directo se llega generar en los materiales que no poseen centro de simetría, cuando se aplica una determinada cantidad de tensión mecánica en el cual el material se encuentra sometido a una compresión o tracción, este llega a alterar su posición presente en su centro de carga tanto de la parte positiva como negativa y se produce la polarización en la superficie del piezoeléctrico (Malmcrona, 2018).

Para que el efecto piezoeléctrico se genere por medio de la deformación del material es necesario tratar dicho material para reordenar las cargas, debido a que dichas cargas se encuentran desordenadas inicialmente lo que imposibilita que se pueda generar el efecto

piezoeléctrico y por consiguiente pueda producir energía eléctrica, para poder obtener dichas propiedades es necesario someter al material a un campo eléctrico de esta manera se ordenan las cargas, después de quitar el campo eléctrico las cargas se encuentran libres, en este momento al realizar una presión o deformación estas se vuelven a ordenar generando una determina carga eléctrica como se lo puede observar en la Figura 1.

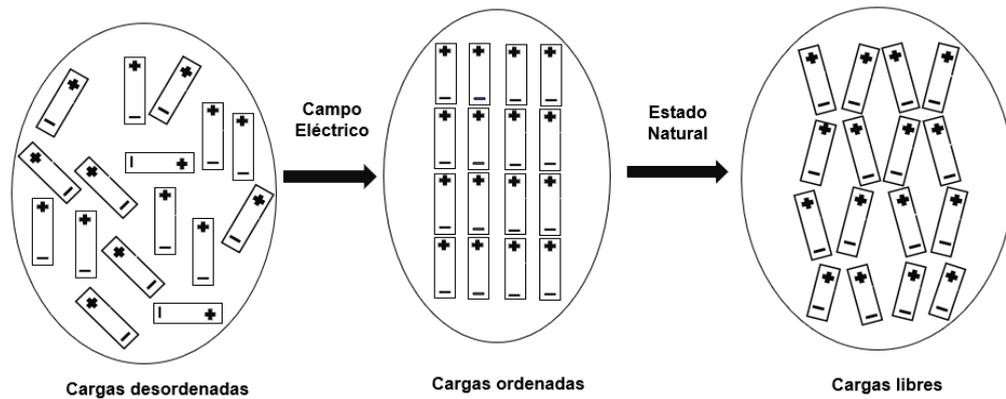


Figura 1. Proceso de polarización aplicado a un material para producir el efecto piezoeléctrico directo.  
Fuente: (Gómez, 2018)

### ➤ **Constantes de efecto piezoeléctrico**

El aprovechamiento de los materiales piezoeléctricos se fundamenta a través de diferentes parámetros esenciales para la generación de energía, para poder definir la cantidad de energía eléctrica que puede producir el material se debe tener en cuenta la relación entre la fuerza mecánica aplicada en el material y la forma de respuesta que produce, dependiendo tanto de las propiedades del cristal piezoeléctrico como de su tamaño, forma y composición (Gómez, 2018). Las constantes de la generación piezoeléctrica están inmersas tanto en la magnitud eléctrica y mecánica, estas se pueden separar en dos asociaciones, la primera llega a explicar el funcionamiento de dirección del campo eléctrico, la cual va a estar asociada directamente con el voltaje generado, la segunda asociación nos muestra la dirección de la fuerza mecánica aplicada al piezoeléctrico como se puede observar en la Figura 2.

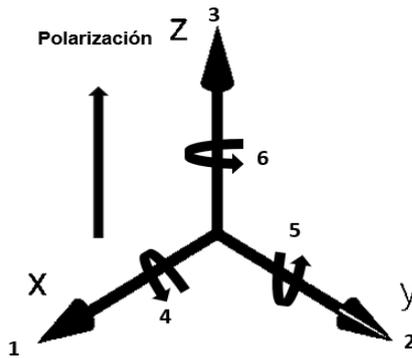


Figura 2. Numeración de ejes en cerámica piezoeléctrica y dirección de polarización  
Fuente: (Fernández, 2018)

➤ **Constante de carga piezoeléctrica**

La constante de carga piezoeléctrica muestra la variación dimensional del material y la diferencia de potencial, es decir, la polarización que se llega a generar por efecto de la tensión o la deformación mecánica que se aplica, sus unidades de medida se expresan en m/V, en el caso de los generadores piezoeléctricos se debe tomar en cuenta las constantes de carga (Jaramillo & Merino, 2015).

Las constantes de carga dependen principalmente de la dirección de aplicación y pueden producirse de manera horizontal y vertical en el cristal piezoeléctrico, en la (Figura 3) se puede observar la constante de carga generada cuando la presión aplicada es perpendicular a los electrodos del material piezoeléctrico, para el siguiente caso en la (Figura 4) se puede observar la constante de carga generada cuando la tensión que se ejerce es paralela a los electrodos del material.

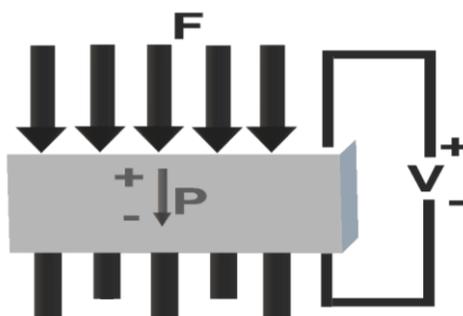


Figura 3. Constante de carga piezoeléctrica aplicada por presión perpendicular  
Fuente: (Jaramillo & Merino, 2015)

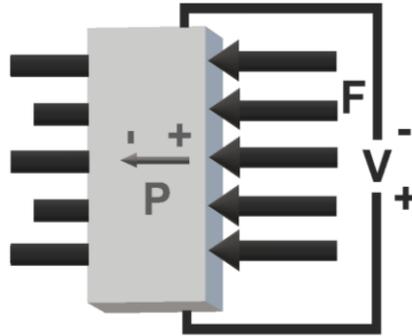


Figura 4. Constante de carga piezoeléctrica aplicada por presión paralela  
Fuente: (Jaramillo & Merino, 2015)

➤ **Constante de voltaje piezoeléctrica**

La constante de voltaje piezoeléctrica se entiende como el campo eléctrico generado por la presión ejercida a partir de una deformación mecánica por el desplazamiento eléctrico que se aplica en él, las unidades de medidas de la constante del voltaje son mV/N (Gómez, 2018).

Si aumentamos el esfuerzo mecánico aplicado, el voltaje generado en el material también aumentará, esto quiere decir que se va a generar una respuesta proporcional con relación al voltaje generado y su aplicación en el efecto piezoeléctrico.

➤ **Constante dieléctrica**

Se le conoce como el vínculo producido por la permitividad del piezoeléctrico y la permitividad del espacio libre, es decir, es el desplazamiento eléctrico generado por el campo eléctrico (Molina, 2021). Las constantes dieléctricas pueden estar divididas tanto para la permitividad de la presión constante, el cual tiene como objetivo mostrar el desplazamiento dieléctrico que se produce, y otro lado, la permitividad de deformación constante, el cual tienen como objetivo mostrar la dirección que genera el campo eléctrico.

➤ **Constante de acoplamiento**

Esta constante es utilizada para mostrar la eficiencia con la cual funciona nuestro material piezoeléctrico con respecto a la conversión de energía de manera directa, de esta

manera se puede obtener un análisis más exacto de la generación de energía que se produce por medio del material piezoeléctrico.

### ➤ **Temperatura de Curie**

La temperatura de Curie es la temperatura encima de la cual un material ferromagnético pierde su magnetismo y se convierte en un material paramagnético, esta condición hace que las cargas regresen a su estado inicial en donde se encuentran desordenadas y sea imposible generar una diferencia de potencial para que se produzca el efecto piezoeléctrico (Linh, 2017).

## **1.3. Materiales Piezoeléctricos**

Los materiales piezoeléctricos se llegan a clasificar en dos grupos los cuales tenemos los materiales naturales y los materiales artificiales, los materiales naturales abarcan los elementos cristalinos como son el cuarzo, sal de Rochelle y la turmalina como principales minerales que pueden llegar a generar el efecto piezoeléctrico, también se tiene los materiales artificiales que están conformados por el titanato de bario y varios componentes de cerámica como son el caso del Zirconato titanato de plomo o también conocido como PZT, el óxido de Zinc(ZnO) y el sulfato de litio, estos son los elementos más comunes que se utiliza para poder aprovechar la recolección de energía (Cortés, Ensaztiga, & Pineda, 2016). La cerámica piezoeléctrica es un material muy eficiente debido a su estabilidad tanto térmica, física y magnética.

La mayor parte de los materiales piezoeléctricos para aplicaciones en el campo de la tecnología constan de una estructura cristalina. Se debe tomar en cuenta que dichos materiales pueden ser monocristalinos y policristalinos, la cerámica ferroeléctrica es un tipo de material que se puede convertir en piezoeléctrico al ser polarizado.

### **1.3.1. Materiales Naturales**

Estos tipos de materiales se encuentran de manera natural y se presentan en formas de cristales o minerales en la naturaleza.

Para la implementación en los sistemas Energy Harvesting este tipo de materiales no son muy recomendados, a pesar de que las propiedades de estos no varían con el tiempo, las señales eléctricas que se generan por estos materiales son muy pequeñas.

➤ **Cuarzo**

Este material posee grandes características en la producción de energía eléctrica debido a que tiene una alta estabilidad térmica y química, se llega a obtener a partir de los elementos o cristales naturales presentes en la naturaleza (Cortés, Ensaztiga, & Pineda, 2016). Este tipo de material tiene la peculiaridad de ser duro y resistente a desgastarse con el paso de los tiempos.

➤ **Sal de Rochelle**

La sal de Rochelle o también conocida técnicamente como Tartrato mixto de potasio y sodio, es un tipo de sal noble que contiene las características de los piezoeléctricos y produce electricidad.

➤ **Turmalina**

La Turmalina es un tipo de elemento que pertenece al grupo de los silicatos, es uno de los materiales que puede llegar a generar dos tipos de propiedades, tanto la parte piezoeléctrica como la piroeléctrica, esto quiere decir que en los dos extremos de nuestro material se van a juntar cargas opuestas al realizar un esfuerzo mecánico o eléctrico.

### **1.3.2. Materiales Artificiales**

Los materiales artificiales son producidos por medio de la fabricación humana, la elaboración de los materiales piezoeléctricos busca la optimización del aprovechamiento de energía, es decir, es realizada para poder mejorar el proceso de generación a partir de diferentes sucesiones de transformación con la finalidad de obtener un material con mayores propiedades de generación eléctrica, el proceso puede conllevar a la mezcla de diversos componentes con características distintas que realicen una mejor adaptación mejorando el efecto piezoeléctrico.

### ➤ **Materiales Cerámicos y ferroeléctricos**

La aplicación de estos materiales se produce a través de la polarización, generando un campo eléctrico externo, para de esta manera los materiales puedan generar el efecto piezoeléctrico. Mediante el avance de los años se han implementado diferentes tecnologías para la producción de materiales capaces de producir energía eléctrica, los podemos encontrar como materiales cerámicos generados sintéticamente, estos tipos de materiales poseen una densidad de energía mucho más alta y aparecen tanto en los monocristalinos y polímeros (Linh, 2017).

- Los materiales policristalinos son utilizados en lugares donde existe una alta densidad de energía, debido a que generan una alta producción de constante de carga y voltaje.
- Los materiales monocristalinos tienen propiedades muy importantes, las mismas que pueden ser utilizadas para acoplamientos electromecánicos.

### ➤ **Titanato de Bario (BaTiO<sub>3</sub>)**

El titanato de bario o también conocido como óxido de bario y titanio, es un tipo de material cerámico ferroeléctrico que posee propiedades piezoeléctricas, este tipo de materiales pueden comportarse de diferente forma dependiendo de la temperatura a la que se encuentre sometida.

### ➤ **Sulfato de litio (Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)**

Este tipo de materiales son muy negativos en el caso de ponerlos en contacto con el agua, debido a que pueden llegar a deshacerse y perder las propiedades piezoeléctricas, a pesar de ser un gran receptor su aplicación en los proyectos donde exista un alto flujo de agua no es muy recomendable.

### ➤ **Zirconato Titanato de plomo (PZT)**

Este tipo de materiales son muy utilizados para la implementación en las industrias debido a que es un tipo de material ferroeléctrico que genera grandes propiedades piezoeléctricas, cada uno de los materiales presentan diferentes factores los cuales apoyan o desfavorecen su generación de energía, como se puede analizar en la Tabla 1.

Tabla 1.  
CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

<b>Materiales Piezoeléctricos</b>		
<b>Tipo de material</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Cuarzo	Es un material muy resistente y duro, presenta gran estabilidad química y térmica para la producción eléctrica	Interferencias en la conversión, menos eficiencia en la producción de energía acústica.
Sulfato de litio	Es uno de los receptores de energía más eficientes de los piezoeléctricos, eficiente con respecto al envejecimiento, baja interferencia en la conversión.	Es un material muy inconsistente, soluble en el agua.
Cerámica polarizada	Es considerado el generador más eficiente para la producción de energía acústica, baja afectación por condiciones de humedad.	Baja resistencia al comportamiento mecánico casualmente presenta interferencias en la conversión de energía.
Titanato de bario	Es considerado uno de los más eficientes emisores de la eléctrica.	Se presenta problemas de amortiguamiento y acoplamiento.
Zirconato Titanato de plomo	Es conocido como el mejor emisor de electricidad por su módulo piezoeléctrico.	Genera un alto coeficiente de deformación.
Cuarzo	Es un material muy resistente y duro, presenta gran estabilidad química y térmica para la producción eléctrica	Interferencias en la conversión, menos eficiencia en la producción de energía acústica.
Sulfato de litio	Es uno de los receptores de energía más eficientes de los piezoeléctricos, eficiente con respecto al envejecimiento, baja interferencia en la conversión.	Es un material muy inconsistente, soluble en el agua.
Cerámica polarizada	Es considerado el generador más eficiente para la producción de energía acústica, baja afectación por condiciones de humedad.	Baja resistencia al comportamiento mecánico casualmente presenta interferencias en la conversión de energía.

Fuente: (Linh, 2017)

Para poder analizar la mejor alternativa de elemento piezoeléctrico se toma en cuenta la temperatura que se implementa, la misma que debe encontrarse entre  $-20^{\circ} < T < 80^{\circ}$  grados Celsius, se considera el rango de frecuencia con la que va a estar operando el cual debe encontrarse entre 10 Hz y 200 Hz, el rango de amplitud de la fuerza externa que se puede aplicar ente 0.1 N a 3 N y finalmente el tiempo de vida debe ser mayor a  $10^6$  ciclos (Gómez, 2018).

Las cerámicas piezoeléctricas PZT contienen diferentes características que las hacen muy efectivas para la aplicación de generación de energía, presentan una histéresis reducida, además de una despolarización baja, generando perdidas bajas y son muy utilizados para casos como transductores y sensores.

#### ➤ **Factores que afectan el rendimiento de los PEG**

El funcionamiento óptimo que mantienen los generadores piezoeléctricos se puede establecer principalmente por medio del material el cual se encuentre utilizando, los materiales de mayor calidad poseen excelentes características los cuales proporcionan un mayor rendimiento al momento de generar energía, de la misma manera dichos cristales los cuales generen el efecto piezoeléctrico pueden variar el nivel de voltaje generado obteniendo mayor cantidad de energía en comparación a otros cristales de menor calidad (Hu, y otros, 2019).

Se han puesto ha debatido mucha estrategia con el objetivo de mejorar la producción y el aprovechamiento eléctrico que presenten los PEG, estas estrategias abarcan el desarrollo de nuevos materiales con la capacidad de poder generar el efecto piezoeléctrico los cuales puedan mantener características como: diferentes micro morfologías, dopaje químico y las cuales puedan conservar una selección de sustratos adecuados para un mayor factor de rendimiento. Sin embargo, la implementación de estos materiales no puede satisfacer los requisitos de los PEG como la flexibilidad y su alto rendimiento a comparación de los materiales piezoeléctricos tradicionales, los cuales son principalmente de cerámica inorgánica. Los nuevos materiales presentan una flexibilidad además de una estabilidad

mecánica baja, lo que impide un adecuado rendimiento en las propiedades de los elementos piezoeléctricos (Molina, 2021).

Para mejorar el rendimiento de los materiales piezoeléctricos se propone la utilización de polímeros orgánicos y partículas inorgánicas para preparar materiales compuestos de películas delgadas y de esta manera se mejora la flexibilidad y su rendimiento (Hu, y otros, 2019).

#### **1.4. Tecnologías Piezoeléctricas**

Las nuevas tecnologías intervienen en la búsqueda de un material piezoeléctrico apropiado para la generación de energía, se debe tomar en consideración características importantes que debe tener el cristal piezoeléctrico para una correcta aplicación, mediante diferentes tecnologías y el aprovechamiento conjunto de los piezoeléctricos se forman equipos capaces de medir y captar la aplicabilidad de dichos materiales, se podría interpretar que una de las características esenciales es la capacidad para poder medir la fuerza, de esta manera podríamos observar el tipo de resultado que se pretende obtener sea el más apropiado.

El aprovechamiento de los materiales en la presencia de actividades es uno de los enfoques primordiales para la producción de energía renovable que sean capaces de generar energía confiable y apropiada para satisfacer un porcentaje de la demanda, los sensores piezoeléctricos están tomando un gran papel en las nuevas tecnologías de desarrollo y aprovechamiento de la energía a producir.

##### **➤ Sensores piezoeléctricos**

Los sensores piezoeléctricos de fuerza tienen la capacidad de generar variaciones en las secciones del material, los mismos que al ser sometidos a una fuerza de compresión genera una corriente eléctrica, los sensores son herramientas de gran importancia para realizar diversos procesos como control e investigación de diferentes factores y fenómenos

en el campo industrial y médico, así como la medición de diferentes procesos como la presión y fuerza (Fernández, 2018).

