



Universidad  
Pontificia  
Bolivariana

$\int_a^b f(x) dx$   
MAESTRÍA  
Ciencias Naturales y Matemática

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN  
LAS ZONAS CON DÉFICIT DE CEE COLOMBIANAS UTILIZANDO  
PIEZOELÉCTRICOS EN PRESENCIA DE LLUVIA.**

**ELIECER YEPEZ SÁNCHEZ**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
MEDELLÍN-COLOMBIA  
2020

Lic. Eliecer Yépez Sánchez.  
Maestría en Ciencias Naturales y Matemática.  
Universidad Pontificia Bolivariana



Universidad  
Pontificia  
Bolivariana

$\int_a^b f(x) dx$   
MAESTRÍA  
Ciencias Naturales y Matemática

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN  
LAS ZONAS CON DÉFICIT DE CEE COLOMBIANAS UTILIZANDO  
PIEZOELÉCTRICOS EN PRESENCIA DE LLUVIA.**

**ELIECER YÉPEZ SÁNCHEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ciencias Naturales y Matemática

**Director**

**M. Sc. Luis Hernando Tamayo Llanos**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
MEDELLÍN-COLOMBIA  
2020

Lic. Eliecer Yépez Sánchez.  
Maestría en Ciencias Naturales y Matemática.  
Universidad Pontificia Bolivariana



Diciembre 14 de 2020

**ELIECER YÉPEZ SÁNCHEZ**

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”. Art. 92, Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma del autor (es)



Universidad  
Pontificia  
Bolivariana

$\int_a^b f(x) dx$    
MAESTRÍA  
Ciencias Naturales y Matemática

### **DEDICATORIA**

A mi esposa e hijo, pues sin su apoyo no se hubiera realizado nada de lo aquí plasmado.

Lic. Eliecer Yépez Sánchez.  
Maestría en Ciencias Naturales y Matemática.  
Universidad Pontificia Bolivariana



### **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente a Dios, quien siempre nos brinda todo su apoyo a nuestras misiones. Luego a mi familia, amigos, compañeros; quienes en su medida contribuyeron con ideas u opiniones para la realización de esta investigación.

A mi Director, por la confianza depositada en mí y por creer en este proyecto.



## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTOS .....	5
RESUMEN .....	12
INTRODUCCIÓN .....	15
<b>CAPÍTULO I. DISEÑO TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
1.1 Planteamiento del Problema .....	16
1.2 Impacto Esperado .....	24
1.3 Objetivos .....	27
1.3.1 Objetivo general: .....	27
1.3.2 Objetivos específicos: .....	28
<b>CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>29</b>
2.1 Marco teórico .....	29
2.2 Estado del arte .....	30
2.2.1 Las hidroeléctricas .....	31
2.2.2 Energía Eólica .....	34
2.2.3 Técnicas similares .....	36
2.2.4 Los piezoeléctricos .....	37
2.2.5 La lluvia y los piezoeléctricos .....	39
2.2.6 Particularidades de la lluvia .....	40
2.2.7 Análisis de los piezoeléctricos .....	44
2.2.8 Aplicaciones de los piezoeléctricos .....	50
<b>CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>	<b>53</b>
3.1 Metodología .....	53
3.2 Productos esperados .....	55
3.3 Estrategia de comunicación .....	55
3.4 Instrumentos de medición .....	55
3.4.1 Pluviómetro .....	55
3.4.2 Osciloscopio .....	57
3.4.3 Sondas de atenuación .....	59
3.4.4 PVDF .....	60
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>61</b>
4.1 Materiales piezoeléctricos utilizados .....	61



4.2	Proceso de modelado de los piezoeléctricos utilizados .....	63
4.3	Protocolo teórico de construcción de un sistema para obtener energía potencial eléctrica a partir de la energía mecánica .....	66
4.3.1	Montaje experimental de los piezoeléctricos PVDF y cerámicos .....	66
4.3.2	Propuesta de un circuito para la recolección de carga.....	68
4.3.3	Respuesta de voltaje de salida y carga acumulada en el piezoeléctrico...	69
4.4	ANÁLISIS DE EFICIENCIA .....	76
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES .....		78
RECOMENDACIONES .....		79
REFERENCIAS .....		80

### Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Comparación zonas de ICÉE/déficit de CEE y su PIB. ....	19
<b>Tabla 2.</b> Gráficas del Seguimiento de Precipitaciones en el País (año 2018).....	20
<b>Tabla 3.</b> Cada kW/k de electricidad generada por energía eólica en lugar de carbón, evita: .....	35
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de la precipitación según la intensidad.....	42
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de la precipitación según la regularidad .....	43
<b>Tabla 6.</b> Materiales piezoeléctricos comunes en la naturaleza .....	45
<b>Tabla 7.</b> Eficiencia de diversos piezoeléctricos.....	46
<b>Tabla 8.</b> Relación objetivo, proceso, producto. ....	55
<b>Tabla 9.</b> Relación de precipitaciones registradas en el pluviómetro .....	57
<b>Tabla 10.</b> Materiales piezoeléctricos utilizados en el estudio.....	61
<b>Tabla 11.</b> Especificaciones técnicas de los piezoeléctricos seleccionados.....	62
<b>Tabla 12.</b> Energía suministrada a los piezoeléctricos (Datos teóricos) .....	64
<b>Tabla 13.</b> Cálculo del área de un piezoeléctrico PVDF.....	65
<b>Tabla 14.</b> Cálculo del área de un piezoeléctrico cerámico .....	65
<b>Tabla 15.</b> Configuración de piezoeléctricos para la obtención de potencia .....	66
<b>Tabla 16.</b> Voltaje y corriente en los piezoeléctricos PVDF y cerámicos en un circuito en paralelo y en serie .....	71
<b>Tabla 17. Datos de Rendimiento de los piezoeléctricos.</b> .....	77

### Lista de figuras

Figura 1 Índice de cobertura de energía por Departamentos – ICEE 2016.....	17
Figura 2 Relación entre consumo de energía per cápita e índice de desarrollo humano (2011) .....	18
Figura 3 Participación porcentual del PIB por departamento – año 2017 provisional.....	19
Figura 4 Mapa de precipitación mensual.....	21
Figura 5 Mapa de emisiones de CO <sub>2</sub> por departamento .....	25
Figura 6 Emisión en Millones de toneladas por departamento .....	26
Figura 7 Relación entre la clase de lluvia y la intensidad .....	27
Figura 8 Funcionamiento de una hidroeléctrica .....	31
Figura 9 Esquema de la central hidroeléctrica.....	32
Figura 10 Tarifas de electricidad sector industrial .....	33
Figura 11 Panorama energético del País.....	33
Figura 12 Comportamiento de la demanda energética por Regiones .....	34
Figura 13 Turbina eólica comercial: componentes.....	35
Figura 14 Tamaño de un aspa eólica y potencia generada .....	36
Figura 15 Proyecto pluvial .....	37
Figura 16 Composición de un átomo de cuarzo sometido a una presión .....	38
Figura 17 Diagrama esquemático de un sensor piezoeléctrico .....	39
Figura 18 Forma de una gota de lluvia.....	40
Figura 19 Gota de agua sin rozamiento con el viento .....	40
Figura 20 Un litro de agua esparcido en un área de 1m <sup>2</sup> .....	43
Figura 21 Efecto piezoeléctrico directo e inverso .....	45
Figura 22 Efecto piezoeléctrico directo y efecto piezoeléctrico inverso.....	49
Figura 23 Mapa de proceso investigativo.....	53
Figura 24 Pluviómetro tipo San Isidro MA15 .....	56
Figura 25 Diámetro de entrada del pluviómetro.....	56

Figura 26 Acercamiento a medida, obtenida del Nonio .....	57
Figura 27 Osciloscopio (A) Hantek 6022BE.....	58
Figura 28 Osciloscopio (B) Tektronix TDS1012 .....	59
Figura 29 Sondas de atenuación 1:10.....	59
Figura 30 Ancho de PVDF .....	60
Figura 31 Largo de PVDF .....	60
Figura 32 Montaje experimental de los piezoeléctricos PVDF en el acrílico .....	67
Figura 33 Montaje de configuración de salida de los piezoeléctricos a la tarjeta del circuito .....	67
Figura 34 Montaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos en el acrílico .....	68
Figura 35 Esquema de configuración del circuito .....	69
Figura 36 Toma de voltaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos en paralelo.....	72
Figura 37 Toma de voltaje experimental de los piezoeléctricos PVDF en paralelo .....	73
Figura 39. Relación entre corriente (mA) y precipitaciones (mm) de los piezoeléctricos configurados en paralelo.....	74
Figura 40. Toma de voltaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos en serie.....	74
Figura 41. Toma de voltaje experimental de los piezoeléctricos PVDF en serie.....	75
Figura 42. Gráfica que relaciona las diferentes tensiones captadas en las mediciones.....	75
Figura 43. Gráfica que relaciona las diferentes intensidades captadas en las mediciones. ..	76
Figura 44. Gráfica de rendimiento.....	77

### Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de la masa a partir de la densidad.....	40
Ecuación 2. Cálculo del volumen de una gota de agua .....	41
Ecuación 3. Cálculo del radio de una esfera.....	41
Ecuación 4. Cálculo de la Energía Mecánica. ....	41
Ecuación 5. Cálculo de la Energía cinética .....	41
Ecuación 6. Igualación de Energía Mecánica y Cinética .....	41
Ecuación 7. Cálculo de Cantidad de gotas. ....	43
Ecuación 8. Cálculo de la energía cinética para una determinada cantidad de gotas.....	43
Ecuación 9. Efecto Piezoeléctrico directo .....	47
Ecuación 10. Efecto Piezoeléctrico directo en función del campo eléctrico y el desplazamiento eléctrico.....	47
Ecuación 11. Efecto Piezoeléctrico inverso .....	48
Ecuación 12. Efecto Piezoeléctrico directo en función de la constante piezoeléctrica y el desplazamiento eléctrico.....	48
Ecuación 13. Polarización paralela al campo eléctrico .....	48
Ecuación 14. Polarización ortogonal al campo eléctrico.....	48
Ecuación 15. Carga de un material piezoeléctrico .....	49
Ecuación 16. Carga generada por un material piezoeléctrico sometido a una fuerza. ....	49
Ecuación 17. Voltaje de entrega a la fuente. ....	50
Ecuación 18. Cálculo del área de entrada del pluviómetro .....	57
Ecuación 19. Precipitaciones por metro cuadrado.....	57
Ecuación 20. Simetricidad de las medidas .....	58
Ecuación 21. Cálculo de la Eficiencia .....	76

## ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LAS ZONAS CON DÉFICIT DE CEE COLOMBIANAS UTILIZANDO PIEZOELÉCTRICOS EN PRESENCIA DE LLUVIA.

Por Lic. Eliecer Yépez Sánchez

Licenciado en Matemáticas USC; Candidato a M. Sc. En Ciencias Naturales y Matemática UPB.

eliecer.yepeza@upb.edu.co

### RESUMEN

En este trabajo de investigación, se da inicio analizando el Índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE) de Colombia, identificando que las regiones que presentan un déficit de Cobertura de Energía Eléctrica (CEE) como son: Vichada, Guaviare, Putumayo, Amazonas, Vaupés, Guainía y Chocó; de igual manera, tienen poca participación en el Producto Interno Bruto (PIB), lo que se traduce en un Índice de Desarrollo Humano (IDH) menor, es decir, en dichas regiones habitan los colombianos más pobres.

Además, corroborando datos estadísticos del IDEAM, se encuentra que, estas regiones con déficit de CEE presentan una precipitación pluvial regular la mayor parte del año, según esta entidad, estas regiones presentan lluvias durante 11 meses del año, cifra que, comparada con otras regiones del país, es elevada. Es por ello que, se busca encontrar alternativas que permitan solucionar el déficit de CEE mediante métodos convencionales, debido a que las hidroeléctricas las cuales suplen la mayor parte de la demanda energética del país, se encuentran alejadas de dichas regiones y no siguen creciendo al ritmo de la demanda, además, los mejores sitios para sus construcciones ya han sido utilizados.

Por otra parte, descartándose por completo las fuentes de energías no renovables, se investiga sobre la energía eólica, la cual, pese a ser una tecnología reciente en Colombia, deja ver sus debilidades; vientos cambiantes en nuestro país y una interconexión eléctrica importante para conectarla con las regiones le restan competitividad comparada; un claro ejemplo, son los paneles solares fotovoltaicos, sin embargo, se han descartado debido a los prolongados períodos de lluvia en las regiones.

Dentro de este orden de ideas, se puede mencionar que, los materiales llamados Piezoeléctricos, pueden llegar a ser una alternativa o solución que brinde energía eléctrica a las regiones apartadas,

Lic. Eliecer Yépez Sánchez.

Maestría en Ciencias Naturales y Matemática.

Universidad Pontificia Bolivariana



sin necesidad de una interconexión eléctrica con el resto del país; esta característica la posiciona como una opción para llevar electricidad de forma económica a las regiones y así mejorar las condiciones de pobreza (existen cifras que demuestran que las poblaciones que reciben electricidad, mejoran su Índice de Desarrollo Humano).

Finalmente, este proyecto de investigación, indaga sobre la eficiencia del material piezoeléctrico PVDF (fluoruro de polivinilideno) y piezoeléctricos cerámicos como insumos fundamentales que puedan ser utilizados en la conversión de la energía mecánica de la lluvia en energía eléctrica. Se explora teóricamente las prácticas realizadas en otras investigaciones similares, para medir la eficiencia de estos materiales. Asimismo, se realiza la búsqueda de literatura científica que investigan este tipo de materiales para realizar el diseño de dos dispositivos capaces de analizar la respuesta de los piezoeléctricos, analizando los datos obtenidos, permitiendo considerar la viabilidad de utilizar los materiales piezoeléctricos que puedan ubicarse sobre los techos de las viviendas, en parques de las regiones con déficit de CEE, y en general, diversas superficies que estén expuestas a la acción directa de la lluvia.

**Palabras clave:** cobertura de energía eléctrica, piezoeléctrico, energía renovable, PVDF.

## ABSTRACT

This research identifies the region which shows the electric power coverage (EPC) in Colombia (Department of Vichada, Guaviare, Putumayo, Amazonas, Vaupés, Guainía and Chocó). We discovered that these places produce the smallest contribution to the gross domestic product (GDP) in Colombia, and also, they have the most regular rainfall indices in the country according to figures from Colombian Official Organisms.

With this research, we found that the EPC deficiency is the cause that people in other places don't show an increase in their human development index (HDI), that means that it doesn't grow in places with electric power coverage deficit and that this is the main problem in this part of our country.

Finally, this research refers to piezoelectric materials (PVDF) as a possibility to solve the (EPC) lack in these places. The piezoelectric could be a possible solution to this problem, because, they don't need expensive interconnection network and they might produce electricity from the rainfall (common natural phenomenon in these places) and get better the HDI.

**Keywords:** electrical energy coverage, piezoelectric, renewable energy, PVDF.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se plantea, con la intención dar culminación con la carga académica reglamentaria para obtener el título profesional Maestro en Ciencias Naturales y Matemática en la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín-Colombia, mediante el estudio investigativo de “Estudio de factibilidad para la generación de energía eléctrica en las zonas con déficit de CEE colombianas utilizando piezoeléctricos en presencia de lluvia”, que presenta como objetivo general Evaluar la viabilidad de implementación de un sistema de recolección de energía (Energy Harvesting) con materiales piezoeléctricos PVDF o cerámicos, a partir del fenómeno de precipitación pluvial en las zonas de déficit de cobertura de energía eléctrica en Colombia.

La estructura del estudio se desarrolla iniciando en su primer capítulo atendido por el conjunto de secciones, en la que se desglosan tanto el planteamiento del problema, como el impacto esperado, y los objetivos: principales y específicos del estudio.

Posteriormente se despliega un segundo capítulo, que contiene el marco teórico y el estado del arte, haciendo un desglose de información referente al estudio de investigación, que aportan y enriquecen los diversos objetivos específicos que permitirán arribar a la culminación de la investigación.

El tercer capítulo, contiene la metodología de la investigación, productos esperados, estrategias de comunicación y equipos de medición experimental para la recolección de datos y su posterior tratamiento e interpretación.

Por otra parte, el capítulo cuatro, es donde se plantea los resultados y análisis de las pruebas experimentales. Seguidamente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos en las mediciones experimentales.

Finalmente, se desarrollan los capítulos concernientes a las recomendaciones, así como las referencias bibliográficas que han servido de respaldo de la investigación.

## CAPÍTULO I. DISEÑO TEÓRICO

### 1.1 Planteamiento del Problema

Colombia posee una producción de energía diversificada, entre carbón, petróleo crudo, gas natural, hidroeléctrico, biocombustible y desechos, solar y eólica; de los cuales el 93,9% de la producción corresponde a fuentes no renovables, la electricidad es obtenida principalmente de las hidroeléctricas, seguido del gas natural y en formas casi despreciables en términos de porcentaje, por Biocombustibles y desechos, Solar y Eólica. En cuanto al consumo, el 39,8% corresponde al sector transporte, el 26,4% a la industria, el 16,3% al sector residencial y el restante 17,5% corresponde al sector comercial y otros (Enersinc, 2017).

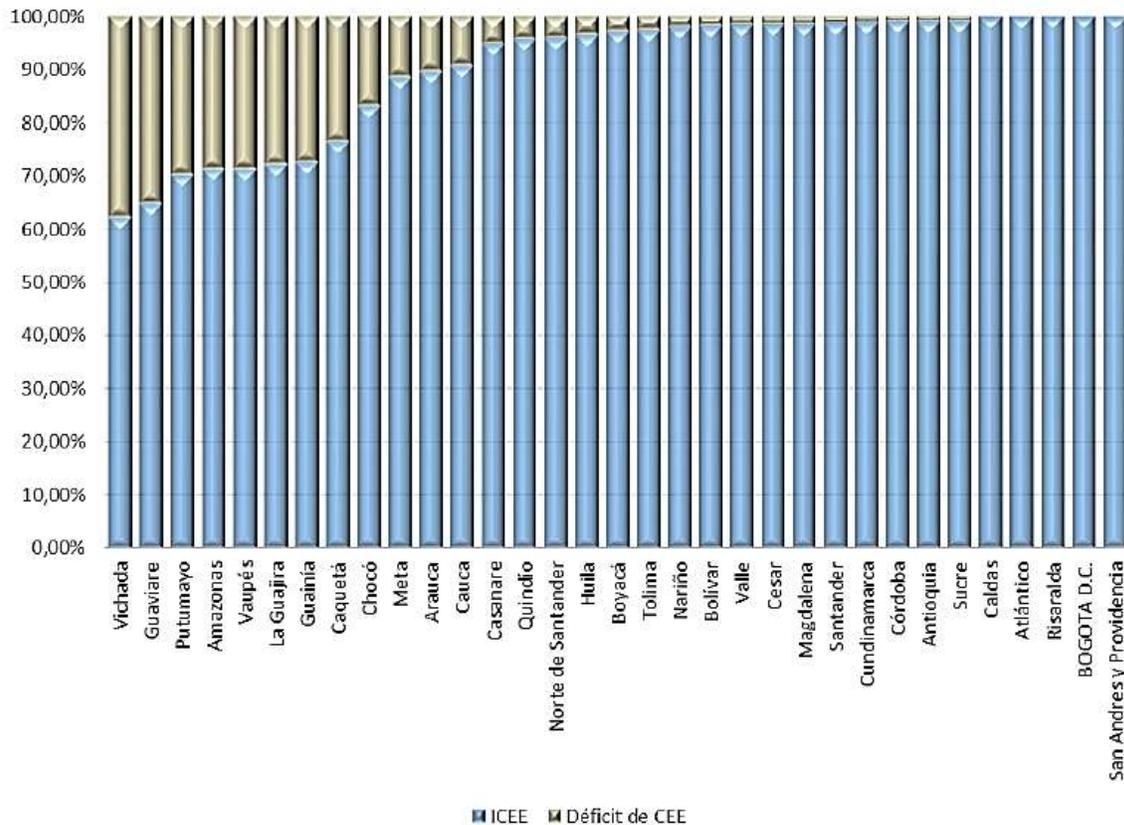
Por otra parte, el consumo energético derivado de la electricidad, tiene su mayor demanda en el sector industrial. Su mayor consumo es utilizado para bombear y/o comprimir líquidos y en general para el funcionamiento de motores 76%, seguido del calor directo 9%, utilizado para el moldeo de metales. Asimismo, la refrigeración, iluminación y aire acondicionado, representan solo el 13% del consumo eléctrico en este sector (Enersinc, 2017).

