



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN DISEÑO INDUSTRIAL
POSGRADO EN DISEÑO INDUSTRIAL
FACULTAD DE ARQUITECTURA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA QUE UTILICE LAS GOTAS DE LLUVIA
PARA GENERAR ENERGÍA**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN DISEÑO INDUSTRIAL**

PRESENTA:

JUAN SALVADOR CÓRDOVA MARTÍNEZ

Director de tesis:

MDI ANA MARÍA LOSADA ALFARO
Posgrado en Diseño Industrial, UNAM

Comité tutor:

**MDI JULIÁN COVARRUBIAS VALDIVIA
MDI GLORIA ADRIANA MENDOZA FRANCO
MDI ERICK IROEL HEREDIA CARRILLO
MTRO. ERNESTO OCAMPO RUIZ**
Posgrado En Diseño Industrial, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Junio 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Diseño de un sistema que utilice las gotas de lluvia para generar energía

Maestría en Diseño Industrial

Juan Salvador Córdova Martínez

Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Junio 2021

Agradecimientos

A mi Mamá y a mi Papá
por su apoyo
durante tantos años.

Introducción

La producción de energía que se necesita para abastecer las necesidades en el mundo, es un tema de gran importancia para el ser humano, llegando a ser un factor principal para su desarrollo. Sin embargo, la producción energética y las fuentes de obtención de combustibles son una preocupación relativamente reciente y de interés mundial; sobretodo por el conocimiento actual de sus implicaciones y sus consecuencias sobre los ecosistemas, los cuáles son cada vez son más notorios en la forma que afectan a todos los seres vivos. Esto se convierte en un serio problema, el cual se va agravando debido a que las necesidades de producción de energía suben cada día; esto se debe principalmente al incremento en la población mundial y en la forma en como se vive actualmente. Para poder relacionarnos entre personas hasta poder realizar tareas domésticas de forma mas sencilla, dependemos de la utilización de múltiples aparatos eléctricos y electrónicos que requieren energía para funcionar. Esto nos ha llevado a revisar la forma en que se ha estado produciendo energía, lo que ha derivado a que en las ultimas décadas se hayan investigado y desarrollado formas alternas de producción de energía, aprovechando fenómenos de la naturaleza cuya incidencia es cíclica o relativamente constante (lo cual da paso a poder catalogar una fuente de energía como renovable). De esta forma, hoy en día se pueden encontrar tecnologías que aprovechan algunos fenómenos naturales para producir energía, las cuales han requerido una gran cantidad de investigaciones, propuestas y mejoras que han llevado un periodo de tiempo de experimentación, iteración y puesta a prueba para llegar a los productos comerciales de la actualidad. Por nombrar algunas de ellas se encuentran las celdas solares que aprovechan la luz del sol, las turbinas hidráulicas que aprovechan la energía de ríos, lagos y olas del mar, los aerogeneradores que aprovechan las corrientes de aire que existen en el planeta, etc. Es aquí donde se plantea el uso de otra fuente que pueda ser utilizada para generar energía, una fuente que no ha sido estudiada a profundidad, ya que se tiene la idea de que puede llegar a ser una fuente valiosa de producción de energía. Esta fuente y recurso natural es la lluvia; en específico, el aprovechamiento de la energía producida por el impacto de las gotas de lluvia en un objeto o superficie, para generar energía eléctrica. Esta propuesta de utilizar la lluvia como fuente de energía viene de la observación de las precipitaciones de agua que cada año han crecido en su intensidad y duración, ya no duran ni están definidas sus temporadas como lo era en décadas pasadas (Magaña, 2011). La gran cantidad de agua que cae en las ciudades del centro y en especial las ciudades de la parte sur de México (CONAGUA, 2016), hacen que sea interesante explorar este recurso, ya que, si se cuentan los días que llueve o en su defecto que el cielo este nublado, se puede ver una afectación considerable en otros sistemas de producción energética como lo es la producción solar por medio de celdas, las cuales bajan su rendimiento por estas circunstancias. Esta es la razón por la que se quiere diseñar un sistema que aproveche las gotas de lluvia, ya que no solo puede ayudar en la producción de una energía limpia, sino que también puede ser una tecnología que se puede complementar con otras ya existentes, para así poder aprovechar cualquier día sin importar la temporada del año. Para realizar el diseño de este sistema, se partirá desde la investigación de las características del fenómeno natural, para pasar a modelar y desarrollar una idea de diseño, hasta llegar a analizar el potencial de esta fuente propuesta mediante los resultados de generación que un prototipo pueda dar. Además, se busca que el proyecto incentive la concientización y educación sobre la generación de energía mediante fuentes renovables, tratando de llegar a cualquier tipo de público y no solo a especialistas del tema.

Las metas de diseño a explorar durante el prototipo son:

- Que sea sencillo de fabricar
- Que sea sencillo de instalar y de usar
- Que pueda llegar a ser modular
- Que su diseño y mejora sea de conocimiento abierto y público para su uso masivo.

Con estos parámetros se busca facilitar cierto empoderamiento tecnológico de las personas, ya que una premisa que se desprende de esta idea, es la de que la energía que se pueda generar, por pequeña que sea, pueda llegar a ser considerable si en conjunto, muchas personas están produciendo energía de esta manera. Además, buscar que el diseño sea abierto tiene como finalidad que, a través del uso y su mejora masiva, el sistema mejore de forma continua y permita una mayor generación de energía para los usuarios. Esto se puede llevar a cabo por medio de lo que es un diseño abierto, el cual, en forma breve, es una forma de compartir un diseño (en este caso el diseño del prototipo) a una red una red abierta para que pueda ser bajado, estudiado, modificado o desarrollándose por cualquier persona, de forma que el diseño siga evolucionando. De esta manera se puede ayudar en problema de la forma en como se genera la mayor parte de la energía (quemando recursos, como el carbón, petróleo o gas), por medio de un empoderamiento tecnológico que permita que cualquier persona pueda ser parte de esto.

Preguntas de investigación, hipótesis y objetivos

Preguntas de investigación

La presente investigación plantea las siguientes preguntas de investigación:

- I. *¿Se puede generar energía eléctrica por medio de las gotas de lluvia?*
- II. *Si se puede generar energía eléctrica por medio de las gotas de lluvia, ¿qué tan eficiente puede llegar a ser el método de producción utilizado?*
- III. *¿Se puede incrementar la producción de energía mejorando el método utilizado o utilizando otro método?*
- IV. *¿Se puede aprovechar la energía generada, de forma que se pueda almacenar y utilizar posteriormente?*
- V. *¿Se puede llegar al diseño de un sistema que pueda generar energía aprovechable, o en su defecto, llegar a un sistema que pueda mostrar un potencial para que en un futuro esto se pueda lograr?*
- VI. *¿Se puede llevar el diseño del sistema de generación de gotas de lluvia a un diseño abierto?*

Hipótesis

La investigación, desarrollo, experimentación e iteración de diseño, pueden llegar a la creación de un sistema o dispositivo de generación de energía por medio de gotas de lluvia, teniendo como base la utilización de lo que es un diseño abierto, para que este se pueda replicado, modificado o tener una continuación en su desarrollo.

Objetivos

Principal:

Diseñar un sistema que utilice las gotas de lluvia para generar energía eléctrica.

Secundarios

- I. *Analizar el estudio del estado del arte de la generación de energía eléctrica por medio de fuentes pluviales para generar una propuesta.*
- II. *Utilizar el concepto de diseño abierto para aplicarlo al diseño del sistema de generación de energía*
 - *Comprobar la generación y estudiar el potencial de generación de la idea seleccionada.*
 - *Iterar en el diseño del sistema buscando mejorar la tecnología para aumentar la eficiencia de producción de energía eléctrica.*
- III. *Proponer un diseño final de un sistema donde se emplee la tecnología seleccionada para ser estudiada, probar su funcionamiento, analizar y dar resultados tanto de los valores de energía obtenidos como de la idea de desarrollar el diseño como diseño abierto*
 - *Analizar si el diseño abierto propuesto pueda ser participe para que las personas que se interesen en el proyecto lo entiendan y puedan evolucionar el diseño a su manera.*

Índice

Agradecimientos	3
Introducción	4
Preguntas de investigación, hipótesis y objetivos	6
Preguntas de investigación	6
Hipótesis	6
Objetivos	6
Principal:	6
Secundarios	6
Capítulo 1 Marco teórico	13
Generación de energía y fuentes de energía	13
La lluvia en México	15
Clasificaciones de intensidad de lluvia	17
Estudios sobre el recurso pluvial	19
Distribución de tamaño de gota.....	19
Parámetros importantes para la generación de energía	21
Distribución de los diámetros de las gotas de lluvia y de la intensidad sobre un evento en específico... ..	22
Estado del arte en el recurso pluvial para la generación de energía	23
Antecedentes de la utilización de lluvia para la generación de energía	23
Uso de la lluvia para generar energía eléctrica.....	23
Hallazgos del estado del arte	26
Capítulo 2 Materiales piezoeléctricos	28
Introducción a los materiales piezoeléctricos	28
Materiales piezoeléctricos por su configuración química	28
Presentación de conceptos.....	28
Resultados experimentales preliminares de la recolección de energía de gotas de lluvia	30
Primer estudio.....	30
Segundo estudio	31
Tercer estudio	32
Hallazgos de los tres experimentos	33
Cálculos y predicciones	33
Calculo teórico de la energía cinética de una gota de lluvia	34
Modelos propuestos de sensores piezoeléctricos para experimentación	35
Sensor piezoeléctrico de tipo ‘Buzz’	36
Sensores piezoeléctricos de una capa o de dos capas ‘bimorph’	36
Enfoque de vinculación con el sistema antes de la experimentación	37
Capítulo 3 Desarrollo del sistema de generación como Diseño abierto	39
Diseño para incentivar el uso de tecnologías de energía alterna	39
El empoderamiento tecnológico es la próxima forma de desarrollo sostenible	39
Definición: Diseño abierto	41
Diseño abierto: Propósito	41
Aspectos importantes a considerar en el desarrollo del dispositivo como diseño abierto	42

Código abierto	42
Código abierto como desarrollo de productos tangibles	42
Diseño modular en el diseño abierto	43
Tipos de nichos del diseño abierto	44
Concepto de apertura ‘openess’	45
Aspectos de la apertura y la perspectiva de la comunidad	45
Licencias de uso	46
Colaboración con empresas o inversores.....	47
La innovación en las empresas por medio del trabajo de diseño abierto	48
Creación de valor y captura de valor.....	49
Razones para que los proyectos de diseño sean revelados libremente (diseño abierto) en un aspecto económico y comercial.....	50
Ser mejor que la competencia	50
Publicidad.....	50
Usuarios.....	51
Fuentes de ingreso indirectos	51
Se necesitan de habilidades para fabricar objetos tangibles.....	52
Un marco para estudiar y definir el desarrollo de un proyecto de diseño abierto	52
Actores.....	52
Objeto	53
Estructura de gobierno.....	54
Proceso de desarrollo.....	54
Resultado Innovador.....	55
Ambiente	55
Conclusiones y anotaciones para el diseño del sistema de generación como diseño abierto	56
Capítulo 4 Experimentación con sensores piezoeléctricos	59
Serie de experimentos: 1. Caída de gotas sobre un sensor piezoeléctrico de tipo ‘buzz’	59
Continuación al experimento: arreglo en serie de diez piezoeléctricos tipo buzz.....	60
Piezoeléctrico laminar como generador para producir energía eléctrica	61
Serie de experimentos: 2. Vibración generada por una gota de agua sobre láminas de diferentes grosores	62
‘Sándwich’ de capas laminares	63
Serie de experimentos: 3. Energía generada por la vibración de láminas	63
Continuación al experimento: Prueba para cargar un elemento almacenador de energía eléctrica	64
Idealización del sistema de generación con múltiples sensores laminares	65
Serie de experimentos: 4. Prueba de la impresión 3D del modelado en software	68
Utilización de aluminio de lata como lámina de soporte	68
Incrementar las características del piezoeléctrico con cambio de geometría	69
Serie de experimentos: 5. Experimentación de sensores con diferentes geometrías	70
Capítulo 5 Diseño de un sistema de generación de energía por medio del impacto de gotas de lluvia	73
Principio de elaboración de la propuesta de diseño abierto del proyecto del sistema de generación.....	73
Inclusión de la propuesta de proyecto de diseño abierto en el diseño final del dispositivo ..	73
Propuesta de proyecto de diseño abierto: Dispositivo generador de energía a través de gotas de lluvia. 74	

Marco con seis aspectos para estudiar y desarrollar la innovación en el proyecto de diseño abierto.....	75
Conclusión del diseño final del dispositivo	77
Iteraciones de diseño para llegar al diseño final del sistema de generación.....	77
Primera Iteración de diseño.....	77
Serie de experimentos: 6. Impresión 3D de un modelo físico de la iteración de diseño.....	78
Segunda parte del experimento: Prueba de la impermeabilización aislamiento y de la generación de energía bajo el goteo de una regadera	81
Segunda iteración de diseño.....	81
Mecanismo de sujeción “giro-cierre” entre los elementos tapas de presión y torre base	82
Mecanismo de sujeción por rosca entre los elementos torre base y tapas de cierre.....	84
Diseño final de la torre base de montaje	84
Iteración de diseño de la geometría exterior de las tapas de presión	85
Ensamble de las tapas de cierre inferior y superior con la torre base de montaje.....	86
Proceso de manufactura del ‘arreglo 2’: conjunto de tapas de presión y sensor laminar.....	87
Ensamble de los componentes de la segunda iteración de diseño.....	88
Serie de experimentos: 7. Prueba de generación de energía y ejemplo de un uso real	89
Prueba de impermeabilización	90
Presentación del diseño final del dispositivo de generación de energía	90
Datos a resaltar obtenidos de la realización del dispositivo final.....	92
Medidas y materiales para el Diseño Abierto del dispositivo final	93
Mediciones	93
Materiales	94
Conexiones	94
<i>Capítulo 6 Diseño final del dispositivo, pruebas y experimentos finales para la producción de energía.....</i>	<i>96</i>
Arreglo de las conexiones de los diez sensores del dispositivo.....	96
Circuito de almacenamiento de energía eléctrica.....	97
Puesta a punto del dispositivo final para la experimentación de generación de energía	98
Notas sobre las pruebas y experimentaciones finales.....	99
Prueba control: captura de la señal de generación de energía	99
Descripción del sistema de pruebas para la simulación de lluvia	99
Primera prueba de generación de energía simulando las condiciones de una lluvia	100
Resultados	101
Modificaciones hechas para la segunda prueba	102
Segunda prueba de generación de energía simulando las condiciones de una lluvia	103
Resultados	104
Análisis de resistencia y durabilidad de los sensores.....	105
Tercera prueba de generación de energía simulando las condiciones de una lluvia.....	106
Resultados	107
Conclusiones de las tres pruebas finales de producción de energía.....	108
Propuestas sobre el uso de la energía del dispositivo	108
La conexión modular de varios dispositivos	108
Cálculos de la generación de energía producida	109
Costo del dispositivo físico experimental (precios redondeados, a 2020 cuando se hizo el dispositivo)	112

<i>Ejemplo demostrativo de la propuesta de proyecto de diseño abierto</i>	115
Paquete del diseño abierto	117
Compartir el diseño abierto del dispositivo globalmente.....	118
Resultados, hallazgos y conclusiones	120
Hallazgos	120
Hallazgos generales de todo el trabajo desarrollado	120
Hallazgos sobre los resultados obtenidos en las pruebas finales.....	120
Hallazgos desde el punto de vista del usuario del dispositivo	120
Hallazgos del dispositivo de generación como proyecto de diseño abierto	121
Resultados	121
Resultados más significativos de la generación de energía del diseño final del dispositivo.....	121
Conclusiones	122
Conclusiones generales de todo el trabajo desarrollado.....	122
Conclusiones sobre los resultados obtenidos en las pruebas finales	123
Conclusiones de las variables a trabajar, modificar y desarrollar a futuro.....	123
Conclusiones desde el punto de vista del usuario del dispositivo.....	123
Conclusiones de la utilización de la energía generada por el dispositivo	124
Anexo 1	127
A1.1 Estudio de la de distribución de los tamaños de gota de un evento fuertemente erosivo.	127
Anexo 2	127
A2.1 Precipitación promedio mensual al día en la CDMX	127
Anexo 3	128
Anexo 4	129
A4.1.1 Serie de experimentos: 1. Caída de gotas sobre un sensor piezoeléctrico de tipo ‘buzz’	129
A4.1.2 Segunda parte: 1. Caída de gotas sobre un sensor piezoeléctrico de tipo ‘buzz’	131
A4.2 Serie de experimentos: 2. Vibración generada por una gota de agua sobre láminas de diferentes grosores	132
A4.3 Características del film piezoeléctrico	135
A4.4 Serie de experimentos: 3. Energía generada por la vibración de láminas	136
A4.5 Continuación al experimento: Prueba para cargar un elemento almacenador de energía eléctrica	139
A4.6 Modelado 3D	140
A4.7 Serie de experimentos: 4. Prueba de la impresión 3D del modelado en software	143
A4.8 Características cambio de geometría	144
A4.9 Serie de experimentos: 5. Experimentación de sensores con diferentes geometrías ..	145
Anexo 5	147
A5.1 Primera iteración, modificaciones	147
Primera Modificación.....	147
Segunda modificación	147

Tercera modificación.....	148
A5.2.1 Practica modificaciones primeras iteración	148
A5.2.2 Continuación: Practica modificaciones primeras iteración.....	150
A5.3 Segunda iteración, modificaciones e impresión	152
A5.4 Guía de pasos a seguir para ensamblar el sensor laminar con las tapas de sujeción presión, dentro de la sección de la torre base.....	157
A5.5 Proceso de manufactura del ‘arreglo 2’: conjunto de tapas de presión y sensor laminar	158
A5.6 Prueba de un uso real de la energía generada por medio de uno de los sensores de sándwich laminar manufacturados.....	159
Guía y prueba de la forma de impermeabilizar el ensamble del conjunto de tapas de presión y el sensor laminar una vez montados sobre la torre base.....	161
Anexo 6.....	163
A6.1 Elección del tipo de conexión de los diez sensores piezoeléctricos	163
Generación de energía, promedio individual	164
A6.2 Circuito eléctrico del dispositivo de generación.....	165
Diagrama del circuito eléctrico	165
Nuevo instrumento de la medición de señal eléctrica: National Instruments NI USB-6216.....	166
Practica: Prueba del circuito de almacenamiento.....	166
A6.3 Prueba de control captura de la señal de generación de energía	168
A6.4 Detalles del acomodo de los elementos para recrear la lluvia y empezar las pruebas	169
A6.5 Practica: Primera prueba	171
A6.6 Modificaciones para realizar una segunda prueba.....	174
A6.7 Practica: Segunda prueba.....	175
A6.7 Practica: Tercera prueba	178
A6.8 Cálculos de la generación de energía producida.....	182
Costo del dispositivo físico experimental (precios redondeados, a 2020 cuando se hizo el dispositivo)	186
Índice de Imágenes	187
Índice de diagramas.....	189
Bibliografía.....	189

Capítulo 1

Marco teórico

Capítulo 1 Marco teórico

Generación de energía y fuentes de energía

La generación de energía es un reto constante que se ha convertido en un gran problema, el cual no tiene solución inmediata, por lo que se debe hacer un análisis profundo y progresivo, para posteriormente plantear medidas que mitiguen o den solución en el mediano y largo plazo. Este problema se ha incrementado y ha sido más notorio por la creciente demanda de la población mundial, el empleo irracional y poco eficiente de ciertos combustibles no renovables (IPCC, 2018). Siendo algunos ejemplos: el creciente uso de múltiples aparatos electrónicos que necesitan de energía eléctrica, así como también el uso de vehículos para transportarse de un lugar a otro, los cuales normalmente usan la energía generada por la combustión de gasolina. Para comprender este problema se ha ido analizando la manera en que se produce la energía, la forma en que debe ser transportada y la forma en que se consume, debido al impacto que se genera en este ciclo. La gran mayoría de las formas en que se genera la energía tienen un impacto negativo en el ambiente, el cual a sido desatendido en sus inicios porque las afectaciones no eran tan notorias, pero ya en la actualidad las afectaciones son graves para la salud y bienestar no solo de los seres humanos, sino de cualquier ser vivo (IPCC, 2018). Ahora estamos en esta posición, en la que la manera en que se ha desarrollado y aplicado la generación de energía durante décadas, nos lleva a que el tratar de modificar estas formas sea sumamente difícil, debido a la complejidad que representa, además de los intereses políticos y económicos que se resisten a un cambio (Chenaut, 2017). Si bien es cierto que el problema es mundial y que se debe de trabajar en conjunto, es difícil poder abarcar y analizar todas las formas en que se genera energía en el mundo, es por esto que este trabajo solo se centrará en la producción que se realiza en México, pudiéndose clasificar de acuerdo a los recursos que ocupa, catalogándolos como renovables y no renovables. En México la producción de energía tanto renovable como no renovable esta monitoreada por la Secretaría de Energía, la estructura de la producción primaria se muestra en la imagen 1 (SENER, 2018).

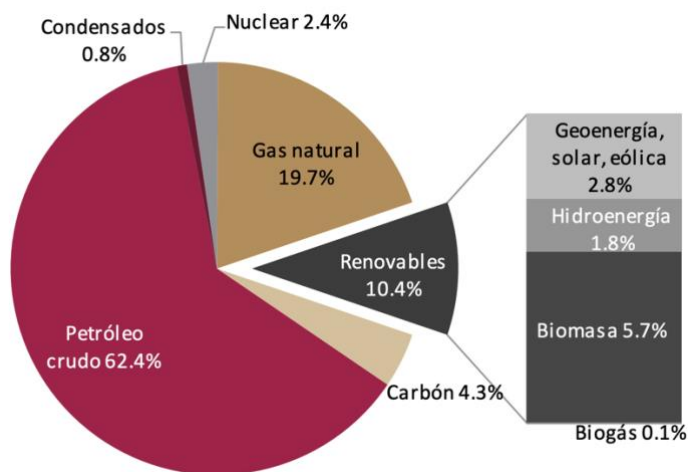


Imagen 1 Estructura de la producción de energía primaria en México (SENER, 2018)

Esto nos muestra que la producción de energía por medio de fuentes renovables es poca y muy inferior a la de fuentes no renovables, sobre todo si se tienen en cuenta las posibilidades existentes en el país en relación a la capacidad de recursos renovables potenciales y que se pudieran explotar. Desde hace tiempo se ha trabajado con recursos renovables para producir energía, en los cuales se ha investigado, desarrollado e implementado tecnologías que hacen posible este aprovechamiento; dentro de los recursos renovables más explotados y desarrollados en México están la energía hidráulica, eólica,

solar fotovoltaica, geo energía, biomasa (SENER, 2018). De estos recursos renovables, la energía solar y energía eólica tienen ya un largo recorrido en los que han sido investigados, analizados y desarrollados para generar energía, por lo que se puede aprovechar este bagaje como punto de apoyo, para desarrollar otra fuente de energía renovable. Por tanto, para proponer otro recurso renovable como fuente de energía se debe comenzar por cuestionar cómo aprovechar el recurso de forma sustentable, partiendo inicialmente en estudiar su viabilidad y prueba de tecnología en pequeña escala o laboratorio, pasando a estudiar su potencial y posterior implementación, sin abandonar la mejora continua en su tecnología. La lluvia es un recurso renovable poco estudiado en cuanto a ser utilizado para generar energía, en especial, si se compara con otros recursos, existen recursos renovables para producción eléctrica con un mayor interés para ser investigados como se puede ver en la tabla 1 (Bossink, 2017), lo cual nos lleva a ver la lluvia como un área de oportunidad.