Un sensor piezoeléctrico consta de 3 partes esenciales para poder aprovechar y generar energía eléctrica, estas pueden ser consideradas para su uso como actuadores para el proceso de acción de la mayor parte de los sensores (Figura 5).

- Placa de metal
- Material piezoeléctrico
- Cables de conexión positivo y negativo

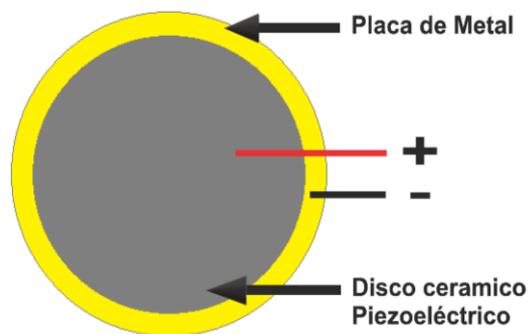


Figura 5. Componentes principales de un sensor piezoeléctrico  
Fuente: (Fernández, 2018).

### ➤ Tipos de sensores piezoeléctricos

Existen diferente tipo de sensores los cuales son de gran importancia en el campo industrial como son los sensores de fuerza, sensores de presión y acelerómetros, dependiendo del área de aplicación cada uno de estos sensores cumple un rol muy importante para la investigación y aprovechamiento de los materiales piezoeléctricos (Kistler, 2022).

Los sensores de presión son ideales para poder medir la presión dinámica y pulsaciones de presión a altas presiones estáticas, los mismos que ayudan a generar una pequeña carga, estos tipos de propiedades permite a los sensores llegar a localizar y monitorear picos de presión en medios gaseosos o líquido (Figura 6).



Figura 6. Sensores piezoeléctricos de presión  
Fuente: (rslicing, 2022)

## 1.5. Conversión de energía mecánica a eléctrica

El funcionamiento y aprovechamiento de la generación piezoeléctrica se fundamenta por medio de la conversión mecánica que se produce en el material, el desarrollo de aprovechamiento de los piezoeléctricos se produce a partir de un proceso de captación y manejo de la energía producida.

El proceso maneja la conversión, recolección y uso de la energía de manera óptima, en los cuales se puede evidenciar diferentes tecnologías y sistemas de generación que utilizan la forma de producción de los piezoeléctricos para una correcta utilización de la carga a utilizar.

### 1.5.1. Fuentes de recolección de energía (Energy Harvesting) energías renovables

Los sistemas de recolección “Energy Harvesting” son conocidos como el proceso mediante el cual se llega a capturar una pequeña cantidad de energía de una o varias fuentes, este sistema de recolección busca optimizar cada una de las propiedades de captación en el entorno de forma eficiente, las cuales podrían no ser aprovechadas debido a que se perderían por causas como el calor, sonido, vibraciones, movimiento y luz (Díez, Gabilondo, Alarcón, & Moll, 2018). Mediante los procesos de recolección energética, estas cantidades de energía pueden ser acumuladas y almacenadas de forma natural para usos posteriores.

En el caso de la recolección de la energía de los sistemas, Energy Harvesting se encuentra dividido en dos grandes campos, tanto por la parte de Harvesting a macro escala y Harvesting a microescala, la macro escala consta de la recolección de una gran cantidad

de energía, estas pueden implementarse para poder alimentar la red inyectando megavatios o kilovatios al sistema de distribución de energía que se utilice (Jiménez, Frutos, Alonso, & Vázquez, 2015).

En el caso de los sistemas micro estos constan de la recolección de pequeñas cantidades de energía, este sistema es bastante utilizado en tecnologías que obtienen mili vatios producidos principalmente a partir de energía térmica, vibraciones y fuentes biológicas, estos son sistemas bastante eficaces en la implementación y recolección de la micro generación como piezoeléctricos y triboeléctricos.

El funcionamiento del sistema Energy Harvesting consta principalmente de 4 parámetros o partes importantes para su captación y almacenamiento útil, como se puede observar en la (Figura 7) (Sotelo, 2015).

1. El primer bloque corresponde a la fuente de energía que se utiliza como fuente de alimentación.
2. El segundo bloque corresponde a un diodo rectificador AC/DC con el motivo de obtener un voltaje DC.
3. El tercer bloque corresponde a un convertidor DC/DC que actúa como elevador.
4. El último bloque consta de un circuito para poder almacenar la energía generada.

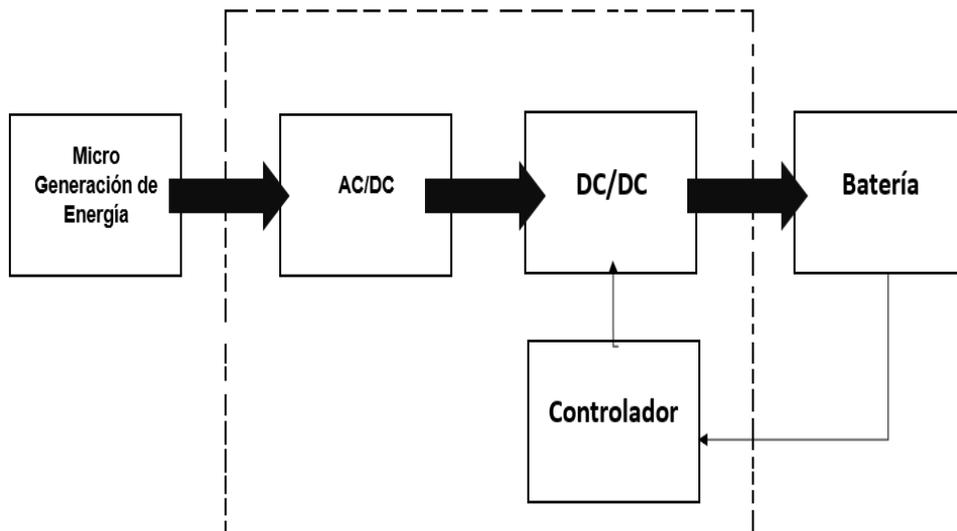


Figura 7. Circuito Energy Harvesting  
Fuente: (Sotelo, 2015).

Se debe tomar en cuenta que un generador de energía recolectada por lo común posee o genera una alta impedancia de salida, la misma energía comúnmente es utilizada para poder cargar nuestro condensador posterior a la aplicación del rectificador.

### 1.5.2. Fluctuación de presión hidráulica para generación de energía

El análisis general para el aprovechamiento de las fluctuaciones de la presión hidráulica se rige a partir de diferentes aspectos relacionados con la hidrodinámica, como la velocidad, aceleración, presión, flujo, etc. En el caso de los tanques de almacenamiento de agua contienen líquido, las cuales quedan sujetas a dos diferentes tipos de presiones hidrodinámicas.

- Presiones Impulsivas son producidas por medio de impactos que genera el agua contra las paredes del tanque de almacenamiento y distribución de líquido, cuando se produce una aceleración por movimientos sísmicos (Guillén & Rojas, 2017).
- Presiones convectivas, en este caso este tipo de presiones se genera por oscilaciones del líquido contenido tanto en las paredes como en el fondo de

los tanques de almacenamiento, estas se rigen a partir de movimientos naturales de vibración.

Las presiones generadas por el líquido mediante el choque con las paredes del tanque por efectos dinámicos contienen dos componentes importantes, tanto por la parte de compresibilidad del líquido como por la parte de oleaje generada por el movimiento o fluctuación del agua, debido a que el movimiento del agua genera acciones hidrodinámicas en el fondo de los tanques de almacenamiento como también las paredes.

Para poder comprender el funcionamiento de las presiones se debe tener en cuenta la diferencia entre la presión impulsiva y convectiva, la presión impulsiva se produce por el movimiento del líquido junto con el tanque; mientras que en el caso de presión convectiva esta es producida por el movimiento oscilatorio libre de la superficie del líquido (Guillén & Rojas, 2017).

En el caso de los tanques se llega a calcular la distribución de las presiones a partir del comportamiento y movimiento del líquido para todos los niveles de agua, estas se pueden desarrollar a partir de las Ecuaciones 1 y 2 (Guillén & Rojas, 2017).

Presiones impulsivas:

$$P_{iy} = \frac{\frac{P_i}{2} [4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i)\left(\frac{y}{H_L}\right)]}{H^2_L} \quad (1)$$

Presiones convectivas:

$$P_{cy} = \frac{\frac{P_c}{2} [4H_c - 6h_i - (6H_L - 12h_c)\left(\frac{y}{H_L}\right)]}{H^2_L} \quad (2)$$

Donde:

- $P_i$  es la presión impulsiva resultante.
- $P_{iy}$  es la presión impulsiva a una determina altura.
- $h_i$  es la altura resultante de la presión impulsiva.

- $P_c$  es la presión convectiva resultante.
- $P_{cy}$  es la presión convectiva a una altura determinada.
- $h_c$  es la altura producida por la presión convectiva.
- $H_L$  es la altura del nivel del agua el cual se encuentra en reposo.

### ➤ Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es utilizada para poder expresar la igualdad que genera un trabajo por unidad de volumen de fluido, relacionando la parte de presión, velocidad y altura de dos puntos en un fluido con flujo laminar y se la puede desarrollar a partir de la Ecuación 3 (Guillén & Rojas, 2017).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (3)$$

Donde:

- $P_1$  es la presión del fluido en el punto 1.
- $v_1$  es la velocidad del fluido en el punto 1.
- $h_1$  es la altura del fluido en el punto 1.
- $P_2$  es la presión del fluido en el punto 2.
- $v_2$  es la velocidad del fluido en el punto 2.
- $h_2$  es la altura del fluido en el punto 2.
- $g$  es la aceleración de gravedad.
- $\rho$  es la densidad del fluido.

La ecuación de Bernoulli se rige a partir de la conservación de la energía para el flujo que se produce por los fluidos, cada una de las partes de la ecuación representan partes de aprovechamiento de la energía,  $P_1$  es la energía de presión,  $\frac{1}{2}\rho v_1^2$  es la energía cinética por unidad de volumen y  $\rho g h_1$  es la energía potencial por unidad de volumen.

### 1.5.3. Procesos de conversión

En los procesos de conversión de la energía proveniente de los materiales piezoeléctricos podemos identificar dos tipos de accionamiento, por una parte, tenemos la energía directa producida por el accionamiento mecánico para generar energía eléctrica y, por otro lado, tenemos el proceso inverso, el mismo que se genera mediante la aplicación eléctrica para obtener energía mecánica, debido a las condiciones del entorno hídrico al cual se encuentra sometido los piezoeléctricos la energía directa es el principal proceso para generación de electricidad más apropiado en este entorno.

Para poder aprovechar el voltaje y la corriente producida es necesario convertir la señal obtenida a una señal continua debido a que la que se genera principalmente es muy transitoria y discontinua (Rios & Fernández, 2017). Mediante el circuito convertidor podemos aprovechar la energía producida por el generador piezoeléctrico, el voltaje en el condensador debe ser lo suficientemente necesario para poder conmutar y obtener la señal DC apropiada (Figura 8).

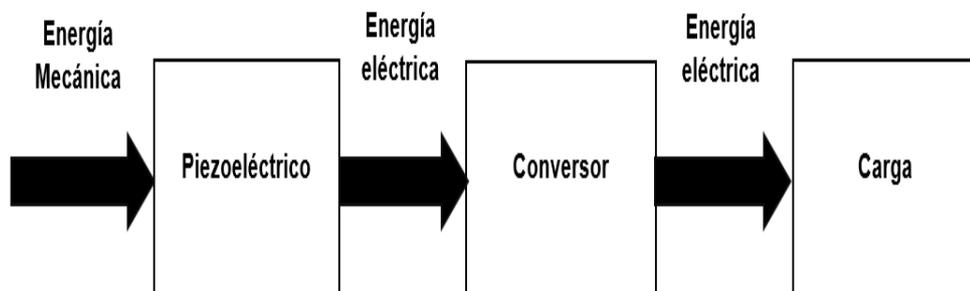


Figura 8. Carga generada a partir de una aplicación mecánica

Para la aplicabilidad de los diferentes sistemas se debe tomar en cuenta los parámetros que hacen el proceso de conversión, estos ayudan a determinar las condiciones necesarias para el estado y acción de materiales, estos parámetros los podemos definir tanto en mecánicos, condiciones de masa, gravedad y presión de apoyo.

### ➤ Modelos piezoeléctricos en zigzag

El modelo de Zigzag se utiliza para poder determinar la eficiencia de generación de las diferentes estructuras piezoeléctricas, el modelo de funcionamiento se basa en la colocación de una serie de elementos piezoeléctricos de tal manera que cada capa de los elementos se forme un zigzag con la finalidad de mejorar la deformación del material por medio de flexión y compresión, el modelo zigzag proporciona una determina tensión nominal, el momento de flexión debido a un mayor acoplamiento electromagnético que se genera en la matriz de la estructura piezoeléctrica llega a ampliar el campo magnético como se muestra en la (Figura 9 y 10).

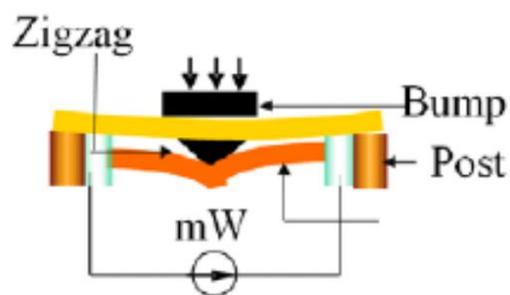


Figura 9. Modelo zigzag con dos estructuras piezoeléctricas  
Fuente: (Molina, 2021).

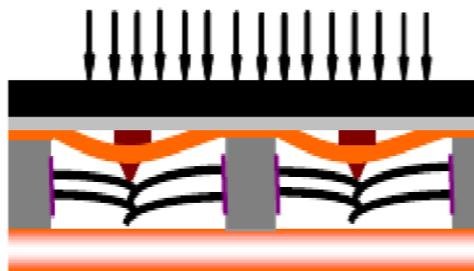


Figura 10. Capas en zigzag para mejorar la deformación del material piezoeléctrico  
Fuente: (Molina, 2021).

### ➤ Comportamiento de generación en los PEG

Los PENG o también conocidos como generadores piezoeléctricos, son fabricados a partir de materiales semiconductores, los cuales mantienen propiedades semiconductoras acopladas que realizan el efecto piezoeléctrico. La generación de energía por medio de los

materiales piezoeléctricos se compone de dos procesos, los cuales pueden generar tanto corriente continua (CC) como también en corriente alterna (CA) (Molina, 2021).

Cuando se realiza una aplicación de fuerza en el PEG se genera el efecto piezoeléctrico en el semiconductor, el cual puede producir un determinado voltaje en circuito abierto generando en la superficie del material piezoeléctrico  $V_p$  por causa de la diferencia de potencial por su polarización que se puede calcular por medio de la Ecuación 4 (Hu, y otros, 2019).

$$V_p = T \cdot s \cdot g \quad (4)$$

Donde:

- $T$  es el grosor que tiene el material piezoeléctrico.
- $s$  es el esfuerzo a lo largo de la dirección de la fuerza aplicada.
- $g$  es el coeficiente de voltaje.

## 1.6. Sistemas piezoeléctricos

Los generadores piezoeléctricos son dispositivos los cuales son utilizados para convertir energía mecánica, la cual puede encontrarse en el ambiente de manera débil e irregular para producir señales eléctricas, Rodríguez Mendoza (2015) expuso la utilización de diferentes sistemas de generación los cuales se basan a partir de materiales piezoeléctricos que se están implementando alrededor del mundo y mediante los cuales se han obtenido grandes resultados para la generación de energía como son:

East Japan Railway Company ha instalado un pavimento piezoeléctrico para la generación de energía eléctrica en el paso de torniquetes y puertas de entrada al metro de Tokio. La superficie total utilizada en el sistema es de aproximadamente 25 m<sup>2</sup> y se estima una generación de energía de 0,4 kWh por día. (Mendoza, 2015, pág. 21)

El instituto de investigación Technion y consecuentemente la empresa Innowatech, han realizado sistemas de aprovechamiento de la energía tomando en cuenta diferentes

entornos comunes, el lugar de enfoque fueron las principales ubicaciones de tránsito de personas, vehículos y ferrocarriles. Los principales sistemas de aprovechamiento y conversión de la energía se basan en el tráfico vial mediante la introducción de los materiales piezoeléctricos en las zanjas, quedando una superficie a 3 cm bajo la carretera. Estos tipos de sistemas de generación están conectadas a un banco de baterías, las cuales se encuentra situadas en el exterior para poder ser almacenadas y posteriormente utilizadas, además estas pueden estar inyectadas a la red eléctrica. Para poder tener una idea real de los datos que este tipo de sistemas piezoeléctricos genera, los resultados que las pruebas supusieron una generación promedio de 200 kWh por cada kilómetro de carretera en los cuales se encuentre instalado este tipo de sistemas (600 vehículos a 75 km/h). Teniendo en cuenta la aplicación de este sistema en las ferrovías, se llegó a obtener un total de 120 kWh en los lugares de instalación, con un total de 10-20 trenes de unos diez vagones cada uno para poder producir esta cantidad de energía (Mendoza, 2015, pág. 22).

Cada uno de los sistemas de generación son similares para poder obtener el aprovechamiento necesario del efecto piezoeléctrico, James Graham y Thaddeus Juscik desarrollaron un tipo de sistemas el cual estaba basado en colocar en las suelas de los zapatos transductores piezoeléctricos de PVDF (Polímero de fluoruro de poli vinilideno) y PZT. Los resultados obtenidos mediante la implementación se logró obtener una mayor cantidad de energía a partir del PZT con un 8,4 mW a comparación del PVDF con 3 mW de energía generada (Mendoza, 2015).