Por consiguiente, la poca producción de energía mediante fuentes renovables, trae alteraciones en los ecosistemas, pues se debe recurrir a producir electricidad de manera no renovable (Enersinc, 2017). Un informe de *Greenpeace* de enero de 2012 señala que los mayores desastres ambientales derivan de las descargas de petróleo crudo en los ecosistemas, relatan que esto ocurre también de manera intencional, por ejemplo, en las descargas operacionales de barcos (Greenpeace, 2018). Sumado a esto, desastres ambientales como el presentado en un pozo petrolero ubicado en La fortuna, Norte de Santander (Aguirre, 2018); requiere generar nuevos métodos de obtención de electricidad y de esta manera encontrar una menor dependencia de los combustibles fósiles.

Otra dificultad en materia energética, recae en la interconexión eléctrica de sus poblaciones, aunque la cobertura ha aumentado, pues se pasó de tener interconexiones eléctricas en menos de la mitad del territorio (Esteve Gómez, 2011), a tener interconectado el 97.02% del territorio nacional.

A continuación, se presenta una ilustración sobre la cobertura energética de Colombia, siendo San Andrés y Bogotá las regiones con índices más altos de cobertura; en contraste con Vichada, Guaviare y Putumayo; quienes presentan los índices de cobertura más bajos. (MINMINAS-UPME, 2016).

**Figura 1** Índice de cobertura de energía por Departamentos – ICEE 2016

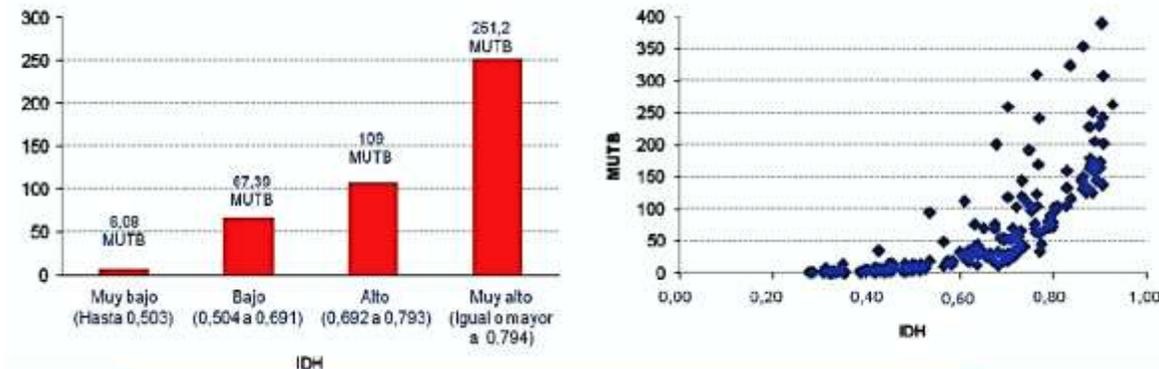


Tomado de (MINMINAS-UPME, 2016)

En la ilustración 1. Se observa que los departamentos que menos cobertura eléctrica (Cobertura de Energía Eléctrica CEE) tienen son: Vichada, Guaviare, Putumayo, Amazonas, Vaupés, Guajira, Guainía, Caquetá, Choco, Meta y Arauca; donde la cobertura aproximadamente se localiza entre un rango que oscila de 63% hasta el 89%, siendo Vichada el de menor cobertura y Arauca el de mayor cobertura. Regiones como San Andrés, Bogotá, Risaralda, Atlántico y Caldas, presentan un índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE) del 100%. (MINMINAS-UPME, 2016).

Esta deficiencia de cobertura tiene un impacto directo en las metas de reducción de la pobreza. Los consumos de energía han mostrado tener una relación directa con la superación de la pobreza (Gates, 2015) (García Ochoa, 2014), esto se puede evidenciar al observar una comparación entre el consumo de energía per cápita y el Índice de Desarrollo Humano, como se relaciona a continuación:

**Figura 2** Relación entre consumo de energía per cápita e índice de desarrollo humano (2011)



Tomado de (García Ochoa, 2014), p.8.

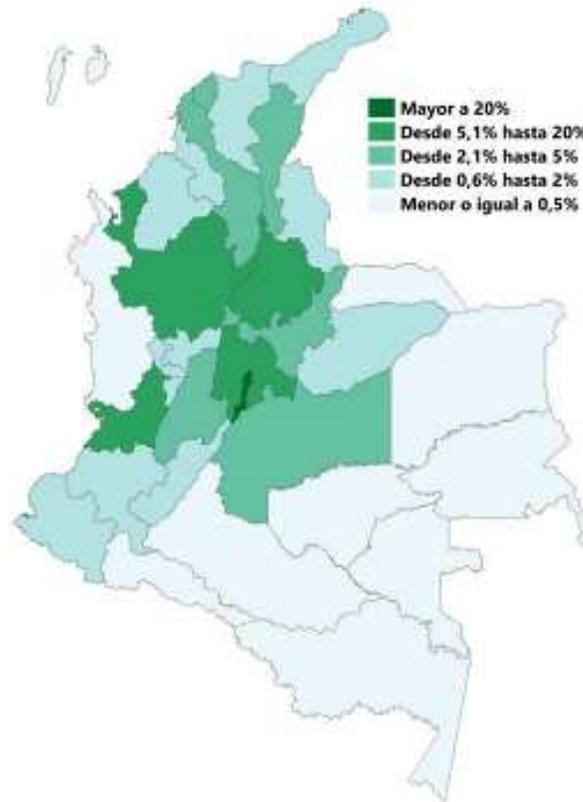
Se puede observar cómo al aumentarse el IDH (índice de desarrollo humano), el consumo de energía per cápita (por persona) aumenta exponencialmente, el autor explica que este crecimiento exponencial se debe incluso a variaciones de tipo ambiental, y no están directamente relacionadas con el aumento del IDH, aunque es claro, que el consumo energético es fundamental en el crecimiento del IDH. (García Ochoa, 2014).

Paralelo a lo anterior, existe en Colombia la necesidad de disminuir la pobreza, así lo deja ver una de las propuestas del Plan de Desarrollo Colombiano. La primera meta contemplada en el PND (Plan Nacional de Desarrollo) 2018-2022 consiste en:

“Una de las grandes apuestas de este Plan de Desarrollo es reducir la pobreza y la desigualdad y avanzar en la equidad. Por esa razón se prevé disminuir la pobreza monetaria del 26,9% en 2017 a 21,0% en 2022, lo que significa una caída de 5,9 puntos porcentuales y 2,9 millones menos de población pobre en el país. (Gobierno en Línea, 2018).

Es posible comprender hasta ahora la relación que existe entre poco IDH y déficit CEE, esto también se puede evidenciar, cuando consultan las bases de datos de DANE, se analiza el PIB proveniente de cada región. La ilustración 3, muestra la producción de PIB por cada región, siendo las partes verdes, las de mayor aporte:

**Figura 3** Participación porcentual del PIB por departamento – año 2017 provisional



Tomado de (DANE, 2019)

De la ilustración anterior (Versión interactiva disponible en <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=9d091f802200470d816eb1f063aa6aee>) se obtiene la siguiente tabla que muestra los porcentajes. Para esta investigación se comparará el PIB producido por las zonas con ICEE, en comparación con las zonas con déficit de CEE, así:

**Tabla 1.** Comparación zonas de ICEE/déficit de CEE y su PIB.

CIUDAD/REGIÓN/DEPARTAMENTO	% PIB CON RELACIÓN AL NACIONAL
San Andrés y Providencia	0,15
<b>ICEE</b> Cundinamarca/Bogotá	6,07
Risaralda	1,63
Atlántico	4,44



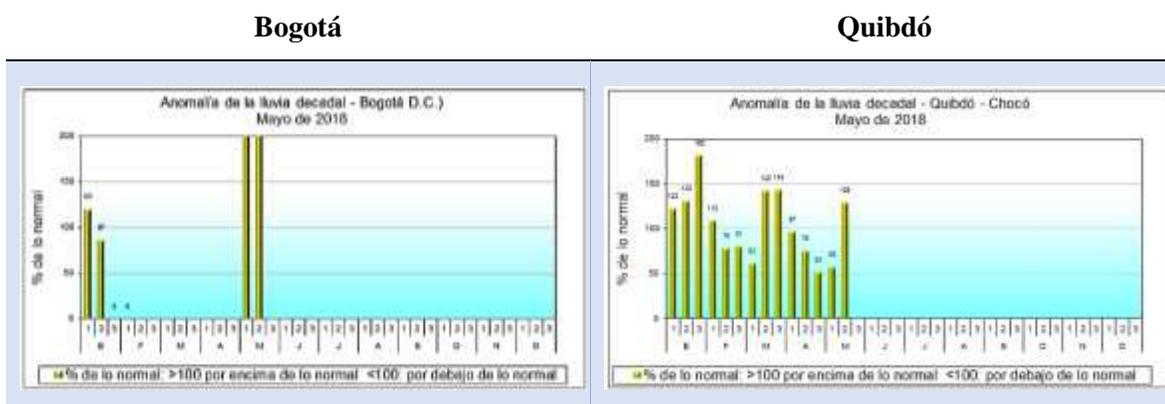
<b>Total de la muestra</b>		<b>12.28</b>
<b>Déficit de CEE</b>	Vichada	0,07
	Guaviare	0,08
	Putumayo	0,39
	Choco/Quibdó	0,43
<b>Total de la muestra</b>		<b>0,97</b>

Fuente propia con datos proporcionados por (DANE, 2019).

Se puede apreciar una diferencia de 11.31 puntos porcentuales (92.1%) entre las regiones interconectadas eléctricamente (ICEE) y las que no lo están (Déficit de CEE), lo que permite apreciar la relación que existe entre estas variables analizadas.

De acuerdo con lo anterior, Colombia es un país rico en materia hidrológica, lo corroboran las mediciones realizadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y se puede observar cómo con excepción de la guajira, los departamentos con un déficit de CEE (cobertura de Energía Eléctrica) son departamentos con índices de precipitación pluvial elevados (Gobierno en Línea, 2019). Para ilustrar esta diferencia, se han tomado dos ciudades capitales ubicadas, la primera en una zona de cobertura ICEE (Bogotá) comparada con una ciudad ubicada en una zona con Déficit de CEE (Quibdó), la tabla de comparación se muestra a continuación:

**Tabla 2.** Gráficas del Seguimiento de Precipitaciones en el País (año 2018)



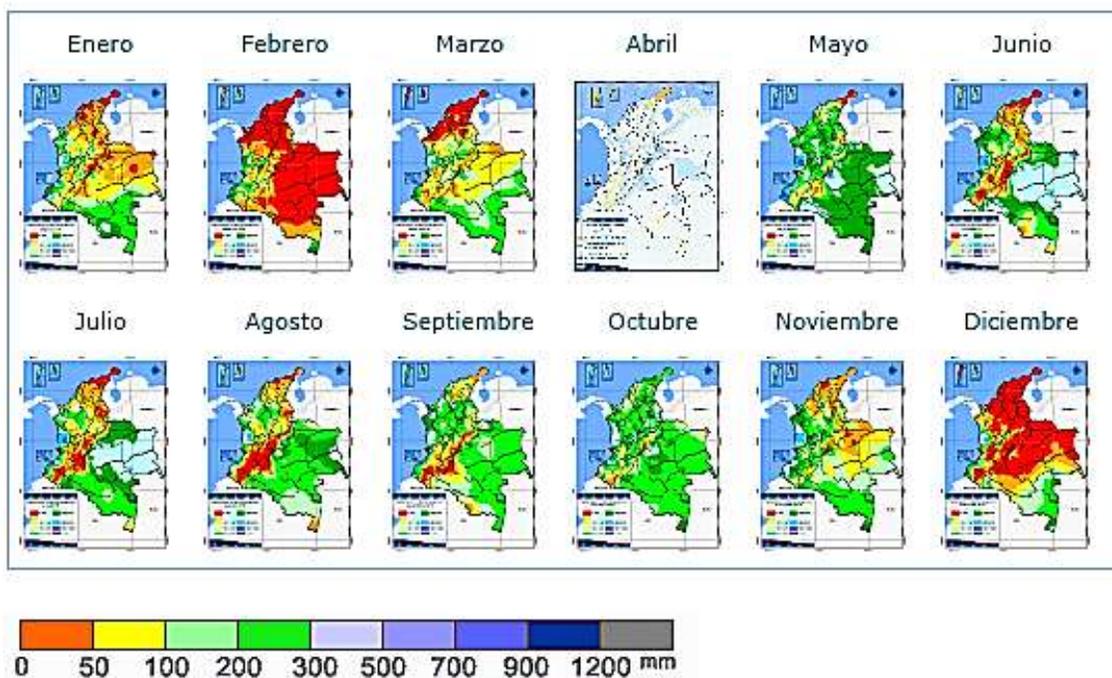
Tomado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/precipitacion-mensual-por-ano>

Es observable en la tabla comparativa anterior (tabla 1), que la lluvia es más regular en Quibdó comparado con Bogotá, indica que para el año 2018 (enero a mayo), Quibdó experimentó una precipitación de lluvias diferente de cero, durante todo el período registrado, contrario a lo ocurrido en Bogotá, donde se puede observar que durante febrero, marzo y abril, la anomalía de la lluvia fue igual a cero. (Gobierno en Línea, 2019).

Realizando un análisis de los datos recolectados por el IDEAM, es posible establecer que para el año 2018, existieron en el país tres meses con anomalías de lluvia altos (abril, mayo, octubre) y dos meses con anomalía de lluvia baja (febrero, diciembre), los mapas de precipitaciones se muestran a continuación:

**Figura 4** Mapa de precipitación mensual

**Mapas del Año de 2018**



Tomado de (Gobierno en Línea, 2019)

En el mapa de precipitación mensual (Ilustración 2), se representan los volúmenes de precipitación acumulados en milímetros durante cada mes del año. Se puede observar que la zona sur del país presenta una precipitación más elevada comparada con otras zonas del país durante todo el año. Si se

compara el ICEE de la Ilustración 1, las regiones de menor cobertura eléctrica coinciden con las de mayor precipitación.

Existen en la actualidad diversas formas de obtención de electricidad que pueden ayudar a solucionar el déficit de CEE en Colombia. Los Paneles Solares Fotovoltaicos contemplados en la tesis de Esteve Gómez (2011) se presentan como una opción de llevar energía renovable a las poblaciones más alejadas, esta forma de obtener electricidad, aprovecha los índices de radiación solar presentes en el ambiente, y mediante un proceso físico, convierte esta radiación solar, en energía eléctrica que es aprovechada; No obstante, esta tecnología tiene algunas complicaciones, como el área extensa que ocupan las plantas fotovoltaicas para generar cantidades significativas de electricidad, incompatible con la preservación de los bosques, entre otras complicaciones (Fylladitakis, 2015); como por ejemplo, una exposición directa al sol, que para las regiones con déficit de CEE, es inconveniente exceptuando la Guajira, por las razones ya expuestas anteriormente, razón por la cual no se esgrimen como la mejor opción para corregir el problema.

Es necesario resaltar, la existencia de otra manera de producir energía eléctrica renovable la cual se ciernen a partir de lo descubierto por el científico francés Antoine-Laurent de Lavoisier (1743, 1794). Él descubrió que la energía al igual que la materia, no puede ser creada ni destruida, solo transformada; y a partir de este principio se empezó a concebir una nueva forma de generar energía eléctrica. Como ha sido demostrado por la física clásica (Gottfried Leibniz y Daniel Bernoulli) un cuerpo que está en movimiento, posee energía cinética. Al considerar lo descubierto por *Lavorier* y lo también descubierto por *Leibniz* y *Bernoulli* es factible aprovechar la precipitación pluvial recurrente que se presenta en las regiones con déficit de CEE, convirtiendo la energía cinética presente en las gotas de lluvia, en energía eléctrica.

Por otra parte, se han orientado investigaciones respecto al tema, por ejemplo, un estudio publicado en la revista *C&G (Cuaternario y Geomorfología)* titulado: “Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta” encontró que, la lluvia al entrar en contacto con el suelo, produce en él deformaciones, reafirmando así, la fuerza que trae consigo la lluvia:

En los suelos desarrollados sobre margas se obtuvieron mejores relaciones entre la energía cinética de la lluvia y los cambios en las propiedades físicas y superficiales del suelo que en los suelos desarrollados sobre coluvios calizos. En los primeros se observó un incremento de



la densidad aparente y disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo con el aumento de la precipitación y de la energía cinética. (Martinez, Abadia, Castillo, & Albaladejo, 2001).

En la actualidad fundaciones como *Energy Innovation* (<http://energyinnovation.org/>) direccionan sus trabajos para buscar nuevas tecnologías amigables con el planeta. Fue en este portal, donde el reconocido empresario, informático y filántropo *BILL GATES* publicó en el año 2015, relatando la preocupación por el alto consumo de energías provenientes de compuestos fósiles, en el escrito afirma:

In 30 years, the world will consume much more energy than it does today. This should be good news. Wherever access to reliable, affordable energy goes up, so does the quality of life. But today more than 1 billion people lack access to the most basic energy services. Energy keeps schools and businesses running, city lights shining, tractors plowing, and cars and trucks moving. Without plentiful energy, the poverty rate could not have dropped by more than half since 1990, and hundreds of millions of people would have been denied the opportunity to improve their lives. There would be no steel, fertilizer, cement, or many of the other materials that make modern life possible. (Gates, 2015)

Lo antes expuesto afirma que, en 30 años el mundo consumirá mucha más energía que en la actualidad, esto no es una noticia desalentadora, pues en la medida que se consume energía, el nivel de vida también mejora, es decir, es directamente proporcional. El incremento de demanda de energía, ha permitido que se mejoren las condiciones de pobreza; desde 1990, millones de personas han podido mejorar sus vidas, gracias a mayor acceso a fertilizantes, acero y otros materiales. (Gates, 2015). Este informe advierte sobre la necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> para controlar el calentamiento global. En el tiempo presente existen más de 403 PPM y según *Gates*, se requiere que esta cifra se reduzca a menos de 100 PPM en el año 2050, para que la temperatura se reduzca en 2°C (Gates, 2015).

En su informe muestra cómo ha cambiado la forma en la que se obtiene la energía eléctrica, pasando de gas y petróleo en 1900, a 7 formas diferentes en el siglo XXI; se destacan en producción de electricidad, las formas contaminantes (Petróleo, Carbón y Gas), seguidas de las formas de producción menos contaminantes (Biocombustible, Nuclear, Hidroeléctrica, otras renovables). A partir del año 2000 las formas de energía renovables empiezan a presentar una inclinación positiva;

las hidroeléctricas, tuvieron su pico más alto en 1960, y hasta 2010 han mantenido una producción aproximadamente constante (Gates, 2015).

Esta investigación centra su atención, en identificar los estudios científicos realizados a materiales piezoeléctricos, en el sentido de producir electricidad a través de su deformación; para mostrar teóricamente la posibilidad de ser usado para la obtención de energía renovable que pueda ser presentada como alternativa para aquellas regiones apartadas geográficamente de las redes eléctricas interconectadas en Colombia (déficit de CEE), contribuir a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y lograr la meta planteada en el escrito de Gates, el PND 2018-2022 y otros que concuerdan con estas apreciaciones.

Finalmente, en el siguiente proyecto se realiza una investigación sobre la obtención de energía eléctrica a partir de la energía mecánica presente en la lluvia y si existen en la actualidad sistemas de conversión de energía mecánica a energía eléctrica por medio de piezoeléctricos, independiente de si están o no relacionados con el fenómeno de la lluvia. Una vez establecida esta información se realiza un análisis de los resultados para determinar cómo se comportan los materiales piezoeléctricos al ser utilizados en la obtención de energía potencial eléctrica a partir de la energía mecánica presente en las gotas de lluvia.