Tabla 1 Recopilación de 229 investigaciones publicadas sobre tecnologías energéticas sostenibles con experimentación y demostración hecha por (Bossink, 2017), en su artículo recopilatorio se pueden ver los enlaces a las 229 investigaciones.

Tecnologías energéticas sostenibles	Numero de proyectos en desarrollo
Producción de hidrógeno y pilas de combustible de hidrógeno.	40 publicaciones (14.3%)
Construir nuevos edificios de energía casi cero, cero y más energía	37 publicaciones (13.3%)
Reequipamiento energético de edificios existentes.	34 publicaciones (12.2%)
Fotovoltaica	31 publicaciones (11.1%)
Captura y almacenamiento de carbono	30 publicaciones (10.8%)
Biocombustibles	24 publicaciones (8.6%)
Vehículos de combustible alternativo	17 publicaciones (6.1%)
Rejilla Smart/micro	14 publicaciones (5.0%)
Energía eólica	13 publicaciones (4.7%)
Tecnología de carbón limpio	7 publicaciones (2.5%)
Almacén de energía	6 publicaciones (2.2%)
Reequipamiento energético de procesos industriales.	5 publicaciones (1.8%)
Energía geotérmica	5 publicaciones (1.8%)
Bombas de calor	4 publicaciones (1.4%)
Energía solar térmica	3 publicaciones (1.1%)
Hidroelectricidad	3 publicaciones (1.1%)
Ciudades ecológicas	2 publicaciones (0.7%)
Energía internet	1 publicación (0.4%)
Recuperación de calor	1 publicación (0.4%)
Reequipamiento energético del transporte marítimo.	1 publicación (0.4%)
Construcción de edificios de cero carbono.	1 publicación (0.4%)

La lluvia en México

En México los fenómenos meteorológicos están monitoreados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), estas instituciones tienen como obligación informar y avisar a la población de las características e intensidades de estos fenómenos meteorológicos; de igual forma estas instituciones llevan un registro y análisis de datos obtenidos sobre este continuo monitoreo, los cuales deben de ser difundidos al público. La precipitación pluvial (lluvia) está registrada por estas instituciones, a través de todo el territorio nacional; siendo “Estadísticas del Agua en México” (CONAGUA, 2016), el último informe que han publicado. Este informe señala que anualmente México recibe aproximadamente **1 449 471 millones de metros cúbicos de agua** en forma de precipitación; además, este señala que esta cantidad de agua que cae, tiene el comportamiento que se muestra en la imagen 2:

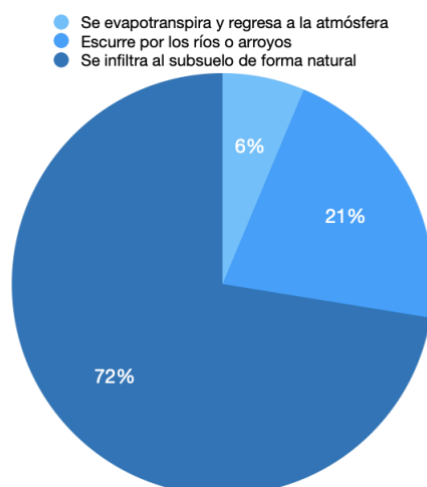


Imagen 2 Gráfica del comportamiento del agua que cae sobre el territorio de la República Mexicana

Tomando en cuenta que el agua de lluvia es agua dulce¹, si se desea conocer la cantidad de agua con la que cuenta el país, se deben considerar los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, dando como resultado que el país cuente anualmente con **446 777 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable** (CONAGUA, 2016). Teniendo como base el informe de CONAGUA y analizando algunos de sus datos e información, se presenta la categorización hecha sobre el agua renovable, que CONAGUA hace, desde tres perspectivas:

- **Distribución temporal:** se refiere a que en México existen grandes variaciones del agua renovable a lo largo del año. La mayor parte de la lluvia ocurre en el verano, mientras que el resto del año es relativamente seco.
- **Distribución espacial:** nos indica que en algunas regiones del país ocurre precipitación abundante y existe una baja densidad de población, mientras que en otras sucede lo contrario.
- **Área de análisis:** la problemática del agua y su atención es predominantemente de tipo local. Los indicadores calculados a gran escala esconden las fuertes variaciones que existen a lo largo y ancho del país.

Se debe de tener en cuenta que la precipitación que se tiene en un país se mide en un espacio de tiempo de un año y que esta varía año con año. En México se tienen registros sobre la precipitación anual que se ha caído, teniendo como ejemplo el registro que se hizo entre los años 2000 a 2015, lo cuales se muestran en la imagen 3:

¹ Agua no salada, como la que se encuentra en lagos, ríos y arroyos, pero no en los océanos.

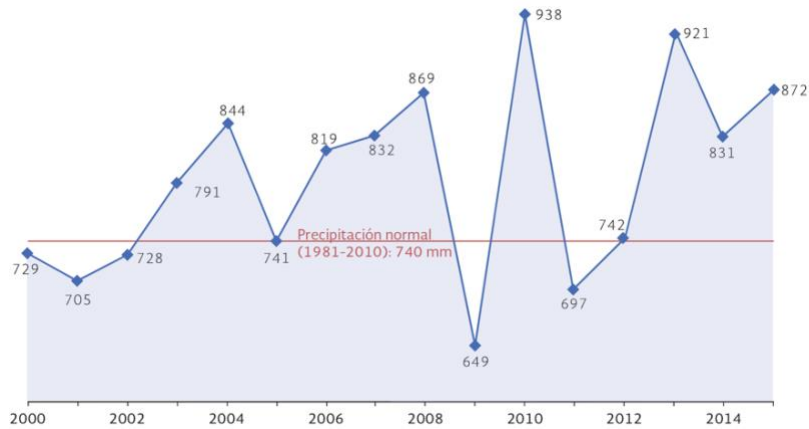


Imagen 3 Precipitación pluvial anual, 2000-2015 (mm) (CONAGUA, 2016).

Se tienen variaciones en la precipitación anual, se pueden usar los promedios para indicar el potencial que se puede esperar suceda en un año, este dato tiene como nombre Precipitación normal. El promedio de precipitación normal en México es de 740 mm², este valor está dictado por la información obtenida entre los años 1981 a 2010. Este periodo de tiempo de treinta años es propuesto por la Organización Meteorológica Mundial (este es seguido por CONAGUA), este lapso se considera como un periodo climatológico mínimo representativo. Además, dicho periodo deberá iniciar el 1° de enero de un año que termine en uno y finalice el 31 de diciembre de un año que termine en cero (CONAGUA, 2016). Por lo que a lo largo de un año el fenómeno de la precipitación tiene una distribución variada y dependiendo de la localización del lugar a estudiar, lloverá con diferentes frecuencias o no lloverá, es por eso que es importante señalar que la distribución mensual de la precipitación puede dar una mejor lectura de cuando se tendrá una mayor disponibilidad del recurso pluvial para generar energía, en otras palabras, conocer los meses en lo que llueve más nos puede indicar cuando se podrá generar mayor energía. En México se tiene en promedio, que el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre los meses de junio y septiembre, como se observa en la gráfica de la imagen 4.

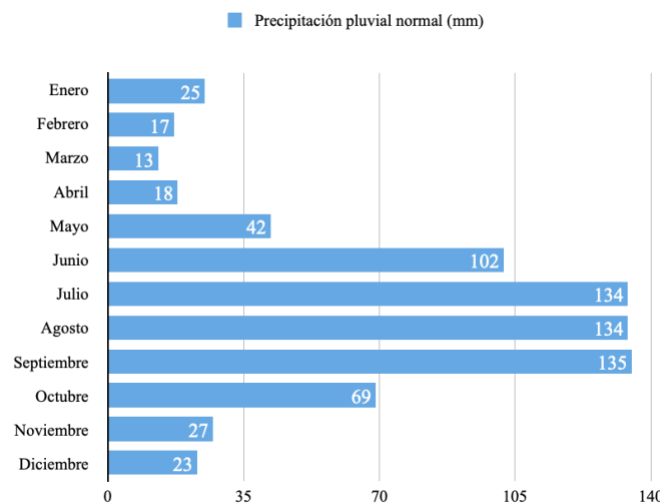


Imagen 4 Precipitación pluvial normal mensual, 1981-2010 (mm) (CONAGUA, 2016).

También se debe de tomar en cuenta que en el territorio mexicano existen diferentes tipos de ecosistemas, que van desde desérticos, montañosos, bosques, selvas, etc. cada uno con sus climas

² 1 mm de precipitación se refiere a 1 milímetro de altura en una superficie de 1 metro cuadrado

diversos, lo que provoca que las zonas donde se tiene una mayor precipitación estén concentradas en lugares específicos en la república mexicana. Para conocer mejor estas zonas de mayor precipitación, los estudios antes realizados nos muestran la distribución de precipitación pluvial en el periodo de tiempo antes señalado, que va de 1981-2010, estas zonas están representadas en un mapa de la República Mexicana, como se muestra en la imagen 5.

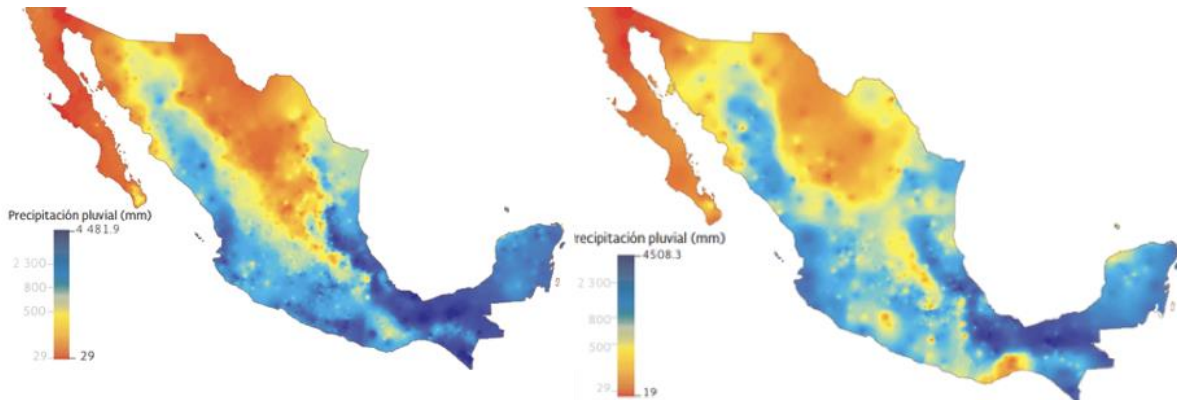


Imagen 5 Distribución de la precipitación pluvial: imagen de la izquierda representa el periodo de 1981-2010, imagen de la derecha representa el año 2015 (CONAGUA, 2016).

El cambio climático en México (Magaña, 2011) ha afectado tanto las fechas en que ocurren los fenómenos meteorológicos (dentro de los cuales esta la precipitación pluvial), como su duración, intensidad y lugar de ocurrencia, es por esto que también se tienen datos que muestran la forma en que ha llovido en los últimos años, siendo esto importante porque nos da un dato claro e inequívoco de que se está alterando el clima. Estos datos se pueden ver en la representación gráfica de la precipitación pluvial del año 2015, haciendo una comparación entre las lustraciones de la medición de precipitación pluvial en territorio mexicano de los años 1981-2010 y la de 2015, se puede ver que las zonas en donde llueve en la República han variado considerablemente. Se pueden resaltar las zonas en donde se tiene una precipitación superior a la normal y estas zonas son principalmente en Tabasco, cuenca del río Papaloapan entre Oaxaca y Veracruz, y en las Cuencas Centrales del Norte (CONAGUA, 2016). Los datos precisos sobre estas representaciones se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Precipitación normal ocurrida en la República Mexicana

Del periodo de 1981 a 2010	740 mm
Del 1° de enero al 31 de diciembre del 2015	872 mm

Esta información tiene como objetivo dar a conocer la forma como ocurre el fenómeno meteorológico de la lluvia en México, lo cual es importante principalmente para saber qué cantidad de agua se espera, para después plantear qué cantidad puede ser utilizada, en qué zonas de interés si puede ser útil el generar energía por lluvia o conocer los lugares donde existe la mayor precipitación, todo esto para utilizar esta lluvia como recurso renovable para poder generar energía.

Clasificaciones de intensidad de lluvia

Además de conocer la precipitación normal en México en cualquier lugar de su territorio, también se debe de saber la forma en como llueve, ya que para utilizar el recurso de la lluvia para poder generar energía se dependerá enormemente de la intensidad con la que las gotas de lluvia caigan. Existen parámetros que nos indican cómo esta intensidad que se produce durante una precipitación pluvial, esta característica es importante porque es una condición inicial para poder plantear un diseño de

algún dispositivo que genere energía por medio de las gotas de lluvia, Llasat (2001) da una clasificación donde la intensidad es descrita por la precipitación media en un lapso de tiempo de una hora, medida en milímetros por hora (mm/h):

Tabla 3 Clasificación de intensidades de lluvia (Llasat, 2001).

Lluvia ligera	$L \leq 2 \text{ mm/h}$
Lluvia moderada	$2 < L \leq 15 \text{ mm/h}$
Lluvia fuerte	$15 < L \leq 30 \text{ mm/h}$
Lluvia muy fuerte	$30 < L \leq 60 \text{ mm/h}$
Lluvia torrencial	$L > 60 \text{ mm/h}$

Intensidades máximas de lluvia en México

Analizando los registros existentes de las intensidades de lluvia que han caído en México a lo largo de los años, se obtiene una idea de cual es la cantidad máxima de agua que puede caer a lo largo de una lluvia y por consiguiente conocer la energía teórica máxima que se podría generar si las condiciones son extremas. En la tabla 4, se presentan las diez localidades que han registrado el valor máximo observado de la precipitación máxima diaria PMD Max (mm). Estos datos han sido registrados sobre los pluviógrafos que se encuentran sobre el territorio mexicano y han sido recopilados por (Campos-Aranda, 2010).

Tabla 4 Características generales, predicciones extremas y parámetros estimados en las 10 localidades con el valor máximo observado de la precipitación máxima diaria en la República Mexicana (Campos-Aranda, 2010).

Localidad pluviómetro	o Periodo de registro (años)	PMD Min (mm)	PMD Máx. (mm)	PMD 10 (mm)	PMD 100 (mm)	R prom	iI (mm/h)
Acapulco	1972-1998 (27)	55	360	248.5	416.6	0.258	75
Chetumal	1952-1995 (39)	55.9	360	204	524.2	0.29	77
Villahermosa	1973-1985 (24)	63.9	340	196.6	400.1	0.313	81
San José del Cabo	1933-1997 (60)	2.1	316	143.8	371.5	0.232	43
Ciudad Victoria	1962-1998 (34)	57.9	288.5	206	354.2	0.313	77
Poza Rica	1961-1996 (35)	41.2	278.7	176.5	286.2	0.337	70
Manzanillo	1969-1997 (22)	44	273	160.5	438.5	0.323	68
Colima	1951-1997 (37)	33.4	255	129.6	246.4	0.432	72
Campeche	1954-1997 (38)	32	254.3	125.6	245.4	0.455	70
Guasave	1969-1996 (23)	34	229.8	142.3	255.1	0.382	72

PMD Min (mm) valor mínimo observado de la precipitación máxima diaria
PMD Max (mm) valor máximo observado de la precipitación máxima diaria
PMD 10 (mm) precipitación máxima diaria de periodo de retorno 10 años
PMD 100 (mm) precipitación máxima diaria de periodo de retorno 100 años
R prom. cociente lluvia - duración promedio
iI (mmHh) intensidad de duración una hora y periodo de retorno 10 años

Es importante conocer la historia de las intensidades máximas que se han presentado sobre el territorio mexicano por los siguientes motivos:

- ❖ *Conocer en que lugares se presentan estas condiciones máximas, para poder proponer estos lugares como zonas ideales para usar el sistema de generación*
- ❖ *También sirve para ver si en un lugar de interés (ejemplo: una casa en alguna zona metropolitana) puede llegar a tener una intensidad de lluvia considerable si se desea colocar el diseño propuesto ahí.*
- ❖ *Con estos datos se puede teorizar sobre la cantidad máxima y mínima de agua, así como la duración promedio que pueda tener el sistema que se desea diseñar, para calcular la cantidad máxima de energía teórica que puede producir el sistema*
- ❖ *Diseñar el sistema para que pueda soportar un evento de lluvia torrencial máxima*

Por ejemplo, podemos señalar, que las zonas geográficas ubicadas dentro del territorio de la República Mexicana donde más se podría utilizar el sistema que se quiere diseñar debido a la cantidad de lluvia que cae, serían: el Sur de Veracruz, Tabasco y norte Chiapas. De igual forma, zonas en época de lluvias como el centro del país donde se encuentra la zona metropolitana del valle de México reciben una cantidad de agua considerable, por lo que se tomará en cuenta estos factores para el diseño del sistema para predecir el posible comportamiento y energía que se pueda generar tanto en la CDMX como en los lugares con mayor precipitación pluvial.

Estudios sobre el recurso pluvial

Para poder usar las gotas de lluvia para generar energía de manera renovable, se debe de estudiar el fenómeno natural de la lluvia o precipitación, primero de forma general para entender cómo llueve, cuánto llueve, dónde llueve etc., para posteriormente pasar a conocer características particulares del fenómeno como lo es la forma en que se generan las gotas de lluvia, su relación con el tipo de lluvia y cómo es el impacto que se produce cuando la gota cae y choca con una superficie.

Distribución de tamaño de gota

Una cualidad importante del estudio de la precipitación pluvial, es la de querer tener datos cada vez más precisos sobre las predicciones de las lluvias futuras, esto por la importancia que tiene y ha tenido en el desarrollo de la humanidad, principalmente porque conocer estos datos ha ayudado para el cultivo de alimentos y en este caso en particular ayuda al cálculo teórico potencial de energía. La forma en cómo se ha monitoreado y predicho la precipitación pluvial ha avanzando hasta llegar a los sistemas meteorológicos actuales, donde se utilizan súper computadoras para conocer las condiciones del fenómeno horas antes de que se produzca, recabar la información en el momento y predecir con mayor exactitud con base en esos datos lo que pasará en horas después y días consecuentes. La información que obtienen estos sistemas no solo ayuda para actividades de cultivo o para alertar sobre posibles condiciones extremas, también pueden servir para otros propósitos particulares, como, por ejemplo, el monitoreo de las condiciones que se puedan presentar en una carrera de formula 1, donde la presencia de lluvia afecta las condiciones de terreno y el accionar de los automóviles. La precisión de estos equipos sobre la predicción de eventos como la precipitación pluvial no es totalmente exacta, es por esto que siempre se dan estimaciones. Cuando se busca información sobre la precipitación pluvial que se pueda presentar en el día, normalmente se obtiene el principal parámetro de interés que usan los hidrólogos, el cual es la tasa de lluvia R , en otras palabras, la densidad de flujo de masa promedio de agua (expresada en mm/h) que cae sobre un área determinada. Esta información es muy importante para muchas aplicaciones, pero no es la única, la tasa de lluvia no necesariamente nos revela la cantidad más adecuada para representar la lluvia a nivel macroscópico. En los problemas de

erosión del suelo, por ejemplo, la energía cinética promedio de la lluvia (Hassan, 2011), es un valor que está estrechamente relacionado con el tamaño y la velocidad de las gotas de lluvia que impactan en el suelo, por lo que estas variables pueden ser más importantes que la tasa de lluvia (Schleiss, 2012). Por esta amplia gama de aplicaciones e intereses, en ocasiones puede ser preferible trabajar con estas descripciones alternativas, más generales y más detalladas de la lluvia, como lo es la distribución del tamaño de la gota DTG (o DSD drop size distribution). La distribución del tamaño de la gota es una descripción alterna que se puede realizar a la precipitación en un periodo de tiempo, tener una referencia de la cantidad de gotas de lluvia que caen resulta benéfico, en especial conocer la forma y la distribución de su tamaño sirve para utilizarse en diferentes aplicaciones, como lo es el caso de estudio y desarrollo que se desea implementar, el cual es generar electricidad a partir de gotas de lluvia. Esta distribución del tamaño de la gota, es una descripción estadística general y detallada de la micro estructura de la lluvia, su propósito es resumir de manera eficiente (usando teorías de probabilidad y estadística) la gran cantidad de información sobre las gotas contenidas en un volumen de aire dado, haciendo las mediciones dentro de un volumen de un metro cúbico (1 m^3). en su definición tradicional, la distribución de gotas se usa para describir el número esperado de gotas que caen en 1 m^3 , una ilustración esquemática de este concepto se puede apreciar en imagen 6:

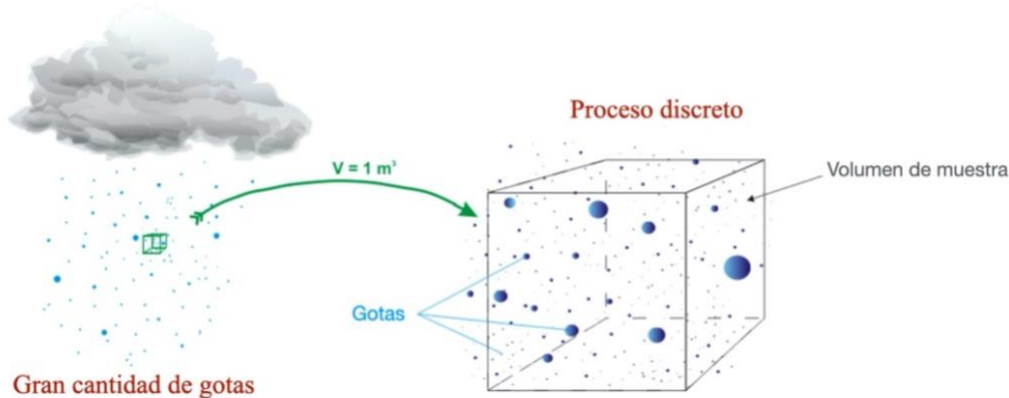


Imagen 6 Explicación gráfica del concepto de distribución del tamaño de gotas de lluvia (Schleiss, 2012).

Se debe de tener en cuenta que las gotas de lluvia en realidad pueden tener diferentes formas dependiendo de sus tamaños, pero para su estudio se describe a la gota de lluvia como una esfera perfecta, en donde su variable mas importante es el diámetro D .

- ❖ En promedio, 1 m^3 de aire generalmente contiene entre 100 a 1 000 gotas de lluvia con diámetros que varían entre 0.1 y 6 mm, la distancia promedio entre dos gotas de lluvia es de 10 cm (Schleiss, 2012).

Aunque estos espacios entre gotas son grandes en comparación con el tamaño de gota promedio, no es suficiente para evitar que las gotas de lluvia colisionen ocasionalmente entre sí, y cuando esto sucede, las dos gotas de lluvia pueden fusionarse para formar una nueva y grande gota (crecimiento de colisión), para después rebotar entre si y continuar su camino por separado o dividirse en muchas gotas diferentes y más pequeñas (ruptura de colisión). Cuando una gota se vuelve demasiado grande, se vuelve inestable y se descompone rápidamente en gotas más pequeñas y estables. Por otro lado, las gotas muy pequeñas pueden evaporarse o pueden ser atrapadas por pequeñas corrientes de aire ascendentes o por turbulencias (Schleiss, 2012). El conocimiento de la distribución del tamaño de gota en un volumen dado de aire es muy útil, permite derivar tamaños de gota característicos como el diámetro de gota media y mediana (que están relacionados con el tipo de precipitación) y muchas otras cantidades físicas importantes como la velocidad de caída promedio, la energía cinética promedio y la tasa de lluvia; datos importantes para diseñar un sistema que genere energía por este medio.