El funcionamiento de la piezoelectricidad y los diferentes ámbitos por los cuales se puede generar una carga por acción mecánica son condiciones necesarias para entender la aplicabilidad en diferentes entornos, por ello para poder implementar un sistema piezoeléctrico como fuente de generación de energía segura para el aprovechamiento de los mismos, se muestra necesario analizar el aprovechamiento de la carga generada para la aplicación en los diferentes campos de estudio, este sistema debe integrar los dispositivos piezoeléctricos el cual genera una carga conectada a un regulador de voltaje, un inversor el

cual va a estar funcionando conjuntamente con la batería para de esta manera producir el valor de energía necesario para satisfacer un determinado consumo como se puede observar en la (Figura 11).

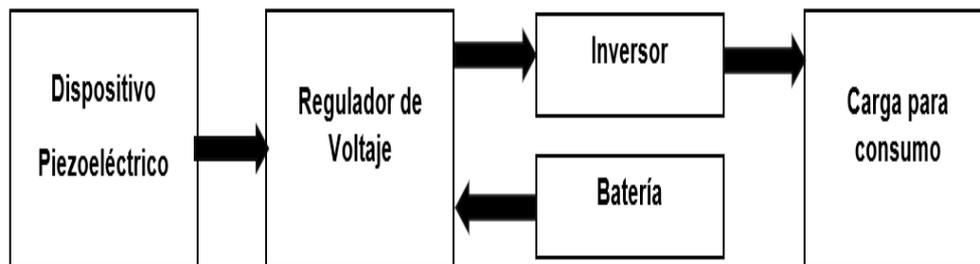


Figura 11. Esquemático de un sistema de generación piezoeléctrico  
Fuente: (Mendoza, 2015)

### 1.6.1. Dispositivos piezoeléctricos

Los piezoeléctricos son materiales capaces de generar energía eléctrica mediante tensiones mecánicas, las mismas que son utilizadas para satisfacer una determinada carga de demanda o servicio de consumo, los dispositivos piezoeléctricos se los puede encontrar en cuatro grupos diferentes como son los generadores, actuadores y transductores.

Los dispositivos generadores son aquellos que producen energía eléctrica mediante el sometimiento mecánico que sufren, la mayor parte de los dispositivos se dividen en cargas mecánicas, cargas dinámicas y las baterías de estados sólidos (Nieto & Sotelo, 2018). Los generadores de carga mecánica pueden rectificar la señal eléctrica mediante sistemas electrónicos para de esta manera puedan ser aprovechadas su transformación para fuentes de energía convencionales.

#### ➤ Reguladores de voltaje

Los reguladores de voltaje son dispositivos capaces de estabilizar y regular el voltaje proveniente de los sistemas de generación piezoeléctricos con el fin de proteger a los elementos como baterías de sobrecargas o descargas que se generen de manera exclusiva o de cortocircuito, los reguladores por lo general ayudan al tiempo de funcionamiento del sistema debido a que aumenta el tiempo de vida útil de las baterías (Mendoza, 2015). Los

reguladores estarían controlando los rangos admisibles de voltaje en las baterías de los sistemas piezoeléctricos para su correcto funcionamiento.

El modo de funcionamiento del regular consta que a medida que la diferencia de voltaje entre el regulador y la batería se reduce, el regulador aumenta el voltaje de la carga para poder satisfacer la estabilidad y demanda en el sistema, en el caso de que el regulador y la batería aumenten, el regulador llega a suministrar un voltaje de mantenimiento necesario para operación del sistema sin dañar el equipo ni la batería.

### ➤ **Baterías**

Las baterías son utilizadas como almacenadores de energía generada mediante los materiales piezoeléctricos, estas nos permiten guardar la energía para poder utilizarla dependiendo al nivel de consumo necesario, lo que imposibilita que la carga generada por el piezoeléctrico se consuma de manera instantánea, estos elementos son de gran importancia para el funcionamiento de los sistemas piezoeléctricos, la capacidad de funcionamiento de las baterías varía dependiendo del tipo de material de construcción, la temperatura con la que se encuentra trabajando y sus estados de descarga que posea (Sotelo, 2015).

Para poder seleccionar la batería más adecuada para el manejo en piezoeléctrico se debe tener una consideración los baterías comerciales presentes en el mercado, estas son principalmente realizadas a base de plomo, también las podemos encontrar en baterías líquidas, cada una de ellas depende de la cantidad de almacenamiento que se pretenda utilizar y el precio.

### ➤ **Inversores**

Mediante la generación de energía eléctrica por parte de los dispositivos piezoeléctricos, estos llegan a producir corriente DC y AC, los cuales para poder ser aprovechados se deben ser transformadas a corriente AC estacionaria, el inversor o convertidor es el encargado de transformar y adaptar la energía producida, debido a que la

corriente generada sea capaz de ser utilizada para la demanda y consumo de un sistema eléctrico específico,

El mecanismo de un inversor consta de convertir la corriente directa en corriente alterna, se debe considerar la capacidad que el inversor puede soportar durante su funcionamiento normal de forma continua, ya que estos son menos eficientes cuando se utilizan a un porcentaje bajo de su capacidad, por lo que debe ser elegido con una capacidad lo más cercana posible a la de la carga de consumo, la cual no debe ser menor al 80% de la capacidad nominal del inversor (Coelectrix, 2018).

### **1.6.2. Aplicaciones a sistemas eléctricos y mecánicos**

La inmersión del efecto piezoeléctrico no es completamente nueva, uno de los claros ejemplos en donde la piezoelectricidad se ha encontrado presente cotidianamente es en los mecheros que por medio de la generación de pequeños arcos o chispas pueden ser encendidos, es aquí donde puede evidenciar el efecto piezoeléctrico directo que por medio de la acción mecánica en el material generamos un cierto diferencial de potencia para poder producir la chispa suficiente el cual mediante el gas almacenado y junto con el arco puedan encender el mechero (Urquiza, 2018).

El modelo piezoeléctrico se encuentra principalmente inmerso en diferentes campos de la investigación para el aprovechamiento de sus capacidades de generación eléctrica, estas son fundamentadas en el ámbito tecnológico en donde podemos ver las actuaciones por parte de los diferentes elementos y materiales como generadores, transductores, sensores y actuadores, además de otras tecnologías que aprovechan el sistema piezoeléctrico.

#### **➤ Campos Eléctricos**

En el campo eléctrico se va denotando diferentes aplicaciones para poder aprovechar el efecto piezoeléctrico y mediante su aplicativo se puede identificar la efectividad del efecto piezoeléctrico directo en donde mediante la aplicación mecánica podemos generar energía

eléctrica, este tipo de campo es bastante utilizado para la medicina en donde mediante pequeños impulsos se puede identificar señales fundamentales para observar el comportamiento de los signos vitales en las personas.

El avance de estas nuevas tecnologías ha llegado a introducirse en nuevas aplicaciones capaces de aprovechar su potencial de generación, en la actualidad esto se puede evidenciar en los artefactos y entornos de uso cotidiano como los zapatos, llantas de bicicletas, vías concurridas, en donde las vibraciones y fluctuaciones del movimiento a este tipo de materiales instalados sean capaces de producir energía para satisfacer una determinada carga de consumo.

### ➤ **Campos mecánicos**

En el campo mecánico podemos definir las aplicaciones tanto de la parte de los actuadores para poder evidenciar el impacto generado por el efecto piezoeléctrico, además de ser utilizado no solo en la generación de energía eléctrica podemos aprovechar los materiales para poder generar una determinada acción mecánica.

La inyección de energía eléctrica a un material produce un determinado movimiento mecánico el cual puede ser aprovechado para poder realizar una determinada acción, en el caso de las industrias podemos evidenciar las efectividades de estos materiales en la parte de inyectores de combustible piezoeléctricos, de esta manera estos inyectores buscan reemplazar a las bobinas de tal manera que puedan generar la acción de movimiento con una mayor velocidad y presión.

La aplicación mecánica no solo es utilizada como una señal de acción, sino también una señal capaz de ser censada para poder realizar un determinado trabajo, de esta manera si existe un pequeño impulso eléctrico o mecánico en el material, este puede tomar dicha referencia para poder generar una acción indirecta que dependa de las condiciones expuestas al material.

## **CAPÍTULO 2**

### **Determinación de parámetros técnicos para generación piezoeléctrica por fluctuación hidráulica**

#### **2.1. Fluctuación Hidráulica para generación de energía por piezoelectricidad**

La generación de energía eléctrica por fluctuación hidráulica se fundamenta como un principio de funcionamiento inmerso principalmente en la hidrodinámica y diferentes factores en donde se presente la variación de presión, lo que actúa como una fuerza mecánica que al entrar en contacto con un material piezoeléctrico este produce electricidad.

##### **➤ Modelo de desarrollo**

El método de análisis de factibilidad del aprovechamiento de la presión hidráulica (Figura 12) muestra el modelo de las condiciones necesarias para poder realizar una adecuada comparación de variables de desarrollo y parámetros de diseño, en un adecuado beneficio de la parte hídrica a fin de transformar la energía mecánica producida por las fluctuaciones del agua frente a las condiciones de generación de los materiales piezoeléctricos, el diagrama señala el modelo de construcción de un prototipo tomando las condiciones necesarias para el desarrollo adecuado de una generación piezoeléctrico, además de una factibilidad de la implementación para un proceso de generación de energía limpia y sostenible.

El proceso analítico que conlleva a la obtención de información adecuada para el diseño y desarrollo del modelo de la generación eléctrica por parte de la fluctuación de agua consta de un entorno en donde se engloba mayor cantidad de factores de aprovechamiento del líquido, el entorno de aprovechamiento se toma en consideración las instalaciones de almacenamiento y distribución de agua potable del Cantón Pedro Moncayo la cual está a cargo de la de la empresa EP. EMASA.PM, la ubicación de los tanques más apropiados para poder observar el proceso de medición se considera a partir de la capacidad de agua que contengan, así como la fluctuación y presión del líquido para el modelo de extracción de

energía aprovechada, el lugar principal (Figura 27) consta de dos tanques de almacenamiento de 650 m<sup>3</sup> y 50 m<sup>3</sup> en donde se obtienen diferentes variaciones hidrodinámicas.

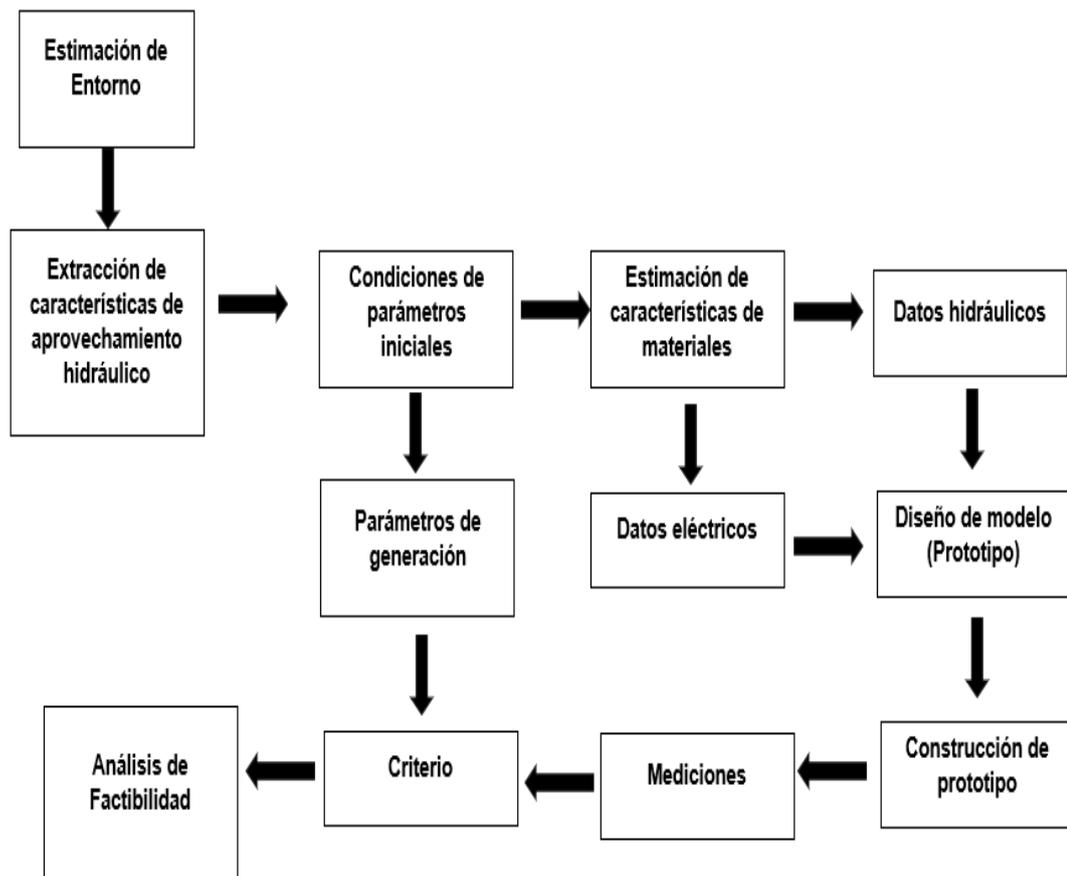


Figura 12: Metodología de diseño y análisis

Los materiales se rigen a partir de un comportamiento conjunto para la obtención de datos de energía, los componentes se fundamentan para la construcción sincrónica de operación en factores de aprovechamiento hidráulico y medición de energía a partir de la fluctuación hidráulica.

### 2.1.1. Medición a partir de factores hidráulicos

Los factores hidráulicos son alteraciones que mantiene el agua para variar el valor de presión, velocidad y fluctuación. Dependiendo al tipo de estructura, las alteraciones afectan el valor de generación de la energía y reducen o aumentan su generación de electricidad, el análisis debe mantener los parámetros de interacción de entrada de agua, así como el tipo de construcción en donde se analiza su funcionamiento técnico.

## ➤ Caudal

Los factores que intervienen en el modelo de aprovechamiento de energía hidráulica varían dependiendo del entorno, la medición de caudal se considera a partir del transporte de agua a través de una determinada tubería, dependiendo del tipo de sistema se obtiene la presión necesaria para el funcionamiento adecuado de un sistema hidráulico.

El caudal es el volumen de agua que atraviesa una tubería en un determinado tiempo, el análisis del caudal que se cuenta en un sistema se puede calcular mediante la Ecuación 5 (Valdivieso, 2019).

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

Donde:

- $Q$  es el caudal que circula por la tubería en (m<sup>3</sup>/s).
- $V$  es el volumen de agua el cual se mide en litros.
- $t$  es el tiempo de demora en pasar por la tubería.

El modelo de medición en las instalaciones de los tanques de abastecimiento y distribución de agua corresponden un sistema entubado de forma cilíndrica donde el volumen de líquido que pasa por la tubería en un determinado tiempo mantiene una sección pareja y una longitud específica para poder calcular el caudal que pasa por el sistema. El caudal obtenido también se puede calcular mediante la Ecuación 6 de continuidad, la cual no es otra que la velocidad con la que el agua se encuentra circulando.

$$Q = v * A \quad (6)$$

Donde:

- $v$  es la velocidad de circulación del agua en (m/s).
- $A$  es el área que tiene la sección transversal de la tubería.

### ➤ **Presión Hidráulica**

La presión se analiza como la fuerza que actúa sobre una determinada superficie, el modelo de funcionamiento de la presión en los sistemas de almacenamiento se fundamentan a partir de los principios de Bernoulli que se interpreta como la formación que se genera a lo largo de la línea de flujo y se rige a partir de la ley de la conservación de la energía, es decir, la misma cantidad de líquido que entra por una tubería será la misma que sale por el otro extremo del sistema hidráulico, y se puede calcular mediante la Ecuación 7 (Monge Redondo, 2018).

$$P = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Donde:

- $F$  la fuerza que se aplica
- $A$  es el área que tiene la sección transversal de la tubería.

### ➤ **Área de la tubería**

Para obtener el valor de la presión hidráulica que pasa por una tubería es imprescindible el valor del área por donde fluye el líquido, este valor se puede calcular mediante la Ecuación 8 (Valdivieso, 2019). Se utiliza para diferentes análisis referentes a hidráulica para obtener valores precisos de medición.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (8)$$

La variable  $D$  representa el diámetro de la tubería en donde se necesite realizar el cálculo del caudal que fluye por el conductor de fluido, este dato se expresa en  $m^2$ .

### ➤ **Ecuaciones de la piezoelectricidad**

Las ecuaciones que conforman los materiales piezoeléctricos son una combinación generada a partir de las tensiones y deformaciones expuestas al material piezoeléctrico, de tal manera que se pueda observar el comportamiento eléctrico, el efecto piezoeléctrico directo se lo puede analizar a partir de la Ecuación 9 (Gómez, 2018).

$$P = dT \quad (9)$$

Donde:

- $P$  es la densidad de carga que se genera en la superficie del material.
- $d$  es el coeficiente de deformación que sufre el material.
- $T$  es la tensión a la cual se encuentra sometido nuestro material.

### ➤ **Módulo de Young**

El módulo de Young o también conocido como módulo elástico, se utiliza para relacionar los diferentes parámetros de interacción que se producen al momento de generar la conversión de energía mecánica a eléctrica por medio de los dispositivos piezoeléctricos, estos están ligados al modelo de almacenamiento de energía (Energy Harvesting).

El modelo de funcionamiento del módulo Young se puede analizar mediante la Ecuación 6, mediante los parámetros de interacción en el material se utilizan para encontrar los cálculos diferentes a cada una de estas variables y se las puede obtener mediante la Ecuación 10, 11 y 12 (Molina, 2021).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (12)$$

Donde:

- $\sigma$  es el esfuerzo unitario que se produce en el material.
- $\varepsilon$  es la deformación unitaria que se produce en el material.
- $P$  es la presión aplicada en la piezoeléctrica medida en (N).
- $A$  es el área sobre el cual la presión actúa ( $m^2$ ).
- $\delta$  es la deformación total generada en el material (m).
- $L$  es la longitud original en (m).