En consideración a lo expresado anteriormente, este proyecto de investigación, pretende dar solución a la siguiente pregunta:

**¿Qué factible es generar energía eléctrica en zonas con déficit de CEE Colombianas utilizando piezoeléctricos PVDF o CERÁMICOS en presencia de lluvia?**

## 1.2 Impacto Esperado

- I. Estudiar el comportamiento físico de los materiales piezoeléctrico PDVF Y CERÁMICO mediante la obtención del modelo matemático para transformar la energía mecánica de la lluvia en energía eléctrica.*

Como se mostrará en el desarrollo de la investigación, existen diversas formas de producir energía eléctrica, con excepción de los paneles solares fotovoltaicos y procesos químicos, la energía eléctrica renovable se produce a partir de la energía mecánica presente en fenómenos físicos (Gates, 2015), así

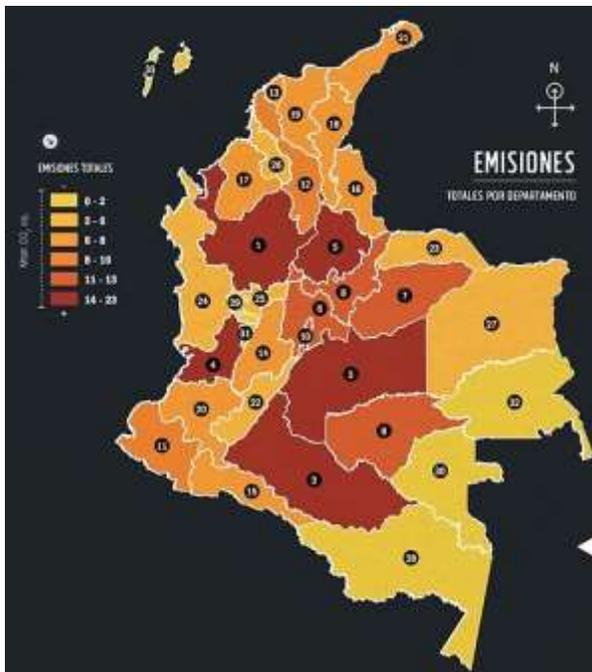
que se indagará sobre cómo extraer energía eléctrica de la precipitación pluvial, dado que en las zonas con déficit de CEE, este fenómeno es bastante regular.

Como se mostrará en el estado del arte, las técnicas para convertir la energía mecánica en energía eléctrica han avanzado en la medida que se producen adelantos tecnológicos, pasando de las hidroeléctricas hasta los materiales piezoeléctricos, estos últimos no han sido evaluados para producir electricidad a partir de la lluvia, y es en este punto donde esta investigación pretende hacer su avance.

## II. Contribuir al desarrollo de energías limpias y renovables amigables con el medio ambiente.

Las ilustraciones 5 y 6 muestran que las zonas con déficit de CEE producen una menor cantidad de gases de efecto invernadero, lo que puede indicar, que de interconectarse eléctricamente con medios de producción de electricidad, puede aumentar la producción de estos gases. Este proyecto de investigación pretende utilizar la precipitación pluvial de estas regiones, para proveerse de electricidad sin emitir por sí mismo gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la conservación de sus ecosistemas, pues, aunque no inciden directamente, si producen cambio climático que repercute directamente en el ecosistema. (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007).

**Figura 5** Mapa de emisiones de CO<sub>2</sub> por departamento



**Figura 6** Emisión en Millones de toneladas por departamento



Fuente de Ilustraciones 5 y 6. (DANE, 2016)

### III. Favorecer el desarrollo energético de las regiones alejadas geográficamente de las redes de interconexión eléctrica de Colombia.

Cómo se ha mostrado en el planteamiento del problema, el IDH tiene un valor más alto en las zonas con mayor demanda energética, lo que puede interpretarse como una consecuencia de la tecnología usada (García Ochoa, 2014), no obstante; se ha demostrado que las zonas que son previstas con energía muestran un mejoramiento en su calidad de vida (Gates, 2015), puede ocurrir entonces, que al proveer de energía a las regiones con déficit de CEE estas mejoren su calidad de vida, siendo medible su impacto, en el mejoramiento de porcentaje de aporte al PIB. En concordancia con García Ochoa (2014), se espera que las regiones a las que pueda suministrar electricidad, traduzcan esta oferta energética en comodidades tecnológicas eléctricas y electrónicas, ciencia, educación y otras. Una lista de artículos eléctricos de un hogar colombiano que pueden funcionar con el rango de potencia esperado se lista en el estado del arte.

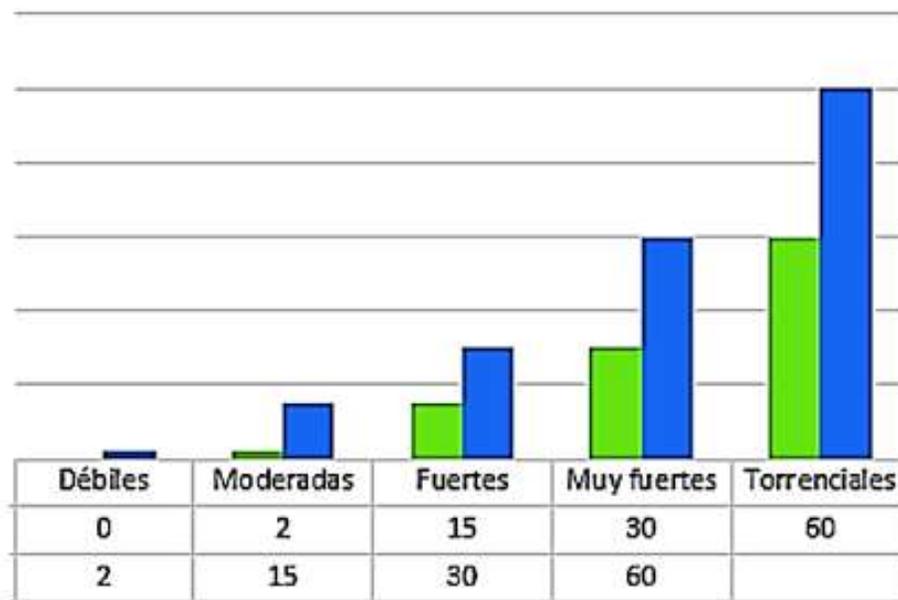
### IV. Ofrecer una alternativa de obtención de energía eléctrica a poblaciones lejanas que tengan como característica un índice de precipitación pluvial mayor a 2mm/h. (Tabla 3).

Monjo i Agut (2010) en su investigación, supone este límite inferior debido a que cualquier valor menor a 2mm/h se considera una lluvia débil o llovizna, en el desarrollo del estado del arte se

realiza una completa descripción del fenómeno de la lluvia con sus características principales, el autor explica que para estudiar el “comportamiento de la lluvia en el tiempo” se debe observar cómo se distribuye la intensidad y por ello establece los valores de la ilustración 7, donde se evidencia los resultados de sus mediciones en una hora, acotando que corresponde a una medición controlada por el corto tiempo en que osciló el experimento.

**Figura 7** Relación entre la clase de lluvia y la intensidad

### Clase/Intensidad media en una hora



Fuente propia. Construida con datos suministrados por (Monjo i Agut, 2010)

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general:

- Evaluar la viabilidad de implementación de un sistema de recolección de energía (Energy Harvesting) con materiales piezoeléctricos PVDF o cerámicos a partir del fenómeno de precipitación pluvial en las zonas de déficit de CEE en Colombia.



### 1.3.2 Objetivos específicos:

- Clasificar materiales que puedan ser utilizados en la obtención de energía eléctrica a partir del fenómeno de precipitación pluvial en las zonas con déficit de CEE en Colombia.
- Generar un modelo teórico matemático de estudio para sistemas de recolección de energía y relación entre cantidad de precipitación y energía eléctrica a partir del efecto piezoeléctrico.
- Formular un protocolo teórico de construcción de un sistema que permita la obtención de energía potencial eléctrica a partir de la energía mecánica presente en las gotas de lluvia.

## CAPÍTULO II. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 Marco teórico

Esta investigación se basa en la producción de energía renovable que favorezca la sustentación ambiental de las regiones con déficit de CEE en Colombia. Desde el siglo XX, *Aldo Leopold*, ambientalista estadounidense comentaba: “*A harmonious relation to land is more intricate, and of more consequence to civilization, than the historians of its progress seem to realize. Civilization is not, as they often assume, the enslavement of a stable and constant earth*”. [Una relación armoniosa con la tierra es más intrincada y de mayor importancia para la civilización, de lo que los historiadores de su progreso parecen darse cuenta. La civilización no es, como a menudo asumen, la esclavización de una tierra estable y constante] (Leopold, 1987). Leopold marca una ruta de avance para la civilización sin la devastación – o como él lo dijo, *esclavización* - de la tierra.

Y es que la generación de energía eléctrica es un problema de gran importancia en el mundo, una población que ronda los  $7,4 \times 10^9$  personas demandan un consumo de energía alto (Agencia Efe, 2017), y lo preocupante, es que para la obtención de esta electricidad se utiliza una gran cantidad de agua, así lo relata la *UNESCO* en su informe “Agua y energía”. Datos y estadística. Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2014”, al respecto se cita lo siguiente:

La energía representa una parte significativa de la utilización de agua de un país (tanto de consumo como de no consumo). La Agencia Internacional de Energía (AIE) calcula la extracción de agua para la producción de energía en 583.000 millones de (*metros cúbicos*) a nivel mundial en el 2010 (lo cual supone alrededor de un 15% de las extracciones mundiales totales o aproximadamente un 75% del total de extracciones industriales de agua), de los que se consumieron 66.000 millones de  $m^3$  (AIE, 2012a). Para el 2035, de acuerdo con el Escenario de Nuevas Políticas de la AIE, las extracciones aumentarán en un 20 %, mientras que el consumo lo haría en un 85 %. (Koncagül, Connor, & Tran, 2014)

El mismo informe advierte también, que, al ritmo de crecimiento de la sociedad, el consumo de energía aumentará considerablemente:

Según el Escenario de Nuevas Políticas de la Agencia Internacional de Energía (AIE), se espera que la demanda energética mundial se incremente en más de un tercio de aquí al 2035

y donde China, la India y el Medio Oriente en particular serán responsables de cerca del 60 % del incremento (AIE, 2012a). (Koncagül, Connor, & Tran, 2014).

De la misma manera, el estudio muestra las principales fuentes de electricidad en el mundo, indica que, en la primera década del siglo XXI, la generación de electricidad eólica aumentó en un 27% y la generación por medio de energía solar fotovoltaica aumentó en un 42% anual. Prevén que la energía eólica y solar continuará creciendo a ese ritmo hasta el 2030. (Koncagül, Connor, & Tran, 2014).

El modelo de generación de energía eléctrica a partir de la energía cinética, no es considerado hasta ahora un sistema eficiente de generación de electricidad, por tal razón, no aparece en las mediciones internacionales realizadas por organismos reconocidos. No obstante, se puede evidenciar, que tienen mayor crecimiento los sistemas que son amigables con el medio ambiente; de hecho, el mismo informe sostiene que la energía eólica, es la manera más limpia de obtener energía eléctrica, al respecto menciona: se determinó que la energía eólica es la más sostenible, principalmente gracias a sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y bajo consumo de agua. (Koncagül, Connor, & Tran, 2014). Debido a esto, se considera que generar energía eléctrica a partir de la lluvia, es amigable con el medio ambiente, puede articularse al ritmo de crecimiento de las energías limpias y al mismo tiempo mejorar su eficiencia.

A continuación, se encuentra el recorrido histórico que ha tenido la humanidad con lo relacionado a la obtención de energía eléctrica limpia y renovable, amigable con el planeta. Se abordan investigaciones similares que han conseguido transformar energía cinética en energía eléctrica, citando bibliografía científica, que permita comprender el nivel de desarrollo en que se encuentra esta tecnología, algunas técnicas afines a la desarrollada en esta investigación y otras que se encuentran en desventaja por las condiciones climáticas y/o económicas de las regiones que se pretenden impactar.

## 2.2 Estado del arte

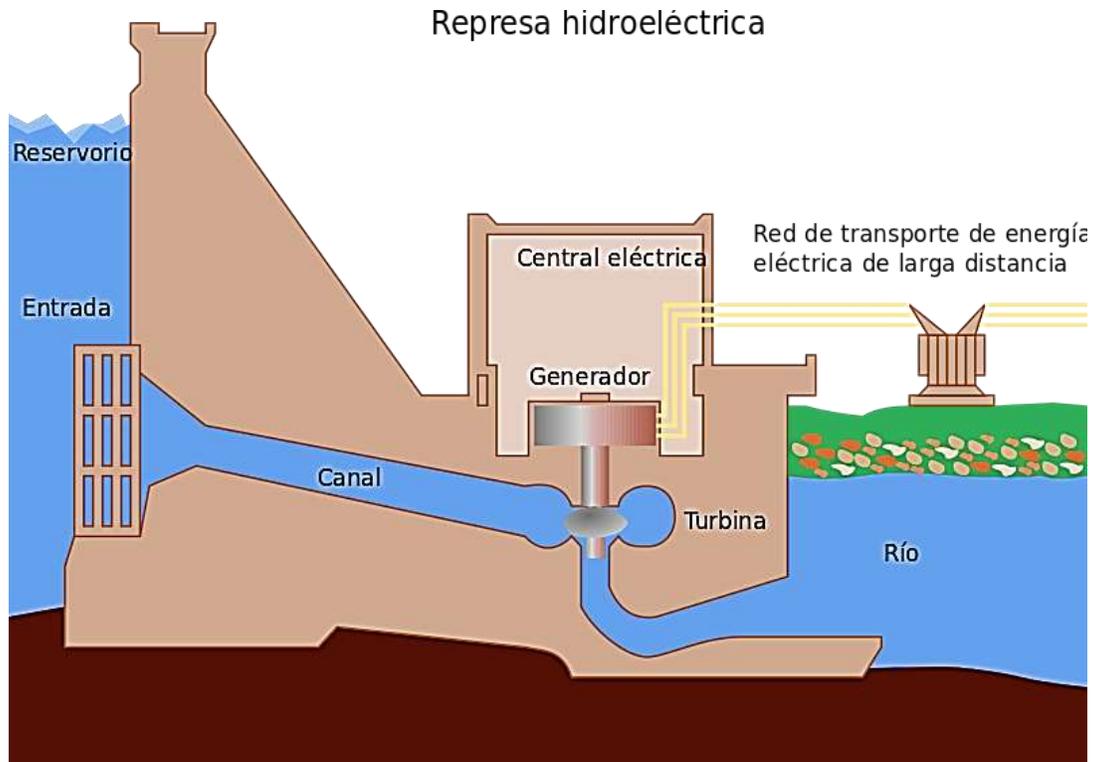
### Antecedentes

Diversas investigaciones han sido orientadas a la obtención de energía renovable, los resultados han sido diversos, así como la forma en que se ha explorado su obtención. Modelos de obtención de electricidad limpia han sido utilizados y a continuación se hace un recuento de los principales modelos:

### 2.2.1 Las hidroeléctricas

Son sistemas basados en un molino que gira impulsado por un caudal de agua y mediante un engranaje, este molino (o turbina) transfiere su potencia a un dinamo, el cual genera electricidad. La figura 1, muestra el principio básico de funcionamiento de una hidroeléctrica.

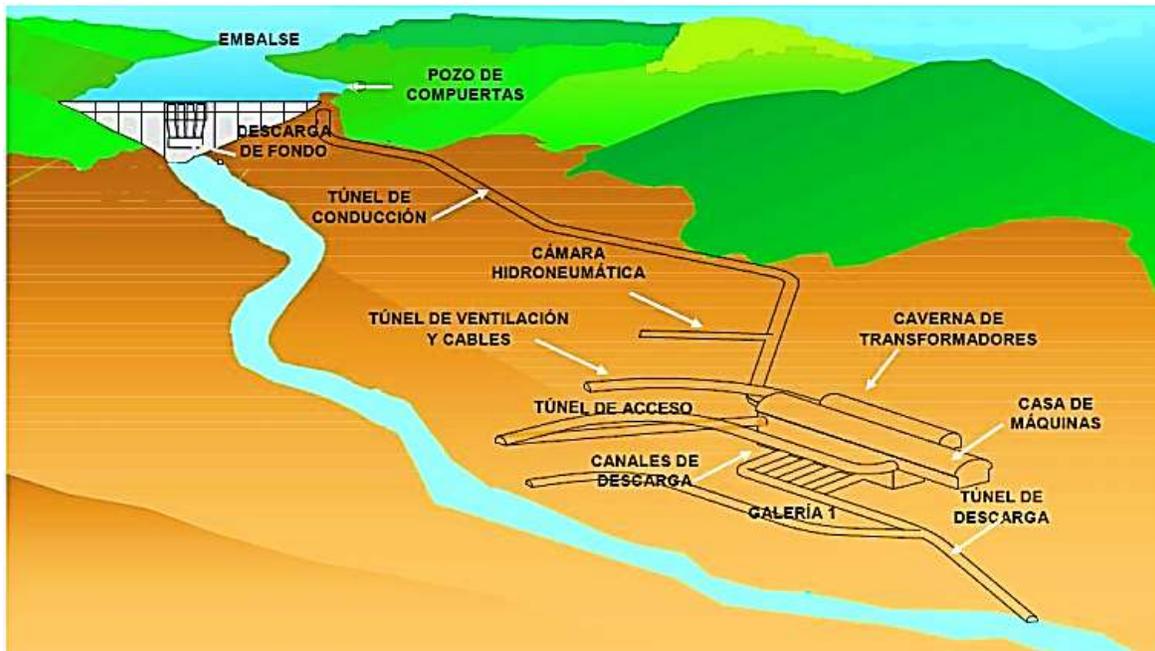
**Figura 8** *Funcionamiento de una hidroeléctrica*



Tomado de User: Tomia - File:Hydroelectric dam.svg, CC BY 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6251241>

“La generación de energía eléctrica a partir de hidroeléctricas constituye hoy en el país una de sus principales fuentes de oferta”, pero esta intervención que se realiza en el entorno ecológico, produce cambios en los ecosistemas circundantes; por tanto, los requerimientos de funcionamiento para estas centrales hidroeléctricas, varían en el tiempo, ajustándose recíprocamente entre los impactos de la obra y el medio (Hernandez Torres, 2011).

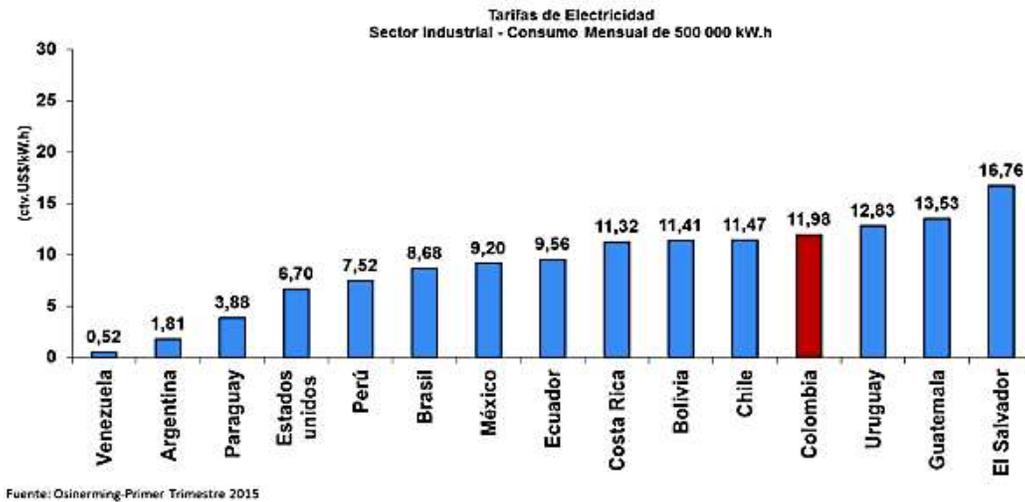
Figura 9 Esquema de la central hidroeléctrica



Tomado de (Hernandez Torres, 2011)

Aunque no existe una tabla que permita cuantificar los daños ambientales (Hernandez Torres, 2011), se puede deducir jurídicamente que existe afectación. El decreto 2820 de 2010, hoja #2, Título I: *DISPOSICIONES GENERALES*, reglamentó lo que significa impacto ambiental en los siguientes términos: “cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad”; (Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Art 1, 2010) Se denomina impacto ambiental. Se suma a este impacto, el costo de la construcción de una central y la falta de CEE, lo que produce un aumento en las tarifas que deben pagar los usuarios, pese a que, una vez construido el embalse, el costo de producción es de \$40/kWh pesos. (Dinero, 2015). A continuación, se muestra un comparativo de costo al usuario (industria) por país:

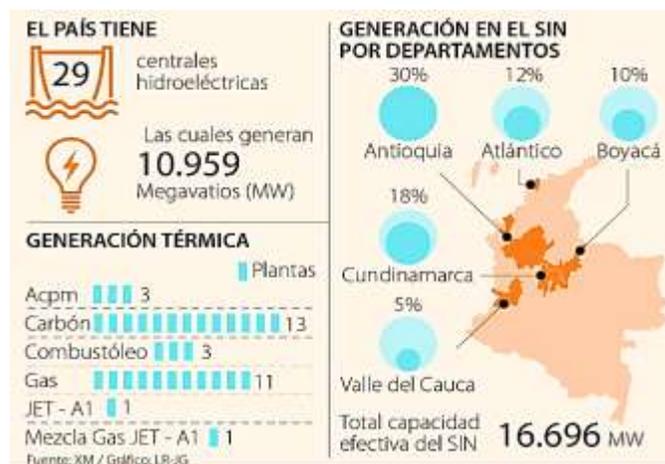
Figura 10 Tarifas de electricidad sector industrial



Tomado de (Dinero, 2015)

Colombia cuenta actualmente con 29 hidroeléctricas que producen 10959 de *Megavatios*, distribuidas en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Boyacá, Cundinamarca y Valle del Cauca, constituyéndose como la única energía renovable importante del país (Vega B, 2017) y aunque el consumo energético del país aumenta, la producción no crece en la misma proporción; actualmente (Febrero-2018) Colombia consume 5619 de *gigavatios*, incrementándose 3.5% con respecto al año 2017 (Febrero). (Rojas Perez, 2018).