Parámetros importantes para la generación de energía

Los factores o parámetros clave que se necesitan estudiar y analizar sobre la generación de energía por medio de gotas de lluvia al impactar cualquier objeto o superficie son los siguientes:

1. El tamaño de la gota y su variación dependiendo del tipo de lluvia
2. La velocidad de caída de la gota
3. El tipo de impacto

El tamaño de la gota y su variación dependiendo del tipo de lluvia

Como se ha mencionada el diámetro de una gota de lluvia puede variar entre 0.1 mm y 6 mm; aun cuando se conoce que en una lluvia hay diferentes tamaños, se suele dar un promedio dependiendo del tipo de lluvia, en donde a mayor intensidad de la lluvia, mayor será el promedio del tamaño de gota. Algunos valores típicos promedio del tamaño de la gota de lluvia y la velocidad terminal (Adnan y Swingler, 2015) se presentan en la Tabla 4. El tamaño de la gota es importante porque al aumentar su diámetro, aumenta también su masa y volumen, lo que provoca que se esta genere mayor energía.

Tabla 5 Descripción del tipo de lluvia y su afectación sobre el tamaño y la velocidad de una gota de lluvia.

Tipo de lluvia	Tamaño de la gota (mm)	Velocidad terminal (m/s)
Lluvia estratiforme ligera		
Pequeña	0.5	2.06
Grande	2	6.49
Lluvia estratiforme moderada		
Pequeña	1	4.03
grande	2.6	7.57
Lluvia torrencial		
Pequeña	1.2	4.64
Grande	4	8.83
Más grande	5	9.09

La velocidad de caída de la gota

Para conocer mas acerca de la velocidad de una gota, se puede tratar a esta como un cuerpo indeterminado y aplicar la teoría de caída libre. En esta, lo que nos interesa es la descripción de la velocidad máxima o en este caso llamada velocidad terminal, esta descripción nos indica que todo cuerpo que cae en caída libre llegará en algún punto a una velocidad terminal, la cual ya no podrá incrementar. Wong, Dahari, Manaf, y Miskam (2014) nos describen las condiciones físicas que afectan la velocidad terminal de la gota de lluvia, siendo estas la presión hidrostática y la presión aerodinámica externa, también nos menciona que dos gotas con diferentes tamaños caerán a aceleraciones iguales en el vacío, pero desigualmente en presencia de aire. Esto se debe a las moléculas de aire causan una fuerza de fricción que se opone al movimiento de las gotas. Las gotas de lluvia más pequeñas tardarán un mayor tiempo en poder alcanzar su velocidad terminal a comparación de las gotas de lluvia mas grandes, las cuales alcanzarán su velocidad terminal de manera mas rápida, mientras la gota de lluvia va cayendo, esta recorre una cierta distancia en donde la resistencia del aire y la fuerza gravitacional de la gota son iguales, la fuerza neta es cero y la

aceleración ha terminado, en este punto la gota caerá a su velocidad terminal, lo cual nos presenta la siguiente afirmación:

“Las gotas más grandes caerán más rápido que las gotas más pequeñas”

Esto se puede apreciar en la tabla 4, donde la gota mas grande tiene una velocidad terminal mayor que las gotas pequeñas, se debe aclarar que esa **velocidad terminal se define como la velocidad máxima que la gota puede alcanzar**. Todas estas consideraciones y velocidades están calculadas sin tomar en cuenta al viento, el cual siempre esta presente en la lluvia y por el cual las gotas tendrán una mayor o menor velocidad, pero la aleatoriedad de la fuerza del viento hace que no se tome en cuenta para análisis de la velocidad de la gota de lluvia.

El tipo de impacto

La resistencia del aire, el ángulo de inclinación de la caída y la forma de la gota influirán en el tipo de impacto y en consecuencia en la energía cinética de la gota de lluvia. El comportamiento del impacto de una gota de lluvia será diferente dependiendo de su tamaño, así como la superficie donde esto sucede, por ejemplo, si se desea obtener la mayor energía cinética, la superficie no deberá tener condiciones es su estructura física que amortigüen el impacto de la gota, por ejemplo, la energía cinética del impacto de la gota será mayor si este se produce en una superficie solida. Se pueden distinguir algunos casos diferentes de impacto según las circunstancias en las que se produce, el resultado de esta colisión depende de las propiedades de la gota, la superficie donde se produce el impacto y el fluido a través del cual la gota viaja antes del impacto (Wong, Dahari, Manaf y Miskam, 2014). A este evento se le puede llamar como “el mecanismo de impacto”, este factor influirá significativamente en la energía potencial de salida de una lluvia. En general, el mecanismo de impacto de una gota que cae sobre una superficie sólida se puede dividir en cuatro categorías principales (Adnan y Swingler, 2015).

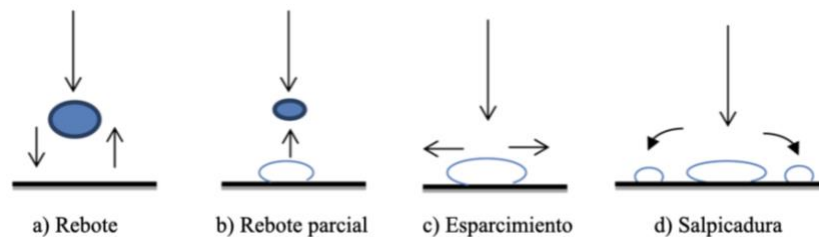


Imagen 7 Acción de una gota de lluvia después de impactar con una superficie solida

Se ha considerado el accionar de una gota de lluvia después de impactar con una superficie sólida y se han conocido ciertas implicaciones que se producen, en concreto (Adnan & Swingler, 2015) aseguran que **“la acción de salpicadura conduce a una pérdida de energía significativa”**. Esto nos subraya la importancia de tomar en cuenta la superficie donde se quiera que impacte la gota de lluvia en el diseño del sistema, para que no se genere una salpicadura y se logre una mayor transferencia de energía.

Distribución de los diámetros de las gotas de lluvia y de la intensidad sobre un evento en específico

Se pueden analizar las características que tiene el evento de una lluvia en específico sobre un periodo corto de tiempo, es decir, si el día de hoy en la tarde se produce una lluvia, se puede tener el registro de como sucedió y que valores se obtuvieron desde que esta comenzó hasta que terminó, siendo esto importante porque cuando sucede la lluvia esta no tiene una intensidad constante. Estos análisis suelen realizarse comúnmente en estudios sobre los efectos erosivos que tienen las precipitaciones pluviales

con una alta intensidad sobre el suelo, teniendo especial interés en la forma en que analizan el comportamiento de la lluvia y es por esto que a continuación se presenta un caso de estudio. El estudio realizado por Bienes et al. (2011), analizan: “la distribución de los tamaños de gota de un evento fuertemente erosivo”. El análisis de este estudio nos dio como resultado las siguientes condiciones que deben tenerse en cuenta cuando se proponga el diseño del sistema, en el apéndice A1.1 se encuentra la información detallada del estudio.

- ❖ *La intensidad máxima registrada en una lluvia puede durar 10 minutos*
- ❖ *Durante la intensidad máxima de lluvia, el diámetro medio de gota (D_{50}) se incrementa, por lo que las gotas de lluvia en ese momento son más grandes*
- ❖ *Otros factores como el viento deben de ser tomados de cuenta porque sus intensidades también cambian y son mas fuertes*

Estado del arte en el recurso pluvial para la generación de energía

Antecedentes de la utilización de lluvia para la generación de energía

Durante miles de años la principal utilización que el ser humano le ha dado a la lluvia es la de usarla para regar cultivos, basándose principalmente en conocer las épocas del año donde se tiene una mayor concentración de precipitación pluvial para aprovecharla de mejor manera. Otra función que se le ha dado al agua de lluvia es la de recolectarla para utilizarla posteriormente, esta práctica se ha perdido en gran parte de las ciudades debido al alcantarillado, esto se ha tratado de retomar y en la actualidad se diseñan e instalan sistemas específicos de recolección de lluvia, conocidos como Rain Water Harvesting (almacenamiento agua de lluvia), en donde, por medio de la utilización de canales y tuberías se crea una red que transporta el agua que cae sobre una superficie, hasta un tanque de almacenamiento; el uso que se le quiera dar a esa agua variará los componentes del sistema, filtros, bombas, etc. Este tipo de sistemas son comúnmente usados para uso doméstico y de agricultura, viéndose actualmente como una ayuda ambiental debido a problemas de escasez y distribución de agua que se tiene en muchas ciudades, por lo cual se desea su implementación a una gran escala ya que su utilización hoy en día es mínima comparada con las casas o lugares donde se pueda utilizar. Estas son las formas principales en las que se utiliza el agua de lluvia con fines benéficos para el hombre y el ambiente. Los conceptos que surgen de estas formas de utilizar el agua de lluvia son una base para llevar a cabo un sistema que use sus gotas para generar energía y más concretamente energía eléctrica; donde se pase por todos los procesos de desarrollo hasta llegar a la implementación y maduración de la energía.

Uso de la lluvia para generar energía eléctrica

Investigando sobre las formas que han sido propuestas y utilizadas para generar electricidad por medio de la lluvia y en específico de las gotas de agua, se han encontrado algunos estudios que plantean una idea de forma teórica, pero con supuestos factibles para poder generar energía, sin llegar a desarrollarla de forma experimental, además, también se presentan otros estudios donde se realiza una experimentación con un sistema ya desarrollado. A continuación, se presentarán los estudios mas relevantes a esta tesis

Propuestas teóricas

- Morarka, Ghaisas y Date (2016) experimentan con una propuesta que utiliza un alambre de cobre empotrado en cantilever, mientras se coloca un imán debajo de este, de forma que para generar energía eléctrica se utiliza el principio de electro magnetismo.

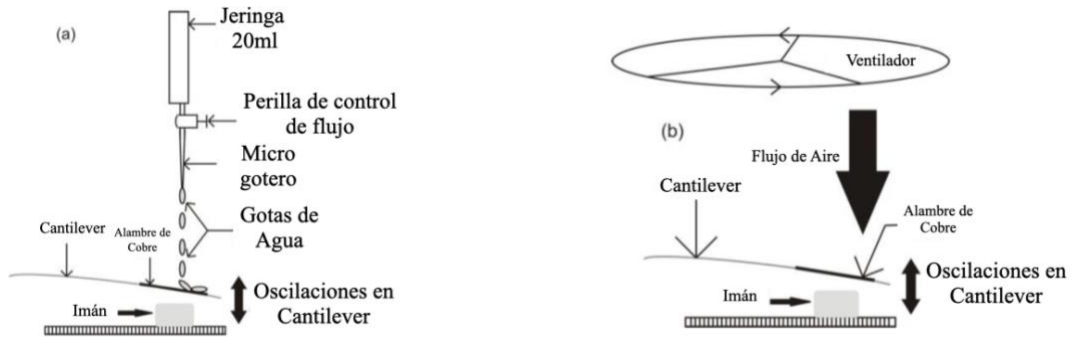


Imagen 8 a) y b) muestran la forma esquemática del arreglo propuesto

Esta propuesta utiliza la teoría de electromagnetismo para poder generar energía, esta idea presenta la utilización de un imán como campo magnético permanente y un alambre de cobre (bobina) montado en cantilever. Esto funciona cuando el alambre es movido por las gotas de lluvia que impacten sobre éste, provocando que vibre de forma que interactúe con el imán, lo que ocasiona un campo magnético y de esta forma teóricamente se producirá energía eléctrica (Morarka, Ghaisas y Date, 2016). Este planteamiento es interesante porque presenta una idea que puede funcionar con pocos elementos y de una forma simple, además, de que puede ser escalable, pudiéndose extender a múltiples alambres para múltiples golpeteos de gotas de lluvia. Su desventaja radica en la poca información que se presenta, donde no se tiene conocimiento del tipo de alambre (material, dimensiones), ni del tipo de imán, por lo que no se sabe que tan factible sea la idea ni que generación de energía eléctrica pudiera producir.

- Rosmin, Jauhari, Mustaamal, Husind y Hassane (2014) analizan las aspas de motores, de un solo cuerpo y de dos cuerpos para sistemas de recolección de agua, pensadas para generar energía cuando el flujo de agua o aire pase a través de ellas.



Imagen 9 a) y b) son los dos tipos de aspas de motor analizado (Rosmin, Jauhari, Mustaamal, Husind y Hassane, 2014).

Con esta investigación se tiene la idea de diseñar y montar generadores eléctricos de micro aspas, los cuales deberán moverse por la fuerza del viento y de las gotas de lluvia para generar electricidad, en esta investigación se analizan variables sobre la geometría de las aspas, para poder proponer la de mejor eficiencia. Las pruebas realizadas fueron con un caudal de agua continuo y no con gotas de lluvia, por lo que este sistema puede ser propuesto, pero para un paso posterior después de que las gotas de lluvia ya hayan impactado en una superficie, para dirigirla a algún canal que contenga estos micro generadores, similar al funcionamiento de una represa, pero en micro escala.

Propuestas con experimentación

Ahora se presentan los trabajos que dentro de su desarrollo han experimentado con las gotas de lluvia para generar energía, algunos de estas investigaciones están en una etapa preliminar por lo que los sistemas diseñados no representan un prototipo final y sus resultados aun pueden mejorar.

Un sistema dentro de otro sistema

Una forma en la que se ha pensado utilizar las gotas de lluvia es la de implementar un nuevo sistema dentro de otro sistema ya establecido, como el de las celdas solares, esto con la intención de aprovechar ambos recursos, este concepto es presentado en una investigación tecnológica proveniente de China, Tang, Wang, Peizhi, y He (2016) exponen en su investigación el desarrollo de una tecnología innovadora de panel solar que puede transformar las gotas de lluvia en energía eléctrica. Este nuevo diseño de celda solar puede ser “accionado” tanto por gotas de lluvia como por los rayos solares, esta tecnología combina un electrodo de grafeno enriquecido con electrones con una celda solar sensibilizada por colorante. Qunwei Tang³ que este tipo de celda todavía se encuentra en una etapa preliminar, puesto que la parte que transforma la energía solar en eléctrica tiene un menor rendimiento con respecto a las celdas solares actuales y la captura de energía por lluvia todavía no es muy significativa. Aparte del gran coste que aún tiene esta tecnología, esta celda solar es solo eficiente en un 6.5% en condiciones de sol optimas, mientras que las mejores celdas solares hoy en día tienen una eficiencia aproximada del 20%, además de que la parte de generación por gotas de lluvia produce mediciones en micro volts, voltajes que se consideran pequeños.

Experimentación con materiales piezoeléctricos

El segundo trabajo analizado es presentado por Zyga (2008), desarrollado por un grupo de científicos del CEA/Leti-Minatec un instituto en Grenoble, Francia. Los datos más importantes que se obtuvieron de esta investigación, muestran que en una de sus simulaciones pudieron recuperar hasta **12 mili watts de energía, de una de las gotas más grandes**. Se utilizó un **material piezoeléctrico hecho de polímero PVDF (fluoruro de polivinilideno)**, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica, el material usado fue un film de PVDF de 25 micrómetros de espesor. Además, se experimentó con diferentes tamaños de gotas de lluvia, alturas y velocidades de caída. Como observación, se menciona que el viento es un elemento a tener en cuenta ya que frena la caída de las gotas, por lo que la energía de impacto de las gotas no será igual que sin la consideración de este elemento (como en un experimento en un laboratorio). Una conclusión importante a tomar en cuenta es la siguiente:

- ❖ **“La energía recuperable depende directamente del tamaño de la membrana piezoeléctrica, el tamaño de las gotas y su frecuencia” Zyga (2008).**

Compilación de investigaciones utilizando materiales piezoeléctricos para generar energía a través del impacto de una gota de lluvia

Para completar lo mostrado por el trabajo anterior se presenta una compilación de investigaciones que tienen como objetivo utilizar diferentes materiales piezoeléctricos, con diferentes geometrías para generar electricidad, así como comparar diversas formas de montar estos materiales piezoeléctricos, esta compilación es realizada por Chua, Hor y Lim (2016). Las conclusiones, resultados y anotaciones más importantes obtenidas de este trabajo son las siguientes. El **rendimiento** de los cosechadores (el material piezoeléctrico conectado a un sensor) se puede **discutir en términos de eficiencia de conversión, potencia de salida y densidad de potencia**. La potencia de salida de estos cosechadores piezoeléctricos estaba en el **rango de μW (micro Watts)**, la **densidad de potencia más alta** lograda de forma experimental fue producida **por la estructura de puente**, su valor fue de **$0.24 W / m^2$** , usándose un material piezoeléctrico de PVDF. Existen discrepancias entre las investigaciones para definir cual es la estructura de montaje que mejores resultados de generación arroja, concretamente en las estructuras en donde el piezoeléctrico esta montado en cantilever y las estructuras donde esta anclado en sus dos extremos de manera que forma un ‘puente’. Por lo tanto, **aún no es concluyente** qué

³ profesor de la Universidad Oceánica de China

combinaciones de material piezoeléctrico y tipo de estructura proporcionan la mayor eficiencia de conversión de energía. En general la eficiencia de conversión es bastante baja, registrando menos del 1%. Sin embargo, una de las investigaciones realizó una simulación que mostró que debería lograrse una eficiencia de conversión del 2.5%. Además, los estudios de recolección de energía piezoeléctrica a partir de fuentes de vibración constantes indicaron que también se puede lograr una eficiencia de hasta el 46%. Esto proporcionó las bases para que Chua, Hor y Lim (2016) señale que se puede optimizar la eficiencia de conversión y la densidad de potencia buscando el mejor material piezoeléctrico, su geometría y el circuito de interfaz para aumentar la producción de energía y reducir la pérdida, con lo cual, esta compilación muestra que utilizar material piezoeléctrico para convertir el impacto de gotas de lluvia en energía eléctrica tiene enfoque prometedor, pero aún está en su etapa embrionaria, el campo está abierto, con muchas oportunidades de investigación.

Hallazgos del estado del arte

Se presentan los siguientes hallazgos para tener como base en el desarrollo del diseño del sistema que se desea hacer. Estos se agrupan de acuerdo a sus consideraciones previas de diseño, condiciones iniciales generales, materiales elementales y funcionamiento propuesto, estos se muestran en el siguiente diagrama:

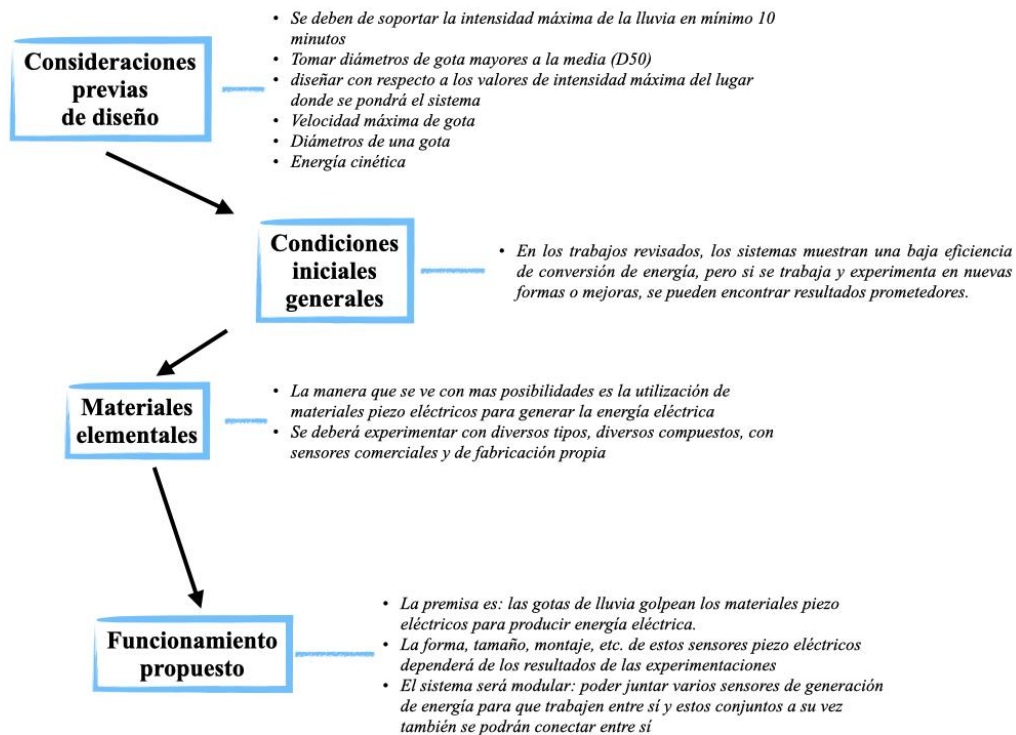


Diagrama 1 Aspectos para tener como base en el desarrollo del diseño del sistema

Capítulo 2

Materiales piezoeléctricos

Capítulo 2 Materiales piezoeléctricos

Introducción a los materiales piezoeléctricos

Materiales piezoeléctricos por su configuración química

La idea que se plantea desarrollar de utilizar la lluvia y más concretamente la energía que se produce con el impacto de las gotas que caen nos lleva a centrarnos a un nivel de micro producción, por lo cual se necesitan dispositivos que utilicen vibraciones, pequeños movimientos o ruidos para generar pequeñas cantidades de energía. Estos requerimientos se pueden encontrar en materiales piezoeléctricos. Investigaciones como la de Wong, Dahari, Manaf y Miskam (2014) describen al enfoque de usar materiales piezoeléctricos como un método simple, que ofrece una conversión directa de energía de vibración a energía eléctrica sin la necesidad de tener una fuente de alimentación externa. La forma en que funcionan los materiales piezoeléctricos es:

- ❖ *Se produce una carga eléctrica cuando el material sufre una tensión mecánica, es decir, cuando se deforma el material; e inversamente se puede producir la deformación del material si se aplica una carga eléctrica.*

El comportamiento de un sensor piezoeléctrico es ideal para ser utilizado en la tarea de generación que se necesita, por lo tanto, se tienen que analizar los diferentes tipos de compuestos de materiales piezoeléctricos, debido a que cada compuesto tiene variaciones en su generación de energía, los dos compuestos más comunes son:

- Titanato de circonato de plomo (PZT)
- Difluoruro de polivinilideno (PVDF)

Algunas de sus diferencias radican en que los dispositivos PZT han sido considerados como un posible reemplazo para las baterías en algunas aplicaciones debido a su alto carácter piezoeléctrico y a su salida de energía, mientras que los materiales de PVDF se utilizan principalmente en aplicaciones que requieren un mayor grado de flexibilidad mecánica y transparencia óptica (Adnan & Swingler, 2015). Para las necesidades que se tienen de producción de energía, se contempla al material piezoeléctrico de PVDF como la mejor opción, debido a estas características mecánicas, un ejemplo de esto es que se requiere que el material soporte la mayor cantidad de vibración posible, para que pueda generar una mayor cantidad de energía.