El modelo de funcionamiento del módulo de Young en un material piezoeléctrico se representa de forma inversamente proporcional, es decir; a mayor módulo elástico menor sería la deformación generada en el material y por ende menor voltaje producirá el piezoeléctrico (Molina, 2021).

### 2.1.2. Voltaje en función de la fuerza aplicada

El valor de voltaje que se produce a través del material piezoeléctrico por medio de los discos o sensores es directamente proporcional a la fuerza que se genera sobre el material, es decir, a mayor fuerza aplicada mayor será el voltaje generado por el piezoeléctrico, esto depende tanto del tipo de material como también de la geometría que contenga, lo que presentara diferentes tipos de aprovechamiento del material, para el caso de los discos piezoeléctricos conformado por un diámetro al menos 5 veces mayor a su espesor el cual contenga PZT(Zirconato de titanato de plomo) el cual trabaje a una frecuencia baja se puede determinar mediante la Ecuación 13 (Malmcrona, 2018).

$$V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{t}{d^2} \cdot g_{33} \cdot F \quad (13)$$

Donde:

- $V$  es el voltaje generado.
- $t$  es el espesor de la cerámica piezoeléctrica.
- $d$  es el diámetro.
- $F$  es la fuerza que se aplica en el material transductor.
- $g_{33}$  es la constante piezoeléctrica.

### ➤ Capacitancia del material piezoeléctrico

En el caso del análisis del modelado de un dispositivo a partir de materiales piezoeléctricos es necesario conocer las características de capacitancia con la finalidad de poder usar el valor de generación como referencia, este viene determinada por la Ecuación 14 (Malmcrona, 2018).

$$C = \frac{4}{\pi} * K_3^T * \epsilon_0 \frac{d^2}{t} \quad (14)$$

Donde:

- $K_3^T$  es la constante dieléctrica relativa en el material.
- $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío.

## 2.2. Diseño y construcción del prototipo de generador piezoeléctrico

El diseño del generador piezoeléctrico se realizó utilizando el software SolidWorks que muestra el boceto de los elementos y materiales en 3D y 2D, logrando realizar detalles adecuados del modelo de construcción del prototipo.

El diseño del generador piezoeléctrico se desarrolla como un modelo aproximado de fabricación para el análisis a una escala mayor, es decir, el modelo se fundamenta para poder observar la variación generada con respecto al diseño y cálculo del material con los datos reales tomados al medir su generación en el prototipo.

### 2.2.1. Herramientas de modelación computarizadas

Con la finalidad de realizar el diseño del respectivo prototipo del generador piezoeléctrico a partir de la fluctuación hidráulica en los tanques de almacenamiento, se utilizó diferentes softwares para poder conseguir un desarrollo y una explicación más adecuada del modelo y su funcionamiento, existen diferentes softwares y simuladores los cuales cuentan con licencias gratuitas que contienen las funciones y herramientas necesarias para poder modelar respectivamente el diseño del prototipo.

#### ➤ **SolidWorks**

SolidWorks es un software CAD el cual facilita el proceso de modelados de tipo mecánico en 2D y 3D permitiendo realizar cualquier pieza o conjunto de elementos que se necesite diseñar, este software extrae los planos técnicos o vistas de las modelaciones de los elementos con el fin de analizar el modelo general de manera virtual para ser implementado físicamente. Para el desarrollo del prototipo del generador piezoeléctrico se

utilizó la versión del Software SOLIDWORKS Student Edition el cual tiene una licencia gratuita que contiene todas las herramientas necesarias para poder ejecutar el generador, este Software permite desarrollar simulaciones de los componentes que se utilicen para poder observar las características de funcionamiento y de esta forma entender el comportamiento del prototipo.

#### ➤ **Simulink**

Simulink es un entorno de MATLAB el cual permite realizar simulaciones de modelos o sistemas mediante una programación visual, el software de desarrollo permite modelar sistemas de tipo eléctrico, mecánico o físico. Facilita la realización del circuito eléctrico necesario para que el generador piezoeléctrico pueda producir energía gracias a sus librerías y componentes que nos permitirá comparar el resultado de generación de simulación con el prototipo desarrollado.

#### ➤ **Fritzing**

Fritzing es un entorno libre de programaciones en donde se puede realizar la automatización de diferentes diseños electrónicos con la finalidad de ayudar a los diseñadores a crear circuitos y esquemas para su fabricación. El entorno de programación y diseño de Fritzing fue creado siguiendo los principios de Processing y Arduino para proporcionarle al usuario una representación gráfica más real para la implementación de diferentes elementos electrónicos.

### **2.2.2. Desarrollo de Conexión del generador piezoeléctrico**

Los diferentes prototipos están diseñados con 4 piezoeléctricos cada una, la primera agrupación corresponde a 2 piezoeléctricos por 2 secciones, para el análisis del funcionamiento de los demás prototipos constan de agrupaciones de 4 piezoeléctricos por una sección en diferentes ubicaciones (Figura 13). El desarrollo de todos los conexiones de los generadores se realizaron en paralelo con una salida individual con el objetivo de generar una salida de voltaje mucho más estable.

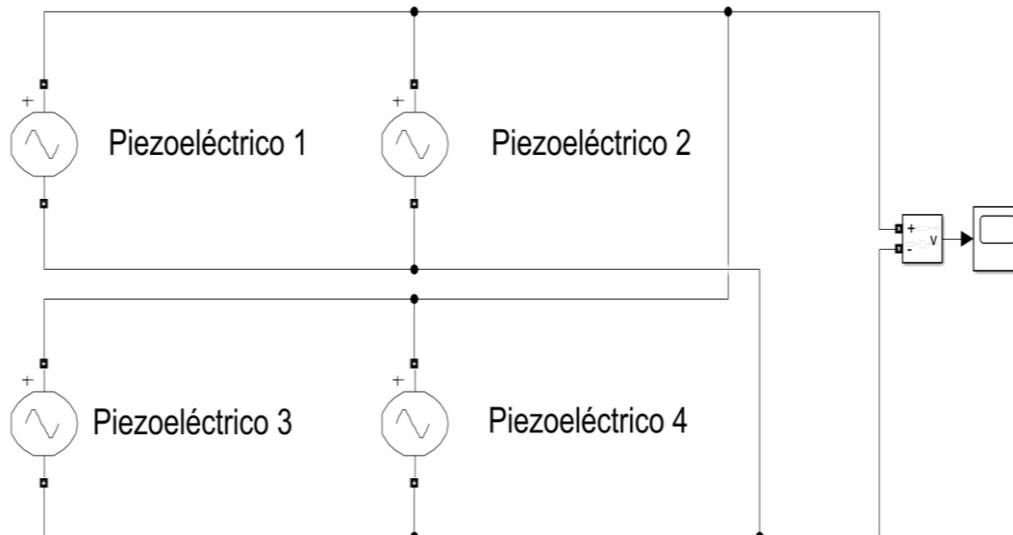


Figura 13. Conexión de los prototipos en paralelo (Simulink)

Los sensores piezoeléctricos que se utilizan generan CA, para evitar que exista la presencia de voltajes negativos al momento de utilizar la señal generada es necesario conectar un puente de diodos con la finalidad de poder rectificar la señal y de esta manera prevenir que el voltaje se cancele. El modelo de conexión en paralelo es empleado debido a que los sensores actúan como generadores independientes, es decir, si uno o varios discos existe una presión se producirá un voltaje, en el caso de la conexión en serie, cuando uno de los discos no existe una presión el voltaje del generador es cero, esto hace que no sea factible para el aprovechamiento máximo de los prototipos.

### 2.2.3. Almacenamiento de la energía del PEG

El circuito de almacenamiento consta principalmente del diseño general a partir del cual se aprovecha la energía producida por el PEG, el modelo de funcionamiento está compuesto por la parte de generación, rectificación y filtrado (Figura 14), para poder aprovechar al máximo la energía producida y evitar otros tipos de pérdidas. Mediante el conexión en paralelo de cada uno de los prototipos, las salidas del generador van a un puente de diodos para realizar una rectificación, una vez obtenida la rectificación de la señal eléctrica de AC a DC se conecta a un capacitor para poder filtrar el voltaje debido a que se necesita un voltaje estable la cual se utiliza para poder almacenar en la batería.

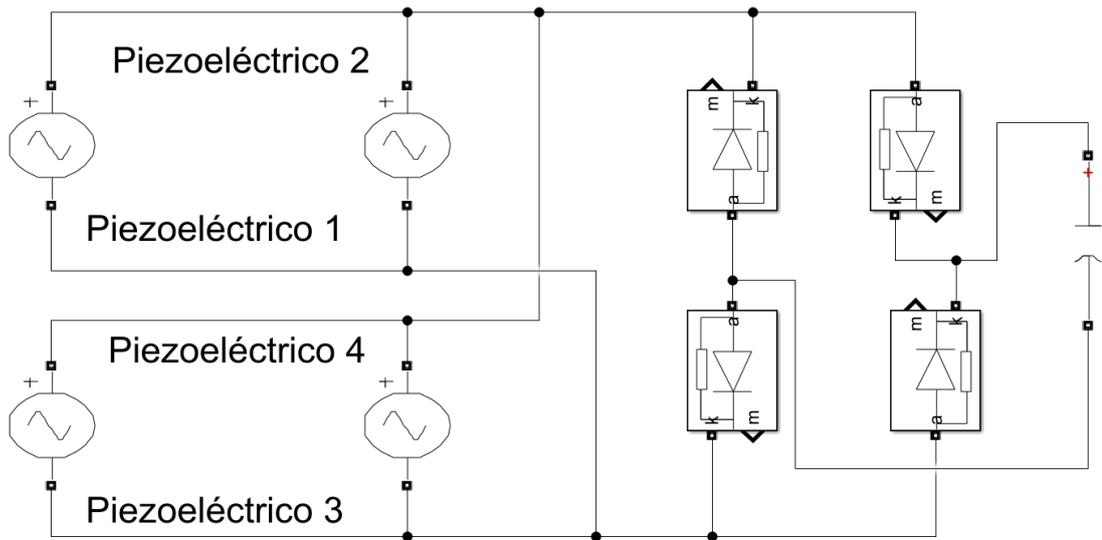


Figura 14. Generación, rectificación y Filtrado del PEG para consumo y almacenamiento en la batería (Simulink)

#### 2.2.4. Modelo de recolección PEG

Para el análisis de la generación se debe tener en cuenta el funcionamiento del circuito general, el modelo de aprovechamiento no supera los 20 Hz y está conectado en serie la parte generadora con el capacitor, por medio del circuito equivalente (Figura 15), se considera el aprovechamiento de la parte generadora mediante el cálculo de la generación de energía las cuales serán comparadas con los datos obtenidos por los prototipos.

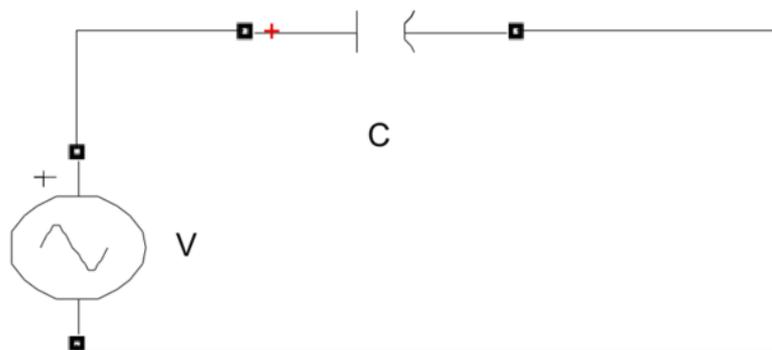


Figura 15. Circuito Equivalente del PEG (Simulink)

Mediante los datos obtenidos por el Datasheet de los sensores piezoeléctricos presentados en la Tabla 2 podemos realizar el cálculo de aprovechamiento de la energía producida, teniendo en cuenta las variables de presión presentadas por la fluctuación de agua en los tanques de almacenamiento, utilizamos la Ecuación 12 para poder definir la cantidad de voltaje producido por el piezoeléctrico en función de la fuerza.

$$V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0.001m}{(0.027)^2} \cdot (2 \times 10^{-3})F$$

$$V = 0.00349 * F$$

El cálculo de la fuerza ejercida sobre el piezoeléctrico depende de la ubicación del material y donde se realice su medición, en el caso de los tanques de almacenamiento y distribución de agua en el Cantón Pedro Moncayo se considera como referencias dos tipos, estructuras y mediante el medidor utilizado en el tanque podemos definir la cantidad de caudal que pasa por la tubería, los lugares de medición corresponden principalmente a las paredes de los tanques y las tuberías donde podemos variar las presiones y analizar el lugar óptimo para el aprovechamiento máximo de generación eléctrica.

➤ **Presión en las tuberías**

Los datos de caudal se utilizan para calcular la presión en Newtons necesaria para que los PEG puedan producir electricidad. Se realizó un muestreo diario de la cantidad de caudal que entra en los tanques de 650 m<sup>3</sup> y 50 m<sup>3</sup>, mediante estos datos se genera un promedio de 29 l/s (0.029 m<sup>3</sup> /s) y 3.5 l/s (0.0035 m<sup>3</sup> /s) respectivamente, tomando en cuenta los conceptos básicos de la hidrodinámica podemos calcular los datos de presión y fuerza ejercida sobre el piezoeléctrico a partir de la Ecuación 3 y 6, se debe tener en cuenta que las presiones varían dependiendo del diámetro de la tubería en la cual se esté realizando la medición, en este caso la tubería para cada uno de los tanques consta de 6 pulgadas (0.1524 m).

Para poder obtener la presión que pasa por una determinada tubería se necesita calcular el Área donde el fluido se encuentra pasando, esto se puede realizar mediante la Ecuación 8.

$$A = \frac{\pi \cdot (0.1524m)^2}{4}$$

$$A = 0.1824147 \text{ m}^2$$

Después de obtener el dato del área de la tubería se debe realizar el cálculo de los valores generales que intervienen dentro del movimiento del líquido, en los cuales se toma como referencia la velocidad con la que el agua se encuentra pasando por el medidor del tanque mediante la Ecuación 6 como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2.  
VALORES DE VELOCIDAD DEL AGUA POR CAUDAL

Tanque	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Área de la tubería (m <sup>2</sup> )	Velocidad de medición agua (m/s)
650 m <sup>3</sup>	0.029 m <sup>3</sup> /s	0.1824147m <sup>2</sup>	1.589784 m/s
50 m <sup>3</sup>	0.0035 m <sup>3</sup> /s	0.1824147m <sup>2</sup>	0.191871 m/s

Para el cálculo de la presión se utiliza la Ecuación 3 de Bernoulli, la cual mediante el desarrollo de la energía cinética podemos obtener la presión resultante que pasa por la tubería al tanque de almacenamiento, teniendo en cuenta que la densidad del fluido es 1 kg/l y la velocidad obtenida anteriormente podemos encontrar la presión en *N* y *Pa*.

Se reemplaza el valor de la fuerza generada en la Ecuación 12 para poder obtener el valor del voltaje del sensor piezoeléctrico independiente, el cual nos genera un valor aproximado para el cálculo global del generador, como se puede observar en la Tabla 3, para obtener el equivalente de la generación de energía por cada uno de los prototipos, se procede a realizar el cálculo general de aportaciones que tendría cada sensor y mediante este dato poder multiplicar la aportación de energía individuales por el número de piezoeléctricos el cual tiene un valor de 4.

Tabla 3.  
VOLTAJE PIEZOELÉCTRICO EN CONDICIÓN DE PRESIÓN HIDRÁULICA POR TUBERIA

Tanque	Velocidad de medición agua (m/s)	Presión	Voltaje por lamina PZT (V)	Voltaje General
650 m <sup>3</sup>	1.589784 m/s	1263.71 $\frac{N}{m^2}$	4.41 V	17.64V
50 m <sup>3</sup>	0.191871 m/s	18.407 $\frac{N}{m^2}$	0.064 V	0.256 V

Para el desarrollo del circuito general se tomó los cálculos del capacitor el cual va a estar conectado en serie para observar el comportamiento del disco piezoeléctrico, mediante la Ecuación 15 podemos encontrar el valor del capacitor con el cual se encuentra trabajando el sensor.

$$C = \frac{4}{\pi} * (1850) * (8.854 \times 10^{-12}) \frac{(0.027)^2}{0.001}$$

$$C = 15.20 \text{ nF}$$

El valor del capacitor es utilizado para poder almacenar la energía producida por el generador, como se pudo observar en el diseño del circuito (Figura 15), el capacitor está conectado en serie con el generador PZT, el cual varía su valor de voltaje acorde las diferentes condiciones hidráulicas, el valor del capacitor es utilizado de la misma manera para cada prototipo cumpliendo el proceso de generación, rectificación y filtrado.

#### ➤ **Presión en las paredes**

La presión en las paredes se puede calcular por medio de la Ecuación 2 convectiva la cual nos genera el movimiento oscilatorio y las variaciones de presiones acorde a un factor de movimiento en este caso la presión de entrada de caudal con la variación de oscilaciones en la superficie del tanque, debido a que el tanque de almacenamiento es cerrado los datos son proporcionados por la empresa a cargo dándonos una presión convectiva de  $59 \text{ N/m}^2$  para el tanque de  $650 \text{ m}^3$  y  $4.54 \text{ N/m}^2$  para el tanque de  $50 \text{ m}^3$ , la presión generada se utiliza para encontrar el valor generado de voltaje mediante la Ecuación 12.

El voltaje obtenido en las mediciones realizadas nos muestra la generación de energía la cual se pretende obtener en el análisis y comparación del prototipo, la energía general varía dependiendo del rango de fluctuación y presión en los diferentes puntos, lo que aumenta o disminuye el valor de generación obtenida Tabla 4.