Figura 11 Panorama energético del País



Tomado de (Vega B, 2017)

Figura 12 Comportamiento de la demanda energética por Regiones

COMPORTAMIENTO POR REGIÓN				
Región	dic-17	Crec.	dic-18	Crec.
Centro	1,6491.6	1.9%	16,837.0	2.1%
Antioquia	9,190.8	-0.6%	9,410.8	2.4%
Costa Atlántica	15,803.0	4.4%	16,665.4	5.5%
Valle	6,960.1	-1.5%	7,106.2	2.1%
Oriente	6,967.5	0.9%	7,147.4	2.6%
CQR	2,671.9	0.1%	2,712.6	1.5%
THC	2,770.1	2.0%	2,867.9	3.5%
Sur	1,927.2	2.0%	1,942.2	0.8%
Chocó	243.2	1.1%	251.3	3.3%
Guaviare	56.0	2.3%	58.5	4.5%

Tomado de (Rojas Perez, 2018)

Se puede observar que las zonas con ICEE, tienen en promedio un mayor crecimiento y por su condición son abastecidas con un menor costo, a diferencia de las regiones con déficit de CEE.

Aunque el modelo de producción eléctrica por intermedio de una hidroeléctrica es el que proporciona la mayor energía eléctrica en Colombia, los impactos económicos y ambientales en el último y más importante proyecto “*Hidroituango*” han puesto este sector en desventaja para su crecimiento, debido a la pérdida de confianza (Saenz V, 2018) y debido a que los mejores lugares para su construcción ya han sido utilizados (Moreno Cortés, 2013); tímidamente aparecen nuevos modelos como la energía eólica.

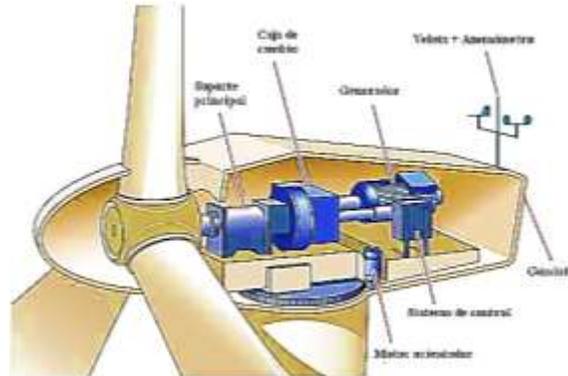
### 2.2.2 Energía Eólica

La energía eólica aprovecha la energía cinética del viento, la cual es convertida en energía mecánica al accionar unas aspas dispuestas para tal fin, así como lo hacían en la antigüedad los molinos de vientos. Esta energía mecánica es transformada en energía eléctrica mediante un dínamo, de una

forma similar a la utilizada en la hidroeléctrica. El viento como fuente de energía ha sido utilizado durante muchos siglos, tomando por ejemplo los barcos veleros (Moreno Cortés, 2013).

A continuación, se presenta el modelo de turbina eólica utilizado comercialmente.

**Figura 13** Turbina eólica comercial: componentes



Tomado de

[https://www.google.com/search?q=funcionamiento+de+una+turbina+e%C3%B3lica&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiagZDxkYrhAhXLrFkKHRaaBmgQ\\_AUIDigB&biw=1366&bih=576#imgdii=ekegd9V\\_8lf8GM:&imgcr=2jk5iviYxVDfeM](https://www.google.com/search?q=funcionamiento+de+una+turbina+e%C3%B3lica&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiagZDxkYrhAhXLrFkKHRaaBmgQ_AUIDigB&biw=1366&bih=576#imgdii=ekegd9V_8lf8GM:&imgcr=2jk5iviYxVDfeM)

La generación de energía eólica no ha tenido un crecimiento notable en Colombia debido a que en estudios realizados a pequeña escala se ha encontrado con dificultades como falta de compromiso por parte de las políticas gubernamentales y a que el comportamiento de los vientos no es constante a lo largo del tiempo (Moreno Cortés, 2013).

Como ventajas, el sistema eólico ofrece una energía limpia y renovable, con un impacto descartado sobre los cambios físico-químicos del suelo, sin residuos ni elementos que puedan llegar a contaminar acuíferos, no origina ningún producto contaminante durante el proceso de generación de electricidad.

Un cuadro comparativo entre la contaminación producida por carbón se muestra a continuación:

**Tabla 3.** Cada kW/k de electricidad generada por energía eólica en lugar de carbón, evita:

0,60 Kg	CO <sub>2</sub> , dióxido de carbono
1,33 gr	SO <sub>2</sub> , dióxido de azufre
1,67 gr	NO <sub>x</sub> , óxido de nitrógeno.

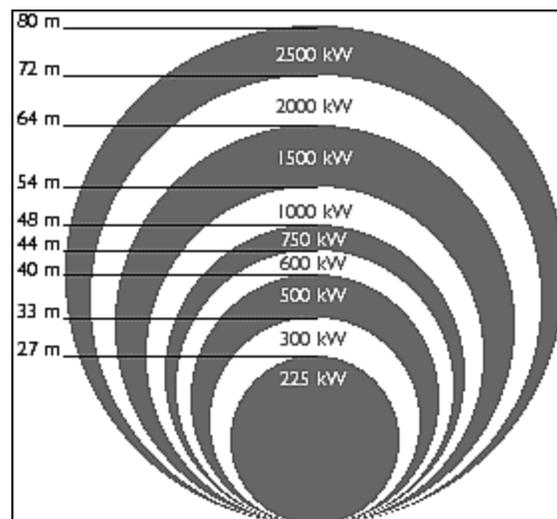
Fuente: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/flujodegases/energiiaeolica/energiiaeolica.html>

Tomado de (Moreno Cortés, 2013)

Como desventajas importantes en esta tecnología, son consideradas, las corrientes impredecibles del viento y la incapacidad tecnológica de controlarlas, este problema deriva en dificultades para realizar la planeación en la construcción de las plantas eólicas. Esta variabilidad en las corrientes de aire, obliga a disponer plantas alternas de electricidad que compensen la variación en la tensión y poder mantener una oferta constante en el tiempo (Moreno Cortés, 2013).

Otro inconveniente importante es la necesidad de infraestructura; los parques eólicos requieren un gran tamaño para generar una potencia importante (ilustración 14) debido a su tamaño. Esto obliga a generar redes de ICEE y por consiguiente transforman el paisaje natural de un lugar (Moreno Cortés, 2013).

**Figura 14** *Tamaño de un aspa eólica y potencia generada*



Tomado de Danish Wind Industry Association

### 2.2.3 Técnicas similares

Orientado en la dirección de este proyecto, aparece la Universidad Tecnológica de México; esta universidad otorgó el premio *UNITEC a la innovación tecnológica (2013-2014)* al proyecto “*PLUVIA*”; dicho proyecto fue desarrollado en el año 2013 por un grupo de jóvenes emprendedores.

Consiste en captar el agua lluvia, y posteriormente transferirla por medio de tuberías que accionan un sistema de turbinas.

**Figura 15** Proyecto *pluvia*



Tomado de: <http://www.unprme.org/reports/UNITECPRME2015Sept072015.pdf>

## 2.2.4 Los piezoeléctricos

Con el transcurrir del tiempo aparecen nuevas formas de aprovechar la lluvia en el proceso de obtener energía eléctrica. Y se suma a esta investigación una técnica de generación de energía eléctrica llamada *ECOPAD*, esta tecnología puesta a disposición del mundo en el año 2011, fue premiada por un jurado en el marco de los premios de diseño *FUJITSU*, los cuales se entregan a la innovación en materia de energías ecológicas (fujitsu-judges-special-award, 2011).

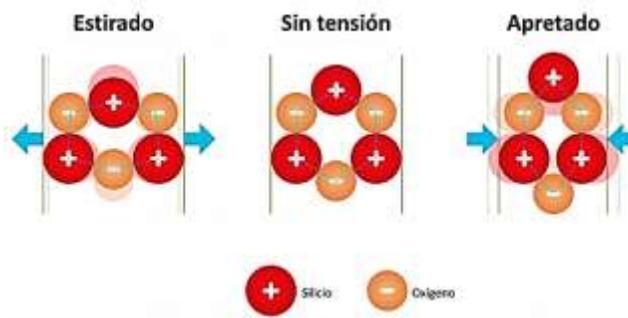
Para comprender esta tecnología, es necesario conocer la existencia y el funcionamiento de los materiales *piezoeléctricos*, estos materiales permiten convertir la presión en energía eléctrica, o, en otras palabras, permiten convertir la energía mecánica de un movimiento, en energía eléctrica. Esta tecnología fue descubierta a finales del siglo XIX:

En 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecen cargas eléctricas en este; ellos llamaron a este fenómeno “el efecto piezoeléctrico”. Más tarde ellos verificaron que un campo eléctrico aplicado al cristal proporcionaba una deformación al material. Este efecto era referido como “efecto piezo inverso”. Los materiales piezoeléctricos, por tanto, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. (Cúpich Rodríguez & Elizondo Garza, 2000).

Cúpich & Elizondo (2000) explican que cuando un material piezoeléctrico, es sometido a una tensión eléctrica, su estructura molecular se alinea, y esta alineación es proporcional al voltaje suministrado, ello conlleva a un cambio en sus dimensiones, el equivalente a una dilatación.

Tomando un cristal de cuarzo, es posible experimentar el fenómeno; por estar conformado por átomos de oxígeno y silicio, los átomos de oxígeno, están cargados negativamente, y los átomos de silicio positivamente. Cuando el cuarzo se estira o se comprime, las cargas positivas y las negativas se reagrupan en lados opuestos del cristal, y al unir esta diferencia de potencial mediante un circuito, se puede obtener una corriente eléctrica. (Nanodays, 2018).

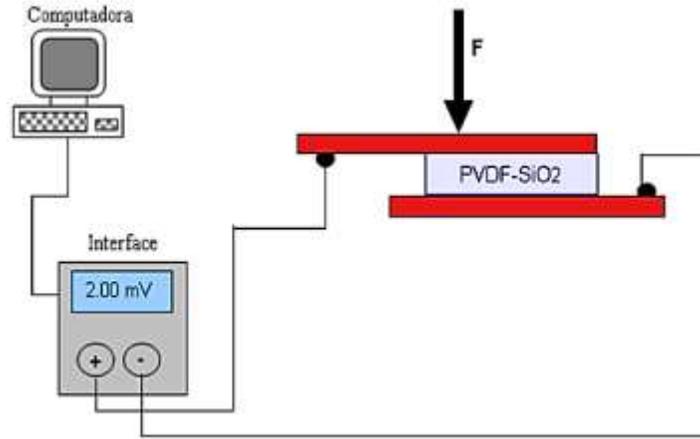
**Figura 16** Composición de un átomo de cuarzo sometido a una presión



Tomado de (Nanodays, 2018).

Lo interesante de esta tecnología, es que las aplicaciones de estos materiales piezoeléctricos continúan en aumento, y en la actualidad se puede obtener material piezoeléctrico modificado en su estructura molecular. Esto lo dio a conocer la *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales* en su revista *Superficies y Vacío* del año 2010; revista en la cual se publicó un artículo llamado: “*Sensores piezoeléctricos de fluoruro de polivinilideno modificado con nanopartículas de sílice para aplicaciones en MEMS*”. En esta publicación explican como el PVDF (Fluoruro de polivinilideno) al ser colocado en medio de dos placas de cobre puede convertir (de una manera similar al cuarzo) la presión (energía mecánica) en energía eléctrica. (Arenas, Rangel, Castaño, Loa, & Vega, 2010).

**Figura 17** Diagrama esquemático de un sensor piezoeléctrico

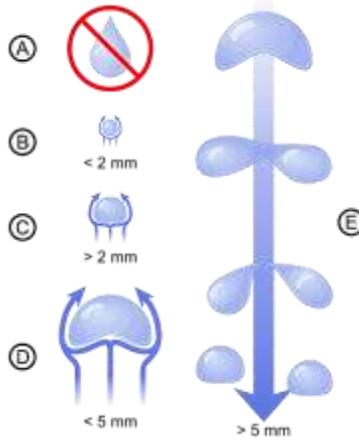


Tomado de (Arenas, Rangel, Castaño, Loa, & Vega, 2010)

### 2.2.5 La lluvia y los piezoeléctricos

Se considera analizar ahora el fenómeno de la lluvia. Esta tiene la particularidad de caer, y esta característica no ha sido lo suficientemente explorada. Al caer la lluvia, en un instante de tiempo  $t_0$  tiene consigo una cantidad de energía potencial gravitacional directamente proporcional a su altura, que al moverse hacia abajo en forma de gota va intercambiando su energía potencial, por energía cinética (para no profundizar en este cambio, se asumirá siempre como energía mecánica). La lluvia cae con velocidades que van desde 4m/s a 6m/s. (Viñas, 2013). La altura de la cual se desprenden las gotas de lluvia no influye en su caída, pues la resistencia al viento evita que cada gota alcance una velocidad mayor, independiente de su altura. Por ser cada gota de lluvia un compuesto líquido, no tiene una forma definida, no obstante, el movimiento de caída obliga a la gota de agua a ser esférica. En la figura 5, se muestra la forma de una gota de lluvia.

**Figura 18** Forma de una gota de lluvia



Tomada de De [Pbroks13](//commons.wikimedia.org/wiki/User:Pbroks13 "User:Pbroks13") - Trabajo propio, [CC BY 3.0](http://creativecommons.org/licenses/by/3.0 "Creative Commons Attribution 3.0"), [Enlace](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7185420)

### 2.2.6 Particularidades de la lluvia

Se calcula ahora la masa aproximada de una gota de lluvia. La masa de un cuerpo es la proporción directa que existe entre su densidad y su volumen:

$$\rho * v = m$$

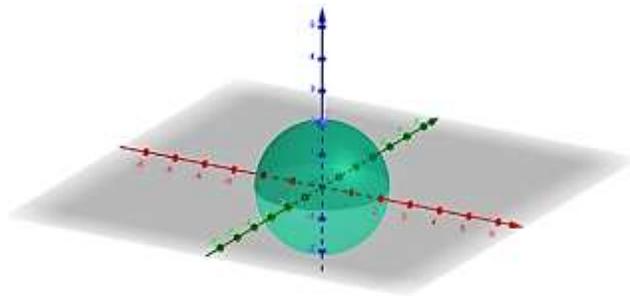
Ecuación 1. Cálculo de la masa a partir de la densidad

La densidad del agua conviene expresarla en gramos por  $\text{cm}^3$  para este cálculo.

$$\rho(\text{agua}) = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Ahora se calcula el volumen de una gota de agua, para ello se usará un cálculo geométrico.

**Figura 19** Gota de agua sin rozamiento con el viento



Fuente propia.



Como ya se estableció, las gotas no tienen forma alargada, son esféricas (Figura 5) y está plenamente establecido en geometría que el volumen de una esfera está definido por:

$$v = \frac{4}{3}\pi r^3$$

*Ecuación 2. Cálculo del volumen de una gota de agua*

El radio de una esfera se relaciona con su diámetro así:

$$r = \frac{\text{diámetro}}{2}$$

*Ecuación 3. Cálculo del radio de una esfera*

$$r = \frac{0,3 \text{ cm}}{2} = 0,15 \text{ cm}$$

Si se asume un diámetro de 3mm (0,3cm) su radio (r) será 0,15cm.

Calculando el volumen de una gota de agua, se tendrá entonces:

$$v = \frac{4}{3}\pi(0,15 \text{ cm})^3 = 0,0141 \text{ cm}^3$$

Establecido esto, es factible calcular la masa de una gota de lluvia.

$$m = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * (0,0141 \text{ cm}^3)$$

$$m = 0,0141 \text{ g}$$

Es posible ahora, conocer la energía aproximada, despreciando la energía perdida en el rozamiento con el viento, de una gota de lluvia realizando el siguiente cálculo, como la energía mecánica se calcula así:

$$E_m = K + U$$

*Ecuación 4. Cálculo de la Energía Mecánica.*

Si se hace la energía potencial (U) igual a cero, esto es, el instante  $t_a$  cuando la gota de lluvia golpea el suelo, por tanto, no posee altura de acuerdo al sistema de referencia, la energía mecánica ( $E_m$ ) será igual a su energía cinética (K), se tendrá que:

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

*Ecuación 5. Cálculo de la Energía cinética*

Entonces:

$$E_m = K = \frac{1}{2}mv^2$$

*Ecuación 6. Igualación de Energía Mecánica y Cinética*



Se realiza la conversión de  $0,0141g = 1,41 \times 10^{-5}kg$ . Y utilizando la velocidad mediana de la lluvia, se tendrá:

$$E_m = \frac{1}{2} (1,41 \times 10^{-5}kg) \left(5 \frac{m}{s}\right)^2 = 3,525 \times 10^{-4} \text{Julios}$$

Esta cantidad de energía hace referencia a solo una gota de lluvia con una velocidad mediana, lo que indica que dicho valor es totalmente aproximado y no se considera constante en la investigación.

La precipitación de la lluvia se mide en áreas de  $1m^2$  (superficie plana), utilizando un instrumento de medida llamado *pluviómetro*, existen de diversos tipos que permiten clasificar la lluvia dentro de unos parámetros (Malmcrona, 2018):

- Intensidad
- Duración
- Altura o profundidad (de un terreno anegado)
- Frecuencia
- Distribución temporal
- Distribución espacial

A continuación, se presenta una tabla de datos que clasifica la lluvia según su precipitación.

**Tabla 4.** *Clasificación de la precipitación según la intensidad*

Clase	Intensidad media en una hora (mm/h)
Débiles	$\leq 2$
Moderadas	$> 2 \text{ y } \leq 15$
Fuertes	$>15 \text{ y } \leq 30$
Muy fuertes	$>30 \text{ y } \leq 60$
Torrenciales	$>60$

Fuente AEMET (agencia estatal de meteorología) (Malmcrona, 2018)

Existe otra manera de clasificar las lluvias, de acuerdo al *índice de regularidad de la intensidad (n)*, esta mide la relación entre la intensidad y la duración de la precipitación.

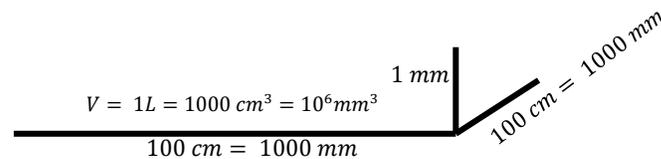
**Tabla 5.** Clasificación de la precipitación según la regularidad

N	Variabilidad de la intensidad
0,00-0,20	Prácticamente constante
0,20-0,40	Débilmente variable
0,40-0,60	Variable
0,60-0,80	Moderadamente variable
0,80-1,00	Fuertemente variable

Fuente. El índice  $n$  de la precipitación intensa. (Malmcrona, 2018)

La lluvia se mide relacionando la caída de agua en un área de  $1m^2$ . Si se vierte un litro de agua en un área de  $1m^2$ , esta alcanzará una profundidad de  $1mm$  (figura 6). Por esta razón, dado que se tomó el volumen de una gota de agua como  $0,0141cm^3$ , entonces se necesitarán 70922 gotas de lluvia para completar este volumen.

**Figura 20** Un litro de agua esparcido en un área de  $1m^2$



Al relacionar el número de gotas que caen por metro cuadrado, es posible determinar una medida aproximada de los Julios obtenidos en esta precipitación por metro cuadrado. La cantidad de gotas ( $g_n$ ) se obtiene de dividir el volumen ocupado ( $V_t$ ) entre el volumen de una gota de agua ( $V_g$ ), así:

$$g_n = \frac{V_t}{V_g}$$

Ecuación 7. Cálculo de Cantidad de gotas.

$$g_n = \frac{1000\text{ cm}^3}{0,0141\text{ cm}^3} \approx 70922\text{ g}$$

Entonces su energía cinética se obtendrá, del producto entre la energía cinética de cada gota multiplicada por el número de gotas que componen el volumen tomado como referencia. Así:

$$E_c = (\text{julios por gota})(\text{cantidad de gotas})$$

Ecuación 8. Cálculo de la energía cinética para una determinada cantidad de gotas.

$$E_c = (3,525 \times 10^{-4} \text{Julios})(70922)$$

$$E_c \approx 25 \text{Julios}$$

Dado que un julio es igual a  $1 \text{ watt} * \text{segundo}$ , entonces la potencia que suministre la lluvia en el piezoeléctrico, es directamente proporcional al tiempo que dure la precipitación, tomando como medida de tiempo el segundo.