Presentación de conceptos

Una característica de los materiales piezoeléctricos a utilizar es la de aprovechar la vibración del material como una deformación del mismo, al crear una vibración en el piezoeléctrico, este se transformará en una señal eléctrica con voltaje y corriente. El principio es el de golpear al material piezoeléctrico con una gota de lluvia para generar esta vibración; durante esta vibración se generará una señal eléctrica con picos positivos y negativos de voltaje que durarán un pequeño periodo de tiempo, este tipo de corriente se denomina corriente alterna (CA). Esta señal en CA que sale del piezoeléctrico no puede ser utilizada en forma directa, para poder usar esta señal se debe de rectificar para convertirse a corriente continua (CC), ya que la mayoría de dispositivos electrónicos trabajan con esta corriente. Algunas investigaciones han podido usar la señal de salida del piezoeléctrico haciéndola pasar por un rectificador de puente de CA a CC, seguido de una capacitancia de filtrado para eliminar las fluctuaciones residuales del voltaje de CC rectificado; donde un regulador o batería este ubicado entre el capacitor y el voltaje de salida, la batería es usada para almacenar la energía

generada y para dar una señal del circuito regulada, de forma que pueda ser usada para alimentar algún dispositivo electrónico (Wong, Dahari, Manaf, & Miskam, 2014). Este principio para convertir la energía mecánica (la vibración) que se le aplica al piezoelectrico para que este genere energía eléctrica se puede apreciar en la imagen 10:

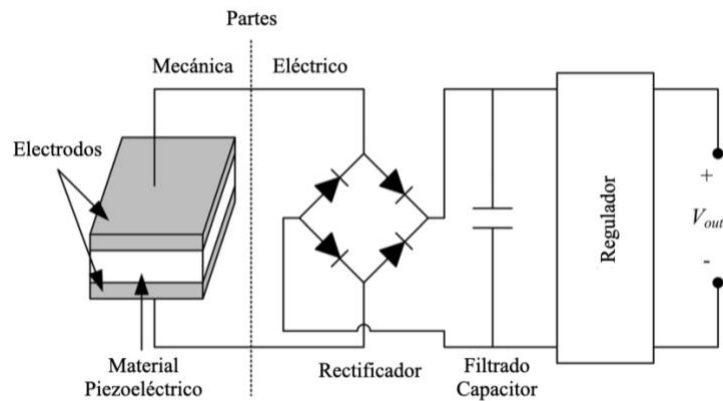


Imagen 10 Esquema del circuito eléctrico usado para rectificar la señal producida por un piezoelectrico (Wong, Dahari, Manaf, & Miskam, 2014).

La energía eléctrica de salida que se puede utilizar debe ser comparada con la energía eléctrica teórica que produce el impacto de una gota sobre cualquier superficie, esto con el fin de conocer la eficiencia que se tiene en la conversión de energía. La energía eléctrica teórica máxima que puede producir una gota de lluvia se puede ver como potencia máxima (' P_{max} ' en watts), esto es, viendo al sistema sin pérdidas de energía, mientras que la energía real que se produce durante la conversión se puede ver como potencia de salida (' P_{out} ' en watts), la cual siempre será menor, ya que muchas variables ocurren dentro de esta conversión y nunca se puede obtener una eficiencia del 100%. La potencia de salida real se puede ver como (Wong, Dahari, Manaf, & Miskam, 2014):

$$P_{out} = \eta_{impact} \eta_{piezoelectric} \eta_{rectify} P_{max}$$

Ecuación 1 Ecuación de la potencia real ' P_{out} ' que se genera por la energía liberada sobre un piezoelectrico cuando una gota de lluvia cae sobre el (Wong, Dahari, Manaf, & Miskam, 2014).

- P_{max} (watts) es la potencia máxima de salida teórica (sin considerar la pérdida de energía)
- P_{out} (watts) es la potencia de salida real (considerando la pérdida de energía)
- η_{impact} es la eficiencia del impacto de la gota de lluvia
- $\eta_{piezoelectric}$ es la eficiencia del material piezoelectrico
- $\eta_{rectify}$ es la eficiencia en la conversión de potencia

La eficiencia real de un sistema reduce las condiciones teóricas de salida que se tienen, por lo cual el objetivo debe ser mejorar la eficiencia en las variables que actúan sobre el sistema. Una manera de realizar esto es desglosar los parámetros importantes que actúan en el evento de la caída e impacto de una gota de lluvia sobre el material piezoelectrico. Como se ha mencionado en el capítulo anterior, estos parámetros son: **el tamaño de la gota, su velocidad de caída, y el tipo de impacto contra una superficie**. El tamaño de la gota y su velocidad son condiciones que no se pueden controlar, pero en el tipo de impacto contra una superficie se puede tener un mayor control, comenzando por proponer una superficie de impacto que evite condiciones que disminuyen la energía que se transfiere, un suceso importante a evitar en el momento de impacto es la de salpicadura, según Adnan y Swingler (2015) "la acción de salpicadura conduce a una pérdida de energía significativa, además, el mayor impacto de la gota de lluvia sin salpicaduras provoca mayores vibraciones de la membrana, lo que generará una mayor cantidad de energía eléctrica". Todos estos parámetros son importantes porque influyen directamente en la energía cinética que tiene una gota de lluvia al caer.

La energía cinética de una gota

La energía cinética de una gota de agua de lluvia está relacionada con los parámetros anteriores, el tamaño y velocidad de caída, en pocas palabras se puede decir que cuanto más grande es la gota y con mayor velocidad, mayor será la energía cinética que genera. Teóricamente, para calcular la energía cinética de una gota de lluvia, se requieren su volumen (V), masa (m) y velocidad (v), esta energía es el valor máximo que puede representar una gota de lluvia y como anteriormente se ha descrito es el valor al cual las eficiencias del sistema harán que disminuya. En este modelo se puede decir que cuanto más grande es la gota y mayor velocidad posea, mayor será la energía cinética que genera. El propósito de este análisis es ser la base para establecer un diseño de un mecanismo que transfiera la energía cinética a energía eléctrica, con las menores pérdidas de energía posibles durante este proceso. Actualmente estudios como el de Adnan y Swingler (2015) detallan una eficiencia en la transferencia de la energía cinética teórica a energía eléctrica aprovechable de apenas el **0.12%**, lo cual es realmente bajo y ha hecho que no se indague mas sobre el tema, pero de la misma forma es una oportunidad de poder incrementar esta eficiencia.

Resultados experimentales preliminares de la recolección de energía de gotas de lluvia

Se analizarán casos concretos de investigaciones donde se experimenta con la manera en que se puede generar energía por medio de gotas de lluvia, tratando de encontrar con una mayor eficiencia, estos estudios han dejado evidencia concreta de las condiciones en que los piezoeléctricos deberían de ser usados. Conocer la forma explícita de como montar los piezoeléctricos es vital para tener una referencia al momento de plantear el diseño del sistema que se desea elaborar y no partir desde cero. Razón por la cual se necesitan conocer dos aspectos, por una parte, los valores de energía que se pueden producir y por otra los detalles importantes de las formas de montaje, para poder organizar una estructura que contemple todo esto. Además, se obtiene una noción de como comenzar con las experimentaciones propias, de forma que se entiendan las características importantes a tomar en cuenta, así como de las mediciones que se deben de tomar. Para esto se han estudiado tres investigaciones que experimentan con arreglos de materiales piezoeléctricos diferentes para generar energía eléctrica; a continuación, se expone un resumen de lo más importante de estas investigaciones.

Primer estudio

El primer estudiado fue el realizado por Wong, Dahari, Manaf y Miskam (2014), este tiene su importancia en la experimentación realizada sobre la energía generada por una gota de lluvia sobre materiales piezoeléctricos acomodados de dos formas: una colocando un piezoeléctrico de forma que quede como viga empotrada (estructura en cantiléver) y otra colocando al piezoeléctrico como puente anclando en sus dos extremos, estos arreglos se muestran en la siguiente imagen.

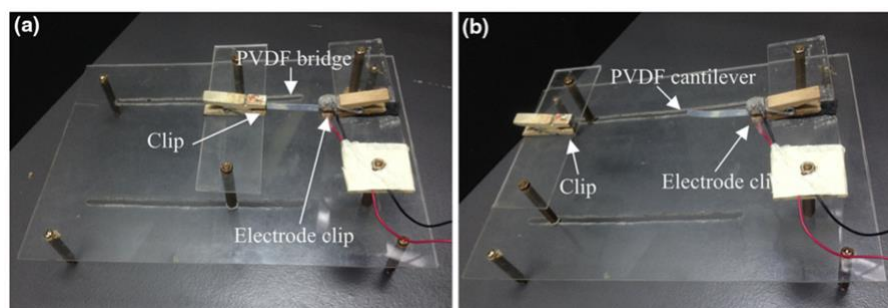


Imagen 11 Montaje del material piezoeléctrico: (a) en puente y (b) cantiléver (Wong, Dahari, Manaf y Miskam, 2014).

Tabla 6 Condiciones iniciales, montaje de los piezoeléctricos y resultados obtenidos del primer estudio

Materiales usados	Lamina de PVDF
Tamaños	4 mm de ancho X 30 mm de largo Grosos de: 9 micro metros 25 micro metros 40 micro metros
Acomodo del piezoeléctrico	En puente En cantiléver
Cargas usadas para caracterización de la señal	No se usaron
Voltajes máximos alcanzados	En puente: Voltaje máximo de 3.502 V entre los grosos de 20 y 30 micro metros En cantiléver: Voltaje máximo de 1.003 V entre los grosos de 20 y 30 micro metros

Segundo estudio

En este estudio Viola, Romano, Miceli y Acciari, (2013) analizan la energía eléctrica generada por medio de gotas de lluvia al impactar dos diferentes tipos de materiales piezoeléctricos que se pueden conseguir comercialmente (piezoeléctrico de PDVF ‘Meas LTD1-028k’ y piezoeléctrico de PZT ‘V22B’/ ‘V22B’). La imagen siguiente muestra el montaje usado en estos piezoeléctricos.

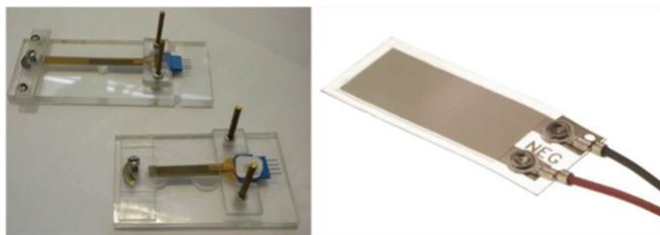


Imagen 12 Materiales piezoeléctricos utilizados, en la imagen a la izquierda (a) Piezoeléctrico de PZT V22B y V22BL, en la imagen de la derecha (b) Piezoeléctrico de PDVF “Meas LTD1-028k” (Viola, Romano, Miceli y Acciari, 2013).

Tabla 7 Condiciones iniciales, montaje de los piezoeléctricos y resultados obtenidos del segundo estudio

Materiales usados	Piezoeléctrico de PDVF “Meas LTD1-028k” Piezoeléctrico de PZT V22B y V22BL
Tamaños	3,3 mm de ancho X 25-30 mm de largo
Acomodo del piezoeléctrico	En puente PZT En cantiléver los PDVF
Cargas usadas para caracterización de la señal	PZT las cargas fueron de 10, 22, 47, 100, 220, 470 k ohm. PDVF las cargas fueron de 10, 15, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82, 100, 150, 180, 470 k ohm

Potencia máxima alcanzada	<p>Piezoeléctrico PZT: Volture V22B - Potencia máxima de $8.20E-07$ W entre las cargas de 30 a 150 k ohm Volture V22BL Potencia máxima de $8.80E-07$ W entre las cargas de 30 a 150 k ohm</p> <p>Piezoeléctrico de PDVF: Potencia máxima de $4.60E-06$ W entre las cargas de 30 a 70k ohm</p>
---------------------------	---

Tercer estudio

En este tercer estudio Adnan y Swingler (2015) analizan el comportamiento de un arreglo de lámina piezoeléctrica de PVDF en cantilever, a la cual se colocó una zona de impacto a la mitad de su longitud, este piezoeléctrico fue adquirido comercialmente (piezoeléctrico ‘Pro-Wave FS-2513P’), el esquema de su montaje es el siguiente:

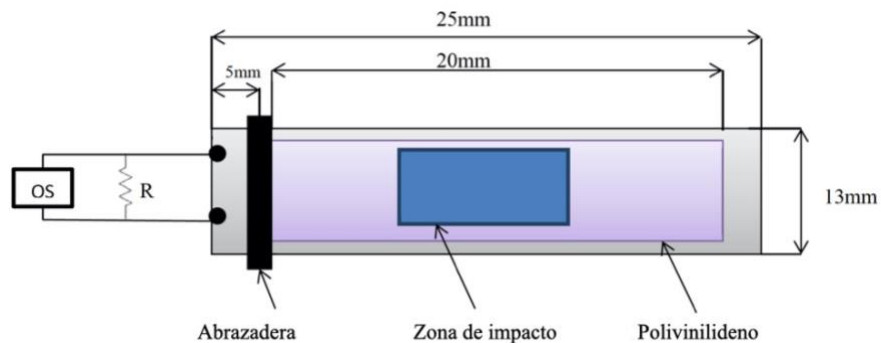


Imagen 13 Dispositivo piezoeléctrico ‘Pro-Wave FS-2513P’ montado en cantiléver, posicionado debajo de una bureta (Adnan y Swingler, 2015).

Otro dato importante a mencionar de esta investigación, es la caracterización de la señal de voltaje producida una vez que una gota impacta al dispositivo, su comportamiento se puede observar en la siguiente imagen. Esta imagen hace una representación de las oscilaciones sinusoidales resultantes, las cuales nos indican el fenómeno que esta ocurriendo, este se describe de la siguiente manera:

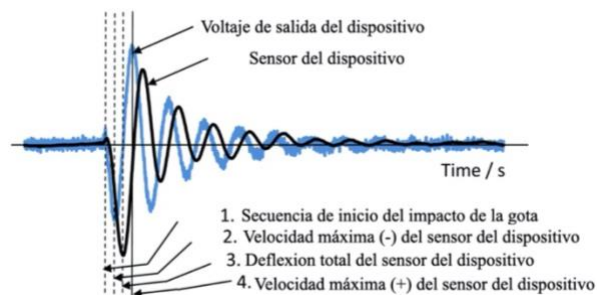


Imagen 14 Perfil de salida de voltaje del dispositivo (Adnan y Swingler, 2015).

Cuando la gota de agua cae sobre la lámina de piezoeléctrico, lo comienza a empujar hacia abajo, empezando a producir las diferentes oscilaciones que se generan en la señal. *La posición 1*, la “secuencia de inicio del impacto de la gota” a *la posición 2*, la “velocidad negativa máxima del sensor”. El piezoeléctrico acelera durante este tiempo y alcanza una velocidad negativa máxima en

la posición 2, lo que resulta en un voltaje negativo máximo. Luego, el piezoeléctrico desacelera y alcanza su desviación completa en la posición 3, la "desviación completa del dispositivo", lo que da como resultado un voltaje cero, después el dispositivo comienza a rebotar y vuelve a acelerar en la dirección opuesta alcanzando su velocidad positiva máxima en la posición 4 "velocidad máxima positiva del sensor". **Esto da como resultado una salida de tensión positiva máxima, que es la magnitud de tensión máxima de todo el evento.** Después de este punto en el evento, las oscilaciones de la salida de voltaje y las oscilaciones de desviación del sensor desaparecen (Adnan & Swingler, 2015).

Tabla 8 Condiciones iniciales, montaje de los piezoeléctricos y resultados obtenidos del tercer estudio

Materiales usados	Lamina de PVDF Pro-Wave (FS-2513P)
Tamaños	13 mm de ancho X 25 mm de largo X 3 mm ancho
Acomodo del piezoeléctrico	En cantiléver
Cargas usadas para caracterización de la señal	Cargas resistivas de 1 MU ($\pm 5\%$), 1.8 MU ($\pm 5\%$), 2.2 MU ($\pm 5\%$), 2.7 MU ($\pm 5\%$), 3.3 MU ($\pm 5\%$) y 4.7 MU ($\pm 5\%$)
Voltajes máximos alcanzados	Voltaje máximo de 3.7 V con una altura de cada de la gota de 47 cm, entre las cargas de 2 y 3 Mega ohm

Hallazgos de los tres experimentos

Estos estudios nos dan información de que materiales utilizar, cuales montajes considerar y los resultados que se esperan, del análisis de estos tres estudios se obtuvieron las siguientes anotaciones que ayudarán en el diseño del sistema a construir.

- ❖ *Se pueden conseguir láminas de piezoeléctrico comerciales o se pueden fabricar o modificar de acuerdo a necesidades específicas.*
- ❖ *Las dos estructuras de montaje que mas se adaptan a las necesidades del sistema a diseñar son el montaje en puente y el montaje en cantiléver*
- ❖ *La estructura de montaje en cantilever produce una señal de vibración con un pico máximo negativo y positivo que va descendiendo hasta llegar a cero*
- ❖ *La estructura de montaje en puente produce una señal mas referente a un pulso, esta tiene un pico máximo y se estabiliza de forma casi instantánea*
- ❖ *Los voltajes máximos obtenidos rondan los 4V, los cuales son los valores a mejorar en nuestra experimentación.*

Cálculos y predicciones

Después de analizar las investigaciones anteriores y conocer los valores de generación que presentan, se procederá a calcular valores propios, usando suposiciones y condiciones de trabajo propias. Se necesita comparar la potencia teórica generada por una gota de lluvia con la potencia que se obtenga dentro de la experimentación, de modo que se podrá conocer la eficiencia que tiene nuestro sistema, para en consecuencia hacer mejoras continuas a través de iteraciones de diseño. La eficiencia máxima que se pudo conocer en los trabajos estudiados fue solamente del **0.12%**, esta es de una única gota de agua, por lo que este valor será utilizado para calcular los valores mínimos que se deberían obtener, y será un punto de partida para proponer mejoras.

Calculo teórico de la energía cinética de una gota de lluvia

Para obtener la máxima energía cinética teórica se necesita saber de la velocidad máxima que puede tener una gota de lluvia, la velocidad terminal máxima de una gota de lluvia es en promedio de 10 m/s, como se puede ver en la Tabla 4. Para comenzar, se propone calcular los valores máximos y mínimos que se puedan obtener de una lluvia, los cuales serán, el tamaño y velocidad mas grandes como valores máximos, mientras que el tamaño y velocidades menores como valores mínimos. Para tener un valor más real de cómo sería el comportamiento de la generación de una gota de lluvia sobre un sistema de piezoeléctrico, se utilizará el valor obtenido de la eficiencia de 0.12%.

Tabla 9 Datos del tamaño del diámetro y velocidad máxima terminal basado en la tabla 12 y en los valores utilizados en las investigaciones antes analizadas.

<i>Gotas</i>	<i>Valores Máximos</i>	<i>Valores mínimos</i>
Tamaño diámetro	5 mm	1.2 mm
Velocidad máxima terminal	10 m/s	5 m/s
Energía Cinética	0.003262 Nm o J	1.1275E-05 Nm o J
Watt segundo	0.003262 Ws	1.1275E-05 Nm o J
Watt hora	11.74 Wh	0,0405 Wh
Potencia en Wh	11.74 Wh	0,0405 Wh
Eficiencia de 100 %		
Potencia en Wh	0.0014094 Wh	4.8711E-06 Wh
Eficiencia de 0.12%		
No. gotas para que la eficiencia del 0.12% alcance 1 Wh	710 gotas	205 291 gotas
No. litros para que la eficiencia del 0.12% alcance 1 Wh	0.0355 L o 35.5 ml	10.264 L

Como se puede observar para generar 1 Watt hora se necesita que caigan un gran numero de gotas sobre un piezoeléctrico, para tener una mejor lectura se procederá a convertir el numero de gotas en litros. Esto significa que se necesita que caigan continuamente 35.5 ml o 710 gotas con valores máximos en un punto específico, es decir, en el área de impacto del material piezoeléctrico. La precipitación pluvial puede dar conocer la cantidad de agua que cayó sobre un lugar específico, esta cantidad de agua se mide en milímetros de altura por un área (1 m²) y esto a su vez es igual a 1 litro (L). Con esto se puede estimar que, si la cantidad de agua que cae en un día en temporada de lluvia (de mayo a octubre) sobre la CDMX (lugar de interés) es 130 mm al día en promedio (Weather-mx & CONAGUA, 2020), esto equivaldría a que cae 130 L sobre un metro cuadrado. Ahora, se entiende que los 130 L caen sobre un área de 1 m², por lo tanto, si un solo sensor piezoeléctrico con medidas de 4 mm X 30 mm (véase tablas 5,6 y 7) tiene una superficie de 120 mm² o 1.2X10⁻⁴ m, entonces a un solo sensor de esas medidas dentro de un área de 1 m² solo le caerán 0.0156 L o 15.6 ml, esto quiere decir que:

- ❖ Si se desea que en una lluvia promedio de 130 mm de precipitación al área que representan los sensores piezoeléctricos le caigan 10.246L⁴ en 1 m² deberá haber 657 de estos sensores

En una lluvia normal es difícil que las gotas golpeen un punto específico continuamente, pero esta es aproximación teórica que sirve como base para tener una noción de que se puede esperar al momento de: primero, experimentar con diferentes tipos de sensores piezoeléctricos, con la intención de utilizar

⁴ Valor mínimo de gota para que la eficiencia del 0.12% alcance 1 Wh

los que mejores resultados muestren, para después, idear una forma de montarlos en un dispositivo de generación de energía que utilice varios de estos al mismo tiempo.

Modelos propuestos de sensores piezoeléctricos para experimentación

Analizadas las diferentes investigaciones que se han hecho sobre la energía generada por medio de una gota de lluvia y los valores propios calculados, se procederá a plantear nuestros propios modelos, experimentado con diferentes tipos de sensores piezoeléctricos, así como diferentes formas de montarlos en una estructura, esto con el fin de fabricar un dispositivo que pueda generar electricidad por medio del impacto de gotas de lluvia. Se partirá en una primera instancia con la prueba de materiales piezoeléctricos en sensores ya hechos, los cuales sean fáciles de conseguir, siguiendo y dependiendo de resultados, con sensores piezoeléctricos más específicos o en su caso de fabricación propia. Esto se hace porque simplifica el trabajo que se desea realizar, si los resultados obtenidos de la generación de energía de los sensores piezoeléctricos comerciales no son redituables o no cumplen las expectativas, se pasará a probar nuevas formas de modificar o agrupar sensores, por el contrario, si los resultados son satisfactorios, entonces ya no hace falta experimentar con otros sensores. Entonces, dependiendo de que suceda, se verá la alternativa de fabricar sensores piezoeléctricos desde cero, para esto se analizará información de las estructuras de diferentes sensores. Esta opción puede ser mas interesante de probar, debido a que se pueden fabricar los sensores para diferentes estructuras de montajes, siendo las dos de mayor interés a probar, la estructura en puente y la estructura en cantilever. La fabricación de sensores piezoeléctricos puede ser más compleja, pero al mismo tiempo puede proporcionar mejores valores de generación de energía, por lo que los resultados de los sensores obtenidos dictarán los experimentos a seguir. En un inicio se partirá con el siguiente esquema de experimentación:

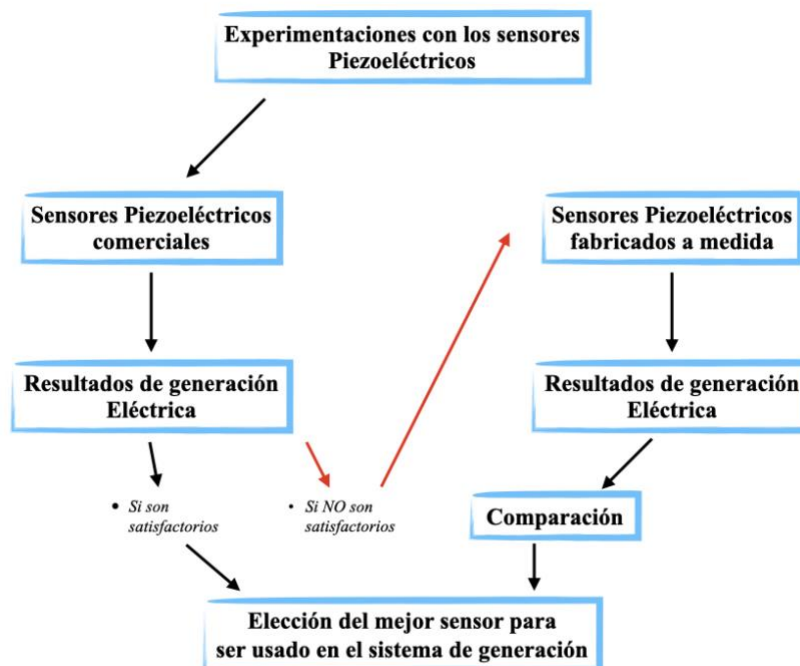


Diagrama 2 Esquema de experimentación con los sensores piezoeléctricos

A continuación, se hará una breve reseña informativa de los sensores con los que se experimentará, los sensores piezoeléctricos que se pueden obtener comercialmente y la información general de como funcionan los sensores que se desean fabricar.