Tabla 4.

VOLTAJE PIEZOELÉCTRICO EN CONDICIÓN DE PRESIÓN HIDRÁULICA POR PAREDES				
Tanque	Densidad del fluido (agua)	Presión	Voltaje por lamina PZT (V)	Voltaje General
650 m <sup>3</sup>	1000 g/l	59 $\frac{N}{m^2}$	0.21 V	0.84V
50 m <sup>3</sup>	1000 g/l	4.54 $\frac{N}{m^2}$	0.016 V	0.064 V

### 2.3. Desarrollo del generador piezoeléctrico

Mediante el análisis de comportamiento de los materiales piezoeléctricos se propuso diferentes tipos de alternativas para el modelo y aprovechamiento de las condiciones de los elementos en la generación de energía, el desarrollo del prototipo varían dependiendo al tipo de construcción y recubrimiento que se encuentra expuesto, los criterios de funcionamiento del prototipo se rigen a partir de su ubicación y como esta cambia el valor de energía generada al ser aplicadas a la fluctuación de la presión hidráulica en los tanques de almacenamiento y distribución.

#### 2.3.1. Selección de material para construcción del prototipo

Para la selección de materiales más aptos en la generación de energía se tomó en cuenta el modelo de funcionamiento de los materiales y una base rígida en la cual el prototipo se encuentra sostenida para realizar la conversión, el prototipo está diseñado para poder almacenar la energía generada para posteriores usos mediante un circuito externo. Los materiales y elementos utilizados se pueden detallar en la Tabla 6.

Mediante una ponderación de los diferentes microprocesadores más comunes en el mercado, como se muestra en la Tabla 5, podemos obtener un análisis del modelo más apropiado para el caso de desarrollo y diseño del prototipo, en el cual vamos a utilizar para el muestreo de la información.

Tabla 5.  
PONDERACIÓN DEL ARDUINO PARA EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Factores	(P) (%)	Arduino Mega 2560			Arduino Uno			Arduino Nano		
		E	C	(P)(x)	E	C	240	E	C	(P)(x)
Precio	30	20\$	6	180	12\$	8	80	8\$	10	300
Dimensión	10	101.52x 53.3mm	6	60	68.6 x 53.4mm	8	80	45 x 18mm	9	90
Procesador	10	ATmega2560	9	90	ATmega328P	8	50	ATmega328	7	70
Frecuencia	5	16MHz	10	50	16MHz	10	100	16MHz	10	50
Memoria Flash (kB)	20	256	10	200	32	5	70	32	5	100
Pines digitales	10	54	10	100	14	7	40	14	7	70
Pines analógicos	5	16	9	45	6	8	80	8	8	40
Puertos serie por hardware	10	3	9	90	1	8	740	1	8	80
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>			<b>815</b>			240			<b>800</b>

Donde:

- E es la especificación de la característica
- C es la calificación de factor en el rango de 0-10
- P es la ponderación

Las características las cuales se analiza muestran un mayor aprovechamiento por parte del Arduino Nano, debido a que no se necesita de muchas particularidades para el muestreo de datos, sin embargo, el modelo de análisis consta del aprovechamiento conjunto en diferentes entornos del tanque lo que muestra más apto la utilización del Arduino Mega 2560 para el desarrollo de los prototipos de manera combinada, es decir, cuando el modelo de generación es individual lo más apropiado es la implementación del Arduino Nano.

Tabla 6.  
MATERIALES QUE CONFORMAN EL PROTOTIPO DE GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

Imagen	Descripción	Referencia
	El Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo el cual es basada en un microcontrolador ATmega2560 es utilizado mediante sus entradas y salidas analógicas/digitales se utilizan para la programación y medición de los datos en tiempo real.	(Proyecto Arduino, 2020)

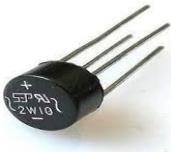


---

### Titanato-Zirconato de plomo (PZT)

- Diámetro ( $d$ )  $\phi$  27mm
- Disco cerámico piezoeléctrico 19mm
- Espesor ( $t$ ) 1mm
- Ref.DH35.453/35
- Frecuencia de resonancia 2'3 kHz
- Capacidad (a 1kHz) 25.00 pF
- Impedancia (resonancia) 300  $\Omega$
- Constante de tensión piezoeléctrica  $g_{33} = 2 \times 10^{-3} \frac{Vm}{N}$
- Constante de carga piezoeléctrica  $d_{33} = 460 \times 10^{-12} \frac{Vm}{N}$
- Constante dieléctrica relativa  $\epsilon^t = 1850$

(Molina, 2021)



---

Puente de diodos se utiliza para poder rectificar la corriente alterna en DC.

- Modelo: 2W10
- Voltaje máximo de pico inverso: 1000 V
- Corriente máxima promedio: 2A

(Molina, 2021)



---

El tubo de termo retráctil es un material el cual al entrar en contacto con calor se retrae, utilizado para evitar el contacto directo con factores ambientales.

(Tecmikro, 2020)



---

El diodo 1N4007 se encarga que la corriente fluya en un solo sentido, facilitando que la batería de manera innecesaria.

(Hetpro, 2021)

- Voltaje inverso pico: 1kV
  - Corriente directa máxima: 1A
  - Caída de voltaje directo: 1.1V
-

	<p>Capacitor electrolítico, es utilizado para modular la señal en fuentes de alimentación.</p>	(Molina, 2021)
	<p>Batería Li-ion en donde se va a almacenar la energía generada</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje: 3.7 V</li> <li>• Corriente: 2000 mAh</li> </ul>	(Selectronicas, 2019)
	<p>Placa De pruebas es una herramienta en donde se puede insertar elementos electrónicos permitiendo armar circuitos por medio de su sistema de conexiones.</p>	(Molina, 2021)
	<p>El cable Dupont se utiliza para interconectar diferentes elementos en un circuito.</p>	(Arduino, 2022)
	<p>El sensor INA219 se utiliza para poder realizar mediciones de voltaje, corriente y potencia en un determinado circuito.</p> <p>Voltaje de medición: 0V-26V</p> <p>Corriente de medición: <math>\pm 3A</math></p> <p>Presión: <math>\pm 0.5</math></p>	(Altronics, 2020)

➤ **Primer prototipo**

El primer prototipo (Figura 16) se obtiene como resultado un diseño de generador cuadrado de 20 cm x 16 cm en el cual posee 4 piezoeléctricos de 27 mm ubicados paralelamente, los cuales estarán recubiertos por un tubo termo retráctil de 29 mm de diámetro que impide un contacto directo con el agua y así el proceso de generación se realice por la variación producida por la presión del termo retráctil con el piezoeléctrico generada por la fluctuación del agua.

El modelo de ubicación de los elementos está compuesto por 2 secciones de 2 para distribuir la presión dependiendo de la altura en la cual el material aprovecha las fluctuaciones de la presión hidráulica.

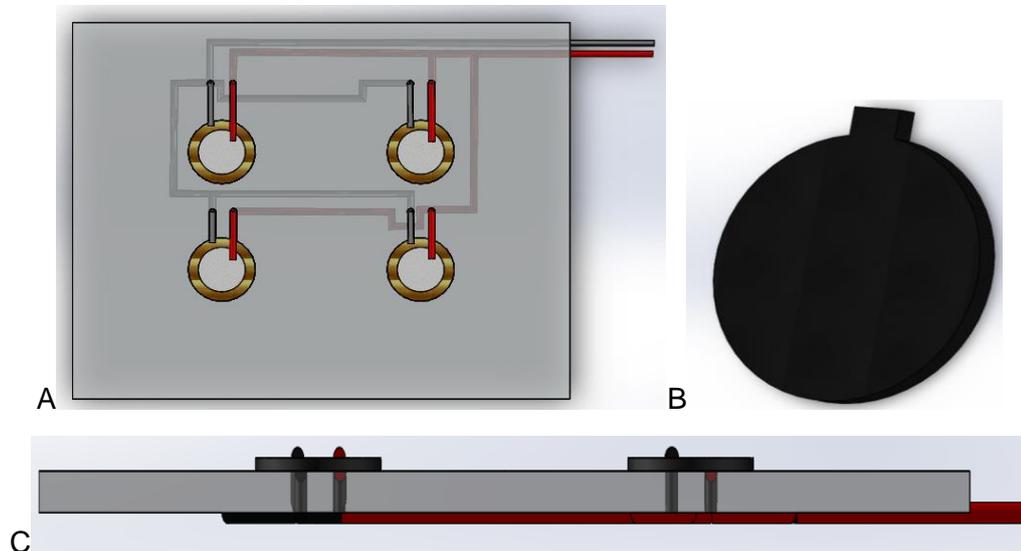


Figura 16. (A) Vista frontal del primer prototipo. (B)recubrimiento termo retráctil. (C) Vista lateral del prototipo 1 ubicación en paralelo (SolidWorks)

La construcción del prototipo (Figura 17) está desarrollada sobre una base rígida en el que se sobrepone los sensores piezoeléctricos recubiertos por el termo retráctil para impedir que la energía producida por el material se disperse por el agua y solo fluya a través del cable conductor conectado.



Figura 17. Prototipo ubicación paralela

### ➤ Segundo prototipo

Para el segundo prototipo (Figura 18) se obtiene como resultado el diseño de un generador piezoeléctrico de 17 cm x 7 cm ubicados en una sección de 4, cada elemento está recubierto por un tubo termo retráctil de 29 mm de diámetro, el diseño de este prototipo tiene

como objetivo observar la variación de la energía producida a partir de la ubicación de los materiales a una altura pareja.

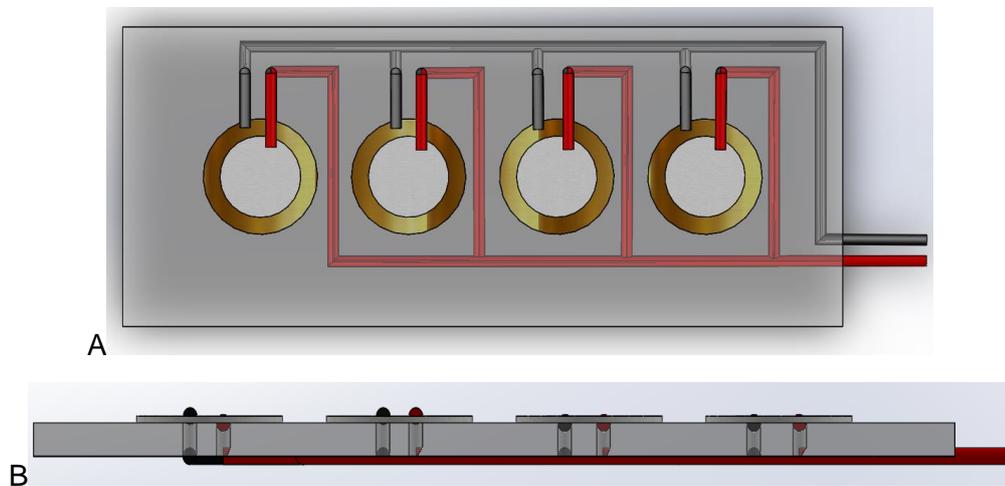


Figura 18. (A)Vista frontal del prototipo 2. (B)Vista lateral del segundo prototipo con recubrimiento termo retráctil (SolidWorks)

El modelamiento y construcción del prototipo 2 (Figura 19) los sensores piezoeléctricos se encuentran sobre la base rígida, los elementos de conducción como los sensores y cable están recubiertos por el termo retráctil a una altura simétrica entre los demás elementos piezoeléctricos, se toma en cuenta una ubicación en serie manteniendo el mismo conexionado en paralelo.



Figura 19. Prototipo ubicación con recubierto termo retráctil

### ➤ Tercer prototipo

El tercer prototipo (Figura 20) se obtiene como resultado el diseño de un generador piezoeléctrico de 3 cm x 16 cm colocados en una sección de 4, cada elemento está recubierto por una capa de aerosol impermeabilizante y un extremo fijado a la base, el diseño de este

prototipo tiene como objetivo observar la variación de la energía producida a partir del movimiento de agua y resistencia presentada por el generador.

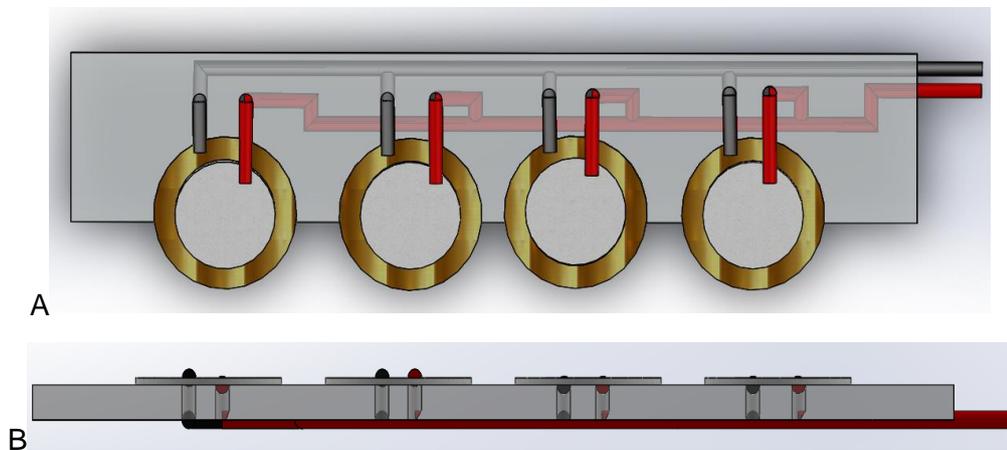


Figura 20. (A) Vista frontal tercer prototipo con recubrimiento impermeable (B) Vista lateral del prototipo 3 (SolidWorks)

El desarrollo de construcción del tercer prototipo (Figura 21) mantiene una ubicación en serie, donde los piezoeléctricos se encuentran sostenidos rígidamente a la base, dejando la mayor parte del sensor libre con recubrimiento impermeabilizante, permitiendo que el agua pase por los lados del material.



Figura 21. Generador piezoeléctrico con recubrimiento impermeable

#### ➤ Cuarto prototipo

El cuarto prototipo (Figura 22) se obtiene como resultado el diseño de un generador piezoeléctrico con una base de 2 cm x 16 cm los cuales van a sostener los piezoeléctricos por medio de los cables, cada elemento está recubierto por un tubo termo retráctil, el diseño de este prototipo tiene como objetivo observar la variación de la energía producida a partir del movimiento de agua sin resistencia de soporte en el material base.

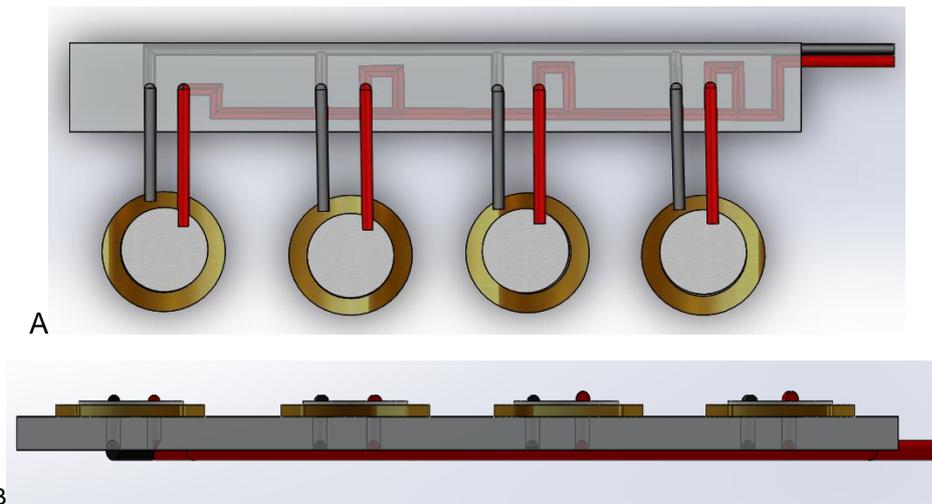


Figura 22. (A) Vista frontal del PEG recubierto por termo retráctil (B) Vista lateral (SolidWorks)

La característica de construcción del prototipo (Figura 23) no contiene una resistencia al momento de entrar en contacto con el agua, cada uno de los piezoeléctricos están recubiertos por un tubo termo retráctil y se encuentran sostenida por los cables donde pasa la energía producida por el PEG.



Figura 23. Generador PEG recubierto termo retráctil sin resistencia base

El modelo de construcción de los discos piezoeléctricos PZT corresponden a una composición de 27 mm de diámetro en todos los prototipos, pero solo 19 mm corresponden al elemento piezoeléctrico, para una correcta distribución de la presión se generó un seccionamiento que faciliten el movimiento del material.

### ➤ Control y almacenamiento

El control del circuito generador se realizó mediante la placa de pruebas (Figura 24) en donde desarrollo cada uno de los procesos para el aprovechamiento de la energía como generación, rectificación y filtración. En la construcción del prototipo se implementó un

capacitor de 220 uF con el objetivo de disminuir el rizado manteniendo un voltaje adecuado, en las salidas de condensador se coloca el diodo de paso para evitar que la batería se descargue en el circuito y la corriente pueda fluir en un solo sentido, por medio del sensor INA219 el cual está conectado al Arduino Mega 2560 se obtiene los datos en tiempo real del voltaje, corriente y energía generados por cada uno de los prototipos.