Los electrodomésticos que pueden funcionar con esta capacidad, según un artículo de EPM (*Empresas Públicas de Medellín*), publicado en marzo de 2012, son:

- Bombillo ahorrador de 25 W: 25W
- Bombillo ahorrador de 15 W: 15W
  - Bombillo Led: 7W
- Instalación navideña de 100 luces led: 9W
  - Grabadora: 14W
  - Radio: 10W
  - Radio Reloj Digital: 2W
- Cargador con celular conectado: 12W
- Cargador sin celular conectado: 5W
  - Afeitadora Eléctrica: 15W

(Muñoz, Arboleda, Garcia, Vasquez, & Palencia, 2012)

### 2.2.7 Análisis de los piezoeléctricos

- **Efecto piezoeléctrico**

Para Springer (2006), los materiales piezoeléctricos, “Smart materials” o “multifunctional materials” como son denominados por otros autores, son aquellos materiales que tiene la propiedad de responder de manera significativa a estímulos que son expuesto y de diferente naturaleza como son: mecánica, térmica, magnética o luz. (p.95)

Debe señalarse, que fueron los hermanos Curie (Pierre y Jacques) quienes hicieron este hallazgo en 1880; ellos descubrieron que cuando se aplica una tensión mecánica (presión) sobre un cuarzo este se polariza, alcanzando a producir arcos eléctricos, lo que denominaron efecto piezoeléctrico.

Asimismo, el efecto piezoeléctrico está presente en ciertos materiales especialmente en algunos cristales y cerámicas, que al recibir una carga mecánica reaccionan produciendo una carga eléctrica.

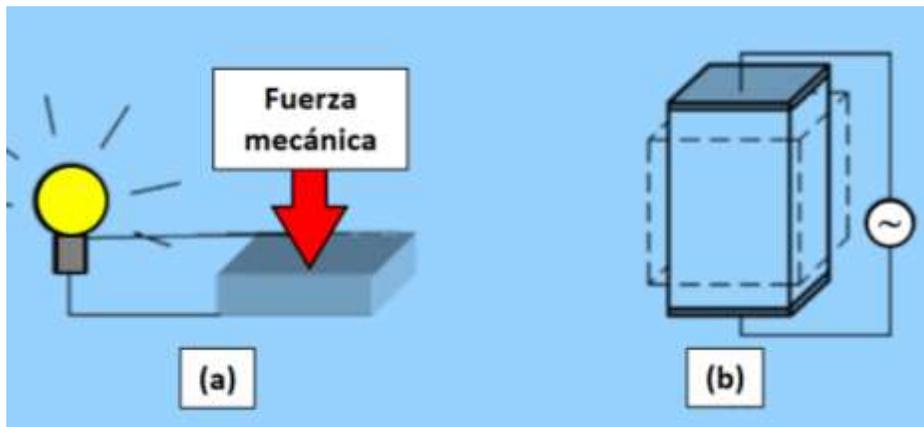
Este fenómeno es bidireccional, lo que da lugar a un efecto piezoeléctrico directo y a uno inverso.

(p.96)

En la siguiente figura 21 se observa una representación del efecto piezoeléctrico directo e inverso.

(a) efecto directo: cuando se aplica una fuerza mecánica sobre el material se induce una diferencia de potencial (se enciende el foco) y (b) efecto inverso: cuando se aplica una diferencia de potencial sobre el material piezoeléctrico este modifica su forma.

**Figura 21** Efecto piezoeléctrico directo e inverso



Fuente: elaboración propia

- **Los materiales piezoeléctricos**

Estos pueden dividirse en dos tipos principales: naturales y sintéticos. Los piezoeléctricos naturales presentan el efecto sin tener que adaptarlos o modificarlos para ello, mientras que los sintéticos, hay que manipularlos para que obtengan esta característica.

**Tabla 6.** Materiales piezoeléctricos comunes en la naturaleza

<b>Piezoeléctricos naturales</b>	<b>Piezoeléctricos sintéticos</b>
Cuarzo	PZT (Titanato de plomo con zinconato)
Sal de Rochelle	PVFD (Polímero de fluoruro de polivinilideno)
Turmalina	Titanato de bario
Topacio	Óxido de Zinc
Sacarosa	

Fuente. Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía. (Malmcrona, 2018)

De igual manera, existen en el mercado diversos tipos de materiales *piezoeléctricos*, un artículo publicado en Canadá en el año 2017, ha medido la eficiencia de varios materiales respecto de la producción de energía, la información se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 7.** Eficiencia de diversos piezoeléctricos.

Reference	Efficiency	Note
[23]	~50%-90%	PZT; bimorph cantilever; vibration; theoretical estimation
[24]	>80%	PZT; tube; flow-induced vibration; theoretical estimation
[28]	2.56%	PVDF film; rainbow bimorph; theoretical estimation
[29]	21.8%	PVDF nanofiber; direct deformation; experimental data
[30]	7.5%	PZT; flextensional structure; direct deformation; experimental data
[31]	>80%	PZT; fixed-fixed bimorph plate; theoretical estimation
[32]	~7%	PZT; cantilever; vibration; experimental data
[33]	0.72%	PZT; cantilever; fluid flows experimental data
[4]	5.4%/14.9%/27.5%	PZT/PMN-PT/PZN-PT; cantilever; vibration; experimental
[34]	<44%	PZT; bimorph cantilever; vibration; theoretical estimation
[35]	3.1%	PZT sandwiched between two Terfenol-D discs
[36]	1.2%	PZT; Impact-type using a rotational flywheel; experimental data
[26]	26%/<2%	PZT cantilever beam; vibration; on-resonance/off-resonance; experimental data
[37]	12.47%	PVDF/AIO-rGO beam; direct deformation; experimental data
[38]	80.3%/35.1%/15.4%	Stack/Membrane/Cantilever; ball drop impact; experimental data
[39]	10%	PZT fixed-fixed beam; ball drop impact; experimental data
[40]	5%-18%	Piezoelectric nanowires; direct deformation; experimental data

Tomado de On the efficiency of piezoelectric energy harvesters.

Se puede observar en la referencia [23] y [24] de la tabla, que un material piezoeléctrico es más eficiente si se somete a una vibración comparado con una deformación (Reference [40]) (Zhengbao, Alper, & Zua, 2017); esta característica tiene gran valor en este trabajo de investigación.

Después de explicar el concepto del efecto piezoeléctrico y los materiales más comunes, se procede a definir su estructura y explicar cómo se comporta. Este fenómeno se da en cristales y cerámicas cuya estructura no posee centro de simetría, siendo esta propiedad básica el motivo principal de su comportamiento. Cuando este material es deformado macroscópicamente, también lo hace de forma microscópica, produciendo desplazamiento de cargas internas en su estructura molecular.

La deformación de la célula elemental que genera un pequeño dipolo a nivel molecular, ocurre en todo el sólido expuesto, todos los dipolos se suman generando un potencial eléctrico cuya dirección depende de la aplicación de la fuerza excitante.

- **Formulación matemática del efecto piezoeléctrico**

Para representar matemáticamente el funcionamiento y características de un material piezoeléctrico, se desarrollarán las siguientes ecuaciones considerando lo expuesto por (Malmcrona, 2018) que describen su comportamiento frente a los distintos tipos de excitación.

1. Si la densidad de carga en la superficie de un material piezoeléctrico al aplicar una fuerza externa es proporcional a la tensión mecánica aplicada (efecto directo), esta estará descrita por la siguiente ecuación:

$$P = dT$$

*Ecuación 9. Efecto Piezoeléctrico directo*

Donde:

$P$  = Vector de polarización eléctrica (dipolo), producto del efecto piezoeléctrico, magnitud igual a la densidad en la superficie considerada. [*Coulomb/metros<sup>2</sup>*]

$d$  = constante de deformación piezoeléctrica [*metros/Voltios*]

$T$  = Tensión mecánica aplicada al material [*Newton/metros<sup>2</sup>*]

Modificando la ecuación anterior en función del campo eléctrico y del desplazamiento eléctrico, nos queda:

$$P = D - \varepsilon^T E$$

*Ecuación 10. Efecto Piezoeléctrico directo en función del campo eléctrico y el desplazamiento eléctrico*

Donde:

$D$  = desplazamiento eléctrico

$\varepsilon^T$  = permeabilidad eléctrica

$E$  = campo eléctrico

A partir de las ecuaciones (9) y (10) obtenemos:  $D = dT + \varepsilon^T E$ ,  $E = -gT + \frac{D}{\varepsilon^T}$ ,  $g$  es la constante de carga piezoeléctrica.  $d$  y  $g$  son coeficientes relacionados entre sí:  $\varepsilon^T g = d/\varepsilon^T$ .



2. La siguiente ecuación representa el efecto piezoeléctrico inverso, consiste en la deformación del material a causa de un campo eléctrico. (efecto inverso)

$$S = dE$$

*Ecuación 11. Efecto Piezoeléctrico inverso*

Donde:

$S$  = Deformación mecánica unitaria causada por el efecto eléctrico

$d$  = constante de deformación piezoeléctrica [*metros/Voltios*]

$E$  = magnitud del campo eléctrico [*Newton/Coulomb*]

Para obtener la deformación mecánica  $S$  en función de la constante de carga piezoeléctrica  $g$  y del desplazamiento eléctrico  $D$ , se sustituye con las ecuaciones anteriores y se despeja:

$$S = gD$$

*Ecuación 12. Efecto Piezoeléctrico directo en función de la constante piezoeléctrica y el desplazamiento eléctrico*

La deformación de un sólido elástico en presencia de una tensión depende de la ecuación de Hooke:

$$S = sT.$$

Donde:

$s$  = inverso del módulo de Young

$T$  = Tensión mecánica

$s^E$  = coeficiente de deformación elástica (campo eléctrico constante – inverso del módulo de Young)

$$D = \varepsilon^T E + dT$$

*Ecuación 13. Polarización paralela al campo eléctrico*

$$S = dE + s^E T$$

*Ecuación 14. Polarización ortogonal al campo eléctrico*

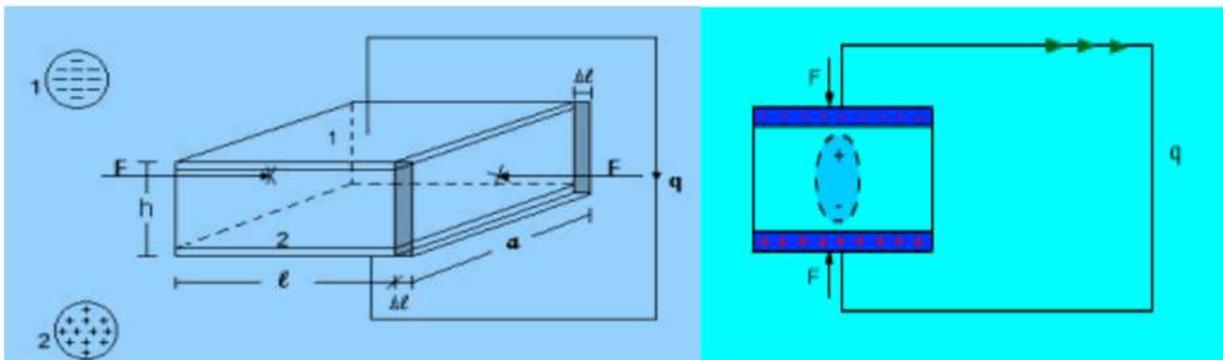
Para calcular la carga que genera un material piezoeléctrico sometido a una fuerza y un campo eléctrico igual a cero, se utiliza la ecuación 13, para un campo eléctrico  $E=0$  la ecuación queda de la siguiente manera:

$$D = dT$$

Ecuación 15. Carga de un material piezoeléctrico

La densidad de carga ( $q$ ) está definida por la cantidad de Coulomb (C) que atraviesa un área (A). Mientras que, la tensión aplicada será igual a la fuerza (F) entre el área (A). Ejemplo figura 22

Figura 22 Efecto piezoeléctrico directo y efecto piezoeléctrico inverso



Fuente. Elaboración propia

$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{l \cdot a}$  y  $T = \frac{F}{h \cdot a}$  sustituyendo en la ecuación 15 obtenemos:

$$q = \frac{d \cdot l}{h} F$$

Ecuación 16. Carga generada por un material piezoeléctrico sometido a una fuerza.

- **Transductor piezoeléctrico**

En este componente del sistema, es donde se produce el efecto electromecánico, gracias al efecto piezoeléctrico la energía pasa de mecánica a eléctrica, debido a la deformación del material.

Para el caso de un disco piezoeléctrico (diámetro  $\approx 5$  veces mayor que su espesor) compuesto por PZT, el voltaje entrega la fuente, es directamente proporcional a la tensión aplicada sobre el material piezoeléctrico. (este depende de: el material, la geometría y la fuerza aplicada).

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

*Ecuación 17. Voltaje de entrega a la fuente.*

Donde:

$V$  = diferencia de potencial

$t$  = espesor de la cerámica piezoeléctrica

$d$  = diámetro

$g_{33}$  = constante piezoeléctrica

$F$  = fuerza aplicada sobre el material

### 2.2.8 Aplicaciones de los piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico no es un tema nuevo, y el incremento en el avance de nuevas tecnologías en el uso eficiente de la energía y su generación, crean el ambiente propicio para valorar el uso de posibles aplicaciones utilizando materiales que tengan estas características.

El desarrollo de esta tecnología es principalmente aplicado en la generación eléctrica para usos domésticos, sin embargo, existen investigaciones sobre el tema que hablan sobre el desarrollo en otras áreas:

- Como alimentación de sensores remotos dentro de torres de enfriamiento de las centrales energéticas convencionales. Estas centrales energéticas producen vapor de agua que puede ser condensado y así aprovechar las gotas de agua que caen por efecto de la gravedad. (Arroyo Rosa, 2018)
- En los sensores que detectan la lluvia. Al utilizar esta tecnología en el sensor, este solo enviaría señales eléctricas al tomar contacto con la lluvia. (Arroyo Rosa, 2018).



- En la construcción. Podrían instalarse estos elementos piezoeléctricos en las ventanas, para que cuando entren en contacto con la lluvia, cierren las mismas. (Arroyo Rosa, 2018).
- Como complemento en los paneles solares, ya que estos recolectarán electricidad, justo cuando el panel solar atraviesa por su zona de menor captación de electricidad, esto es cuando llueve, incluso si es de noche. (Arroyo Rosa, 2018).
- Ecopad sugiere, que un futuro las *Tablet* no requerirán cargadores eléctricos, ellos teorizan, que si una persona utilizando su *Tablet*, hace contacto (táctil) con la pantalla de este artefacto por lo menos 10 mil veces por día, esta acción generará la electricidad suficiente para mantener cargada la *Tablet*. (fujitsu-judges-special-award, 2011).

### Análisis

Existen diversas maneras de producir electricidad a partir del agua, ya sea almacenada (hidroeléctrica) aprovechando su caudal, o aprovechando la acústica generada al impactar sobre una superficie (por ejemplo, el sonido de una cascada), sea como caudal o como lluvia. Aunque este segundo punto es interesante, y valdría la pena discutirlo en una próxima investigación; el tema que se relaciona con esta investigación es la aparición de los materiales piezoeléctricos. Estos, poseen átomos cargados negativa y positivamente (SENA, 1976), que al ser dilatados por compresión o elongación (Benavente, y otros, 2014), cambian la disposición de los átomos; entonces se genera carga positiva de un lado del material y del otro lado carga negativa; al interconectar esta diferencia de potencial por medio de un circuito de cobre (Arenas, Rangel, Castaño, Loa, & Vega, 2010) se genera un paso de electrones, energía eléctrica.

Construir un recipiente que almacene lluvia durante un tiempo, y luego se libere para generar un caudal que mueva un molino o turbina para generar corriente eléctrica. Un procedimiento similar al que utilizan las hidroeléctricas con el caudal de los ríos. (Ibar Romero, Jose, 2005).

Otra opción, es la de elaborar un número de micro-turbinas, lo suficientemente sensibles a la caída de una gota de lluvia, la cual, al moverse por acción de la lluvia, generan una corriente eléctrica, de la misma manera que un dinamo genera tal corriente. (Macias de la Rica, 2012).

Luego de esta investigación, toma fuerza la conversión de energía mecánica en energía potencial eléctrica mediante los materiales piezoeléctricos. Es común ver en la actualidad pantallas táctiles, las cuales para funcionar aprovechan la corriente eléctrica generada por el contacto humano (Wong,

Lic. Eliecer Yépez Sánchez.

Maestría en Ciencias Naturales y Matemática.

Universidad Pontificia Bolivariana



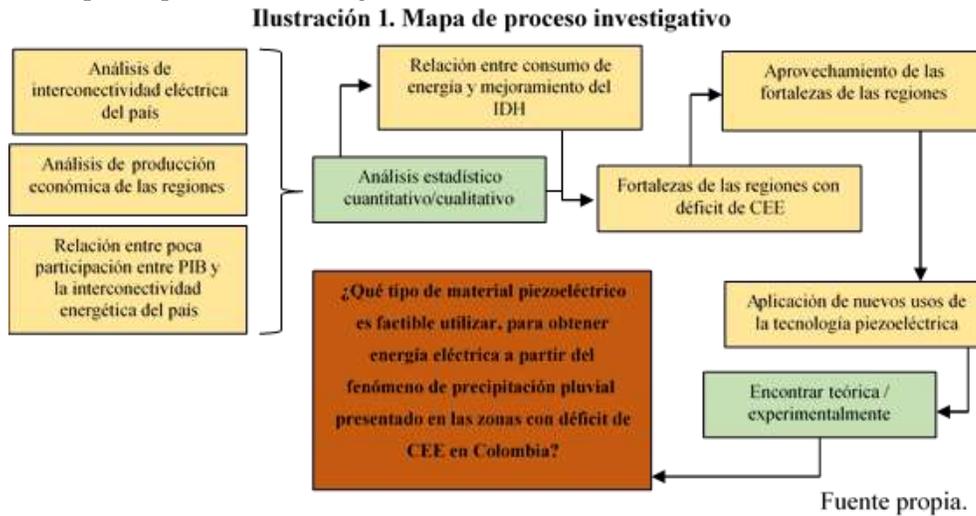
2011). Este contacto produce una deformación en el material produciendo una diferencia de potencial. Esta presión para efectos de la investigación, no sería ejercida por el cuerpo humano, en cambio, sería remplazada por la energía mecánica de la lluvia.

Las pruebas realizadas por Arrollo Rosa (2018) mostraron que los materiales piezoeléctricos de cuarzo, generan entre  $1\mu w$  y  $12mw$ , esto depende de la intensidad de la lluvia, pues cuando llueve en forma torrencial, las gotas de lluvia son más grandes y salpican, desperdiciando parte de su energía mecánica, recolectando menor energía potencial eléctrica.

## CAPÍTULO III. DISEÑO METODOLÓGICO

### 3.1 Metodología

Figura 23 Mapa de proceso investigativo



Fuente. Elaboración propia

Desde la postura metodológica, se aplica la investigación de Diseño Experimental, considerando el afirmado por Hernández et. al. (2008), “se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula” (p.164). A su vez, entre los tipos de diseños experimentales emplea el Diseño con pre-prueba post-prueba y grupo de control, para el cual Hernández et. al. (2008a) manifiesta:

Este diseño incorpora la administración de prepruebas a los grupos que componen el experimento. Los participantes se asignan al azar a los grupos, después a éstos se les aplica simultáneamente la pre-prueba; un grupo recibe el tratamiento experimental y otro no (es el grupo de control); por último, se les administra, también simultáneamente, una post-prueba. El diseño se diagrama como sigue:

RG1	01	X	0
RG2	03	—	0 (p.140).

Los resultados emitidos por estas pruebas, sirven de apoyo para controlar y validar internamente el experimento, y por ende obtener las conclusiones pertinentes. Para este tipo de diseño se manipula la validez interna y externa. La primera se logra con los resultados de la preprueba y posprueba junto al análisis del investigador. La segunda proviene de los resultados emitidos de repetir las pruebas a un grupo mayor de sujetos en estudio con características similares.

Por lo tanto, en la primera etapa de la investigación, se realiza una búsqueda por intermedio de los organismos estatales colombianos encargados de realizar mediciones estadísticas, comparando datos geográficos, económicos, sociales, ambientales, etc.; en distintas zonas del país. Se encontró que las zonas que presentan un menor aporte en el PIB (Producto Interno Bruto) del país, presentan además un déficit en su Cobertura de Energía Eléctrica (CEE). Esta correlación se explica con situaciones similares en otros puntos geográficos del mundo, donde se encontró que zonas que son provistas de electricidad inician un proceso de mejoramiento del Índice de Desarrollo Humano (IDH). Resulta factible pensar que, la poca participación en el PIB, se debe a su déficit energético.