Sensor piezoeléctrico de tipo 'Buzz'

Estos dispositivos se utilizan principalmente para alarmas y controles de sonido con un pequeño margen de frecuencia, como en los electrodomésticos. Este sensor piezoeléctrico puede estar conformado por materiales cerámicos o cristales iónicos que son capaces de generar una pequeña energía eléctrica cuando estos son deformados (Mecafenix, 2018). Estos sensores son ideales para empezar a experimentar, su funcionamiento es sencillo, se deforma o se oprime el disco cerámico y en consecuencia este produce una señal de energía que es transmitida por medio de la placa de metal a los cables, por los cuales se puede monitorear esta señal. De modo que la idea a probar es la siguiente: se montará un gotero con el cual se pueda controlar la distancia y el tamaño de gotas, para que estas salgan y caigan de forma que impacten directamente sobre los sensores, esto hará que los sensores produzcan una señal de energía, la cual será recabada y analizada. Este tipo de sensores, por sus características deben de ser montados como una estructura en puente, debido a que por sus dimensiones y a su geometría se recomienda que solo el centro del sensor sea el que vibre, motivo por el cual su comportamiento se prevé similar a los sensores montados en estructura de puente que se han visto anteriormente. Por tal motivo, los resultados que se obtengan de las experimentaciones que se realicen a este sensor, también nos indicarán el comportamiento de la estructura en puente y la forma en que esta afecta la señal que produce en sensor.

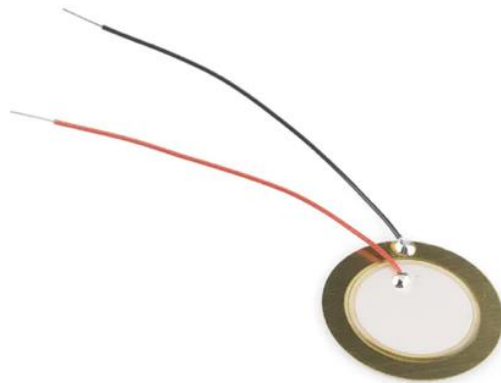


Imagen 15 Piezoeléctrico de tipo 'buzz' (Mecafenix, 2018).

Sensores piezoeléctricos de una capa o de dos capas 'bimorph'

Estas configuraciones de sensores consisten en una placa estructurada por una o dos láminas de material piezoeléctrico sobre un soporte medio, la cual debe estar empotrada para crear un efecto de viga en cantilever, lo que provoca que este "sándwich" piezoeléctrico tenga movimientos de flexión, torsión y estiramiento. Al momento de que ocurren estas deformaciones es cuando se produce energía eléctrica, siendo la deformación de flexión la que más interesa al momento del impacto con una gota de agua, ya que es la que se produce cuando la 'viga' vibra. La torsión y estiramiento también producen energía, pero no se recomienda que existan en un gran porcentaje o que sean muy continuas ya que estas fatigan al material ocasionando que se produzca una falla (que se rompan o doblen las láminas). En la imagen siguiente se puede ver la estructura de un sensor piezoeléctrico de dos capas 'Bimorph' (Chattaraj & Ganguli, 2018), así como los movimientos antes mencionados, la flexión, torsión y estiramiento.

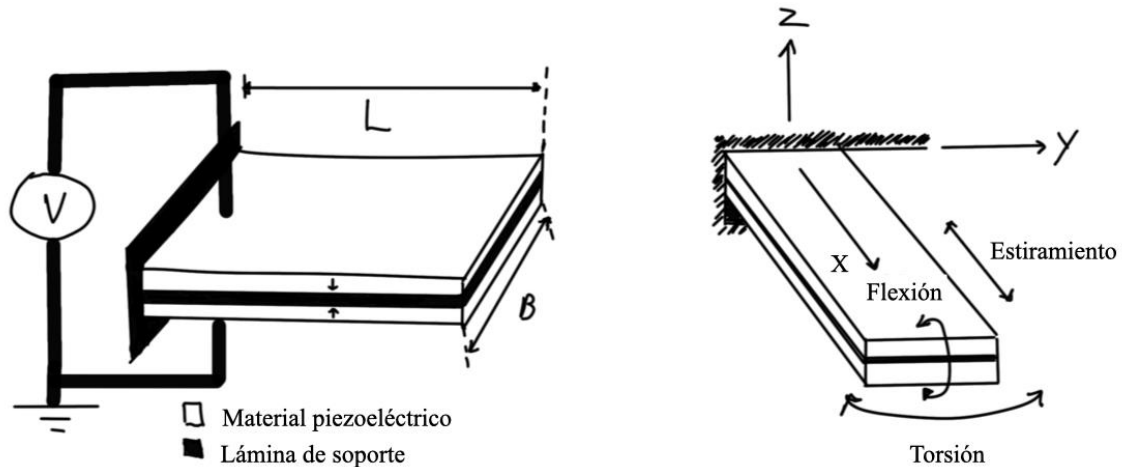


Imagen 16 Esquema gráfico de un piezoeléctrico 'bimorph' como viga en cantiléver (Chattaraj & Ganguli, 2018), b) Esquema gráfico de los movimientos de flexión, torsión y estiramiento.

La forma en como se cuantifica el movimiento del sensor empotrado en cantiléver en su oscilación de flexión, es con la frecuencia que este describe, siendo a mayor valor de la frecuencia la mayor rapidez en la que el sensor realiza el movimiento de flexión de arriba a abajo, esto también trae un mayor consumo de electricidad. **A mayor frecuencia Hz - Mayor energía eléctrica requerida.** Este movimiento a diferentes frecuencias produce vibraciones, lo que en algunos casos es lo que se desea como una aplicación y en nuestro caso en particular es la aplicación de esta idea, pero de forma inversa, producir mecánicamente esta vibración para que se cree una frecuencia de movimiento lo más alta posible en el sensor piezoeléctrico, para que se genere energía eléctrica. La frecuencia a la que pueden llegar a trabajar puede ir de los 1 Hz a los 250 Hz.

Enfoque de vinculación con el sistema antes de la experimentación

Con todo esto ya se puede empezar la experimentación, pero antes de hacerla se debe tener en cuenta la visión que tiene el diseño de sistema que abarca el vínculo que se puede generar sobre las personas que estén a su alrededor y en concreto las personas que lo usen. Se debe investigar y adentrarse más en este tema, porque se desea influir en la relación persona – sistema, se tiene como objetivo el que el sistema incentive a las personas a que utilicen este tipo de sistemas de micro generación de energía de fuentes alternas, para que cada día la generación total de una casa, municipio, ciudad y hasta país sean con recursos renovables que ayuden al medio ambiente y en consecuencia a los seres vivos. También se debe evitar que el sistema necesite de técnicos especializados para su instalación o uso, y si no se puede evitar que los componentes utilizados en el diseño final del sistema tengan cierta complejidad, entonces también deberá de haber una ayuda para fabricarlos o instalarlos, esto ya sea con una plataforma o comunidad que permitan que las personas no pierdan el interés. Esto será desarrollado en el siguiente capítulo, con la intención de que se produzcan ideas, conclusiones, anotaciones, característica, etc., que estén a la par con las condiciones que se han visto de los materiales piezoeléctricos para dar inicio a la experimentación, que nos lleve al posterior diseño del sistema de generación de energía eléctrica por medio de gotas de lluvia.

Capítulo 3

Desarrollo del sistema de generación como *Diseño abierto*

Capítulo 3 Desarrollo del sistema de generación como *Diseño abierto*

Diseño para incentivar el uso de tecnologías de energía alterna

El desarrollo del sistema de generación no tiene como única finalidad probar que se pueden utilizar fuentes alternas, sino también la de proponer que el uso, fabricación o modificación pueden lograr una vinculación con estos sistemas que ayude a que las personas tengan una mejor aceptación y conocimiento sobre el tema, al mismo tiempo el dispositivo les permitiría reducir su consumo eléctrico. Esto se plantea con el propósito de que una vez se ha utilizado alguno de estos sistemas de producción de energía por medio de fuentes alternas, se busque implementar más sistemas de este tipo, además de poder verse como una inversión a futuro. Por lo tanto, ***‘que no solo sea un dispositivo para bajar los precios de consumo y ayudar a la economía de una casa; que sea un recordatorio de que es algo que busca ayudar al medio ambiente’***. El plan para lograr esto es crear una conexión entre la persona y el sistema o dispositivo, partiendo del conocimiento básico o avanzado de como se desarrolla, se fabrica y se utiliza, donde el sistema llegue a dar a conocer a las personas lo que hace, la energía que produce, el porque es importante el saber lo que representa la producción de energía para un individuo, para una familia o para una comunidad, etc. Además, de que otras personas puedan modificar o resolver las complejidades del sistema de diferente forma o progresar el mismo a un diseño más avanzado.

El empoderamiento tecnológico es la próxima forma de desarrollo sostenible

El empoderamiento de las personas sobre la tecnología ha probado ser una aproximación poderosa para poder resolver los problemas que diferentes comunidades tienen; estos problemas nacen después de la llegada de personas externas provenientes de lugares mas desarrollados, buscan aplicar este desarrollo en las comunidades, fallando en hacer que las comunidades continuen con este desarrollo por si mismas sin la necesidad de ayuda externa (Morgana et al. 2013). Este ejemplo nos precisa claramente que el empoderamiento tecnológico juega un papel importante en el desarrollo de comunidades o de cualquier persona, teniendo la finalidad de ser auto suficiente. Es poder cambiar nuestro propio mundo sin la necesidad de seguir todo el tiempo a un guía, que nos dicte como hacer las cosas y cuando él no esté, nos perdamos o no sepamos que hacer, esto nos ayuda a poder tomar nuestro propio camino y desarrollarnos de la forma que creamos conveniente.

La tecnología apropiada

El uso que le damos a la tecnología debe estar basado de acuerdo a las condiciones que tenemos en nuestro entorno, debemos de saber los alcances que se tienen, las limitaciones que tenemos, así como el cambio que este uso provoca en nosotros; esto puede ser la economía de un lugar, la disposición que tenemos a un cambio continuo, así como la carrera por adquirir siempre lo más novedoso. Es por este tipo de cuestiones que debemos conocer cómo implementar la tecnología apropiada para cada circunstancia y así se logre un mayor impacto en las personas, sobretodo para que sea una herramienta en la que se pueda recurrir cuando se necesite, de forma se llegue a un fin común, el cual debe de ser el de tener un bienestar social, económico y ambiental. Para lograr esto podemos utilizar el concepto de desarrollo sostenible, el cual se define a continuación.

“El desarrollo sostenible es un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (UN, 1987).

En este se tiene como referencia a las necesidades, tanto en el presente como en el futuro, recalándonos que cada generación debe de ver no solo por si misma, sino por la generación que sigue y así sucesivamente. Por esta razón se debe de cambiar la forma en que se realizan las cosas, ya que cualquier desarrollo en el ámbito que sea, debe de estar planteado con base en la sustentabilidad, para dar forma a una transición que lleve al mundo a una armonía social, económica y ambiental, dejando atrás la idea de crear algo sin tener en cuenta las consecuencias. Parte de esta sustentabilidad tiene que ver con la forma en que la tecnología interactúa con las personas y como esta debe de ayudarlas en su vida, por lo que su desarrollo sin ser amigable y sin generar un vínculo pierde razón de ser, además que esto contribuye en volverla desechable y obsoleta. Morgan et al., plantea: “... como un impulso al proceso de transformación, la tecnología apropiada también debe de implementarse en varias etapas para asegurar la expansión de los efectos de la implementación de la tecnología”, lo que nos afirma que el desarrollo de tecnología debe de visualizar la forma en que es asumida por las personas. De esta manera, si se quiere crear una tecnología que sea sustentable y que al mismo tiempo que empodere a las personas, estas ideas deben de estar presentes en todas sus etapas de desarrollo. Morgan et al. menciona tres condiciones principales para que una tecnología llegue al empoderamiento, las cuales son:

I. Dar:

La tecnología “**da**” cosas a las personas, esto es un resultado donde las personas ganan un beneficio adquirido, generando una nueva condición, lo que crea un antes y un después del uso de esta tecnología.

II. Mantener:

El proceso de “**dar**” es seguido por esfuerzos de “**mantener**” esas condiciones que ahora se tienen, la tecnología debe de transmitir ese conocimiento que haga a las personas mantener estas condiciones.

III. Crear:

Para que las personas obtengan un grado de empoderamiento se debe de llegar al siguiente nivel el cual es el de “**hacer**”, en este las personas ahora pueden crear sus propias condiciones por su cuenta.

El centro de todo debe de ser las personas, todas las decisiones de desarrollo de tecnología deben de girar a su alrededor, el empoderamiento de las personas sobre la tecnología debe ser un objetivo principal. Esto es a donde se quiere que llegue el sistema que se quiere crear, ya que esto también logra que se multiplique el uso y aplicaciones de estos sistemas de generación.

Tabla 10 Condiciones para llegar a un empoderamiento de la tecnología

Desarrollo	La tecnología “da” cosas
Desarrollo sostenible	La tecnología “mantiene” las condiciones
Empoderamiento	La tecnología “hace” que las personas creen sus condiciones

Definición: Diseño abierto

En años recientes el desarrollo y fabricación de objetos ha dejado de ser algo exclusivo de grandes empresas o de fábricas especializadas, ahora algunos objetos pueden hacerse a través de una manufactura casera; todo gracias a los avances de la tecnología, en particular con la gran información que se encuentra en la red (videos, foros, comunidades), la potencia de procesamiento que una computadora personal tiene, y la relativamente fácil obtención de máquinas para fabricar objetos (impresoras 3D, herramientas, etc.). Esta nueva forma de fabricar objetos ha nacido de personas que buscaban replicar o modificar algunos objetos de forma recreativa o por pasatiempo, en donde el conocimiento que tenían las personas era muy variado, desde personas con poco conocimiento que van aprendiendo a fabricar algunos objetos hasta personas con un gran conocimiento y experiencia que podían hacer objetos complejos. Lo que ha ocurrido en estos últimos años es que esta forma de fabricar objetos ha pasado de ser algo casero y recreativo a algo más formal, empresas e investigadores se han dado cuenta que aquí ha nacido una nueva forma de investigar, trabajar y desarrollar productos. Ahora, las personas, investigadores o empresas quieren imitar el éxito que se ha tenido en el desarrollo colaborativo de proyectos de software a través de comunidades virtuales, al desarrollo e investigación de objetos tangibles, sobrepasando las complejidades que este aspecto tiene (Balka, 2011). A esto se le puede llamar *diseño abierto*.

Diseño abierto: Propósito

La visión que se tiene del sistema o dispositivo a desarrollar aparte de generar energía eléctrica, es la de proponer una implementación a pequeña escala, partiendo de la idea de que esta implementación pueda usarse en una primera instancia como un objeto básico, como lo es un accesorio que se encuentre en la casa o departamento de cualquier persona, pudiéndose instalar de forma sencilla en un lugar donde caigan gotas de lluvia. Para posteriormente dar un paso más allá, donde el dispositivo tome una mayor importancia y ya no sea visto como un accesorio, sino como un objeto que tiene un propósito, el de generar energía, el cual tenga la posibilidad de crecer a un sistema mayor en el que se puedan conectar varios dispositivos entre sí o de poder ser modificado para mejorar sus valores de generación. Esto se puede llevar a cabo si se utilizan las herramientas actuales de lo que es un **diseño abierto**, en las cuales un producto u objeto tiene sus características físicas, de fabricación y de ensamble subidas en una red, a la cual pueden acceder personas, empresas, investigadores, etc., y estas puedan replicarlo, modificarlo o mejorarlo, lo que paralelamente provoca que se genere una comunidad en torno a este. Es por esto que se utilizará esta idea de diseño abierto para compartir el diseño del sistema que se va desarrollar. Con esto se tiene la intención principal de que se creen comunidades en torno al sistema y con esto se puedan llevar a cabo estas tres premisas:

- Que las personas puedan bajar la información necesaria para poder replicar el dispositivo, para poder utilizarlo, requiriendo solo de un conocimiento básico sobre el tema; además, de que se tiene la intención de que esto sea lo más sencillo posible, a fin de llegar a más personas.
- Que las personas puedan modificar el diseño original, para que el “nuevo” dispositivo que desarrollen este hecho a su medida, pudiendo cambiar su forma parcial totalmente, el número de sus componentes, el tipo de componentes, la forma de funcionamiento, etc. La única desventaja que se visualiza en esta premisa es que las personas que deseen llevar a cabo estas modificaciones deben de tener un conocimiento medio o avanzado, en el tema de generación de energía y de fabricación de componentes.
- Esta nace de la posibilidad de que la propuesta de diseño que se haga del dispositivo en esta tesis no logre llegar a ser un producto final (ya sea por falta de recursos económicos, humanos

o de tiempo de desarrollo), por lo que se puede subir el diseño a la red para buscar personas que se interesen en el trabajo y de esta manera se pueda seguir desarrollando el dispositivo, al grado de poder llevarlo a un producto final, esto ya sea en una colaboración o que las personas lo desarrollen por su cuenta. Esta posibilidad tiene una desventaja, la cual es que las personas necesitarían un grado de conocimiento avanzado sobre el tema, además de contar con recursos (económicos, de equipo, tiempo, personal, etc.), para poder hacer este desarrollo ya que se necesitarían hacer varias experimentaciones e iteraciones de diseño.

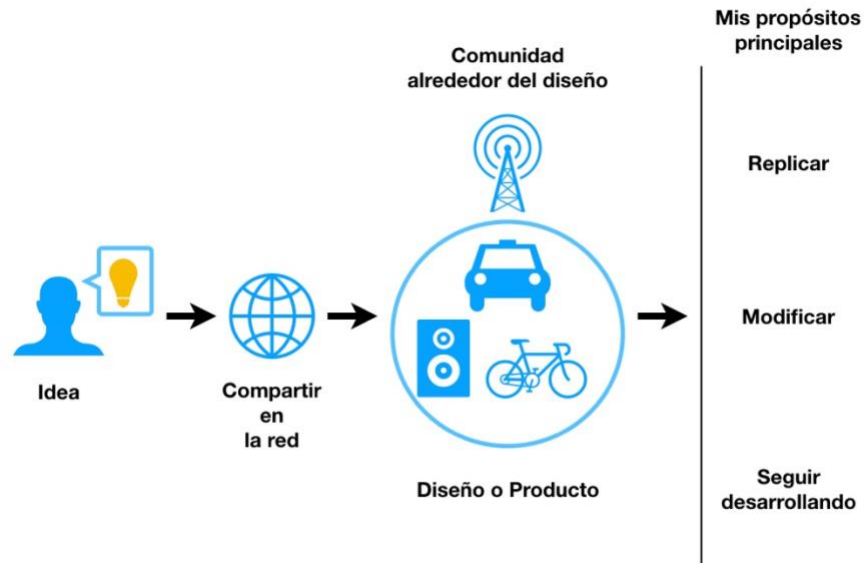


Diagrama 3 Esquema del planteamiento de desarrollar y compartir el diseño del dispositivo de generación como diseño abierto

Aspectos importantes a considerar en el desarrollo del dispositivo como diseño abierto

Código abierto

El término código abierto surge de la industria del software, una definición de este es: **“En términos generales, un programa de software de código abierto otorga acceso al código fuente, y no solo al código objeto (la secuencia de 1 y 0 que las computadoras realmente usan), además permite que las modificaciones realizadas por sus usuarios sean devueltas a la comunidad.”** (Balka, 2011). Este tipo de desarrollo tiene inicio en la posibilidad de subir información en la red, a partir de donde se pueden crear sitios virtuales, de los cuales se creen las estructuras para compartir archivos que puedan ser usados de forma libre, para ser modificados o replicados. Esta definición puede ayudar a trasladar esta esencia a los objetos tangibles, en donde algunos de sus creadores han decidido publicar completamente todo el código fuente, el cual se puede ver como un conjunto de esquemas, firmware, software, lista de materiales, lista de piezas, dibujos, archivos de diseño, recetas, instrucciones, etc. necesarios para recrear o modificar el producto.

Código abierto como desarrollo de productos tangibles

Realizar un desarrollo de un producto con código abierto es trabajar en conjunto con una comunidad, esto con el fin de aprovechar los recursos que otras personas o empresas tienen. Esto resulta de mucha utilidad a los investigadores, debido a que muchos de ellos no tienen los recursos que una empresa puede poseer, además, de que esta colaboración puede crear de alianzas que benefician a ambas partes. En este tipo de colaboraciones la información no solo se comparte, sino que se explota para

contribuir a un desarrollo común, esta forma de trabajar se convierte en una ventaja competitiva, que además puede ser la clave para innovar el producto. Algunos productos ya han empezado a desarrollarse de esta forma, en ellos algunos de sus creadores han decidido publicar completamente todo el código fuente, esquemas, firmware, software, lista de materiales, lista de piezas, dibujos, diseños de circuitos impresos, archivos de diseño, recetas, instrucciones, etc. necesarios para acceder y recrear el producto (Balka, 2011). En estos productos también han surgido problemas, principalmente relacionados con la fabricación del objeto; derivado de esto algunas técnicas se han desarrollado para que se puedan resolver estos problemas.

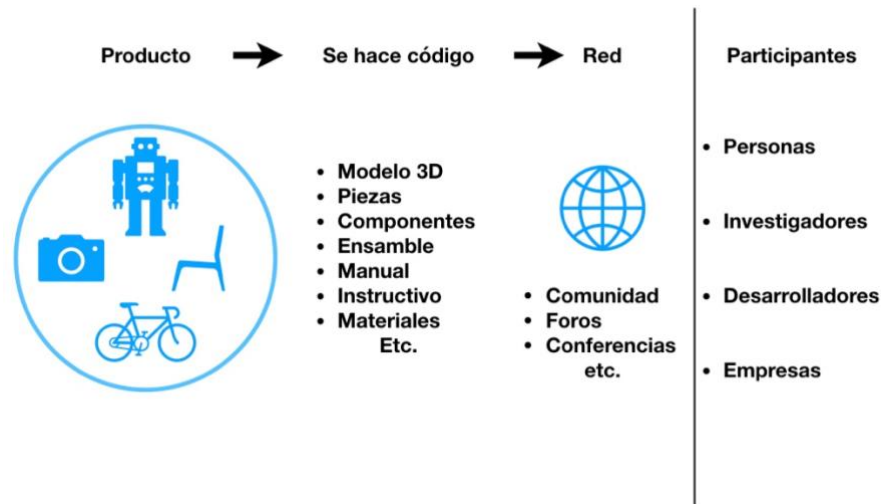


Diagrama 4 Esquema de la codificación de un objeto a su código fuente para ser compartido.