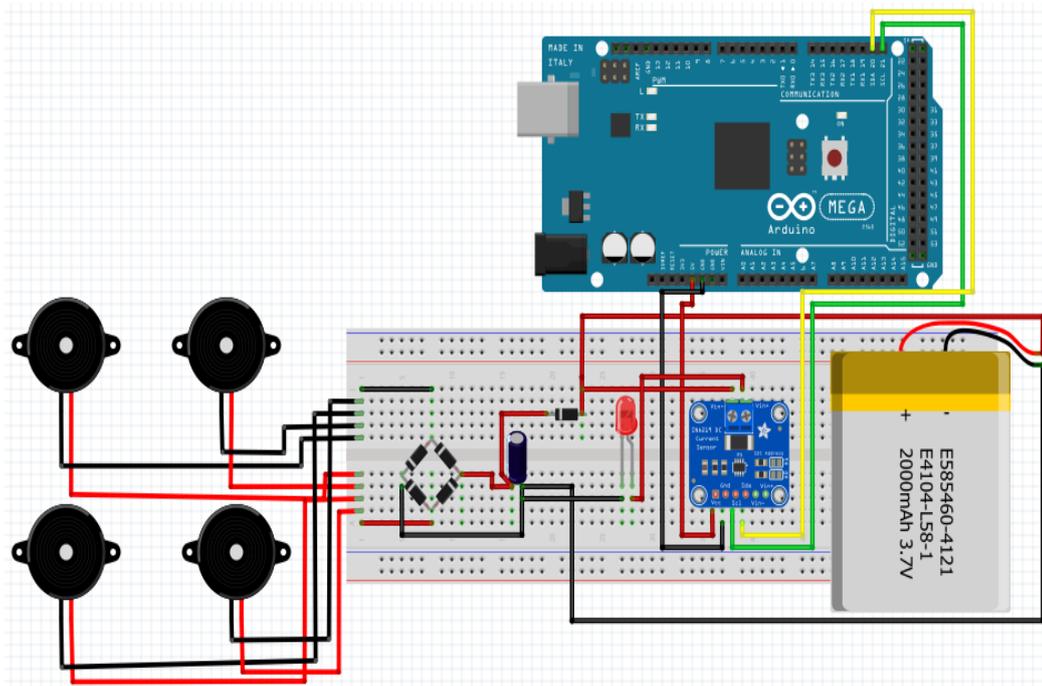


Figura 24 del prototipo integrado (Fritzing)

El funcionamiento sensorial se produce a partir de la medición del generador y el sistema de almacenamiento y control, al momento que se produce la generación de energía por medio de la fluctuación hidráulica y el material piezoeléctrico el sensor realiza una lectura, mientras exista una generación de energía el sensor INA219 va a ir censando los datos siempre y cuando exista datos de generación el valor de conversión de la energía producida se va a almacenar en el ordenador, en el caso de no existir valores de medición el sensor regresa al bucle inicial hasta que el valor de entrada de energía sea capaz de ser medido como se puede observar en la (Figura 25).

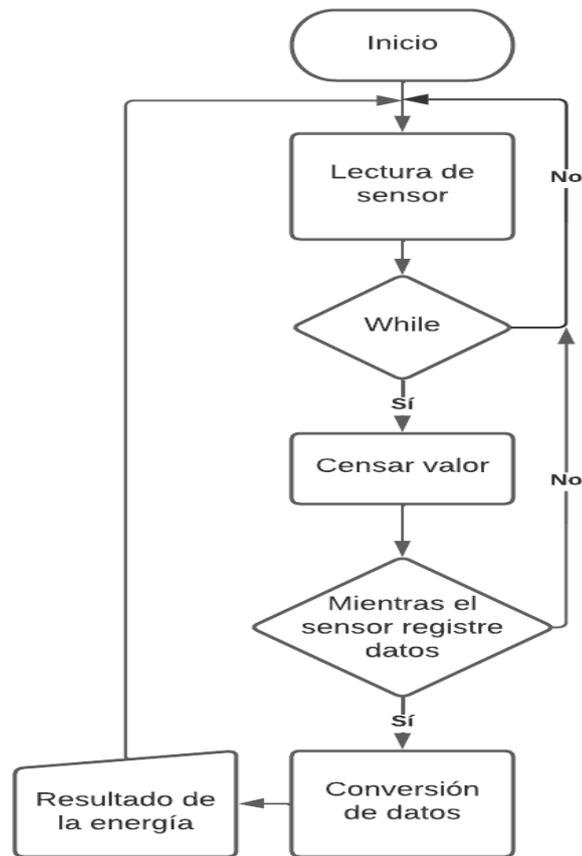


Figura 25 e flujo del funcionamiento sensorial para medición de datos

El diseño y construcción del sistema de control y almacenamiento es utilizado para captar las pequeñas cantidades de energía obtenidas por cada uno de los prototipos (Figura 26), el sistema está conectado al generador y mediante el sensor INA219 se puede extraer los datos con respecto al nivel de caudal obtenido.

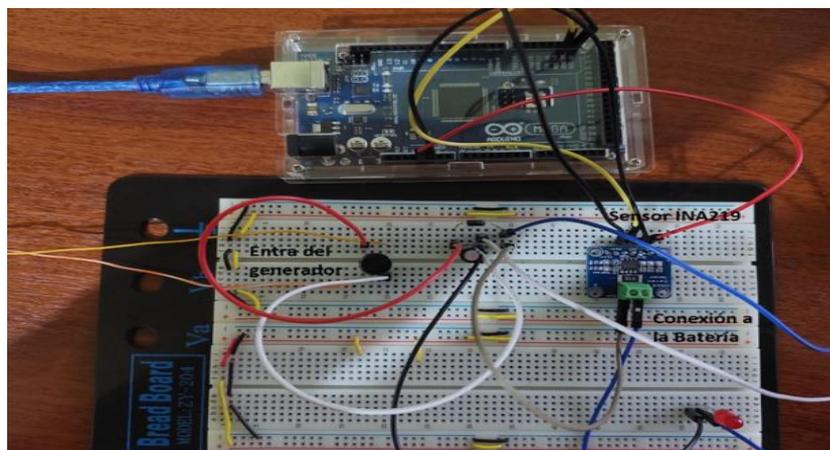


Figura 26. Circuito de generación y almacenamiento del PEG

### 2.3.2. Mediciones de datos

Las mediciones se realizaron en los tanques de almacenamiento y distribución del Cantón Pedro Moncayo, los cuales están a cargo de la EP. EMASA (Figura 27), el prototipo se instaló en los tanques correspondientes a la parroquia de Tabacundo y Sumahuasi los cuales abastecen a 3200 usuarios, el desarrollo del prototipo realizo mediciones en dos puntos de fluctuación de agua tanto en las paredes como en las salidas de las tuberías de agua.



Figura 27. Instalaciones de Almacenamiento y distribución de agua

Las mediciones se tomaron en diferentes entornos para observar el cambio de energía con respecto a la variación del caudal y la fuerza de aplicación en el piezoeléctrico (Figura 28), los datos obtenidos nos ayudaron a entender los sitios de mayor aprovechamiento del generador piezoeléctrico.



Figura 28. Mediciones del generador piezoeléctrico

Para el caso de cada uno de los prototipos el voltaje generado depende de las condiciones de resistencia a las cuales el material esté sometido, los puntos principales de medición se fundamentan en tuberías y paredes de las instalaciones, el análisis de estos puntos es importante debido a la presencia de un mayor número de presiones los cuales ayudan a la generación de energía por medio de los PEG.

## **CAPÍTULO 3**

### **Factibilidad técnica de generación por fluctuación hidráulica**

En este capítulo se presentan el estudio de factibilidad de generación eléctrica a partir de los materiales piezoeléctricos mediante la fluctuación hidráulica, el análisis de viabilidad se sustenta en los resultados obtenidos por el prototipo y el cálculo matemático representado para la formulación del aprovechamiento de la energía, también se detalla las características técnicas de generación para el modelamiento a escala doméstica.

#### **3.1. Generación de electricidad mediante fluctuación de presión hidráulica**

El generador piezoeléctrico PZT es utilizado para aprovechar la fluctuación hidráulica, modela un prototipo a escala reducida en donde las características de generación logran variar dependiendo del tipo de estructura y posición en donde se utilice, manteniendo las características de cada uno de los prototipos del generador se toman a consideración el modelo de viabilidad más apropiado para un desarrollo escalar útil en donde la energía pueda ser aprovechada de mejor modo.

##### **3.1.1. Datos de generación**

La recopilación de información mediante el desarrollo de los diferentes prototipos se utilizó para la proyección de generación eléctrica con mayor viabilidad de implementación en los tanques de almacenamiento y distribución, en este apartado se selecciona las características más apropiadas como el espacio de medición y el nivel de instalación para poder llevar el modelo de generación a una escala útil con el propósito de observar el desarrollo más factible para su implementación.

##### **➤ Resultados de medición del primer prototipo**

Mediante los datos obtenidos por el primer prototipo podemos definir una reducción en el voltaje de aprovechamiento en relación con el voltaje óptimo de generación obtenido por el cálculo matemático, esta reducción se presenta por el tipo de construcción y el modelo de distribución de las láminas piezoeléctricas en paralelo y se detalla los datos en la Tabla 7.

Tabla 7.  
RESULTADOS DE MEDICIÓN DEL PRIMER PROTIPO

Caudal l/s	Caudal m3/s	Velocidad m/s	Fuerza (N)	Voltaje (V)	Corriente (uA)	Potencia (uW)	Potencia (mW)	Energía (mWh/día)
29	0,029	1,58978	1263,71	13,0452	26,1752	341,4619	0,3415	8,1951
29,78	0,030	1,63254	1332,60	13,7564	26,2041	360,4748	0,3605	8,6514
28,89	0,029	1,58375	1254,14	12,9465	26,1552	338,6175	0,3386	8,1268
27,77	0,028	1,52236	1158,78	11,9621	26,1402	312,6921	0,3127	7,5046
28,98	0,029	1,58869	1261,96	13,0273	26,1556	340,7358	0,3407	8,1777
27,75	0,028	1,52126	1157,11	11,9449	26,1423	312,2670	0,3123	7,4944
29,3	0,029	1,60623	1289,99	13,3165	26,1925	348,7936	0,3488	8,3710
27,71	0,028	1,51907	1153,78	11,9105	26,1428	311,3733	0,3114	7,4730
26,18	0,026	1,43519	1029,89	10,6315	26,1125	277,6157	0,2776	6,6628
28,61	0,029	1,56840	1229,95	12,6967	26,1548	332,0805	0,3321	7,9699

Las variaciones en el voltaje dependen de la cantidad de caudal que está teniendo contacto con el material, a medida que aumenta el caudal el voltaje aumenta. El sistema óptimo se representa como un voltaje lineal constante Figura 29.

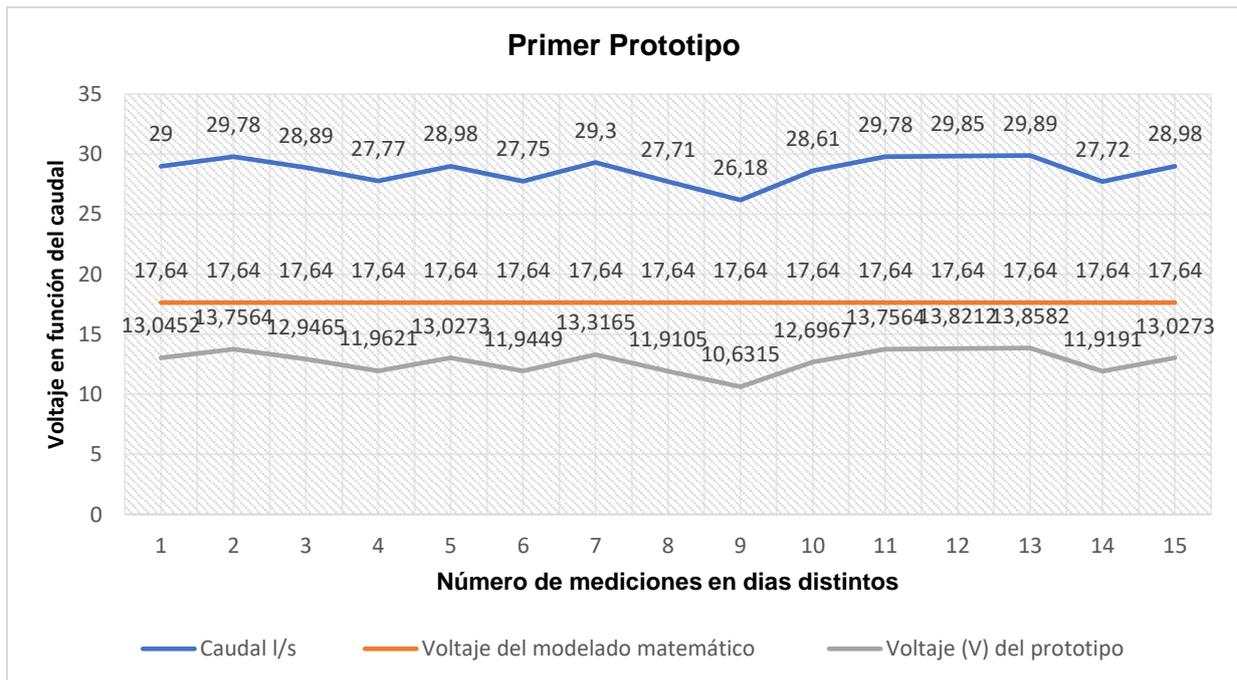


Figura 29. Variaciones de voltaje con relación al caudal del primer prototipo

La variación de la energía depende tanto de las condiciones de fluctuación producida por la parte hídrica como también de la presión ejercida en el material piezoeléctrico, el valor de voltaje a partir del modelado matemático muestra el valor de eficiencia, es decir, el modelado matemático representa el voltaje que se pretende obtener si las condiciones del

material y la presión son adecuadas trabajando a un 100% de eficiencia. El voltaje del prototipo genera un valor de energía menor en comparación al modelado matemático, esto se produce debido a diferentes factores como la fluctuación, pérdidas en el material, composición del material, etc. El margen de diferencia de voltaje producido entre el prototipo y el modelado es de 27,58% de error.

➤ **Resultados de medición del segundo prototipo**

Las mediciones del segundo prototipo se fundamentan con los datos iniciales de caudal para observar la variación de generación de electricidad con respecto a los datos generados por el modelo matemático, como se puede observar en la Tabla 8.

Tabla 8.  
VALORES DE MEDICIÓN DEL SEGUNDO PROTOTIPO

Caudal l/s	Caudal m3/s	Velocidad m/s	Fuerza (N)	Voltaje (V)	Corriente (uA)	Potencia (uW)	Potencia (mW)	Energía (mWh/día)
29	0,029	1,58978	1263,71	12,1569	26,1621	318,0490	0,3180	7,6332
29,78	0,030	1,63254	1332,60	12,8196	26,1784	335,5969	0,3356	8,0543
28,89	0,029	1,58375	1254,14	12,0648	26,1552	315,5575	0,3156	7,5734
27,77	0,028	1,52236	1158,78	11,1475	26,1287	291,2695	0,2913	6,9905
28,98	0,029	1,58869	1261,96	12,1401	26,1586	317,5680	0,3176	7,6216
27,75	0,028	1,52126	1157,11	11,1314	26,1269	290,8300	0,2908	6,9799
29,3	0,029	1,60623	1289,99	12,4097	26,1658	324,7093	0,3247	7,7930
27,71	0,028	1,51907	1153,78	11,0994	26,1266	289,9889	0,2900	6,9597
26,18	0,026	1,43519	1029,89	9,9075	26,1078	258,6634	0,2587	6,2079
28,61	0,029	1,56840	1229,95	11,8321	26,1487	309,3935	0,3094	7,4254

Realizamos una comparación de los datos medidos con respecto a los datos óptimos para ver el cambio de energía que presenta dependiendo a las ubicaciones de los elementos en serie, como se puede observar en la Figura 30. El margen de diferencia de voltaje producido entre el prototipo y el modelado es de 32.51% de error, mientras más alto sea el valor de error, la energía aprovechada es menor.

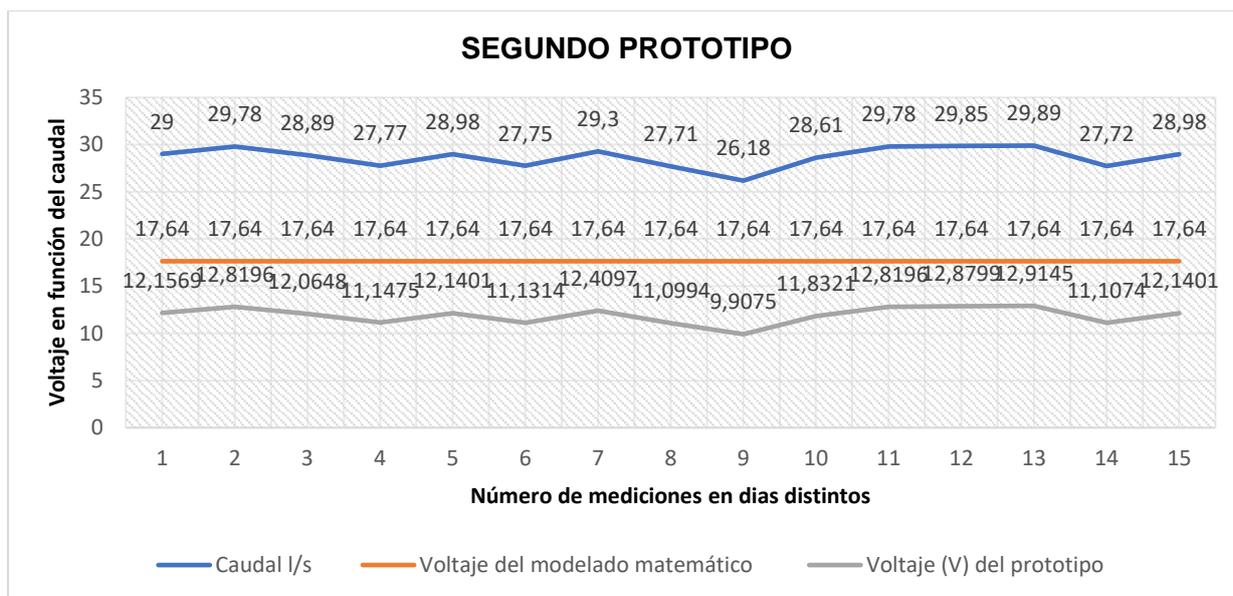


Figura 30. Variaciones de voltaje con relación al caudal del segundo prototipo

### ➤ Resultados de medición del tercer prototipo

Los datos obtenidos por el tercer prototipo, como se puede observar en la Tabla 9, presentan variaciones en el voltaje mucho menores en comparación a los recubiertos con el tubo termo retráctil, la generación de energía presente en el prototipo mantiene un rango de tiempo de producción muy bajo lo que imposibilita su producción para ser almacenada. La reducción de voltaje es mucho menor a comparación de los distintos prototipos y el valor óptimo de producción en función matemática (Figura 31).