Se analizó datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), encontrándose que las regiones con déficit de CEE y poca participación en el PIB, tienen unos índices de precipitación pluvial regular, con excepción de la región de la guajira, la cual presenta temporadas de sequía que se extienden por muchos meses en el año. Se analizan diversas formas de llevar electricidad a esas regiones para mejorar su IDH, considerando sus características climáticas. Se encontró que las hidroeléctricas, principal fuente de electricidad en Colombia, posee al igual que la energía eólica, dificultades para abastecer estas regiones, pues es necesario una red de conexión de energía eléctrica (ICEE) que no poseen.

Al consultar sobre mecanismos de producción de energía eléctrica, se encontró que los materiales piezoeléctricos se esgrimen como tecnología alternativa que puede llegar a solucionar el déficit de CEE en las regiones, usando la lluvia como fuente principal generadora de energía. Esto, debido a que estas regiones (excepto la guajira) son llamadas lluviosas. Se espera que estos materiales piezoeléctricos permitan convertir la lluvia en electricidad.

Una vez identificados teóricamente algunos materiales piezoeléctricos de acuerdo a investigaciones similares, se organizará la información para futuros trabajos, lo cual se considera el primer aporte de esta investigación en favor de la solución general del problema energético de las regiones, también se procederá a realizar mediciones experimentales con el fin de encontrar el material apropiado y se buscará desarrollar una película piezoeléctrica.

**Tabla 8.** *Relación objetivo, proceso, producto.*

OBJETIVO ESPECÍFICO	INSTRUMENTOS METODOLÓGICOS	PROCESO DE LA INFORMACIÓN	RESULTADO ESPERADO
Clasificar materiales que puedan ser utilizados en la obtención de energía eléctrica a partir del fenómeno de precipitación pluvial en las zonas con déficit de CEE en Colombia.	Consulta en fuentes de información: Libros, artículos, trabajos de grado, páginas web, noticias y publicaciones que traten el tema de las energías limpias, debilidades y fortalezas de las regiones.	Comparación con escritos internacionales para identificar la relación en los problemas de estas regiones con otros de otras regiones y la manera conjunta en la forma de solucionarlos.	Conocer los materiales que puedan ser utilizados en la obtención de energía eléctrica en las regiones investigadas, para ser clasificados.
Formular un protocolo teórico de construcción de un sistema que permita la obtención de energía potencial eléctrica a partir de la energía mecánica presente en las gotas de lluvia.	Se compara investigaciones similares realizadas por otros investigadores que permitan establecer la diferencia entre un grupo de piezoeléctricos	Tabulación de la información y búsqueda física de los materiales a fin de iniciar las pruebas del montaje experimental a manera de recomendación de esta investigación.	Diseñar la disposición correcta para generar una cantidad determinada de potencia. Como recomendación, se deben iniciar los montajes experimentales que apoyen la teoría.

Fuente. Elaboración propia

### 3.2 Productos esperados

- Copia en la Biblioteca Central de la UPB del documento en papel y medio magnético, que soporta el trabajo de grado, una vez sea aprobado.
- Artículo científico que relata toda la experiencia de investigación incluyendo conclusiones, que permitan una difusión a la comunidad científica mediante revistas indexadas.

### 3.3 Estrategia de comunicación

Una vez este proyecto sea revisado, sustentado y aprobado por parte de las autoridades que la Universidad Pontificia Bolivariana designe, se enviarán copias del artículo científico resultante de la investigación a revistas indexadas de orden regional, nacional e internacional, con el fin de dar a conocer ante pares académicos los hallazgos aquí realizados.

### 3.4 Instrumentos de medición

#### 3.4.1 Pluviómetro

Por la especial relevancia para este proceso de investigación que tiene la lluvia, es necesario utilizar un instrumento que permita medir la cantidad de precipitación; La medición de la

precipitación se realiza para obtener información sobre sus características espaciales y temporales, como intensidad, frecuencia, fase, duración cantidad etc. (IDEAM, 2020).

Por tal motivo, se utiliza el pluviómetro manual Tipo San Isidro MA15, el cual tiene un bajo costo y se encuentra calibrado a partir de un pluviómetro Hellman europeo. El error oscila entre 1 y 2 mm cada 100 mm (según indica el fabricante).

**Figura 24** *Pluviómetro tipo San Isidro MA15*



Fuente. Elaboración propia

El pluviómetro Tipo San Isidro MA15 adquirido posee un diámetro en su entrada que corresponde a 0,1145 m, medidas obtenidas con un Nonio.

**Figura 25** *Diámetro de entrada del pluviómetro*



Fuente. Elaboración propia

Realizando un acercamiento a la lectura del Nonio, se tendrá entonces una medida de 11.45 cm:

Figura 26 Acercamiento a medida, obtenida del Nonio



Fuente. Elaboración propia

Como la región de la entrada del pluviómetro es circular, entonces su área podrá calcularse cómo:

$$A_p = \pi * r^2$$

Ecuación 18. Cálculo del área de entrada del pluviómetro

$$A_p = \pi * (0,05725)^2 = 0,010296766 \text{ m}^2$$

Proporcionalmente, es posible determinar entonces la cantidad de precipitación pluvial por  $\text{m}^2$ .

$$\text{Cantidad de precipitación} = \frac{\text{Recolección del pluviometro}}{0,010296766 \text{ m}^2} * \text{m}^2$$

Ecuación 19. Precipitaciones por metro cuadrado

Se lleva una tabla de registro sugerida por el fabricante, la cual relaciona la precipitación recolectada, así:

Tabla 9. Relación de precipitaciones registradas en el pluviómetro

DIA \ MES	Enero	...
1	$x_1$	$x_3$
...	$x_2$	$x_4$

Fuente. Elaboración propia

### 3.4.2 Osciloscopio

Para registrar las señales eléctricas arrojadas por los piezoeléctricos al estar sometido en una prueba experimental, se utilizarán dos modelos de osciloscopio, uno previamente adquirido (A) y otro que

se adquirió para esta investigación (B); este último, comparado con los osciloscopios calibrados que poseen los laboratorios de ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana Sede Medellín, en cuanto a los osciloscopios y las medidas que estos registren puede decirse que:

$$A = B = \text{Osciloscopios UPB}$$

*Ecuación 20. Simetricidad de las medidas*

Es la naturaleza gráfica del osciloscopio lo que lo hace tan valorado como un instrumento de medición, el osciloscopio es un dispositivo de presentación de gráficas, es decir, traza una gráfica de una señal eléctrica (Contreras, 2017).

En un osciloscopio pueden observarse diversos tipos de señales eléctricas, analizando sus períodos, frecuencias, amplitudes. En otros casos, dependiendo del número de canales del osciloscopio, pueden realizarse comparaciones entre las señales, las cuales van desde meramente observables, hasta operadas matemáticamente (suma, diferencia, transformadas). En cuanto al uso de un osciloscopio con fines investigativos, se dice que:

La medición de la variación relativa de la fase de la frecuencia de salida de un generador de alta exactitud con respecto a una frecuencia patrón con esta técnica es muy ilustrativa y además, constantemente podemos visualizar y controlar el desplazamiento relativo de la señal y con una resolución máxima de algunas decenas de pico segundos con un osciloscopio de 100 MHz de ancho de banda. (Torras, 2005).

**Figura 27** Osciloscopio (A) Hantek 6022BE



Fuente. Elaboración propia

Los osciloscopios Hantek 6022BE son osciloscopios ciegos, requieren de un computador para visualizar sus lecturas, no obstante, esta característica los hace livianos y apto para trabajar en zonas de espacio reducido; su cubierta metálica de aluminio, le permite trabajar a temperaturas elevadas sin

afectar su funcionamiento. Su alimentación es por puerto USB, debido a esto no requiere alimentación diferente a la proporcionada por el PC. Todas estas características son recogidas de los comentarios de los usuarios, ya que puede ser adquirido en amazon.com; y en general, en tiendas de instrumentos electrónicos. (Infomecánica, 2020).

**Figura 28** Osciloscopio (B) Tektronix TDS1012

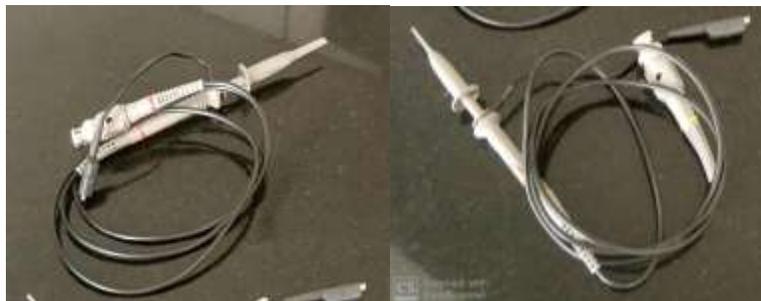


Fuente. Elaboración propia

Los productos Tektronix TDS1012 están protegidos por patentes de EE.UU. y de otros países, emitidas y pendientes (Tektronix, 2003). Además, al ser proporcionado directamente por los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana, dan una medida confiable, cuya imprecisión (error estático) está medida en la escala del aparato (Creus, 2011), esto es  $\pm 1$  mV.

### 3.4.3 Sondas de atenuación

**Figura 29** Sondas de atenuación 1:10



Fuente. Elaboración propia

Las señales obtenidas durante las pruebas, son captadas por sondas de atenuación, las cuales funcionan 1:1 o 1:10. Cada sonda lleva la señal de prueba hasta el osciloscopio por un canal y como

los osciloscopios A y B tiene dos canales, pueden tomarse dos señales experimentales al mismo tiempo, para su observación y análisis.

Las sondas de prueba permiten integrar el osciloscopio al circuito, mediante un conector y conductor eléctrico que sirve para llevar la señal desde el circuito hasta el osciloscopio. Esta interacción debe tener un efecto mínimo sobre la manera en que el circuito opera, la señal debe ser conducida (transmitida) a través de la punta y el cable de la sonda, hasta el osciloscopio: con la mayor fidelidad (Contreras, 2017).

### 3.4.4 PVDF

Como se ha indicado anterior, el Fluoruro de Polivinilideno, es un material de uso frecuente en sensores de básculas, debido a su gran sensibilidad; su eficiencia de acuerdo a las tablas presentadas anteriormente, está calculada teóricamente en un 25% (Zhengbao, Alper, & Zua, 2017).

El área de los piezoeléctricos a utilizar, se determinó experimentalmente, tomando las medidas con el Nonio, quedando de la siguiente manera:

**Figura 30** Ancho de PVDF



Fuente. Elaboración propia

Se puede observar en la imagen que el ancho corresponde a  $1,33 \text{ cm}$  o  $0,0133 \text{ m}$ .

Para el largo tendremos entonces:

**Figura 31** Largo de PVDF



Fuente. Elaboración propia

Se observa en la fotografía un largo de  $2,48 \text{ cm}$  o  $0,0248 \text{ m}$ . Lo cual indica que el área de cada piezoeléctrico será de  $3,2984 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ .

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describe el procedimiento realizado durante el estudio, para obtener los datos correspondientes sobre: la clasificación de materiales piezoeléctricos utilizados en la investigación para la obtención de energía eléctrica a partir de la precipitación pluvial, la potencia suministrada a partir de la energía mecánica presente en las gotas de lluvia y la formulación teórica de construcción de un sistema que permita obtener energía eléctrica, a partir de la energía mecánica presente en las gotas de lluvia.

De acuerdo con lo anterior, se realizó un proceso de caracterización de los materiales seleccionados, para determinar su respuesta eléctrica a partir de la excitación mecánica. De esta manera se obtuvo el modelo de estudio para sistemas de recolección de energía y la relación entre cantidad de precipitación y energía eléctrica a partir del efecto piezoeléctrico.

### 4.1 Materiales piezoeléctricos utilizados

En la tabla 10 se observan los dos tipos de materiales piezoeléctricos utilizados para el estudio. El primer tipo de material piezoeléctrico empleado es de tipo cerámico. Es por ello que se utilizaron materiales PZT comerciales, posteriormente se procedió a la medición de características eléctricas del material mediante equipos especializados.

El segundo tipo de material piezoeléctrico utilizado es el PVDF o fluoruro de polivinilideno. Del mismo modo, se realizaron medidas del comportamiento eléctrico resultante, a partir de la aplicación de estímulos mecánicos originado por las gotas de lluvia.

**Tabla 10.** *Materiales piezoeléctricos utilizados en el estudio*

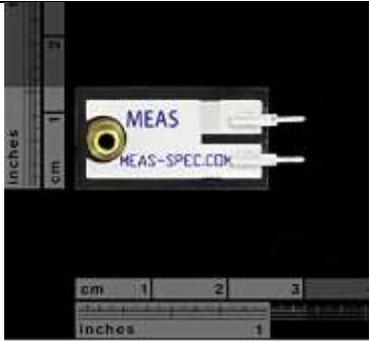
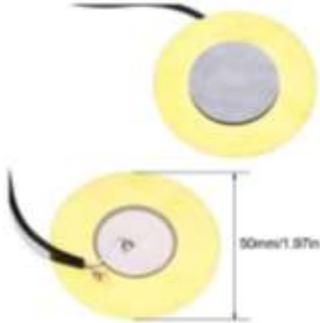
N°	Materiales	Observaciones
1	Piezoeléctrico cerámico (PZT)	No fue necesario amplificar las señales eléctricas producidas por el dispositivo

2	Piezoelectrico PVDF (Marca MEAS)	No fue necesario amplificar las señales eléctricas producidas por el dispositivo
---	-------------------------------------	--

Fuente: elaboración propia

En la tabla 11 se observa las características y propiedades de los piezoelectricos seleccionados, tomado de las especificaciones dadas por el fabricante del producto.

**Tabla 11.** Especificaciones técnicas de los piezoelectricos seleccionados

Piezoelectrico		
Propiedades y especificaciones	PDVF	Cerámico
Características	-Conexión de lengüeta de soldadura -Versión sin masa	-Cuerpo macizo -Placa de metal, centro disco cerámico
Resistencia	-Resiste alto impacto	-Excelente resistencia al impacto
Temperatura de Funcionamiento	0°C a 85°C	≤ 200° C
Temperatura de almacenamiento	-40°C a 87°C	--
Aplicaciones	-Recolección de energía -Detección de vibraciones -Interruptores de activación de bajo consumo -Alarmas de vehículos -Movimientos	-Recolección de energía (energy harvesting) -Sistema de soldadura por ultrasonidos -Sensores de vibraciones y acelerómetro
Imagen de referencia		

Fuente. Elaboración propia

Fuente: elaboración propia



#### 4.2 Proceso de modelado de los piezoeléctricos utilizados

Para el proceso de caracterización del piezoeléctrico cerámico y del piezoeléctrico PVDF se realizó el siguiente procedimiento:

a) Registro de la respuesta eléctrica de ambos materiales piezoeléctricos cuando están bajo estímulos mecánicos. Para determinar la energía recibida por los materiales piezoeléctricos seleccionados, se realizaron cálculos teóricos a partir de las posibles gotas de lluvia recolectadas, en la tabla 12 se observa la potencia suministrada en el material piezoeléctrico, la cual depende principalmente de la duración de la lluvia y el área de cada piezoeléctrico.

**Tabla 12.** Energía suministrada a los piezoeléctricos (Datos teóricos)

Intensidad de la lluvia (mm/h) captada en el pluviómetro (mm)	Cantidad de precipitación mm.m <sup>2</sup>	Cantidad de precipitación en los piezoeléctricos PVDF			Cantidad de precipitación en los piezoeléctricos cerámicos			Duración (h)	Potencia suministrada en el piezoeléctrico (Julios)	
		mm	Gotas	Masa kg	mm	Gotas	Masa kg		PVDF (J)	Cerámico (J)
5	485,6	1,28	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,14	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	1,25	0,00017625	0,00017625
17	1651,0	4,36	2	2,82x10 <sup>-5</sup>	0,46	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,45	0,0003525	0,00017625
12	1165,4	3,08	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,33	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,58	0,00017625	0,00017625
7	679,8	1,79	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,19	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	2,25	0,00017625	0,00017625
16	1553,9	4,10	2	2,82x10 <sup>-5</sup>	0,44	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,5	0,0003525	0,00017625
10	971,2	2,56	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,27	1	1,41x10 <sup>-5</sup>	0,83	0,00017625	0,00017625

Fuente: elaboración propia

Por otra parte, como se mencionó anteriormente para calcular la cantidad de precipitación por metro cuadrado utilizamos la ecuación 19:

$$\text{Cantidad de precipitación} = \frac{\text{Recolección del pluviometro}}{0,010296766 \text{ m}^2} * \text{m}^2$$

De esta manera, conociendo las dimensiones de los piezoeléctricos utilizados (PVDF y cerámicos), calculamos la cantidad de precipitación recibida en ellos.

- Para el caso de PDFV el área es igual:

**Tabla 13.** Cálculo del área de un piezoeléctrico PVDF

Largo (m)	Ancho (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Cálculo del área para 8 piezas (PVDF) (m <sup>2</sup> )
0,0248	0,0133	3,2984x10 <sup>-4</sup>	2,64x10 <sup>-3</sup>

Fuente: elaboración propia

A partir de estos datos, la cantidad de precipitación en el PDVF será igual a:

$$\text{cantidad de precipitación en el PVDF} = \frac{\text{Precipitación} * (\text{m}^2) * \text{área de los PVDF}}{\text{m}^2}$$

- Para el caso de los cerámicos el área es igual:

**Tabla 14.** Cálculo del área de un piezoeléctrico cerámico

Diámetro (mm)	Radio (mm)	Área (m <sup>2</sup> )	Cálculo del área para 8 piezas (cerámicos) (m <sup>2</sup> )
18,9	9,45	2,8x10 <sup>-4</sup>	2,24x10 <sup>-3</sup>

Fuente: elaboración propia

Para calcular la cantidad de precipitación en los piezoeléctricos cerámicos utilizamos la siguiente ecuación:

$$\text{ant. de precip. en el cerámico} = \frac{\text{Precipitación} * (\text{m}^2) * \text{área de los cerámicos}}{\text{m}^2}$$

Dado que el diámetro de una gota son 3mm, su puede calcular aproximadamente las gotas que pueden caer en cada piezoeléctrico.



### 4.3 Protocolo teórico de construcción de un sistema para obtener energía potencial eléctrica a partir de la energía mecánica

#### 4.3.1 Montaje experimental de los piezoeléctricos PVDF y cerámicos

El esquema general de recolección de energía mecánica para transformarla en energía eléctrica se observa en la tabla 15.

**Tabla 15.** Configuración de piezoeléctricos para la obtención de potencia

Material Piezoeléctrico	Vibración ambiental (lluvia)	Circuito acondicionado	Potencia (w)
Cerámico	17mm	Serie	$3,24 \times 10^{-2}$
		Paralelo	$1,6 \times 10^{-2}$
PVDF	17mm	serie	$1,58 \times 10^{-3}$
		paralelo	$1,01 \times 10^{-3}$

\*Se tomó el mejor evento para completar la tabla. Fuente. Elaboración propia

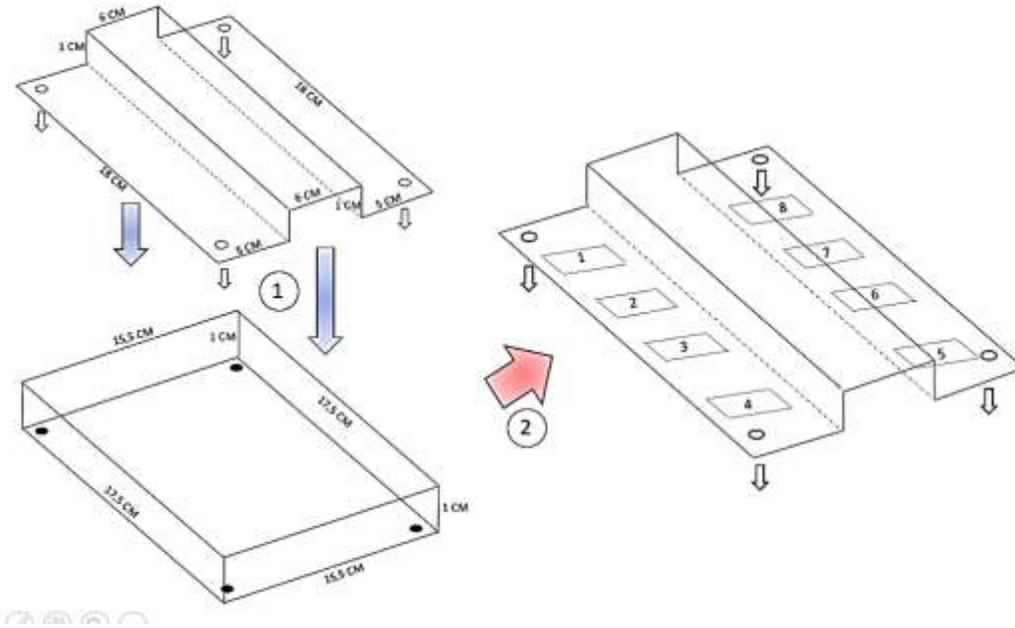
Los datos teóricos obtenidos en la tabla anterior muestran potencias bajas como para suministrar energía suficiente para poner en funcionamiento alguna máquina, debido que se utilizaron áreas muy pequeñas. En todo caso, realizando una linealidad entre el comportamiento de los piezoeléctricos, puede determinarse el área adecuada para uso de aplicaciones comerciales.