Diseño modular en el diseño abierto

En el desarrollo de productos tangibles se pueden apreciar diferentes factores que permiten saber la facilidad que se tiene para poder concretar un objeto final, uno de estos factores es la complejidad de las piezas que conforman al objeto, así como la cantidad de estas. El procedimiento o técnica para facilitar el desarrollo y fabricación de productos complejos, es el de dividir sus partes en módulos, o conjuntos, propiciando que un grupo de personas se puedan centrar en una pieza o ensamble, mientras que al mismo tiempo otro grupo se concentra en otra pieza, esto hace no solo más fácil el desarrollo del producto, sino también lo hace más rápido. Con esto se pueden aprovechar las diferentes experiencias y conocimientos que las personas puedan tener en una comunidad de desarrollo. Otro de las ventajas que se pueden tener al utilizar la partición modular de un objeto, es el de poder decidir el grado de apertura que tiene un diseño abierto, esto es, se pueden abrir para un proyecto ciertas partes o piezas de su diseño, mientras otras permanecen cerradas, de tal forma que se pueda mantener un nivel de propiedad para la persona que crea ese diseño. Una desventaja que se encuentra es que la partición modular de un producto debe tener un límite, dado que entre mayor sea esta, mayor será la dificultad de poder trabajar al unísono hacia un mismo producto final.

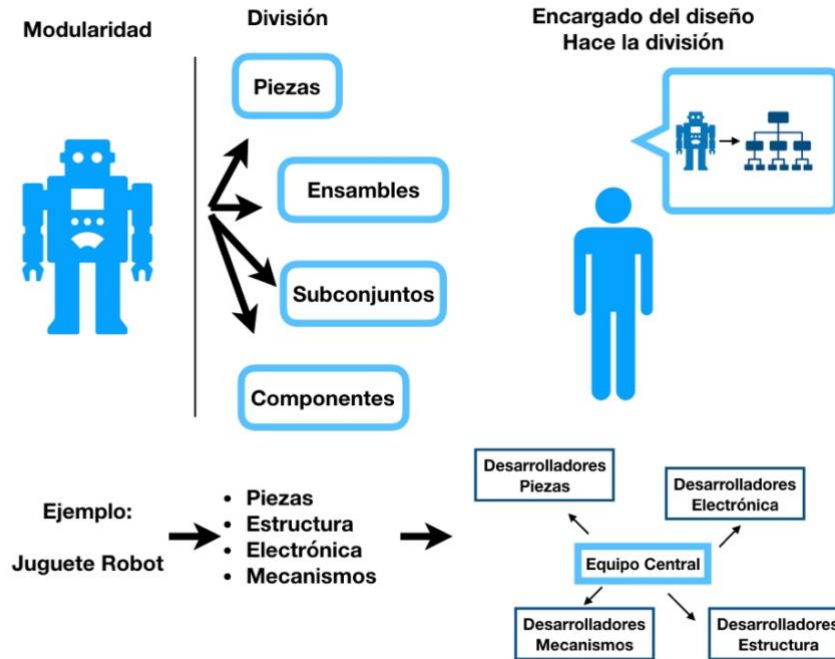


Diagrama 5 Esquema de la partición modular de un objeto o producto y su valor como parte de su desarrollo

Tipos de nichos del diseño abierto

Como se ha comentado existen diferentes tipos de personas u organizaciones que se han interesado en trabajar en un diseño abierto, por lo que se puede segmentar en tres nichos importantes:

- **Empresas y desarrolladores** de productos con el objetivo de comercializar, buscando un beneficio
- **Investigadores** buscando alianzas para desarrollar un trabajo a un nivel mayor, con ayuda de una comunidad
- **Consumidores**, personas que deseen recrear un el producto, con o sin modificaciones para uso personal



Diagrama 6 Nichos del diseño abierto y sus beneficios

Concepto de apertura ‘openess’

La apertura en un proyecto de diseño abierto se refiere a la libertad que se tiene para usar, modificar o divulgar la información referente a este. Existen diferentes opiniones acerca del grado de apertura que debe tener un proyecto de diseño abierto, debido a las complejidades que puede tener la persona o personas encargadas de guiar el proyecto cuando el diseño es totalmente abierto y donde cada integrante puede ir por su cuenta, además de que esto representa dificultades para poder comercializar el producto. Debido a esto, algunos profesionales creen lo siguiente: "los enfoques de línea dura ya sean de código abierto o propietarios, no funcionan [tan bien en el mundo de hoy]" (Thomas, 2008 citado por Balka, 2011), por lo cual se debe hacer una mezcla entre la apertura cerrada y abierta, "la idea detrás de la apertura debe colocarse en un continuo, que va de cerrado a abierto y que abarca diversos grados de apertura" (Dahlender y Gann, 2010 citado por Balka, 2011). De esto se pueden derivar dos estrategias, la de “partes abiertas” y la de “parcialmente abierto”, las cuales pueden llegar a ser complementarias.

La estrategia de “**partes abiertas**” se refiere, a que el encargado o persona que desee publicar su trabajo para que sea desarrollado en una comunidad, decida qué partes del proyecto u objeto estarán abiertas, pudiendo ser algunos módulos del objeto, mientras otros no son publicados y permanecen cerrados. Esto le da un mayor control a la persona que crea el proyecto, además, de que le permite quedarse con cierta propiedad del objeto.

La estrategia “**parcialmente abierta**” se refiere a la creación de un proyecto de diseño en términos restrictivos. El proyecto de código abierto puede, por ejemplo, restringir el uso permitido al uso no comercial o limitar el grupo de personas que tienen acceso al conocimiento revelado (Balka, 2011). Esto se utiliza para crear trabajos con una comunidad específica y donde no se pueda divulgar el trabajo, para evitar plagios y proteger los derechos de la publicación. Esta estrategia puede ser conveniente para empresas que inviertan en desarrollar un producto, pero no deseen que se divulgue ninguna información, así como para investigadores, donde se asegure que solo personas seleccionadas pueden ser parte del trabajo.

Aspectos de la apertura y la perspectiva de la comunidad

La forma en como se aplican las diferentes estrategias de apertura, produce un efecto en la participación que tienen los miembros de las comunidades, lo cual repercute en como desarrollan un proyecto. *“En cuanto a la forma en que la comunidad lleva a cabo el desarrollo y la producción, el grado de transparencia describe la cantidad y calidad de la información disponible, por ejemplo, la capacidad de leer el código y observar o seguir los procesos de producción. El grado de accesibilidad define la capacidad de contribuir al desarrollo, por ejemplo, para cambiar el código directamente.”* (Balka, 2011). Conceptos como la transparencia, la accesibilidad, entre otros, ayudan a la comunidad a saber que pueden o que no pueden hacer, además, de mejorar la forma de trabajo, beneficiando en una mejor comunicación, desarrollo y progreso del proyecto. De estos conceptos, tres de ellos son importantes para recalcar y mencionar.

- **La transparencia** se refiere a la cantidad y calidad de la información, que se revela libremente a los desarrolladores.
- **La accesibilidad** denota la posibilidad de que los miembros de la comunidad participen activamente en el desarrollo de productos.
- **La replicabilidad** denota la disponibilidad de componentes individuales y, por lo tanto, la posibilidad de auto ensamblar el producto.

Estos conceptos dan contexto a la perspectiva que tenga el desarrollo en conjunto en una comunidad, en donde pueden ser personas que deseen la ayuda de gente más experimentada y de obtener recursos de empresas, o por el otro lado, de empresas que busquen beneficiarse de una participación externa. Es por esto que se sugiere tener un grado de libertad no solo en el aspecto técnico del producto, sino de las personas que pueden trabajar en este y en como lo pueden hacer. Raasch y col. (2009 citado por Balka, 2011) mencionan que, *"al decidir dejar suficiente espacio para alentar la inversión privada, la comunidad puede mejorar su probabilidad de éxito"*. Por lo cual se puede trabajar de forma conjunta independientemente de si el objetivo es tener un beneficio comercial y monetario, o de carácter más social. *"Las personas a cargo intentan promover el éxito del proyecto mezclando cuidadosamente los requisitos comerciales y comunitarios"* (Balka, 2011).

Licencias de uso

De estas estrategias parten las licencias de uso, las cuales son importantes para las personas que deseen crear proyectos de diseño abierto, ya que sirven para este sea visto, publicado y utilizado de la forma que ellos desean. Por ejemplo, aun cuando una persona quiera dar a conocer su diseño abiertamente al público, este deberá de tener una licencia de uso, la cual especifique que el diseño no pertenece a nadie y nadie puede apropiarse de él, ni hacer uso de él para revenderlo. Además, las licencias de uso son necesarias, debido a que aseguran a una empresa o inversionista que los recursos que dan para un trabajo de diseño abierto pueden redituarse, ya sea en publicidad, conocimiento o parte de las ganancias de comercialización.

Esquema del orden de los aspectos a considerar en un diseño abierto

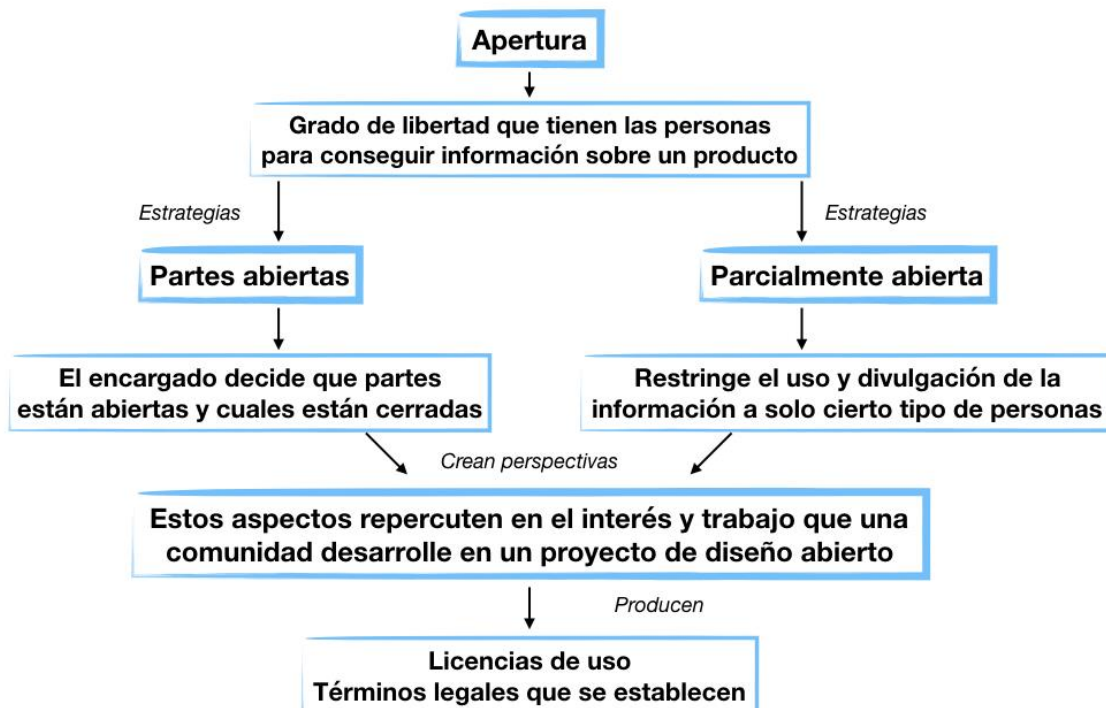


Diagrama 7 Esquema de la utilización de los aspectos a considerar en el desarrollo del dispositivo

Colaboración con empresas o inversores

El tipo de apertura y las licencias deben de sentar la base no solo del diseño abierto en si, sino de las personas que pueden acceder al diseño, de forma que se pueda obtener ayuda en todos los ámbitos para desarrollar el producto, tanto en los recursos humanos, como en los recursos materiales y económicos, ya que una de las características de desarrollar un objeto tangible es la de hacer varias experimentaciones, así como iteraciones de su diseño. La escasez de recursos o la necesidad de aumentarlos, es una de las razones para querer crear un diseño abierto de un producto u objeto que se desee desarrollar, de modo que se puedan superar estos desafíos. Algunos de los inconvenientes que se pueden encontrar en el desarrollo de un objeto a través de un diseño abierto son los siguientes:

- **Producción:** para poder fabricar un objeto tangible a través de un diseño abierto se necesita contar con las herramientas o maquinaria que permitan producir los diferentes componentes, además, en muchos casos se necesita de experiencia en los diferentes procesos de manufactura.
- **Multi variedad de componentes, grandes, pequeños:** un producto tangible necesita de múltiples componentes, a los que se les necesita de diversas personas experimentadas en múltiples áreas para poder fabricarlos. Esto es complejo de ser llevado a cabo por una sola persona o grupo que se dedica únicamente a un área del saber, por lo que para poder llevar a cabo el producto deberán de apoyarse en otras personas con conocimiento y experiencia en las áreas que desconocen.
- **Costo de experimentar y probar:** uno de los grandes problemas que se tienen al momento de desarrollar un diseño abierto, es el costo que se tiene para producir varias replicas de una pieza y hacer experimentaciones, volver a iterar en el diseño y volver a experimentar. Esto es un consumo de recursos muy grande y muchas veces no puede ser solventado por una sola persona, es por esto que se requiere de algún patrocinio o inversión, principalmente de particulares o empresas.

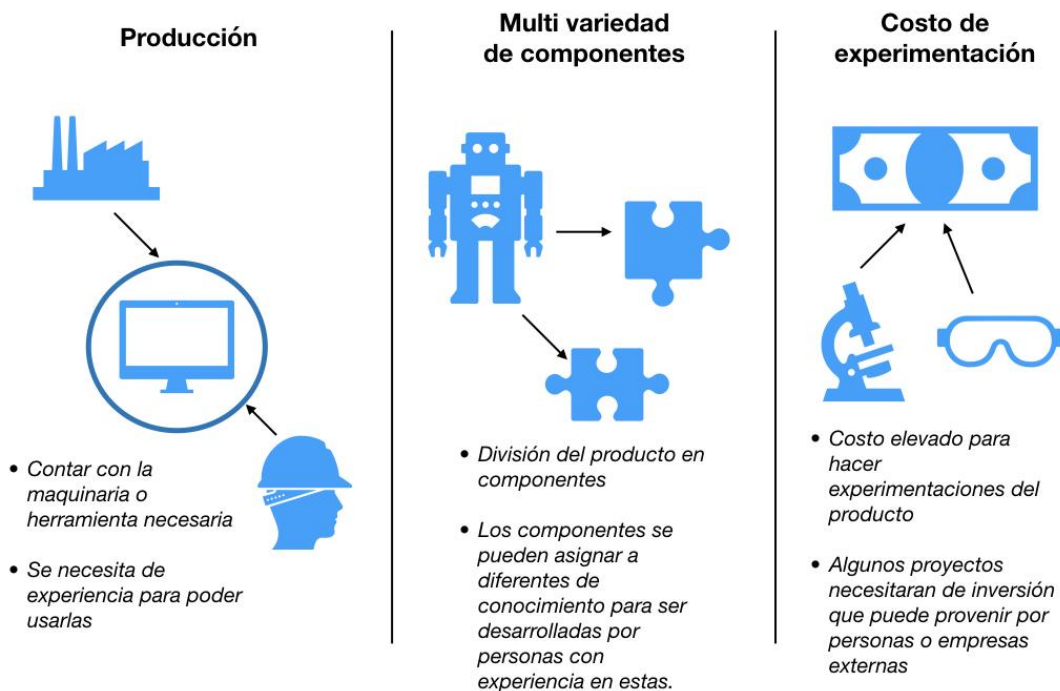


Diagrama 8 Inconvenientes en el desarrollo de un diseño abierto

Años atrás estos inconvenientes eran impedimentos que no se podían solventar, por lo que el desarrollo de producto tangible a través de un diseño abierto no se podía llevar a cabo. En la actualidad esto ha cambiado, estos inconvenientes se pueden solventar con la ayuda de las nuevas formas de intercambio de información, así como de herramientas de producción ‘casera’ como, tornos pequeños, utensilios comerciales, impresoras 3D, etc. (Balka, 2011). Múltiples personas y comunidades que se han apoyado en estas herramientas de producción ‘casera’, han creado conocimiento de como utilizarlas correctamente, hasta llegar a llamarlas *“técnicas de código abierto”* (Balka, 2011). Esto presenta ventajas y desventajas, debido al tipo de información que puede ser de utilidad o que puede ser confusa y vaga, en donde cada uno deberá de poder darle sentido. Es por esto que muchos tutoriales o instructivos en la red no pueden llevarse a cabo, aun cuando exista videos, ya que puede faltar información en los detalles de construcción, o no se tienen las habilidades para realizarse. Aun con estas desventajas, estas nuevas técnicas han ayudado a desarrollar productos, haciendo que existan foros, comunidades y paginas dedicadas a este tema, pasando de objetos básicos y simples a objetos complejos. Contar con el respaldo de organizaciones o empresas ya sean privadas o publicas, que puedan proveer los recursos que se necesitan para desarrollar una investigación o un producto para comercializar, es algo que se debe de tomar en cuenta. Siempre es deseable que una persona pueda trabajar y desarrollar cosas por su cuenta, pero si no tiene las herramientas o recursos para lograrlo, puede apoyarse en otros creando una comunidad para llevarlas a cabo. El trabajo en una comunidad puede ser presencial o no, puede que la información sea la que se comparta en la red, y que las pruebas o reuniones sean presenciales. Los siguientes puntos muestran las ventajas de trabajar de esta manera, dejando que alguien externo pueda participar e invertir en el proyecto, ya sea una persona o una empresa:

- ❖ *Algunos proyectos se pueden avanzar, o desarrollarse de forma que cumplan sus metas si se hace una colaboración con una organización o empresa, que puedan proveer los recursos que hacen falta.*
- ❖ *De igual manera una empresa puede buscar colaborar con personas externas en el desarrollo de un proyecto, para tener un panorama mas amplio.*
- ❖ *Las modificaciones de un producto vienen del cliente, que lo ajusta para que este se adapte a el, por lo tanto, una empresa o desarrollador puede encontrar en estas colaboraciones la retroalimentación que necesita.*
- ❖ *Una comunidad de código abierto puede llegar a ser tan extensa o pequeña, el grado de su éxito dependerá de la promoción y la recepción que tenga el proyecto.*
- ❖ *Se puede elegir quienes participan en el proyecto, se puede abrir todo el diseño o por partes, se puede colaborar con empresas externas o no, se puede modificar, desarrollar o solo replicar un objeto. El diseño de código abierto permite ir en cualquier dirección en cualquier proyecto.*

La innovación en las empresas por medio del trabajo de diseño abierto

Una organización o empresa se puede interesar en un proyecto de diseño abierto e invertir en este con la idea de obtener algo a cambio, la intención de una empresa es utilizar eficazmente sus recursos combinándolos en productos y servicios para maximizar el retorno en el tiempo (Barney, 1986 citado por Balka, 2011). La meta de una empresa a parte del beneficio económico es la de *innovar*, razón por la cual puede ver el trabajar en un proyecto de diseño abierto como escalera para llegar ahí. La innovación es un recurso valioso que se desea tener y desarrollar, una empresa que no genera una innovación en sus productos esta sujeta a seguir a otra empresa. ***“Se observa que los ganadores en el mercado global han sido empresas que demuestran una respuesta oportuna y una innovación de productos rápida y flexible, junto con la capacidad de coordinar y redistribuir de manera efectiva las competencias internas y externas.”*** (Balka, 2011). Parte de la innovación de una empresa, en especial en sus productos tangibles, es en el seguimiento que se le da después de ser vendidos, cuando son usados por las personas que los adquirieron se puede ver si el objeto se usa de

acuerdo a como se pensó y diseñó o si las personas han realizado alguna modificación para mejorar su relación con este. Esta retroalimentación es la que produce innovación en un producto, por ejemplo, von Hippel (1988 citado por Balka, 2011) encuentra que en algunas industrias más de dos tercios de las innovaciones que estudió se remontan a la idea o sugerencia inicial de un cliente. Las empresas pueden crear comunidades cerradas, con licencias de uso y condiciones herméticas para que agentes externos valoren sus productos, con la idea de que las personas que se dedican a desarrollar todo tipo de diseños abiertos les ayuden en un proyecto. También pueden invertir en trabajos de diseño abierto de otras personas, con la finalidad de obtener información, para obtener nuevas ideas y no necesariamente quieran comercializar ese trabajo.

Creación de valor y captura de valor

Parte de la innovación proviene de crear un valor en algo, esto se puede describir de la siguiente manera: **“los individuos crean valor al desarrollar tareas, servicios, productos, procesos u otras contribuciones novedosas que se perciben como valiosas.”** (cf. Lepak, Smith y Taylor, 2007 citado por Balka, 2011). El crear valor a un producto puede ser algo tan sencillo como modificar una taza para ser agarrada de manera diferente, hasta rediseñar el producto completamente, por lo cual un diseño abierto puede ser un valor agregado de un producto. Esta creación de valor puede ser también la obtención de información sobre un producto y cómo este puede ser modificado, de igual manera se puede ver como un valor la creación de una comunidad respecto a un objeto. Un producto puede generar una comunidad a su alrededor de este, en la que se puede encontrar información sobre como usarlo, modificarlo, repararlo, etc., además de poder interactuar con sus miembros para adquirir información específica. Esta creación de una comunidad a partir de un producto, puede desarrollar un valor agregado a un objeto. Se puede hacer que el objeto sea el centro de todo un proyecto, por ejemplo, algunas empresas se puedan dedicar a comercializar la materia prima para crearlo o modificarlo (empresas que venden impresoras en 3D y sus filamentos) y otras se dediquen a vender las partes complejas que se necesitan para hacer el producto, (ejemplo, todos los sensores de luz, presencia, motores, etc. que se utilizan con Arduino). De esta forma, si bien un producto esta en código abierto y cualquiera puede acceder a el, lo que hace difícil que se puede comercializar directamente con este, se puede crear valor con lo que lo rodea, y de esta manera las personas puedan ver que existe un retorno con beneficio si comparten algún diseño. **“La posibilidad de apropiarse de las ganancias creadas por una innovación es clave para que ocurra la innovación”** (Balka, 2011).

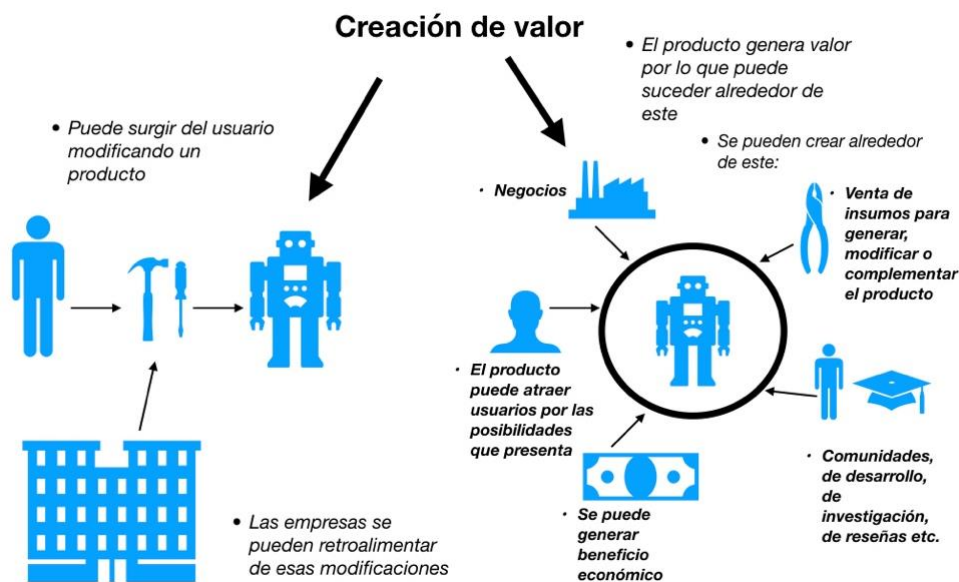


Diagrama 9 Esquema de la creación de valor de un producto

Razones para que los proyectos de diseño sean revelados libremente (diseño abierto) en un aspecto económico y comercial

Trabajar en un proyecto de diseño abierto también se puede ver como una nueva posibilidad de hacer negocio, a continuación, se exponen las razones por las que trabajar de esta forma puede generar beneficios económicos y comerciales.