Tabla 9.  
VALORES DE MEDICIÓN DEL TERCER PROTOTIPO

Caudal l/s	Caudal m3/s	Velocidad m/5	Fuerza (N)	Voltaje (V)	Corriente (uA)	Potencia (uW)	Potencia (mW)	Energía (mWh/día)
29	0,029	1,58978	1263,71	9,3514	26,1523	244,5614	0,2446	0
29,78	0,030	1,63254	1332,60	9,8612	26,1612	257,9818	0,2580	0
28,89	0,029	1,58375	1254,14	9,2806	26,1482	242,6716	0,2427	0
27,77	0,028	1,52236	1158,78	8,5750	26,1078	223,8742	0,2239	0
28,98	0,029	1,58869	1261,96	9,3385	26,1384	244,0944	0,2441	0
27,75	0,028	1,52126	1157,11	8,5626	26,1187	223,6452	0,2236	0
29,3	0,029	1,60623	1289,99	9,5459	26,1487	249,6131	0,2496	0
27,71	0,028	1,51907	1153,78	8,5380	26,1192	223,0052	0,2230	0
26,18	0,026	1,43519	1029,89	7,6212	26,1021	198,9284	0,1989	0
28,61	0,029	1,56840	1229,95	9,1016	26,1302	237,8266	0,2378	0

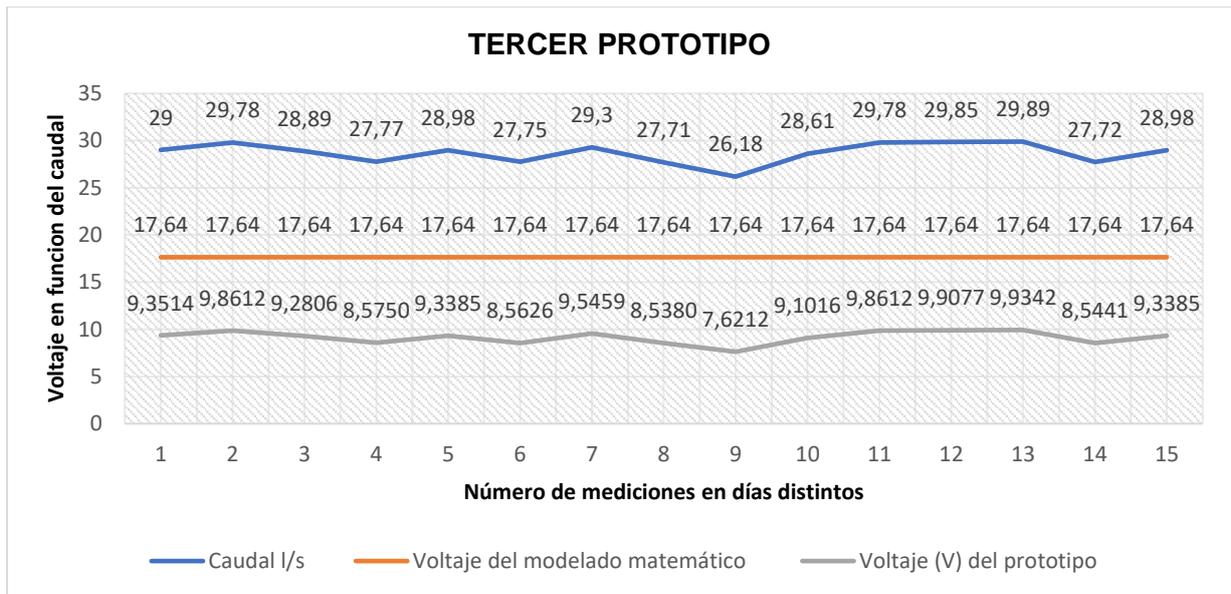


Figura 31. Variaciones de voltaje con relación al caudal del tercer prototipo

Debido a las condiciones de implementación, el sistema sin recubrimiento muestra un voltaje de aprovechamiento mucho menor, produciendo un margen de error del 48,08% en su generación, la energía obtenida por el prototipo no se puede almacenar preciso a que su producción solo se mantiene por un corto instante de tiempo debido a que al entrar en contacto con el agua este se convierte en el principal conductor de la energía.

➤ **Resultados de medición del cuarto prototipo**

Las mediciones realizadas por el cuarto prototipo, como se puede observar en la Tabla 10, presentan variaciones en el voltaje con un mayor índice de aprovechamiento por su composición sin resistencias, la proyección de energía es limitada, el espacio de instalación es reducido, además de presentar diferentes inconvenientes preciso a que la energía no puede almacenarse constantemente por su composición de generación solo se produce en instantes de fluctuación significativa en donde el prototipo puede posicionarse al estado de retorno inicial para su aprovechamiento máximo (Figura 32).

Tabla 10.

VALORES DE MEDICIÓN DEL CUARTO PROTOTIPO

Caudal l/s	Caudal m3/s	Velocidad m/s	Fuerza N	Voltaje (V)	Corriente (uA)	Potencia (uW)	Potencia (mW)	Energía (mWh/día)
29	0,029	1,58978	1263,71	14,5882	26,1947	382,1344	0,3821	9,1712
29,78	0,030	1,63254	1332,60	15,3835	26,2241	403,4193	0,4034	9,6821
28,89	0,029	1,58375	1254,14	14,4778	26,1847	379,0961	0,3791	9,0983
27,77	0,028	1,52236	1158,78	13,3770	26,1784	350,1882	0,3502	8,4045
28,98	0,029	1,58869	1261,96	14,5681	26,1698	381,2447	0,3812	9,1499
27,75	0,028	1,52126	1157,11	13,3577	26,1597	349,4342	0,3494	8,3864
29,3	0,029	1,60623	1289,99	14,8916	26,2105	390,3168	0,3903	9,3676
27,71	0,028	1,51907	1153,78	13,3192	26,1546	348,3596	0,3484	8,3606
26,18	0,026	1,43519	1029,89	11,8890	26,1215	310,5590	0,3106	7,4534
28,61	0,029	1,56840	1229,95	14,1985	26,1713	371,5931	0,3716	8,9182

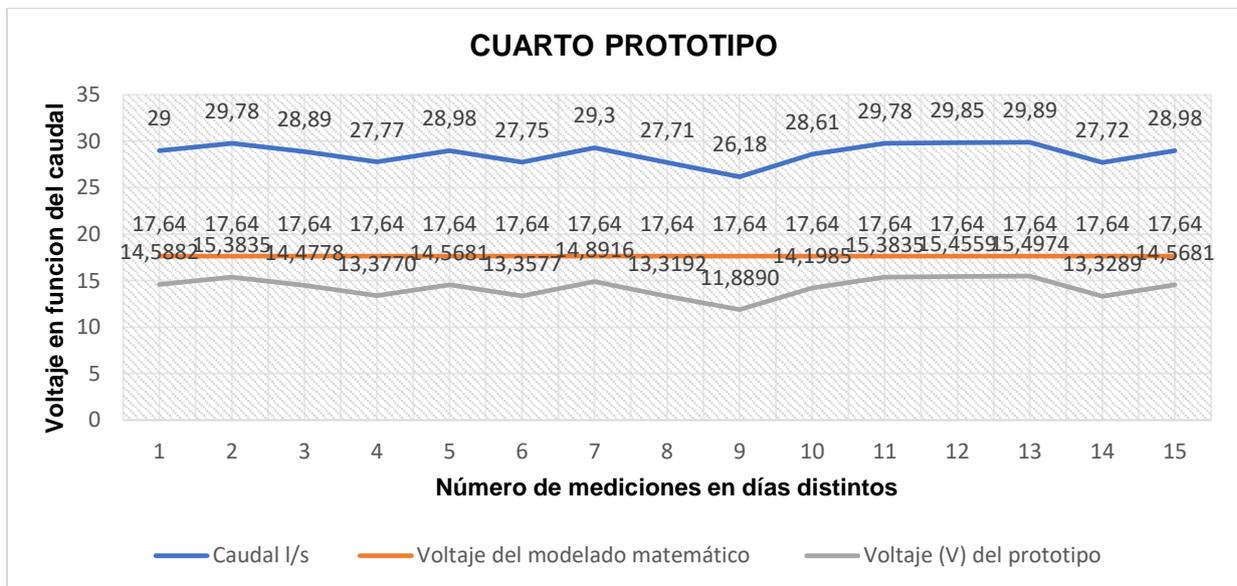


Figura 32. Variaciones de voltaje con relación al caudal del cuarto prototipo

La generación del cuarto prototipo mantiene un margen de error del 19,02% en el voltaje, el nivel de producción depende de las fluctuaciones hidráulicas con altas variaciones, es decir, el sistema debe mantener un nivel de oscilaciones significativo para que la energía pueda ser aprovechada, esto reduce el espacio de instalación y una proyección de energía para ser utilizada de manera óptima.

### ➤ Margen de error entre el modelo matemático y prototipo

El funcionamiento de un equipo se produce a partir de las características que componen su estructura y trabajo, la mayor parte de los equipos trabajan a un valor de eficiencia menor al de sus características de producción, esto se puede generar por medio de pérdidas o factores que intervienen en el aprovechamiento máximo de operación. El modelo matemático representa el valor óptimo de funcionamiento el cual produciría el generador si mantuviera las condiciones necesarias de eficiencia de manera constante, por medio del prototipo se puede observar el margen de diferencia que se produce entre el funcionamiento eficiente y el valor de producción real, el margen de error como se puede observar en la Tabla 11 representa la diferencia de generación obtenida en función del voltaje, mientras más grande sea el margen de error su eficiencia de trabajo es menor lo cual representa menor aprovechamiento en la producción de energía.

Tabla 11. MARGEN DE ERROR MODELADO MATEMÁTICO PROTOTIPO

<b>Generador</b>	<b>Modelo matemático</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Margen de Error relativo</b>
Primer prototipo	17,64 V	12,77 V	27,58%
Segundo prototipo	17,64 V	11,90 V	32,51 %
Tercer prototipo	17,64 V	9,16 V	48,08 %
Cuarto prototipo	17,64 V	14.28 V	19,02 %

El margen de error relativo a partir de las condiciones hidráulicas mantiene un valor elevado, estas peculiaridades se presentan debido a las características de generación y el valor base el cual se encuentra proyectando, a partir de la investigación analítica se puede obtener un aprovechamiento de producción mayor al 50%, lo cual presenta un beneficio bajo para la generación de energía, el error puede variar dependiendo de las condiciones de los tanques así como de la proyección de transformación de la energía.

### 3.1.2. Selección de prototipo viable de generación eléctrica

La distribución de espacios para garantizar una adecuada medición en el rango de aprovechamiento eléctrico demuestra variaciones en el voltaje óptimo, mediante el análisis de los prototipos se mantiene una restricción en el marco de instalación tomando en cuenta

la estructura de los tanques, el tamaño y las variaciones de fluctuación que se producen dentro de la instalación Tabla 12. El entorno de aplicación limita el modelo de accionamiento del generador, mientras que otros aprovechan el modelo base para generar energía constante.

Tabla 12.  
PONDERACIÓN DE FACTIBILIDAD EN GENERACIÓN

Factores	(P) (%)	Prototipo 1			Prototipo 2			Prototipo 3			Prototipo 4		
		E	C	(P)(x)	E	C	(P)(x)	E	C	(P)(x)	E	C	(P)(x)
<b>Precio de construcción</b>	10	15\$	9.5	95	15\$	9.5	95	14.5\$	10	100	14.5\$	10	100
<b>Energía producida</b>	20	Rango 6-9 mWh/día	9	180	Rango 6-8 mWh/día	8	160	Rango 0 mWh/día	0	0	Rango 9-10 mWh/día	10	200
<b>Espacio de instalación</b>	20	Tanques y tuberías	10	200	Tanques y tuberías	10	200	No optimo	0	0	Tuberías	5	100
<b>Proyección de generación</b>	30	Alta	10	300	Alto	10	300	Bajo	0	0	Medio	5	150
<b>Voltaje generado</b>	20	10-14 V	9.5	190	9-12 V	8.5	170	7-9 V	6	120	11-15 V	10	200
<b>Factibilidad</b>	10	Buena	10	100	Buena	8	80	Baja	0	0	Media	5	50
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>			<b>1065</b>			<b>1005</b>			<b>220</b>			<b>650</b>

Donde:

- E es la especificación de la característica
- C es la calificación de factor en el rango de 0-10
- P es la ponderación

El desarrollo está enfocado en el aprovechamiento máximo de las características de los equipos, el prototipo 1 es una determinación de propiedades que se asemejan a un sistema de generación tipo baldosa piezoeléctrica recubierta con un tubo termo retráctil, su construcción puede instalarse tanto en los tanques como tuberías lo que provee una proyección de crecimiento en la generación de energía. El generador buscaría mejorar el nivel de máximo de viabilidad en el campo eléctrico, es decir, los factores que intervienen tanto en la generación y costo a mediano y largo plazo están orientados a una producción capaz de satisfacer las necesidades de los consumidores.

Por medio de los cálculos matemáticos y eléctricos se obtuvo un equivalente de generación piezoeléctrica de 4 discos PZT conectados en paralelo. El voltaje producido por el generador muestra alternaciones dependiendo del tipo de caudal variando la fuerza de aplicación, por medio de la estimación de fluctuación hidráulica diaria se obtiene un promedio general de caudal equivalente a 29 l/s al día lo que genera una fuerza de aplicación de 1263,71 N produciendo un voltaje entre 10 V-17.64 V en CA, mediante el sistema Energy Harvesting las pequeñas cantidades de generación pueden ser almacenadas para su uso, debido a que la energía varía dependiendo de la fuerza de aplicación el voltaje puede llegar a aumentar y disminuir lo que proporciona una alteración al momento de utilizarla sin un sistema continuo.

### **3.2. Presupuesto del prototipo**

La inversión del sistema de generación piezoeléctrico mantiene un costo inicial de 15 \$ para un generador que consume un espacio de 20 cm x 16 cm lo cual posee 4 piezoeléctricos de 27 mm, el valor de voltaje máximo es de 13,85 V dependiendo de la variación de fluctuación que mantenga el espacio de instalación. El nivel de energía obtenido al ser un sistema de generación constante está orientado a la producción de energía continua, es decir, el sistema trabaja las 24 horas del día y almacena la producción para cualquier incidente, debido a que el sistema consiste en un circuito pequeño, la energía generada es baja a pesar de tener un voltaje elevado lo cual dificulta su aprovechamiento.

#### **3.2.1. Valoración precio prototipo**

Para la construcción del PEG se considera los aspectos tanto de generación como el de conversión que utiliza para rectificación, filtración y almacenamiento de la energía producida. El costo de inversión del prototipo en el sistema de filtración se desarrolla en un aprovechamiento y medición de las pequeñas cantidades de energía que se obtienen por medio del análisis de generación entre el PEG y las fluctuaciones de presión hidráulica, el valor obtenido no es mayor a los 11 \$ para su desarrollo, cabe destacar que el sistema implementado va a cambiar dependiendo de las características de generación, es decir,

mediante la proyección de energía del PEG el sistema va a irse adaptando acorde a las necesidades de los consumidores. El diseño de sistema de generación piezoeléctrico se analiza dependiendo del espacio conveniente de instalación, lo que nos permitirá aumentar o disminuir los PZT para obtener un rango de costo y generación Tabla 13.

TABLA 13.  
COSTO Y PROYECCIÓN DE ENERGÍA DEL PEG POR ESPACIO DE INSTALACIÓN

Descripción	Discos PZT	Costo	Voltaje	Corriente	Generación de Energía
Generador de 20cm x 16cm con sistema de almacenamiento	4	4\$	Rango 10-14V	26uA	Rango 6-9 mWh/día
Generador de 100cmX100cm mediante cálculo matemático	35	35\$	154.35V	227.5 uA	842.75 mWh/día
Generador de 100cmX100cm proyección del PEG	35	35\$	Rango 87.5-122.5V	213.214-227.5 uA	Rango 447.75-668.85 mWh/día

El aprovechamiento de sistema de generación varía dependiendo del espacio de instalación, es decir, a medida que aumentamos la instalación en m<sup>2</sup> aumenta la producción de energía y consecuentemente el costo, la proyección de energía se debe considerar dependiendo de la escala de carga que se necesite satisfacer.

El sistema de generación trabaja con una energía relativamente pequeña debido a que la corriente que fluye dentro del generador es baja, esta condición de producción se produce debido a que las fluctuaciones de presión son menos constantes preciso a que los tanques corresponden a un sistema cerrado, lo que no pasa en sistemas de baldosa piezoeléctrica donde el movimiento de personas produce un mayor aprovechamiento de la energía, esto se debe a que las personas se mueven de manera seguida y no se establecen en un solo punto lo que permite que el material pueda regresar al estado inicial y generar mayor corriente y voltaje aumentando el aprovechamiento de la energía

### 3.2.2. Proyección de aprovechamiento útil del PEG

La producción a escala está relacionada con la parte de crecimiento y aprovechamiento de la energía, existen muchos modelos de aprovechamiento que intervienen los sistemas PEG en los cuales variarían los valores de producción dependiendo a las particularidades las cuales se encuentran sometidas. Considerando el sistema de aprovechamiento en base en los datos recabados, el sistema de generación en los tanques de almacenamiento y distribución de agua tienen un máximo de aprovechamiento de 100 m<sup>2</sup> para su instalación con un total de 350 discos PZT, la inversión del sistema tiene un costo inicial de 350 \$ para la parte generadora.