##### 4.3.1.1 Montaje experimental de los piezoeléctricos PVDF

En la figura 32 se observa el montaje experimental de los piezoeléctricos PVDF, dispuestos sobre una estructura fabricada 100% de acrílico transparente.

La estructura está compuesta por dos partes, las dimensiones de la base del acrílico son 17,5 cm de largo, 15,5 cm ancho y 1 cm de altura. Asimismo, la carcasa superior fabricada igualmente con acrílico transparente tiene las siguientes dimensiones: 18 cm de largo, 16 cm de ancho (no es una superficie plana, esta presenta un escalón de 6 cm de ancho ubicado en el centro a 5 cm de cada extremo: observe la figura 32) y 1 cm de alto en el escalón central de la carcasa.

**Figura 32** Montaje experimental de los piezoeléctricos PVDF en el acrílico

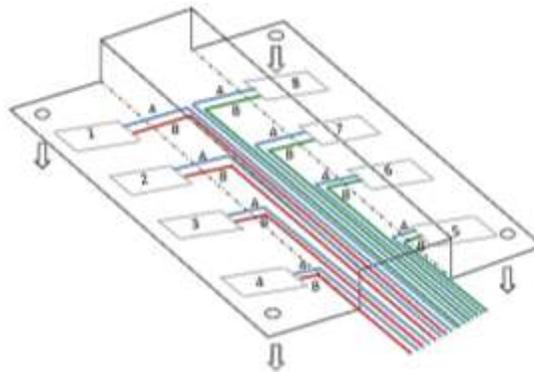


Fuente: elaboración propia

La ubicación de los 8 sensores piezoeléctricos PVDF en el acrílico están dispuestos en sentido antihorario, figura 32.

Para poder analizar la respuesta a la vibración en las pruebas siguientes, los sensores no están fijados a la superficie acrílica, sino que se encuentran elevados 0,5 cm. Además, si se quiere analizar su respuesta a la presión, se fijarán posteriormente a la superficie.

**Figura 33** Montaje de configuración de salida de los piezoeléctricos a la tarjeta del circuito

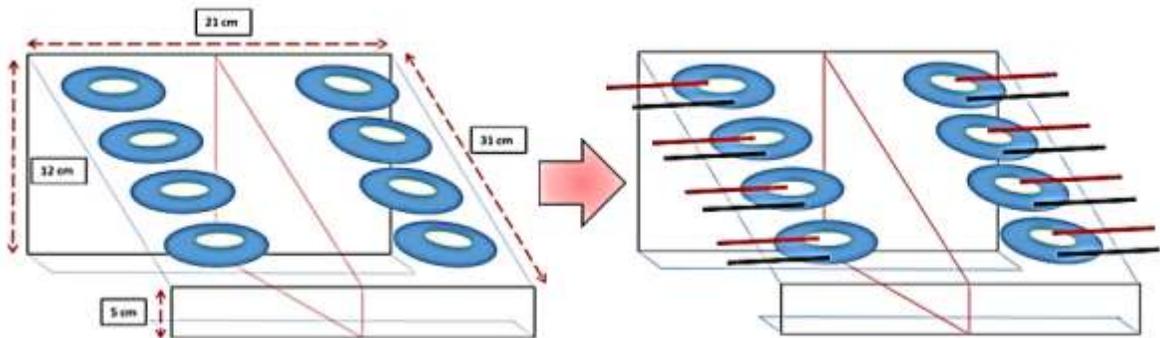


Fuente: elaboración propia

En la figura 33 se observa la ubicación de los sensores piezoeléctricos y la distancia de salida hacia la tarjeta de configuración del circuito. Por ejemplo, los sensores 1-8 A=16 cm se encuentran a la misma distancia de salida, 1-8 B= 15 cm, 2-7 A=12 cm, 2-7 B=11 cm, 3-6 A=7 cm, 3-6 B=6 cm, 4-5 A=4 cm y 4-5 B=3 cm.

#### 4.3.1.2 Montaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos

**Figura 34** Montaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos en el acrílico



Fuente: elaboración propia

En la figura 34 se observa el montaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos, dispuestos sobre una estructura fabricada 100% de acrílico transparente.

Las dimensiones de la base del acrílico donde están colocados los piezoeléctricos son, 31 cm de largo y 21 cm ancho. Asimismo, la plataforma está dispuesta de forma inclinada (como una cuña), por un lado, tiene una altura de 12 cm y por el otro extremo 5 cm de altura, observe la figura 34 de referencia.

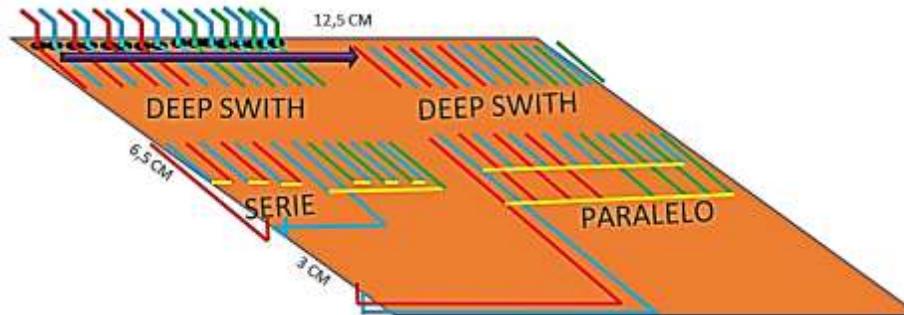
La ubicación en el acrílico de los 8 sensores piezoeléctricos cerámicos está dispuesta en sentido antihorario, figura 34.

#### 4.3.2 Propuesta de un circuito para la recolección de carga

En la figura 35 se observa el esquema de configuración del circuito, este dispositivo se ha denominado “tarjeta de control”, sus dimensiones son: 12,5 cm de ancho y 9,5 cm de largo.

De acuerdo con lo anterior, la tarjeta de control tiene una entrada tipo HEADER (regleta hembra) de 16 entradas, las cuales se duplican para alimentar 4 interruptores tipo Deep Swith, los que permitirán controlar la configuración de las conexiones.

**Figura 35** Esquema de configuración del circuito



Fuente: elaboración propia

Como se observa en el esquema de configuración del circuito, la tarjeta de control tiene 2 salidas. La primera es el Deep Swith A, este permite el paso de corriente de cada sensor para interconectar el circuito en serie. La segunda salida Deep Swith B, permite el paso de corriente a un circuito en paralelo. Asimismo, en pruebas preliminares se observó que, la respuesta tiene muy baja tensión a diferencia de la configuración en serie.

### 4.3.3 Respuesta de voltaje de salida y carga acumulada en el piezoeléctrico

En el procedimiento ejecutado para determinar los modelos eléctricos, se han realizado múltiples medidas utilizando el osciloscopio, con la finalidad de registrar la respuesta eléctrica de los materiales piezoeléctricos PVDF y cerámicos, sometidos a una excitación mecánica y dispuestos en un circuito tanto en serie como en paralelo.

Para conocer la respuesta eléctrica de la señal suministrada por los materiales piezoeléctricos al estar sometido en una prueba experimental, se operaron dos modelos de osciloscopio: el primer modelo es el Hantek-6022BE, este equipo es un osciloscopio ciego, que requiere de una computadora para visualizar las lecturas. Mientras que el segundo modelo Tektronix TDS1012, tiene una pantalla que muestra constantemente el desplazamiento relativo de la señal.



Además, se utilizaron sondas de atenuación 1:1 o 1:10 durante las pruebas para realizar medidas con los piezoeléctricos. Cada sonda lleva la señal de prueba hasta el osciloscopio por un canal, los osciloscopios utilizados poseen dos canales, por tal razón, puede implementarse el uso de ambos canales para tomar dos señales experimentales al mismo tiempo, para su observación y análisis.

**Tabla 16.** Voltaje y corriente en los piezoeléctricos PVDF y cerámicos en un circuito en paralelo y en serie

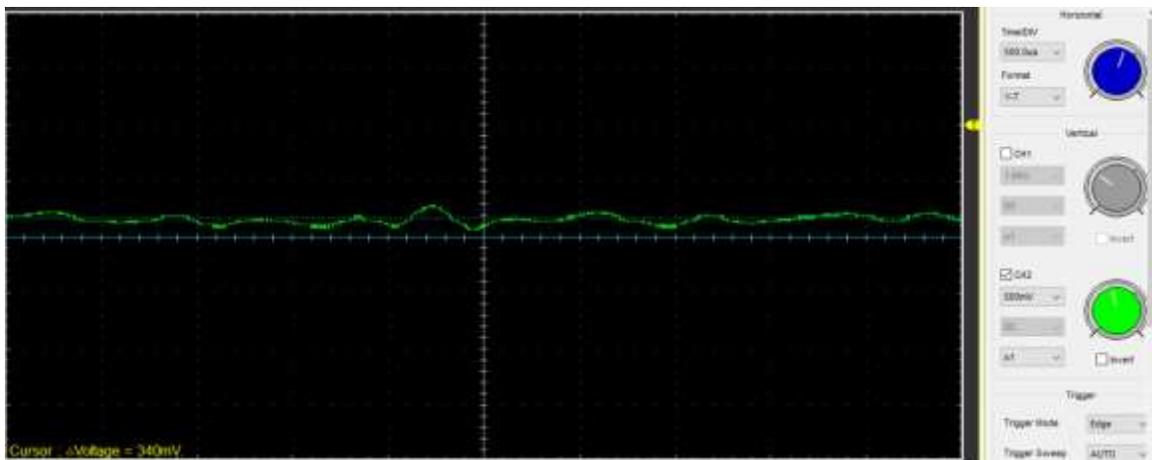
Número de evento	Cantidad de lluvia percibida por el pluviómetro (mm)	Duración del período de lluvia observado (horas)	Datos obtenidos en cada configuración del circuito							
			Circuito en paralelo				Circuito en serie			
			Voltaje promedio obtenido durante el evento registrado en el osciloscopio (mV)		Corriente promedio obtenida durante el evento registrado (mA)		Voltaje promedio obtenido durante el evento registrado en el osciloscopio (mV)		Corriente promedio obtenida durante el evento registrado (mA)	
			PVDF	Cerámico	PVDF	Cerámico	PVDF	Cerámico	PVDF	Cerámico
1	5	1,25	155	340	0,65	4,98	1890	457	0,62	9,31
2	17	0,45	1190	3080	0,85	5,20	2170	3230	0,73	13,90
3	12	0,58	543	1200	0,73	5,00	1980	2410	0,67	12,93
4	7	2,25	187	452	0,66	4,98	1910	530	0,64	11,10
5	16	0,5	619	2950	0,80	5,15	2500	3110	0,69	13,50
6	10	0,83	368	503	0,64	4,98	1930	980	0,66	10,43

Fuente. Elaboración propia

En la tabla 16 se presenta el resumen de las medidas realizadas durante la prueba experimental. Es importante resaltar que el esquema original no contempla baterías, por lo tanto, no hay en el circuito elementos que permitan el almacenamiento de la energía eléctrica captada. Según el estudio la energía eléctrica captada solo fue utilizada para medir la respuesta de los materiales piezoeléctricos utilizados (PVDF y cerámicos), ante la presencia de lluvia.

#### 4.3.3.1 Voltaje experimental configuración de circuito en paralelo

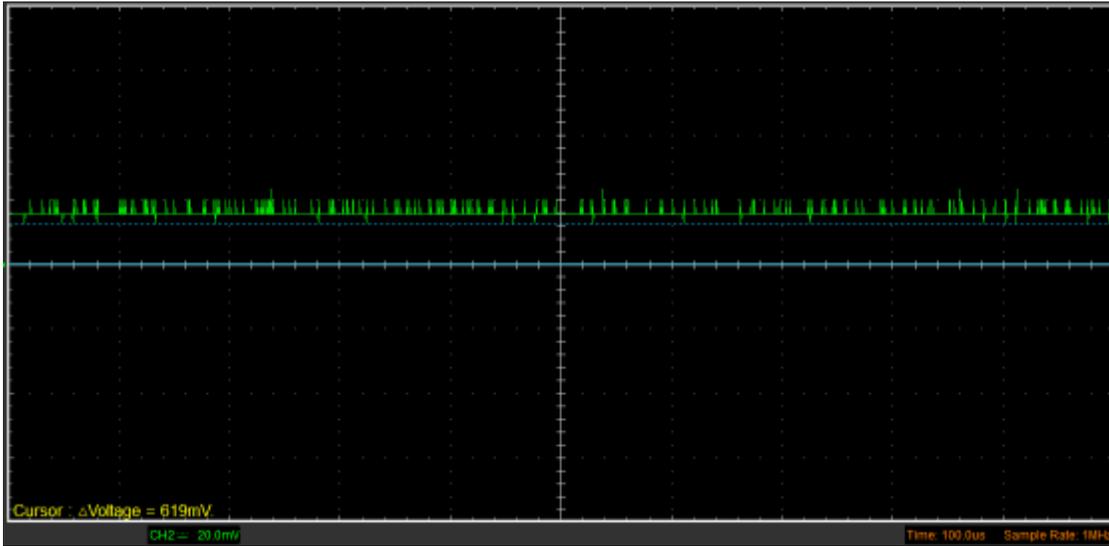
**Figura 36** Toma de voltaje experimental de los piezoeléctricos cerámicos en paralelo



Fuente: elaboración propia

En la figura 36 se observa el voltaje correspondiente de los piezoeléctricos cerámicos, configurados en un circuito en paralelo durante un evento lluvioso. El voltaje promedio obtenido fue de 0.34V o 340mV, la corriente promedio resultante fue de 4,98mA, para un período de duración de lluvia de 1,25 horas.

Figura 37 Toma de voltaje experimental de los piezoeléctricos PVDF en paralelo

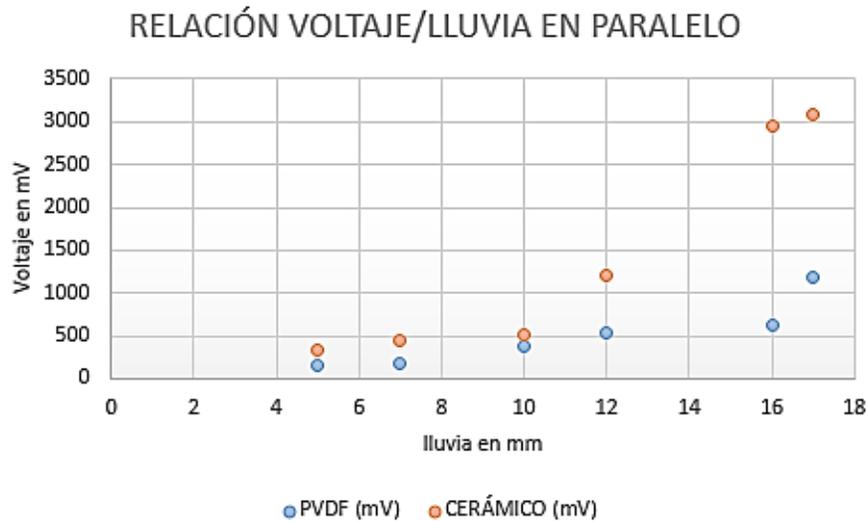


Fuente: elaboración propia

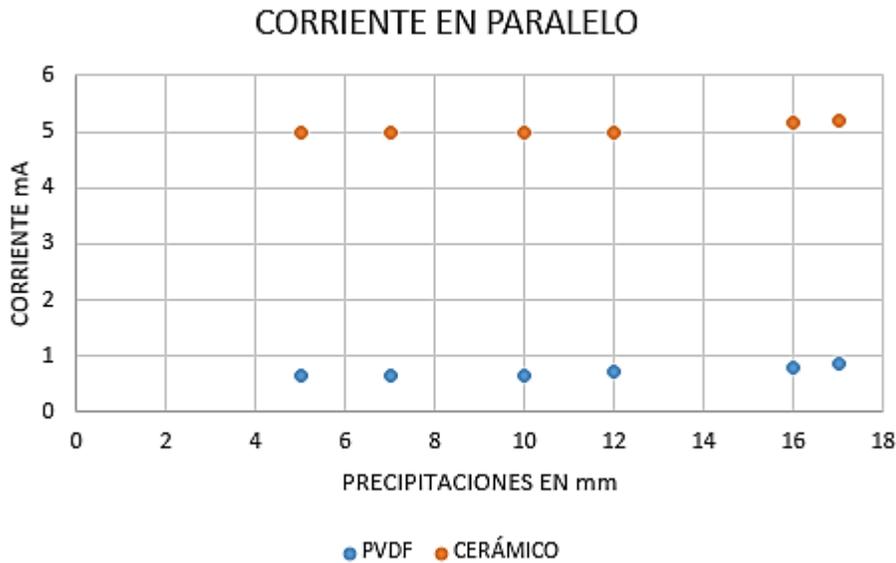
En la figura 37 se observa el voltaje correspondiente de los piezoeléctricos PVDF, configurado en un circuito en paralelo durante un evento lluvioso. El voltaje promedio obtenido fue de 0.619V o 619mV, la corriente promedio resultante fue de 0,80mA, para un período de duración de lluvia de 0,5 horas.

Los datos obtenidos son representados en la siguiente gráfica:

Figura 38. Gráfica de datos obtenidos de la configuración en paralelo de los piezoeléctricos cerámico y PVDF.