Ser mejor que la competencia

Argumento

Un proyecto de diseño abierto exitoso, no solo significa el desarrollo de un buen producto, también provoca ser líder ante la competencia.

*Se crea una reputación y se crea una marca
“Un proyecto exitoso de código abierto puede ser capaz de debilitar a los competidores potenciales y lograr la independencia de las políticas de precios y licencias (Wichmann, 2002 citado por Balka, 2011).*

Se puede crear un estatus del producto ante las personas, el estatus traerá a las personas al producto, y no al revés, generando que la comunidad que se crea alrededor sea muy fuerte.

Encontrar una comunidad fuerte sobre un producto también atrae a más personas

Práctica

Esto se puede ver en ejemplos como:

- **Arduino** (plataforma para crear proyectos de software y hardware, a través de placas de electrónica)
- **Modelado de piezas Solidworks** (software dedicado al modelado mecánico en 3D y 2D, además de ser un simulador de esfuerzos, fluidos, movimiento etc., el software en sí no es abierto pero los diseños de las piezas se pueden compartir).

Los cuales tienen competidores que se pueden considerar mejores en uno o varios aspectos, pero que al tener un gran renombre tienen una gran comunidad alrededor de ellos. Esta gran comunidad hace que las personas prefieran usar estos softwares sobre otros, en parte, por la vasta información que existe a su alrededor.

Publicidad

Argumento

Se genera publicidad para una empresa al momento que esta trabaja e invierte en un proyecto de diseño abierto, esto se debe a que todas las personas que trabajan o están alrededor del proyecto ahora conocen a la empresa.

Pueden existir convenios para que en el desarrollo del proyecto solo se utilicen productos de esa marca (software, componentes, herramienta etc.), esto generará un retorno económico al mediano plazo. Las personas externas interesadas en el proyecto verán la marca que se utilizó para su desarrollo y probablemente quieran conseguir los elementos usados de esta marca.

Práctica

Por ejemplo:

Una marca de impresoras 3D patrocina un proyecto de diseño abierto, esta invierte en dar impresoras para su realización, si el proyecto es exitoso, la empresa puede crear publicidad diciendo parte de ese éxito se puede deber a que se usaron impresoras 3D de su marca. Las personas a las que les interese ese proyecto probablemente quieran adquirir esas impresoras o en su defecto ahora conocen que esas impresoras funcionan de buena manera y son confiables.

Usuarios

Argumento

Llamaremos usuarios en este contexto a las personas que son parte de la comunidad, son partícipes del trabajo de un desarrollo abierto y pueden contribuir a este, replicando el objeto o modificándolo, trabajan para si mismos o en una colaboración con una empresa o investigador.

Los usuarios pueden beneficiarse de los diseños abiertos para poder aprender, replicar y modificar objetos, mecanismos, software, hardware, componentes electrónicos etc. Pueden hacer sus propias creaciones y dependiendo de las licencias de uso poder comercializar con ello. Otros usuarios, buscarán primordialmente obtener experiencia y conocimiento.

En algunos casos pueden ser remunerados con algún sueldo, que sea un proyecto de diseño abierto no implica forzosamente que todo el trabajo colaborativo es gratis.

Práctica

Aquí puede suceder un beneficio extra para las personas que trabajan para proyectos:

-Pueden empezar desarrollando de forma voluntaria y gratuita, pero cuando una empresa desarrolle un proyecto o invierta en uno externo, se puede dar cuenta de la forma de trabajo de los usuarios, dándose el caso que les proponga contratarlos.

El usuario se puede hacer de un nombre o en su caso, acrecentar su CV

Los usuarios también se pueden beneficiar al hacer conexiones con otros usuarios, personas, desarrolladores, investigadores de forma que se busquen para trabajar en proyectos posteriores.

Fuentes de ingreso indirectos

Argumento

Se pueden aprovechar oportunidades en el proyecto de diseño abierto para comercializar otros bienes relacionados, se pueden vender herramientas, maquinaria, componentes o piezas. Si una persona quiere replicar un producto, pero no tiene la capacidad para generar cierta pieza o componente, podría adquirirla con algún vendedor

“En un diseño abierto, parece posible actuar como una empresa focal y generar ingresos por la venta del producto a desarrolladores y otros clientes” (cf. Raasch & Herstatt, Forthcoming, citado por Balka, 2011).

Se puede contratar a una persona para que analice, sugiera y realice una pieza o componente que alguien necesite.

Práctica

Se pueden implementar los modelos comerciales comunes que incluyen proveedores de componentes, fabricantes por contrato, distribuidores y proveedores de servicios. Múltiples negocios pueden nacer y crecer alrededor de un diseño abierto. Por esto la importancia de que el diseño sea un éxito, ya que esto asegura que se desee ser parte de el, de replicarlo y modificarlo.

Se puede ver como la sentencia que afirma que “el software vende el hardware”, donde el diseño abierto se vea como software y toda la materia prima, herramientas, maquinaria, instructivos, etc. se vean como el hardware.

Se necesitan de habilidades para fabricar objetos tangibles

<i>Argumento</i>	<i>Práctica</i>
<i>Muchos de los objetos que se fabrican actualmente, ya sea que su proceso para elaborarlo sea artesanal o automatizado, necesitan de una persona que tengan un grado de experiencia en el manejo de herramientas y maquinaria, así como de técnicas y habilidades. Pueden existir instructivos para llevar algo a cabo, pero existen habilidades que requieren de entrenamiento y experiencia.</i>	<i>Puede pasar que alguien vea un diseño abierto y tenga la idea de modificarlo para crear algo nuevo con otro fin, pero no tenga idea de como fabricarlo. Ahí es donde puede pedir a otra persona que directamente le haga las modificaciones que desea o se lo pueda manufacturar.</i>
<i>Muchos componentes pueden no ser idóneos para que una persona sin experiencia los trate de hacer. Se puede gastar materia prima en realizar objetos que no pueden salir a la primera.</i>	<i>Por ejemplo: El construir alguna pieza de mueblería necesita del correcto manejo de la madera, de una cierta habilidad con las herramientas. Del mismo modo para construir una impresora 3D se necesita de experiencia.</i>

Un marco para estudiar y definir el desarrollo de un proyecto de diseño abierto

Con toda la información que se ha recabado y discutido, se definirá un marco en el cual se identifique todo lo necesario para proponer un proyecto de diseño abierto. Este marco ayudará a sentar las bases con las cuales se hará una propuesta de divulgación de nuestro proyecto de diseño de forma abierta. Este marco delimita todo lo que envuelve un proyecto de diseño abierto, sus generalidades y sus particularidades, en busca de la innovación. El marco que se ha propuesto sigue las ideas propuestas por Balka (2011), en el cual se vislumbran seis aspectos que delimitan un proyecto de diseño abierto, en los que su correcto entendimiento y posterior desarrollo pueden llevar al proyecto a resultados satisfactorios. Estos seis aspectos se muestran a continuación, posteriormente se mencionarán algunas de sus características y perspectivas importantes, así como observaciones que han dejado el análisis de proyectos de diseño ya concluidos.

- Actores
- Objeto
- Estructura de gobierno
- Proceso de desarrollo
- Resultado Innovador
- Ambiente

Actores

Se le llama actores a todas las personas y organizaciones involucradas en el proyecto de diseño abierto, los actores van desde las personas que publican el proyecto, las que se interesan en trabajar y desarrollar el proyecto, hasta las empresas que buscan invertir en el proyecto. Se deben de tener en cuenta las motivaciones que cada actor tiene, para que el desarrollo en conjunto de un proyecto satisfaga en lo mayor posible a todas las partes involucradas. Por ejemplo, von Krogh y von Hippel

(2006 citado por Balka, 2011) señalan los beneficios selectivos de la participación en proyectos y la revelación de información como una condición previa importante.

<i>Características y perspectivas de los actores</i>	<i>Observaciones obtenidas del análisis de investigaciones y proyectos ya realizados</i>
<p><i>La cantidad de actores en un proyecto depende del mismo (temática), de su complejidad y de la rapidez con que se quiera realizar.</i></p> <p><i>El tipo de actores que pueden trabajar en el proyecto depende de este, se pueden necesitar desde personas con poca experiencia y sin conocimiento a profesionales con vasta experiencia.</i></p> <p><i>En muchas investigaciones como la que se pretende hacer, se debe de dejar abierta la posibilidad de que alguna persona con conocimiento y experiencia de forma profesional tome iniciativa y evolucione el proyecto.</i></p>	<p><i>Siempre existirán discrepancias entre los actores del proyecto.</i></p> <p><i>Se puede decir que un mayor número de desarrolladores generan más actividad, pero al mismo tiempo un mayor número de actores acrecientan la complejidad de trabajar en sintonía.</i></p> <p><i>Los actores comerciales parecen estar a favor de proteger su trabajo al registrar el nombre del proyecto, que es menos frecuente en el caso de actores individuales o de investigación.</i></p> <p><i>Los proyectos con una gran comunidad, que incluyen actores comerciales o que incluso están organizados por profesionales, tienen una alta probabilidad de alcanzar etapas avanzadas de desarrollo.</i></p>

Objeto

El objeto o producto es lo que se va a desarrollar, investigar o modificar, es la parte central de un proyecto de diseño abierto. El objeto determina al tipo de proyecto, su temática, complejidad y características, dependiendo de este se requerirá de ciertos tipos de actores con diferentes grados de conocimiento y experiencia, de igual forma de este dependerá el interés que los actores externos.

<i>Características y perspectivas del objeto</i>	<i>Observaciones obtenidas del análisis de investigaciones y proyectos ya realizados</i>
<p><i>Al objeto se le debe de digitalizar toda su información referente, ya sea con su estructura física simulada en software 3D, sus manuales de fabricación en archivos PDFs, sus video tutoriales en plataformas como YouTube, etc.</i></p> <p><i>El objeto dicta la complejidad de proyecto de diseño abierto, debido al detalle que se debe de tener en la información a compartir. No es impedimento para que se lleve a cabo, pero si un reto para tener en cuenta. Como se ha mencionado antes, diferentes estrategias para dividir al objeto en partes, ensambles o piezas puede emplearse para sobrepasar estas complejidades.</i></p>	<p><i>El desarrollo de impresoras 3D, cortadores CNC y herramientas similares relativamente baratas para uso doméstico cada vez más permite a los desarrolladores producir sus propios objetos independientemente de una producción central (Balka, 2011)</i></p>

Estructura de gobierno

La estructura de gobierno de un proyecto de diseño abierto es primordialmente definir los derechos de uso, licencias de uso y alcances permitidos que el creador establece. Cada persona que desea crear un proyecto o en su caso quiera subir su producto a alguna comunidad, puede decidir la estructura de gobierno que lo regirá. Esto es indispensable porque salvaguarda la propiedad intelectual, le da crédito a la persona que hace y sube la información, aun cuando esta es libre.

Características y perspectivas de la estructura de gobierno

El tipo de licencia que se utilice en un proyecto, puede invitar o alejar a los diferentes actores que lo pudieran desarrollar “las licencias restrictivas limitan lo que las personas pueden hacer con el producto” (Balka, 2011)

Las licencias de uso no están libres de conflicto, debido a las legislaciones de cada país, algunas licencias pueden ser validas o no.

Puede ocurrir que se cambie la licencia de uso, debido principalmente al surgimiento de un actor que desee invertir en el proyecto.

Observaciones obtenidas del análisis de investigaciones y proyectos ya realizados

Una licencia de uso que restrinja la comercialización, se traduce en la reducción de la utilidad percibida por el producto, lo que mermaría el interés de aquellos que buscan un beneficio comercial.

Existen situaciones como la de Arduino:

Su registro de marca internacional fue aceptado en muchos países, pero rechazado en los EE. UU., debido a que Arduino es principalmente un apellido.

Proceso de desarrollo

La persona que desea desarrollar un producto debe de tener un plan que indique las bases que se tienen para el proyecto, así como las metas de este, también debe de indicar los pasos a seguir, además de tener en cuenta las diferentes variaciones que se pueden producir. A todo esto, se le llama proceso de desarrollo, este proceso indica quien o quienes conducen y coordinan el proyecto, que actores son deseados para sumarse al proyecto, en este se deja en claro en dónde se pretende subir el proyecto, con que comunidad se desea trabajar o que tipo de comunidad se pretende que nazca a partir del producto que se esta o se quiere desarrollar. En este también se debe de tener en cuenta que los actores inversores pueden entrar en diferentes etapas del desarrollo del producto, normalmente en las ultimas etapas, donde el objeto se proyecta como un producto final de manera mas concreta.

Características y perspectivas del proceso de desarrollo

El proceso de desarrollo puede ser un documento que indique las diferentes etapas que lleven a replicar un objeto, que diga cómo se hace. Al modificar o avanzar en el desarrollo del producto, se deberá de continuar anotando todas las condiciones, características e instrucciones que surjan, así como las personas y recursos que se utilizaron.

El diseño abierto hace que el proceso de desarrollo de un producto no tenga un punto final, sino pueda seguirse sumando información.

Observaciones obtenidas del análisis de investigaciones y proyectos ya realizados

En el proceso de desarrollo se indica que algunas piezas del producto se pueden conseguir de manera comercial, para que este sea mas eficiente.

Resultado Innovador

El resultado innovador de un proyecto puede llegar a ser relativo, en primera instancia se tiene que evaluar si se cumplieron las metas u objetivos que se plantearon en su inicio. Si se cumplen las metas y además el producto va mas allá, al seguir siendo desarrollado por otras personas entonces se le puede calificar como un proyecto con un resultado innovador. Estas innovaciones tienen que ver con la forma en que es un proyecto de diseño abierto, la participación que hubo en el desarrollo, la comunidad que se creó, el objeto que se creó, el interés que causa el objeto, el número de personas que desean replicarlo o modificarlo son algunos de los parámetros en los que se puede decir que un proyecto ha creado una innovación.

Características y perspectivas del resultado innovador

Usuarios avanzados o desarrolladores, que deseen modificar parcial o totalmente el diseño, definirán al proyecto como innovador si en el encuentran un interés de seguir estando involucrados.

Si el producto engancha a los usuarios a desarrollar nuevas aplicaciones o mejoras, aun cuando este ya este “terminado” entonces ha logrado crear su propio “mundo”.

Observaciones obtenidas del análisis de investigaciones y proyectos ya realizados

La innovación del producto recae en la forma en que los usuarios finales ven al objeto.

Si sienten una mejora en alguna de sus características entonces pueden decir que el resultado es innovador. La innovación no necesariamente implica un rediseño del objeto o una nueva forma totalmente distinta de usarlo, la innovación puede ser simple.

Ambiente

El ambiente de un proyecto de diseño abierto se refiere al entorno en donde se está desarrollando, la temática del mismo, los canales de comunicación y el tipo de red que se usa. Definir el ambiente de un proyecto se hace con la intención de que todos los actores estén en la misma sintonía, la mayor condición que el ambiente debe de delimitar es **el lenguaje**, definir el lenguaje que se va a utilizar durante el proyecto es indispensable para que este cumpla su propósito. Esto también se refiere no solo al lenguaje de comunicación que utilizaran los actores para comunicarse, también se refiere al lenguaje para desarrollar el producto, por ejemplo, se debe establecer que softwares se usaran, que extensiones de los archivos se usaran, que sistema de unidades se usara, etc.

Características y perspectivas del medio ambiente

El ambiente debe establecer la temática y tema en específico del proyecto. Así se puede ser mas específico en los actores que deben de estar desarrollando el producto, se puede ir desde las energías renovables hasta el desarrollo de accesorios de decoración, muebles, movilidad, autopartes, etc.

Los canales de comunicación también son parte esencial del medio ambiente. Aquí se especifica si la comunicación será a través de la red, de correos, foros, paginas de internet, o si es hibrida y la comunicación puede ser por correo, pero también presencial en pruebas, etc.

Observaciones obtenidas del análisis de investigaciones y proyectos ya realizados

“La variedad de los proyectos examinados, visualizando que el diseño abierto ya se está aplicando en una serie de industrias diferentes, va desde industrias muy tradicionales como 'Alimentos y Bebidas' o 'Energía y Servicios Públicos' hasta industrias como 'Electrónica de Consumo' y 'Telecomunicaciones'.” (Balka, 2011).



Diagrama 10 Resumen de los seis aspectos que conforman el marco que define un proyecto de diseño abierto

Nota:

Si se quiere hacer una referencia rápida, se pueden hacer unas categorizaciones sobre un proyecto de diseño abierto. Esto sirve para ser buscado de manera rápida en un buscador de algún foro o página donde se puede hacer un diseño abierto.

- **características de artefactos:** *complejidad, modularidad, industria*
- **características de la comunidad de desarrolladores:** *solo desarrolladores individuales, proyectos conjuntos comunidad-empresa.*

Conclusiones y anotaciones para el diseño del sistema de generación como diseño abierto

Estas conclusiones y anotaciones sirven para plantear desde un inicio el desarrollo del sistema de generación que se desea hacer como un diseño abierto, siguiendo presentes en todas las iteraciones de diseño que se realicen, estas se enuncian a continuación:

- ❖ *El diseño abierto para desarrollar productos se considera factible, incluso de objetos muy complejos, siempre y cuando puedan dividirse en módulos o conjuntos.*
- ❖ *Los responsables del proyecto deciden cuidadosamente qué partes publican y qué partes mantienen cerradas, con frecuencia se decide componente por componente.*
- ❖ *Se debe tener una estrategia donde no todo sea abierto para que funcione de la mejor manera.*
- ❖ *Las personas encargadas del proyecto le dedican más horas, que por ejemplo alguien ocasional, lo que nos dice que, si es un proyecto para seguir desarrollando se debe tener en cuenta que debe existir alguien que guíe el proyecto y no lo deje abandonado (Balka, 2011)*

- ❖ *Algunas piezas y componentes pueden llegar a ser mas fáciles de conseguir ya hechos que hacerlos.*
- ❖ *La apertura es importante para abrir comunidades de diseño, se encontró que la transparencia y la accesibilidad son mas importantes que la replicabilidad del objeto.*
- ❖ *Existe una satisfacción al momento de trabajar en esto proyectos cuando se tienen una mayor apertura.*
- ❖ *Se requieren desarrolladores con habilidades especiales, por ejemplo, ingeniería, informática o electrónica. Además de la gran experiencia, los proyectos de diseño abierto también tienden a requerir desarrolladores de una considerable diversidad de antecedentes (Balka, 2011).*
- ❖ *Muchos proyectos han sido iniciados por particulares y con el tiempo desarrollaron productos totalmente comercializables.*
- ❖ *Las empresas pueden beneficiarse de sus actividades en diseño abierto mediante la creación y el mantenimiento de relaciones con estas comunidades.*
- ❖ *Al hacer un dispositivo que aproveche los procesos de manufactura individuales como impresoras 3D, hacen que se diferencie de una producción central*

Nota:

*Un esquema resumen del capítulo puede verse en el **anexo A3***

Capítulo 4

Experimentación con sensores piezoeléctricos

Capítulo 4 Experimentación con sensores piezoeléctricos

Se empezará con la experimentación con diferentes sensores piezoeléctricos para conocer cuales producen las mejores características de producción de energía (voltaje, corriente eléctrica y almacenamiento), como se mostró en el diagrama 2 del capítulo 2.

Serie de experimentos: 1. Caída de gotas sobre un sensor piezoeléctrico de tipo ‘buzz’

En este experimento se analizó el comportamiento de un piezoeléctrico de tipo ‘buzz’ cuando una gota de agua cae sobre él, simulando una gota de lluvia, pero en un ambiente controlado. Teniendo en cuenta las variables como el tamaño de la gota y la altura desde el momento en que la gota se produce e impacta con el piezoeléctrico, se hicieron las mediciones de señal eléctrica que generaba, las pruebas se hicieron con un solo sensor conectado a un osciloscopio, el cual monitoreaba la señal producida. De esta forma se pudo tener lectura del comportamiento de la señal de generación, así como sus valores de voltaje, los resultados se muestran a continuación (detalles de esta práctica están el anexo A4-1.1)

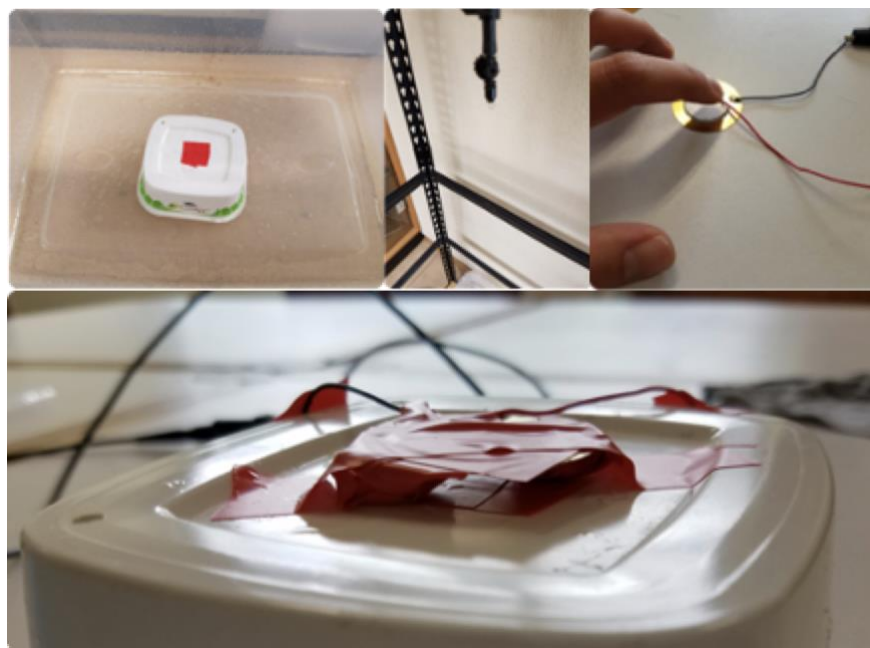


Imagen 17 Fotografías ilustrativas de la práctica con sensores piezoeléctricos tipo ‘buzz’, imagen arriba a la izquierda: base de impacto del piezoeléctrico, imagen de arriba al centro: gotero utilizado, imagen de arriba a la derecha: prueba de control del piezoeléctrico, imagen de abajo: modificación de la posición del piezoeléctrico sobre la base.