El generador piezoeléctrico mantiene una conexión serie paralelo (35 discos en serie y 10 en paralelo) lo cual disminuye el valor del voltaje y aumentando la corriente para una mejor manipulación y aprovechamiento de la energía, la proyección del PEG varía entre 87.5-122.5 V, el arreglo de generación no afecta la energía producida que varía entre 44.773-66.885 Wh/día.

El aprovechamiento de la generación del PEG se representa en función del tiempo y las características de carga que se desee satisfacer, dependiendo del tipo de carga con el que trabajen, el tiempo de almacenamiento cambia. Los equipos electrónicos pueden mantener diferentes cantidades de consumo como se puede observar en la Tabla 14.

Tabla 14.  
TIEMPO DE GENERACIÓN POR EQUIPO ELÉCTRICO

<b>Equipo</b>	<b>Carga P[W]</b>	<b>Tiempo de carga del Generador</b>
Sensor de PH del agua	0.0072 W	15-25 segundos
Sensor de temperatura	1W	30-60 minutos
Luminarias	10 W	4-6 horas
Módem	25 W	9-14 horas
Cargador de Celular	15 W	5-8 horas
TV	400 W	6-9 días

PC	500 W	7-11 días
Licuada	375 W	5-8 días
Refrigeradora	350 W	5-8 días
Equipo de Sonido	650 W	10-14 días
Ducha eléctrica	4500W	67-100 días

Mediante la proyección del generador piezoeléctrico podemos mantener una trascendencia de almacenamiento para diferentes equipos en función del tiempo y la potencia de trabajo, es decir, mientras menos es la potencia con la que opere el equipo, menos tiempo le llevara al generador reunir la cantidad de energía suficiente para satisfacer la demanda.

Para poder analizar la aplicación del PEG es necesario comprender el funcionamiento del generador frente a la carga, en el caso de la luminaria de 10 W el generador piezoeléctrico tarda de 4 a 6 horas para poder mantener encendido el equipo por una hora, mientras más es la potencia de trabajo mayor será el tiempo de almacenamiento para su uso Tabla 15. En el caso de los equipos de menor potencia el tiempo de carga es menor, para los equipos de trabajo frecuentes en la aplicación de medición constante el aprovechamiento de energía se muestra de manera óptima debido a que la energía utilizada para los componentes mantiene un tiempo de carga menor, los sensores actúan de manera constante lo que muestra un trabajo conjunto en la generación y aprovechamiento para el desarrollo apropiado.

Tabla 15. CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO Y COSTO

<b>Fuente</b>	<b>Almacenamiento (Batería)</b>	<b>Potencia</b>	<b>Tiempo de carga</b>	<b>Costo de carga</b>
Convencional	230 Ah 12V	120 Wh	23 horas	0,2539 USD/kWh
Piezoeléctrico	230 Ah 12V	44.773-66.885 Wh/día	41-61 días	0,2539 USD/kWh

El almacenamiento y costo de los sistemas de generación eléctrica presentan un patrón de beneficio encaminado a un ahorro energético en función del tiempo y las

características de producción que mantengan los sistemas convencionales, tomando en cuenta el funcionamiento de cada uno se puede analizar un modelo de generación con base en los costos de producción similar, el consumo y carga de los sistemas convencionales varían dependiendo del tipo de equipo que se encuentre utilizando además del nivel de generación de la fuente de trabajo. El tiempo de carga de una batería de 230 Ah es menor al ser conectada a un cargador de 120 Wh en comparación a la fuente piezoeléctrica.

El costo de beneficio energético se interpreta mediante el tiempo de recuperación de la energía en función del costo de producción presente por el generador, es decir, en cuanto tiempo se recupera la inversión realizada a partir de la energía producida por el PEG, los sistemas convencionales mantienen un tiempo de recuperación de inversión menor, debido a que el tiempo de almacenamiento es menor al generador piezoeléctrico.

### **3.3. Factibilidad de generación**

La generación de energía por materiales piezoeléctricos es un sistema de producción amigable con el medio ambiente, la proyección de energía corresponde a un sistema de beneficio a corta escala por medio del aprovechamiento de las fluctuaciones hidráulicas. Los materiales piezoeléctricos PZT generan una alta variación de voltaje y una baja producción de corriente, lo que permite utilizar el sistema en pequeños aparatos eléctricos.

La generación de energía por presión hidráulica en los tanques de almacenamiento y distribución mantiene un margen de beneficio bajo con respecto a otros sistemas convencionales, debido a su área de instalación en el cual no permite la generación de energía a gran escala.

La propuesta financiera para el área de implementación llega a mantener un costo elevado proporcionado por el PEG. El sistema de producción eléctrica presente por los materiales piezoeléctricos mediante la fluctuación hidráulica mantiene un nivel de viabilidad bajo, este cambio de aprovechamiento es mucho menor en comparación a otros sistemas de recolección en los cuales intervienen los PEG y otros sistemas convencionales debido a que

existen diferentes factores como la baja fluctuación presente en los tanques de almacenamiento, espacio de implementación reducido y presión constante.

Para los equipos de menor potencia el desarrollo de aprovechamiento eficiente se muestra mayor debido al tiempo de carga reducido a diferencia de los sistemas alternativos, esto conlleva un beneficio de generación consumo de manera constante, el sistema puede mantener el tiempo de carga para un aprovechamiento mayor en los equipos. La generación puede ser ocupada para un sistema de medición conjunto, manteniendo un desarrollo apropiado para los sistemas de medición en los tanques de almacenamiento y distribución de agua del cantón Pedro Moncayo.

Las características de generación producen un mayor tiempo de carga para poder utilizar la energía, a medida que el tiempo de generación aumente, el tiempo de restauración de la inversión se muestra más largo, lo que presenta un sistema menos eficiente en comparación a otros sistemas convencionales.

## Conclusiones

- Mediante el análisis de los diferentes tipos de tecnologías y sistemas de generación eléctrica en los cuales intervienen los materiales piezoeléctricos, se concluye un mayor aprovechamiento y eficiencia a partir de los materiales PZT debido a sus características en condiciones hidráulicas. La recolección de energía corresponde al sistema Energy Harvesting, lo cual presenta un mayor índice de eficiencia al momento de recolectar pequeñas cantidades de energía.
- Las características de conversión y generación de energía a partir del efecto piezoeléctrico, es utilizado para determinar los parámetros apropiados en la transformación de electricidad, el valor de la energía es proporcional tanto a la fluctuación como a la presión y corresponde a diferentes factores como el movimiento hidráulico, el caudal, velocidad, la estructura y tamaño de los tanques para la transformación de energía mecánica generada por el agua a energía eléctrica.
- El desarrollo analítico a partir de la modelación matemática y la proyección de los diferentes prototipos mediante la presión hidráulica muestra la factibilidad de generación a partir de materiales piezoeléctricos, la proyección se aprovecha a partir del primer prototipo con un valor de 12,77 V y una energía de 8,0239 mWh/día, el segundo prototipo 11.90 V y una energía de 6,973 mWh/día, tercer prototipo 9,16 V sin aprovechamiento debido a sus características de producción y el cuarto prototipo 14,18 V y una energía de 8,879 mWh/día con una instalación reducida. El primer prototipo mantiene una mayor viabilidad obteniendo una generación óptima debido a las características de instalación, permitiendo generar una proyección mayor en los tanques de almacenamiento y distribución para utilizar la energía capaz de satisfacer pequeñas cargas que funcionen como reserva en caso de emergencias y mantener un margen de aprovechamiento óptimo en los sistemas sensoriales lo que genera un desarrollo eficiente mayor.

## **Recomendaciones**

- Debido a las condiciones presentes por los prototipos de generación, se recomienda el desarrollo de otros sistemas alternos en los cuales se pueda evidenciar el cambio de almacenamiento y recolección, el desarrollo investigativo puede enfocarse en la variación de la energía a partir de un sistema de retorno para mejorar la generación eléctrica debido a la baja fluctuación hidráulica.
- Debido a las condiciones de fluctuación bajas presentes en los tanques de almacenamiento y distribución, se recomienda realizar un estudio más minucioso en los cuales intervengan diferentes entornos de movimiento hídrico para el desarrollo analítico de producción eléctrica tomando en cuenta las variaciones de energía producidas por la presión y movimiento hidráulico.

## Referencias

- Agencia Internacional de Energía. (2016). *Datos Banco Mundial*. Obtenido de Producción de electricidad a partir de fuentes de petróleo, gas y carbón (% del total): <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.FOSL.ZS>
- Alemán, D. (2016). *Sistemas electromecánicos piezoeléctricos para la recolección ecológica de energía*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Altronics. (2020). Obtenido de Sensor de Corriente y Voltaje DC INA219: <https://altronics.cl/sensor-ina219>
- Arconel. (Abril de 2020). *Regulación y Control de Electricidad*. Obtenido de Balance Nacional de Energía Eléctrica : <https://www.regulacioneolica.gob.ec/balance-nacional/>
- Arduino. (28 de 07 de 2022). Obtenido de Cables Dupont para Protoboard M/M 10 Unidades | Arduino.cl: <https://arduino.cl/producto/cables-dupont-para-protoboard-m-m-10-unidades/#:%7E:text=Cables%20Dupont%20para%20Protoboard%20M%2FM%20s on%20cables%20jumper%20de,un%20conector%20de%202.54mm.>
- Coelectrix. (02 de 04 de 2018). *Coelectrix*. Obtenido de Inversor de corriente, que es y como elegir el que necesitas.: <https://coelectrix.com/inversor-de-corriente>
- Cortés, A., Ensaztiga, E., & Pineda, M. (2016). *Propuesta de Diseño de un Piso Generador de Energía Eléctrica*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Díez, P., Gabilondo, I., Alarcón, E., & Moll, F. (2018). *EEE International Symposium on Circuits and Systems*. EEE International Symposium on Circuits and Systems. Obtenido de "A Comprehensive Method to Taxonomize Mechanical Energy Harvesting Technologies.
- Fernández, A. (2018). *Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño .
- Fischer, E. (2018). *GENERACIÓN DE ENERGÍA CON MATERIALES PIEZOÉLECTRICOS*. Balnearia bonaerense de Mar del Plata: Rinfí.
- Gómez, Á. (2018). *Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos*.
- Guillén, M., & Rojas, A. (2017). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL AGUA EN TANQUES APOYADOS RECTANGULARES Y CILÍNDRICOS BAJO ACCIÓN SÍSMICA*. Lima: UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS.
- Hetpro. (2021). Obtenido de 1n4007: todo lo que necesitas saber sobre este diodo: <https://www.hwlibre.com/1n4007/>
- Hu, D., Yao, M., Fan, Y., Ma, C., Fan, M., & Liu, M. (2019). Strategies to Achieve High Performance Piezoelectric Nanogenerators. *Nano Energy*, Pages 288-304.
- International Energy Agency. (04 de Abril de 2021). *International Energy Agency*. Obtenido de Obtenido de Suministro Mundial de Energía: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/electricity>

- Jaramillo, J., & Merino, D. (2015). *Una aproximación a la naturaleza de la piezoelectricidad*. Loja.
- Jenniches, S. (Mayo de 2018). Assessing the regional economic impacts of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Pages 35-51. Obtenido de Renewable and Sustainable Energy.
- Jiménez, F., Frutos, J., Alonso, D., & Vázquez, M. (Noviembre de 2015). Piezoelectric business optimization for use in energy systems harvesting. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Pages 247-253.
- Kistler. (2022). *Kistler*. Obtenido de Sensor de presión piezoeléctrico: <https://www.kistler.com/es/glosario/termino/sensor-de-presion-piezoelectrico/>
- Lin, Z. (2020). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. *Nano Energy*, Página 3-4.
- Linh, H. (2017). *Propiedades dieléctricas, piezoeléctricas y ferroeléctricas de películas delgadas del compuesto (K0.5Na0.5)0.985La0.005NbO3*. Baja California.
- Malmcrona, M. (2018). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía*. leganés.
- Matínez, M. (07 de Julio de 2020). *Tomorrow. City*. Obtenido de PIEZOELECTRICIDAD: USANDO LAS PISADAS DE LOS CIUDADANOS PARA GENERAR ENERGÍA: <https://tomorrow.city/a/piezoelectricidad-generar-energia-con-movimiento>
- Mendoza, R. (2015). *Extracción de energía del agua mediante generadores Piezoeléctricos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Molina, M. (2021). *MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE NANOGENERADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LOS EFECTOS TRIBO Y PIEZOELÉCTRIC*. Ibarra: UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.
- Monge Redondo, M. (20 de Junio de 2018). *iagua*. Obtenido de DISEÑO AGRONÓMICO E HIDRAULICO DE RIEGOS AGRICOLAS A PRESION: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/fundamentos-basicos-hidraulica-i>
- Nieto, E., & Sotelo, R. (2018). *ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A TRAVÉS DE DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS*. Bogotá: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- OurWorldInData. (01 de Junio de 2020). *Energy Data Explorer*. Obtenido de Electricity Generation : [https://ourworldindata.org/explorers/energy?country=USA~GBR~CHN~OWID\\_WR](https://ourworldindata.org/explorers/energy?country=USA~GBR~CHN~OWID_WR)
- Proyecto Arduino. (08 de Agosto de 2020). Obtenido de Arduino Mega 2560 Características, Especificaciones: <https://proyectoarduino.com/arduino-mega-2560/>
- Rios, F., & Fernández, P. (2017). *Factibilidad técnica y económica de implementar un sistema energy harvesting con generadores piezoelectricos, en una zona de alto trafico vehicular de la ciudad de Cali*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana.

- rslicing. (2022). *rslicing*. Obtenido de Sensor PiezoElectrico:  
<https://www.rslicing3d.com/programacion-arduino-complementos/sensor-piezoelctrico/>
- Sánchez, F. (05 de Noviembre de 2018). *Cienciamx*. Obtenido de anomateriales para aplicar en energías renovables:  
<http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/materiales/23225-nanomateriales-energias-renovables>
- Selectronicas. (2019). Obtenido de Batería litio polimero 2000 mAh 3.7V:  
<https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/tipo-lipo-1/3-7v/bateria-litio-polimero-2000-mah-3-7v-baterias-pilas-de-lipo-litio-polimero-de-3-7v-1s-recargables-bat-li-po-2000-3,7-3-7v-detail>
- Sotelo, J. (2015). *Visión de la aplicación de los sistemas piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica a partir del viento en edificios*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Statista. (14 de Diciembre de 2020). *Satatista*. Obtenido de Distribución porcentual del suministro de energía primaria mundial de 2018 a 2040:  
<https://es.statista.com/estadisticas/636205/porcentaje-del-suministro-energia-primaria-mundial-por-fuente-energetica/>
- Tecmikro. (2020). *Termoencogible Termocontraible para cables - Tubo Termoretractil*.  
Obtenido de <https://tecmikro.com/cables/347-termoencogible-termocontraible-para-cables-tubo-termoretractil.html>
- Urquiza, D. (2018). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía*.  
Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Valdivieso, A. (2019). *Iagua*. Obtenido de ¿Qué es un caudal?:  
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudal>
- Yajure, C., & Yaismir, G. (2017). *Estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad*. Caracas: Scientia et Technica Año XXII.

## Anexos

Para realizar la medición y extracción de datos es necesario exportar los valores obtenidos por el sensor INA219 a Excel, la programación realizada en Arduino se la puede obtener en uno de los ejemplos proporcionados por el entorno de programación Arduino correspondiente a la librería Adafruit\_INA219 y mediante el ejemplo se puede obtener el valor de corriente, voltaje y potencia. A continuación, se muestra la programación utilizada para la medición de los valores del prototipo.

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_INA219.h>

Adafruit_INA219 ina219;

void setup(void)
{
  Serial.begin(115200);

  while (!Serial) {
    // will pause Zero, Leonardo, etc until serial console opens
    delay(1);
  }

  uint32_t currentFrequency;

  Serial.println("Hello!");

  // Initialize the INA219.

  // By default the initialization will use the largest range (32V, 2A). However
  // you can call a setCalibration function to change this range (see comments).

  if (! ina219.begin()) {
    Serial.println("Failed to find INA219 chip");
    while (1) { delay(10); }
  }
}
```

```

// To use a slightly lower 32V, 1A range (higher precision on amps):
//ina219.setCalibration_32V_1A ();

// Or to use a lower 16V, 400mA range (higher precision on volts and amps):
//ina219.setCalibration_16V_400mA ();

Serial.println("Measuring voltage and current with INA219 ...");
}

void loop(void)
{
float shuntvoltage = 0;

float busvoltage = 0;

float current_mA = 0;

float loadvoltage = 0;

float power_mW = 0;

shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV ();

busvoltage = ina219.getBusVoltage_V ();

current_mA = ina219.getCurrent_mA ();

power_mW = ina219.getPower_mW ();

loadvoltage = busvoltage + (shuntvoltage / 1000);

Serial.print("Bus Voltage: "); Serial.print(busvoltage); Serial.println(" V");

Serial.print("Shunt Voltage: "); Serial.print(shuntvoltage); Serial.println(" mV");

Serial.print("Load Voltage: "); Serial.print(loadvoltage); Serial.println(" V");

Serial.print("Current:   "); Serial.print(current_mA); Serial.println(" mA");

Serial.print("Power:      "); Serial.print(power_mW); Serial.println(" mW");

Serial.println("");

delay (2000);

}

```