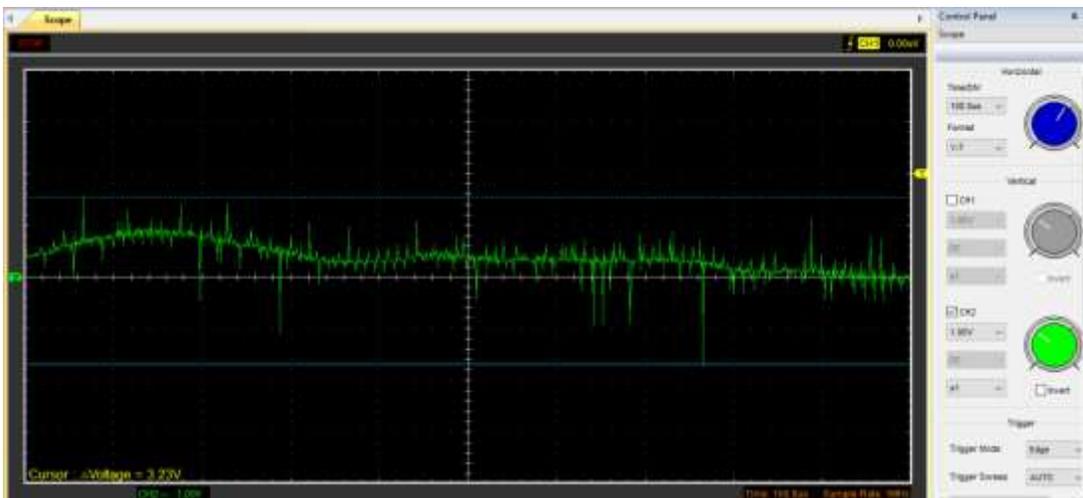


**Figura 389.** Relación entre corriente (mA) y precipitaciones (mm) de los piezoelectricos configurados en paralelo.



#### 4.3.3.2 Voltaje experimental configuración de circuito en serie

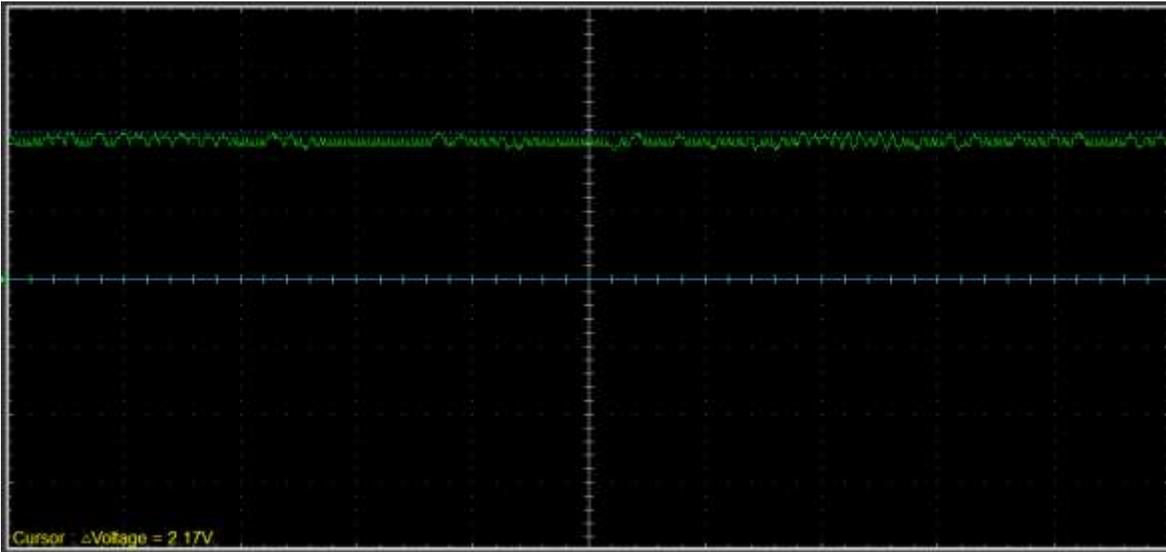
**Figura 40.39** Toma de voltaje experimental de los piezoelectricos cerámicos en serie



Fuente: elaboración propia

En la figura 40 se observa el voltaje correspondiente de los piezoelectricos cerámicos, configurados en un circuito en serie durante un evento. El voltaje promedio obtenido fue de 3.23V o 3230mV, la corriente promedio resultante fue de 13.90mA, para un período de duración de lluvia de 0.45 horas

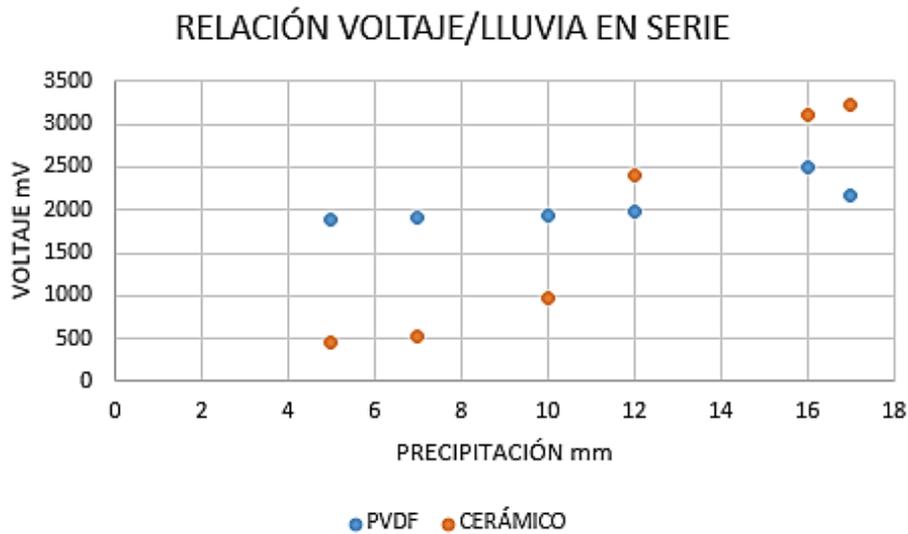
Figura 41.40 Toma de voltaje experimental de los piezoeléctricos PVDF en serie



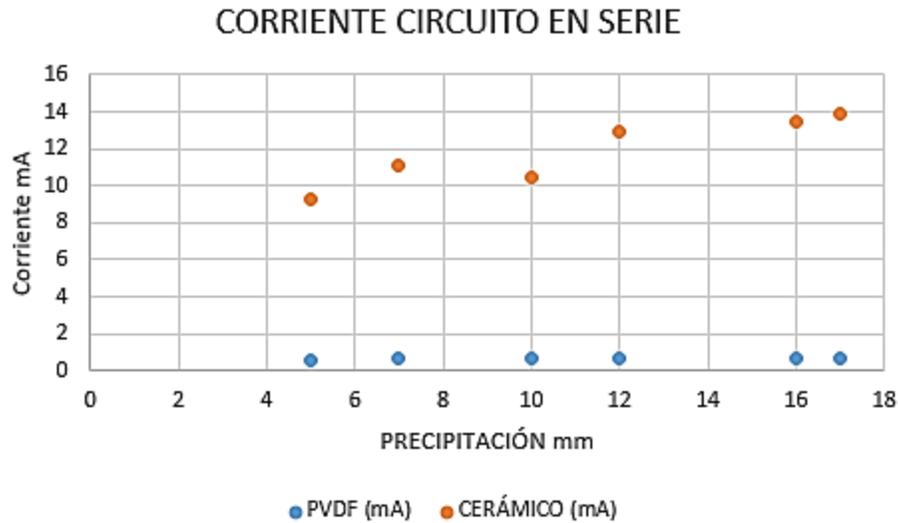
Fuente: elaboración propia

En la figura 41 se observa el voltaje correspondiente de los piezoeléctricos PVDF, configurado en un circuito en serie durante un evento. El voltaje promedio obtenido fue de 2.17V o 2170mV, la corriente promedio resultante fue de 0,73mA, para un período de duración de lluvia de 0.45 horas. De lo anterior se obtienen los siguientes gráficos.

Figura 42.41 Gráfica que relaciona las diferentes tensiones captadas en las mediciones.



**Figura 43.42** Gráfica que relaciona las diferentes intensidades captadas en las mediciones.



#### 4.4 ANÁLISIS DE EFICIENCIA

En todo proceso físico que produzca transformación de la energía, lleva consigo un desgaste de energía, que hace que toda la energía recibida no se traduzca completamente en trabajo (Hermosa Donate, 2013). Se compara la energía teórica recibida con la energía obtenida en las mediciones experimentales, el cociente obtenido de esta ecuación, nos indica cuál es el rendimiento de cada uno de los piezoelectricos (Cerámico-PVDF), para obtener energía eléctrica a partir de las gotas de lluvia.

$$\text{rendimiento } (n) = \frac{\text{energía de salida}}{\text{energía de entrada}}$$

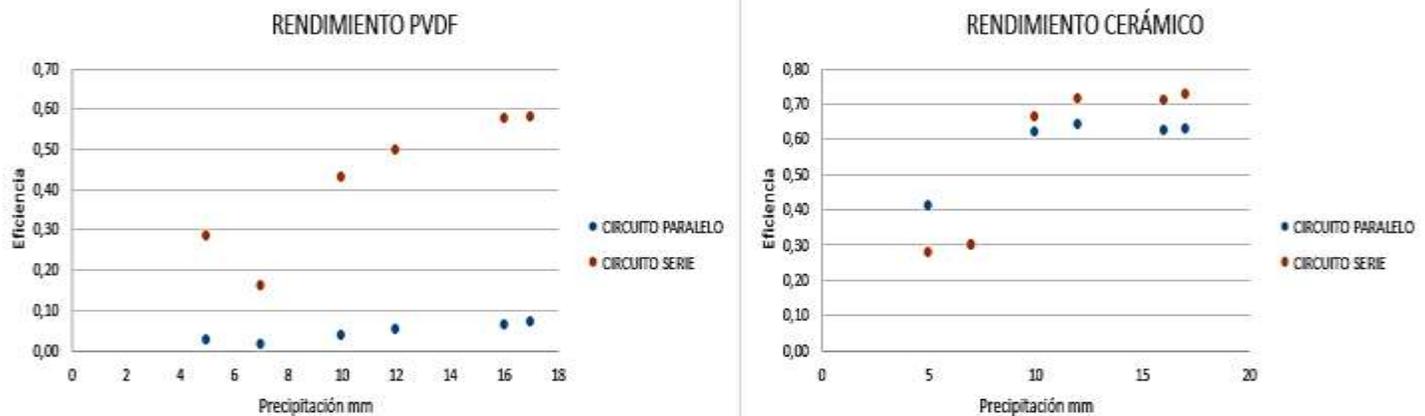
*Ecuación 21. Cálculo de la Eficiencia*

Tabla 17. Datos de Rendimiento de los piezoeléctricos.

ENERGÍA MECÁNICA RECIBIDA ( $1/2 * M * V^2$ ) ENTRADA		ENERGÍA RECOLECTADA (Joules) SALIDA				RENDIMIENTO (n)			
		CIRCUITO PARALELO		CIRCUITO SERIE		CIRCUITO PARALELO		CIRCUITO SERIE	
CERÁMICO (J)	PVDF (J)	CERÁMICO	PVDF	CERÁMICO	PVDF	CERÁMICO	PVDF	CERÁMICO	PVDF
0,004119	0,004119	0,00169	0,000101	0,00114	0,00117	0,41	0,02	0,28	0,28
0,004119	0,004119	0,00259	0,000280	0,00299	0,00238	0,63	0,07	0,73	0,58
0,004119	0,004119	0,00264	0,000217	0,00294	0,00205	0,64	0,05	0,71	0,50
0,004119	0,004119	0,00123	0,000056	0,00122	0,00065	0,30	0,01	0,30	0,16
0,004119	0,004119	0,00257	0,000252	0,00293	0,00237	0,62	0,06	0,71	0,58
0,004119	0,004119	0,00255	0,000152	0,00273	0,00176	0,62	0,04	0,66	0,43

Una visualización de los datos se presenta en la siguiente tabla:

Figura 44.43 Gráfica de rendimiento.



## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

La investigación realizada, recoge el aporte de información de los resultados obtenidos referente al estudio de factibilidad para la generación eléctrica utilizando piezoeléctricos cerámicos y PVDF en presencia de lluvia, se analizaron dichos resultados en conjunto con los objetivos propuestos en la investigación, mediante la discusión de los resultados con estudios previos y antecedentes similares.

1. El uso de materiales piezoeléctricos cerámicos y PVDF, sirvió para estudiar su comportamiento en sistemas de almacenamiento de energía eléctrica a partir de la lluvia, además de conocer el prototipo de montaje experimental diseñado para su medición.
2. La energía mecánica puede transformarse en energía eléctrica, debido a la deformación del material (caso piezoeléctrico). Para el estudio realizado, los datos obtenidos son teóricos, calculados a partir de las posibles gotas de lluvia recolectadas en los materiales piezoeléctricos utilizados (PVDF y cerámicos) y la energía eléctrica que reciben los piezoeléctricos en función del área.
3. El montaje experimental de los piezoeléctricos en paralelo y en serie, muestran que el circuito configurado en paralelo, tiene una respuesta muy baja de tensión respecto a la configuración en serie. Además, es importante resaltar que el prototipo experimental no contempla el uso de baterías, por lo que no se permite el almacenamiento de energía eléctrica captada. La tabla 16 muestra la respuesta, tanto del voltaje como de la corriente promedio que fue captada por los materiales piezoeléctricos ante la presencia de lluvia.
4. El rendimiento de los piezoeléctricos cerámicos muestra una mejor respuesta para ser utilizado en la obtención de energía eléctrica a partir de la lluvia, en comparación con los piezoeléctricos de PVDF.



## RECOMENDACIONES

Después de haber culminado el desarrollo de la investigación, estudio de factibilidad para la generación de energía eléctrica en las zonas con déficit de CEE colombianas utilizando piezoeléctricos en presencia de lluvia, se dan las siguientes recomendaciones:

- Realizar nuevos diseños o mejoras en los prototipos de montaje experimental, con la finalidad de mejorar la señal eléctrica generada en los elementos piezoeléctricos.
- Estudiar la respuesta de nuevos materiales piezoeléctricos del mercado y su factibilidad para la generación de energía eléctrica, por estímulos mecánicos (presencia de lluvia).
- Estudiar el material PVDF en presencia de humedad, algunos datos preliminares mostraron tensiones aun después de ser sacados de la presencia de lluvia.

## REFERENCIAS

- Agencia Efe. (28 de Diciembre de 2017). *¿Cuántas personas hay en el mundo?* Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/actualidad/cuantas-personas-hay-en-el-mundo-articulo-730840>
- Aguirre, R. (26 de Marzo de 2018). *El Colombiano*. Obtenido de <http://www.elcolombiano.com/colombia/sigue-tragedia-ambiental-por-derrame-de-petroleo-en-santander-DX8451137>
- Arenas, C., Rangel, D., Castaño, V. M., Loa, E., & Vega, M. (2010). Sensores piezoeléctricos de fluoruro de polivinilideno modificado con nanopartículas de sílice para aplicaciones en MEMS. *Superficies y Vacío* 23 (3), 20-25.
- Arroyo Rosa, J. M. (14 de marzo de 2018). *Temarios Formativos Profesionales*. Obtenido de <https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2013/12/producir-electricidad-con-la-lluvia.pdf>
- Benavente, R., Borrel, A., Salvador, M., Gracia-Moreno, O., Peñaranda, F., & Catalá-Civera, J. (2014). Propiedades mecánicas y coeficiente de dilatación térmica de la B-eucríptica sinterizada por la técnica de microondas. *Bletin de la sociedad española de Cerámica y Vidrio*. Vol. 53, 133-138.
- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). *Información Técnica Sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático*. Bogotá: IDEAM.
- Bongiovanni, P., Cascino, M., & Sanso, M. (2011). Micrófonos. *Cátedra fundamentos de Acústica y Electroacústica*, 1-12.
- Contreras, R. (2017). *La Sonda de Prueba del Osciloscopio*. Caracas: Ciencia Recreativa.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. 8<sup>o</sup> Edición. Mexico: Alfaomega.
- Cúpich Rodríguez, M., & Elizondo Garza, F. j. (2000). Actuadores Piezoeléctricos. *Ingenierías, Enero-Marzo Vol III N° 6*, 1-7.
- DANE. (2016). *Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- DANE. (2019). *Cuentas Departamentales. Boletín Técnico*. Bogotá: DANE. Obtenido de Producto Interno Bruto (PIB) Departamental: <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=9d091f802200470d816eb1f063aa6aee>
- Dinero. (13 de agosto de 2015). *¿Por qué es tan cara la energía eléctrica en Colombia?* Obtenido de Revista Dienro: <https://www.dinero.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216>
- Enersinc. (2017). *Energy Demand Situación in Colombia*. Bogota: Departamento Nacional de Planeación.
- Esteve Gómez, N. (2011). *ENERGIZACIÓN DE LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS A PARTIR DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES SOLAR Y EÓLICA*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- fujitsu-judges-special-award. (2011). *designboom*. Obtenido de <https://www.designboom.com/technology/ecopad-fujitsu-judges-special-award/>
- Fylladitakis, E. (2015). *Impactos Ambientales de los sistemas fotovoltaicos*. Londres: Universidad de Reino Unido.

- García Ochoa, R. (2014). *Pobreza Energética en América Latina*. Santiago de Chile: Naciones Unidas-CEPAL.
- Gates, B. (30 de Noviembre de 2015). *Energy Innovation. Why We Need It and How to Get It*. Obtenido de Energy innovation:  
[https://www.gatesnotes.com/~media/Files/Energy/Energy\\_Innovation\\_Nov\\_30\\_2015.pdf?la=en](https://www.gatesnotes.com/~media/Files/Energy/Energy_Innovation_Nov_30_2015.pdf?la=en)
- Gobierno en Línea. (14 de Noviembre de 2018). *Departamento Nacional de Planeación (DNP)*. Obtenido de Gobierno Nacional revela las bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/En-el-marco-de-la-celebraci%C3%B3n-de-los-60-a%C3%B1os-del-DNP,-el-presidente-Duque-propone-a-los-colombianos-un-pacto-por-la-legalid.aspx>
- Gobierno en Línea. (8 de Marzo de 2019). *Ideam*. Obtenido de Ideam.gov.co:  
<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/precipitacion-mensual-por-ano>
- Greenpeace. (27 de Octubre de 2018). *Impactos Ambientales del Petroleo*. Obtenido de Greenpeace.org:  
[https://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2012/1/impactos\\_ambientales\\_petroleo.pdf](https://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2012/1/impactos_ambientales_petroleo.pdf)
- Hermosa Donate, A. (2013). *ELECTRÓNICA APLICADA*. México: Alfaomega.
- Hernandez Torres, C. A. (2011). *Análisis Ambiental de las Grandes Centrales Hidroeléctricas de Colombia Aplicando Metodología Multiobjetivo*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Ibar Romero, Jose. (2005). *La Tecnología Hidroeléctrica*. Buenos Aires: EPEC.
- IDEAM. (15 de Marzo de 2020). *Documentación*. Obtenido de bvirtual:  
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/012406/Cap7.pdf>
- Infomecánica. (20 de Marzo de 2020). *InfoMecánica Taller*. Obtenido de Osciloscopio Hantek 6022BE: <https://infomecanica.com.ar/productos/osciloscopio-hantek-6022>
- Koncagül, E., Connor, R., & Tran, M. (2014). *Agua y Energía. Datos y Estadísticas. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2014*. Colombella: WWDR.
- Leopold, A. (1987). The Conservation Ethic. En L. Aldo, *A Sand County Almanac: Interpretive and Critical Essays*. (págs. 634-643). Madison: University of Wisconsin Press.
- Macias de la Rica, J. M. (2012). *Ensayo de Microturbinas Hidráulicas para la Generación de Energía Eléctrica en Zonas Desabastecidas (II)*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Malmcrona, A. (2018). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía*. Leganes: Universidad Carlos III de Madrid.
- Martinez, M., Abadia, R., Castillo, V., & Albaladejo, J. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *C. & G.* 15, 31-43.
- MINMINAS-UPME. (2016). *Metodología para la Estimación del Índice de Cobertura de Energía Eléctrica - ICEE - de 2016*. Bogotá: UPME.
- Moreno Cortés, P. A. (2013). *Energía Eólica: Ventajas y Desventajas de su Utilización en Colombia*. Bogotá: Universidad Libre .

- Muñoz, L. M., Arboleda, C., Garcia, J. G., Vasquez, M., & Palencia, C. (2012). *Uso Inteligente de la Energía Eléctrica, Banco de Recomendaciones*. Medellín: EPM.
- Nanodays. (17 de Marzo de 2018). *Efecto piezoeléctrico*. Obtenido de [http://www.nisenet.org/sites/default/files/catalog/uploads/spanish/12194/electricsqu eeze\\_images\\_13nov13\\_sp.pdf](http://www.nisenet.org/sites/default/files/catalog/uploads/spanish/12194/electricsqu eeze_images_13nov13_sp.pdf)
- Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Art 1, Decreto 2820 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 5 de Agosto de 2010).
- Rojas Perez, G. (15 de Febrero de 2018). *El Mundo*. Obtenido de 3.5% creció la demanda de energía en enero de 2018 en Colombia: <https://www.elmundo.com/noticia/3-5crecio-la-demanda-de-energia-en-enero-de-2018-en-Colombia/367086>
- Saenz V, J. (19 de Mayo de 2018). *El Espectador*. Obtenido de Finanzas de EPM son averiadas por Hidroituango: <https://www.elespectador.com/economia/finanzas-de-epm-son-averiadas-por-hidroituango-articulo-789444>
- SENA. (1976). *Instalaciones eléctricas: Diferencia de potencial y corriente eléctrica*. Bogotá: Publicaciones SENA.
- Tektronix. (2003). *Series TDS1000B y TDS2000B Osciloscopio de almacenamiento Digital*. EE.UU: Tektronix (R) .
- Torras, G. O. (2005). Utilización de osciloscopios digitales para la calibración de patrones de frecuencia. *Boletín Científico Técnico INIMET(1)*, 3-11. Recuperado el 2020, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223020702001>
- Vega B, J. P. (18 de Agosto de 2017). *La República*. Obtenido de Las 26 hidroeléctricas tienen capacidad para generar 10.959 megavatios: <https://www.larepublica.co/infraestructura/las-26-hidroelectricas-tienen-capacidad-para-10959-megavatios-2538271>
- Viñas, J. M. (19 de 03 de 2013). ¿A qué velocidad caen las gotas de lluvia? *Heraldo de Aragon*. Obtenido de <http://www.divulgameteo.es/uploads/Velocidad-gotas-lluvia.pdf>
- Viñas, J. M. (19 de 03 de 2013). ¿A qué velocidad caen las gotas de lluvia? *Heraldo de Aragon*, págs. 2-3.
- Wong, A. (2011). Pantallas Táctiles Capacitivas Requieren Tecnología Innovadora para Ampliar el Mercado. *IDT*, 66-68.
- Zhengbao, Y., Alper, E. b., & Zua, Y. (2017). On the efficiency of piezoelectric energy harvesters. *Extreme Mechanics Letters 15*, 26-37.