El fin del experimento fue conocer cuánta energía se puede generar con estos sensores y dependiendo de los resultados se conocerá si esta es una opción válida para que sean utilizados en el diseño final del sistema de generación o no, si los resultados no son satisfactorios se pasará a volver a experimentar con otro arreglo con estos mismos, para obtener otra respuesta, tratando de hacer funcionar estos sensores, antes de descartarlos por completo. El resultado que nos deja esta prueba es el siguiente, por cada gota de agua que impacta en el disco piezoeléctrico de tipo ‘buzz’ se pudo producir una señal eléctrica que va de los **0.3V a los 2.2V, la cual no es constante**. Esta generación de energía se puede considerar como poca, pero se tiene que tener en cuenta que solo se usó un sensor piezoeléctrico, faltando medir el comportamiento al conectar varios sensores, ya sea en paralelo o en serie, para que se cubra una mayor área de impacto y se reciba un mayor número de gotas, lo cual hace pensar que puede haber una mejora sustancial en la generación de energía en una superficie no muy grande. Ya

que, si la producción de energía sigue una relación lineal donde un sensor ‘buzz’ produce como mínimo 0.3V y ahora se 10 de estos, entonces se producirán como mínimo 3V, por el otro lado si como máximo un ‘buzz’ genera 2.2V y ahora se conectan 10, entonces se generarán 22V, lo cual ya es una cantidad considerable.

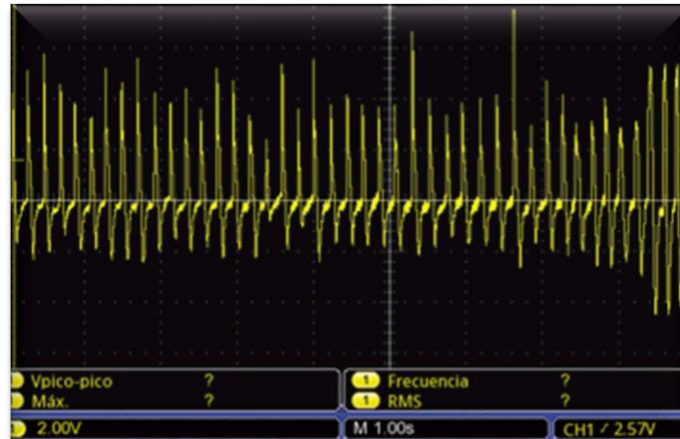


Imagen 18 Ejemplo de las mediciones tomadas con el osciloscopio cuando se generaba energía eléctrica por medio del impacto de gotas de agua sobre el sensor ‘buzz’

Continuación al experimento: arreglo en serie de diez piezoeléctricos tipo buzz

En esta continuación, se pudo verificar la premisa de que si se conectaban varios sensores piezoeléctricos de tipo buzz la generación de energía incrementaba notoriamente. Para esto los sensores se conectaron en serie, ya que de esta forma teóricamente sus voltajes se suman, los detalles de esta practica se pueden ver en el anexo A4-1.2, a continuación, solo se comentarán los resultados. La producción de energía fue similar a la obtenida en la experimentación de un solo sensor tipo buzz, pero la constancia y numero de picos de voltaje fue notablemente mayor, los valores de los picos generados fueron de **0.3V a los 2.2V pico a pico**. Esta generación eléctrica llegó a pensar que se podía cargar una batería, para demostrar que la energía era utilizable, lo cual no ocurrió y demostró que esta energía se vuelve nula cuando se le conecta algún elemento eléctrico como un diodo o batería. Esto demostró que la energía generada por este tipo de sensores piezoeléctrico tipo buzz no es considerable ni aprovechable.

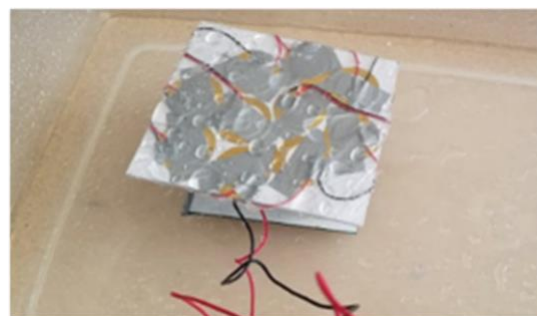


Imagen 19 Arreglo en serie de discos piezoeléctricos siendo golpeados por gotas de agua

Se puede concluir que las pruebas realizadas con el señor material piezoeléctrico tipo buzz muestran que estos sensores no se pueden utilizar en el diseño final del sistema de generación. Analizando el comportamiento de la señal de energía que se produjo, se considera que las razones por las que existió una gran dificultad en poder almacenar esta energía, son las siguientes:

- ❖ *La energía que se genera es solo un pulso*
- ❖ *El pulso generado tiene un tiempo de duración demasiado pequeño*
- ❖ *Para poder almacenar la energía se necesita una señal que dure mas que un pulso*

Es por estos hallazgos que se decidió dejar de probar con modelos que solo generen un pulso, como este tipo de sensores, así como estructuras de tipo puente que previamente sus investigaciones han mostrado que tienen un comportamiento similar. Ahora se analizarán los sensores piezoeléctricos que se pueden fabricar manualmente y que son de tipo laminar, para después experimentar con ellos con una estructura en cantilever, que haga que la gota de agua golpee el sensor y este tenga un breve periodo de vibración antes de que le vuelva a golpear otra gota, lo que en teoría hace que la señal de generación se mantenga oscilando. Este planteamiento supone una mayor generación de energía, así como poder almacenar la energía de forma más sencilla.

Piezoeléctrico laminar como generador para producir energía eléctrica

Ahora se probará la generación de energía eléctrica por medio de gotas de agua que puedan caer sobre sensores piezoeléctrico laminares de una o dos capas. Analizado el accionar de este montaje, se tiene el planteamiento de que si la gota de lluvia cae sobre el sensor provocará el moviendo de flexión de la lámina de soporte, lo cual producirá a su vez una frecuencia en esta y en el mismo piezoeléctrico, que resultará en la generación de electricidad (Fu, Chen, & Bai, 2018).

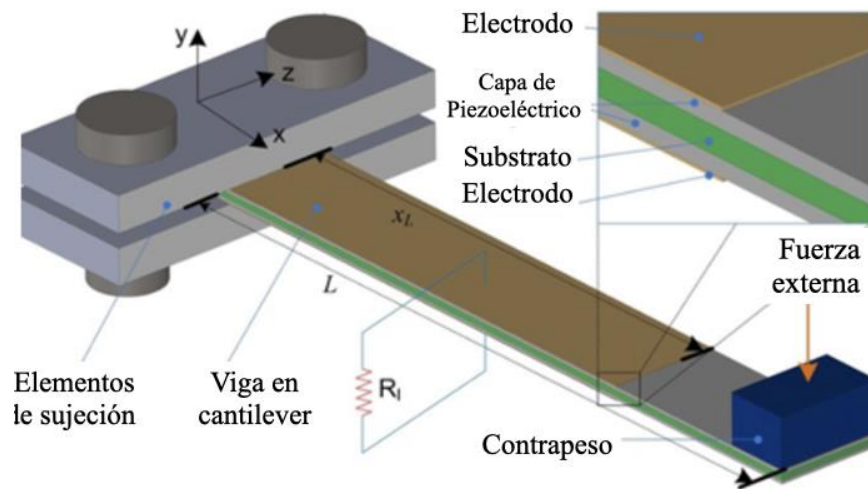


Imagen 20 Diagrama esquemático de un sensor piezoeléctrico laminar de una capa empotrado en un extremo, siendo este accionado por una fuerza externa (Fu, Chen, & Bai, 2018).

En este diagrama se puede apreciar el esquema de un sensor piezoeléctrico laminar de una capa, estando este empotrado en un extremo (actuando como viga en cantilever), mientras esta siendo accionado por una fuerza externa, además de que en este evento entran en juego no solo la velocidad y energía cinética con la que llegue la gota de agua sino también las características de la forma, geometría, materiales, etc. del sensor. Lo que se desea es generar la mayor cantidad de energía posible y para esto se debe de generar la mayor frecuencia de oscilación posible en la viga, lo que nos lleva a lo siguiente:

- ❖ *Se necesita de una mayor fuerza externa para generar una mayor frecuencia.*
- ❖ *Es de suma importancia el momento generado por la fuerza, por esto a mayor distancia del golpe de la fuerza externa al empotramiento mayor momento y mayor frecuencia en la viga.*

- ❖ *La frecuencia en este sistema tendera a oscilar hasta hacerse cero, por lo cual no es constante y tiene una frecuencia máxima que será el pico de energía generada para después decaer a cero.*

Esto nos lleva a hacer una comparación que pudiera dar como resultado un mejor rendimiento que con los sensores piezoeléctrico de tipo buzz, esta comparación es la siguiente. El comportamiento de los sensores tipo buzz al ser accionados con el pulso de un dedo o con una gota de agua, producen una señal la cual llega su pico máximo y caen a cero casi instantáneamente, lo que hace que sea complicado el almacenaje de esta energía, esta señal se puede apreciar en la parte izquierda de la siguiente imagen. Mientras que, como se observa en la parte derecha de la imagen, el accionar de un sensor piezoeléctrico de tipo laminar en cantilever, tiene al momento de ser golpeada por una fuerza externa una mayor vibración, lo que representa que tarde un tiempo mientras esta recupera su posición inicial. De esto se puede recalcar lo siguiente, **la señal eléctrica que se produce por el impacto de la gota no decaiga instantáneamente, sino que se mantenga un corto periodo.** En la grafica se puede ver que el sensor laminar sigue teniendo oscilaciones en su señal, cada vez más pequeñas hasta llegar a cero. Este comportamiento da como posibilidad que la generación de energía al momento de ser golpeada por la gota de lluvia permanezca oscilando y **antes de llegar a cero esta nuevamente pueda ser golpeada por otra gota, lo que haría hipotéticamente una mejor forma de poder utilizar y almacenar esa pequeña energía eléctrica generada.**

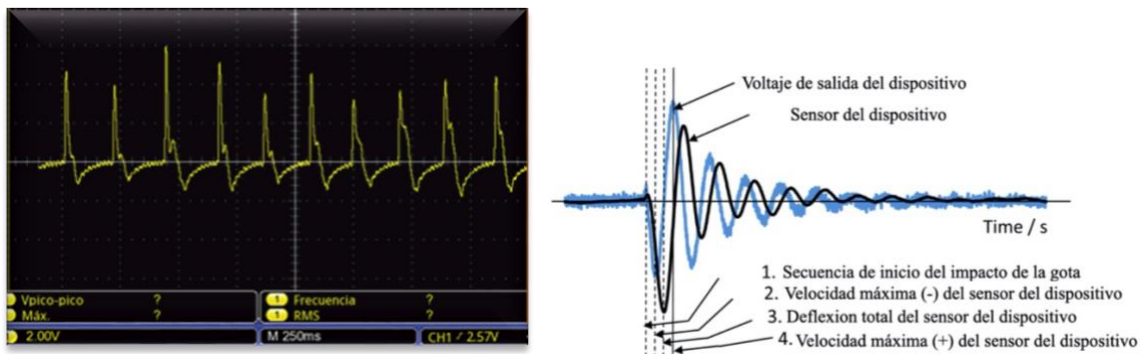


Imagen 21 a) Gráfica de la señal dado por el accionar de un sensor tipo buzz, b) Gráfica del comportamiento de la señal eléctrica dada por el accionar de un sensor piezoeléctrico tipo laminar empotrado en cantilever (Adnan & Swingler, 2015).

Serie de experimentos: 2. Vibración generada por una gota de agua sobre láminas de diferentes grosores

Para conocer el grosor ideal necesario que debe de tener el sensor laminar piezoeléctrico que se va a fabricar, se hizo la experimentación con láminas de diferentes grosores, mientras están siendo golpeadas por una gota de agua, de forma que se conoció cual de estas tiene una mayor vibración. Los resultados de esta prueba mostraron que el sensor laminar que se quiere fabricar **debe tener un grosor entre los 0.05 mm y los 0.15 mm**, menor a la estructura es demasiado débil y mayor a eso el sensor no se moverá, para ver los detalles de la prueba véase el anexo A4-2. Con esta experimentación se pudo conocer la amplitud que una lámina empotrada en cantilever puede tener cuando una gota de agua la golpea, la lámina de 0.05 mm tuvo una amplitud de 68 mm, la de 0.10 mm tuvo una amplitud de 23 mm, la de 0.15 mm tuvo una amplitud de 17 mm. Esta nos muestra que conforme el grosor de la lámina aumenta, la amplitud, la vibración y tiempo tienden a tener valores menores, pero esto no quiere decir que la lamina de menor grosor debe ser la que se use en el modelo que se desea plantear. Esto se explica con el grosor mínimo de 0.05 milímetros, el cual es un grosor estructuralmente débil en comparación con los otros grosores y debido al comportamiento mostrado, este tiene una gran probabilidad de romperse o deformarse después de ser usado por un tiempo.



Imagen 22 Fotografías del momento de impacto de una gota de agua sobre una lámina en cantiléver a) Posición inicial (posición cero), b) Posición máxima inferior (posición máxima negativa), c) posición máxima superior

‘Sándwich’ de capas laminares

La lámina que actúa como viga en cantilever y cuyo grosor ya se ha determinado, ahora se debe ver como un ‘sándwich’ de varias capas de distintas láminas. Uno de las capas mas importantes es la lámina de material piezoeléctrico, la cual convertirá la vibración mecánica obtenida por el impacto de la gota en energía eléctrica. Por lo visto en las experimentaciones, las láminas de menor grosor tienen una mayor vibración, pero al mismo tiempo su estabilidad no es buena, por esta razón deberá de existir una capa con un grosor mayor para generar estabilidad en todo el sándwich. Esta capa deberá de ser de un material flexible que no se deforme por las continuas vibraciones, por esto se considera usar una lámina de metal como las del calibrador. En consecuencia, se considera que el sándwich este dividido en dos partes:

- ❖ *Lámina de metal (lámina de soporte con el grosor más grande), será la que propagará la vibración a todas las demás capas del ‘sándwich’.*
- ❖ *Lámina de material piezoeléctrico (lámina con grosor más pequeño), transformará las vibraciones recibidas a energía eléctrica*

Para evitar confusiones, a la lámina de material piezoeléctrico se le llamara film piezoeléctrico. Se consiguió comercialmente el film piezoeléctrico, el cual no tiene un grosor mayor a los 0.05 mm, esto para poder ser acoplado a las láminas de soporte con grosores entre 0.05 mm y 0.10 mm, para que de esta forma las vibraciones observadas previamente en las experimentaciones se mantengan. El film piezoeléctrico que se consiguió es el siguiente:

- ❖ ***Hoja film de piezoeléctrico metalizado de 28 micro metros 1-1004346-0, MEASUREMENT SPECIALTIES, INC. (especificaciones del film se pueden ver el en anexo A4-3)***

La producción de energía que este film produce está atribuida a la cantidad de material utilizado y a la deformación que se aplica (teniendo cuidado de no romper el film), estas son las condiciones principales se deben de tener en cuenta para el diseño del sistema de generación. Este material, además, trae la oportunidad de utilizar sus características de deformación momentánea, para tener como situación ideal, hacer que esto sucede de forma cíclica para producir energía de forma continua, la cual supondría una mayor facilidad para almacenarla.

Serie de experimentos: 3. Energía generada por la vibración de láminas

Esta prueba sirve para conocer el comportamiento que tiene el sensor laminar con dos capas, cada una con un grosor diferente, una es la lámina de metal de soporte y la otra es el film piezoeléctrico,

de este modo se puede conocer la energía generada por la vibración que recibe todo el sensor, teniendo datos más precisos al monitorear esta señal con el osciloscopio. Uno de los puntos para que el diseño final pueda ser publicado como un diseño abierto, tenga una mejor aceptación y logre ser entendido por el mayor número de personas posible, es que este deberá de ser lo más sencillo posible, tanto en sus materiales, su fabricación y su ensamble final. Por tal motivo algunos de los materiales usados para realizar las pruebas, son materiales sobrantes de otros proyectos que se encuentran en el laboratorio del PDI; cuando se necesite un material específico o se haga una versión final de algún componente, los materiales serán los que mejor cumplan con las funciones que deben realizar. Antes de iniciar la experimentación se fabricó una estructura de soporte en la que se pueda montar el sensor laminar con sus dos capas, para que este actúe como una sola lámina y la pérdida de vibración sea la menor posible. Además, se aseguró que las conexiones que van de las caras del film piezoeléctrico puedan transmitir la señal de generación al osciloscopio, esto se logró colocando dos conectores eléctricos (dos piezas de metal) en la parte de la prensa que asegura y tiene contacto con el film.

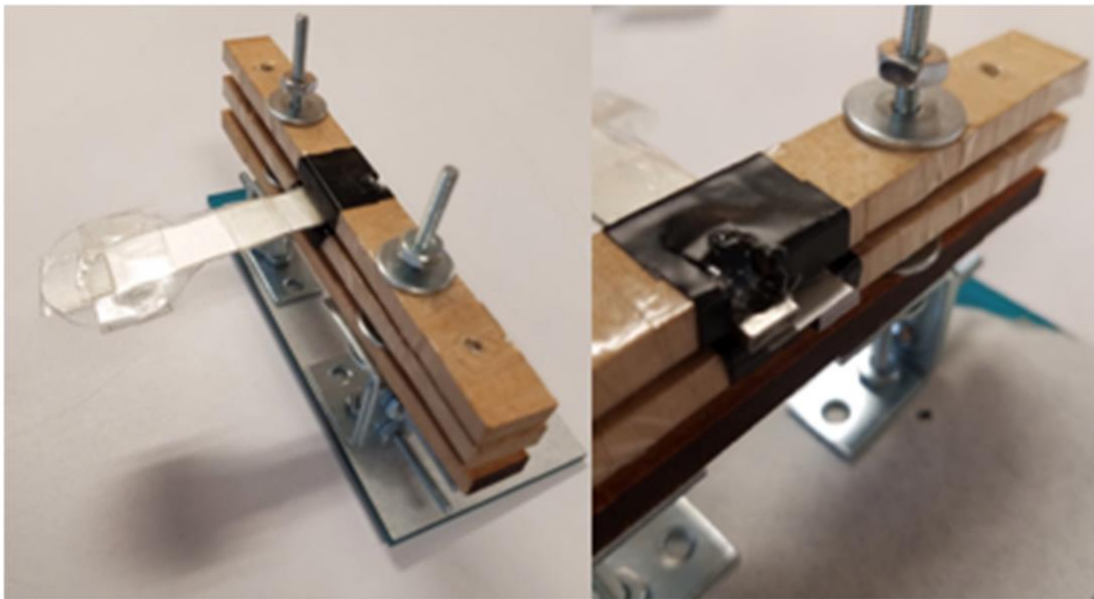


Imagen 23 Imagen izquierda: Lámina de acero y film piezoeléctrico siendo sujetados por el soporte, imagen derecha: detalles de las conexiones eléctricas (piezas de metal) que están en contacto con el film piezoeléctrico para poder transmitir la energía generada.

Se realizó la experimentación con el sensor laminar de dos capas, en las que se obtuvieron las capturas de la señal de energía generada, así como su comportamiento, para ver los detalles de la prueba ver el anexo A4-4. La señal generada por el sensor tuvo valores que varían entre los **-60 mili volts a los 80 mili volts** y su comportamiento se puede describir de la siguiente forma, ***Existe una señal inicial de ruido que se presenta en el sistema, después al momento en que empieza la vibración en las láminas, ocurre un pico en la señal el cual tiene un periodo muy corto casi instantáneo, al que le sigue una pequeña oscilación de la señal que va decreciendo hasta volver a la misma señal estable de ruido inicial.*** Se intentó almacenar de forma simple un capacitor con la energía obtenida, lo cual no resultó y confirmó que hacen falta más experimentaciones en este aspecto. En conclusión, la energía producida por esta configuración no fue suficiente ni en términos de valor de voltajes, ya que son muy pequeños (mili volts), ni en el poder ser almacenada en un capacitor.

Continuación al experimento: Prueba para cargar un elemento almacenador de energía eléctrica

Después de conocer que existe una pequeña cantidad de energía eléctrica generada por la vibración de sensor laminar, que va de entre los **-60mV a los 80mV**, se desea conocer el comportamiento que

se produce al momento de querer cargar un elemento de almacenamiento de energía. Para este fin se utilizó un súper capacitor de 0.047F. Se hizo vibrar al sensor conectado al súper capacitor para ver si este cambiaba la medición de su señal de salida. Después de las vibraciones hechas (ver detalles de la practica en el anexo A4-5, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 11 Resultados de carga de un súper capacitor con las vibraciones de un sensor laminar.

<i>Medición del súper capacitor antes de las vibraciones</i>	<i>Numero de vibraciones</i>	<i>Medición después de las vibraciones en el súper capacitor</i>
13.5 mV	10	13.5 mV
12.2 mV	50	12.3 mV

Estos resultados no quieren decir que se pudo generar y almacenar energía, esta variación se pudo deber a la manera en que se midió el capacitor, teniendo algún error en la primera medición antes de conectar algo, o en la segunda medición, ya habiendo hecho las vibraciones. Por lo tanto, después de esta experimentación, ahora se necesita saber como será la respuesta si se conectan un mayor número de sensores de tipo laminar, ya sea en paralelo, en serie o en alguna combinación de estos, de modo que ayude a incrementar la señal de voltaje generada, hacerla más estable y lograr que se pueda almacenar.

Idealización del sistema de generación con múltiples sensores laminares

Derivado de la experimentación realizada y de lo propuesto para que se comparta como diseño abierto, se decidió utilizar los sensores laminares como elemento principal en el diseño del sistema para generar energía eléctrica por medio del impacto de las gotas de lluvia. Estos no son muy complejos de fabricar, por lo tanto, ahora se investigará la forma en que varios de estos sean usados al mismo tiempo, siendo esto necesario porque, en el fenómeno de la lluvia las gotas caen aleatoriamente, a diferente tiempo y en diferente lugar, es difícil que una gota caiga en el mismo lugar consecutivamente, por lo cual diseñar un sistema donde varios sensores puedan trabajar independientemente cuando se necesite o en conjunto cuando sean golpeados al mismo tiempo es de suma importancia. Hacer que los sensores trabajen en conjunto ayuda a que la energía tenga la misma intensidad que el pico máximo de señal de uno solo, pero con una mejor estabilidad. Para plasmar la idea de como quedaría este sistema se decidió apoyarse en un software para moldear en 3D, específicamente el programa de Solidworks. En esta primera solución de como conectar varios sensores en un sistema, se tomó la decisión de iniciar con la conexión de diez de estos sensores, eligiendo este número debido a la facilidad que presenta para hacer operaciones, por ejemplo, si se desea escalar el sistema en módulos, se puede ir escalando de diez en diez, lo que hace la suma de generación mas fácil. Partiendo del arreglo de sensor laminar que se ha realizado, se tiene conocimiento de los elementos importantes que deben ser considerados.

- I. **La lamina de soporte.** Esta es la lámina que propaga en mayor media la vibración que se produce después del impacto con la gota, como en la prueba anterior, se tiene una forma de cuchara en uno de sus extremos, esto para que el área de contacto sea mayor. Se modelo con *base a una lámina de metal con grosor de 0.10 mm.*
- II. **Film piezoeléctrico.** Es el material que va a generar la energía eléctrica por medio de las vibraciones del impacto de la gota, en donde, a falta de mayor experimentación con diferentes geometrías, se modelo con las dimensiones de la pieza de experimentación, estas son, *grosor 0.04 mm, en dos tamaños: 12 X 30 mm y 12 X 62 mm.*
- III. **Elemento de contrapeso.** Es un peso ubicado un extremo de la lámina de soporte, sirve para ayudar a generar una amplitud y frecuencia mas alta en el sensor, con un impacto menor.

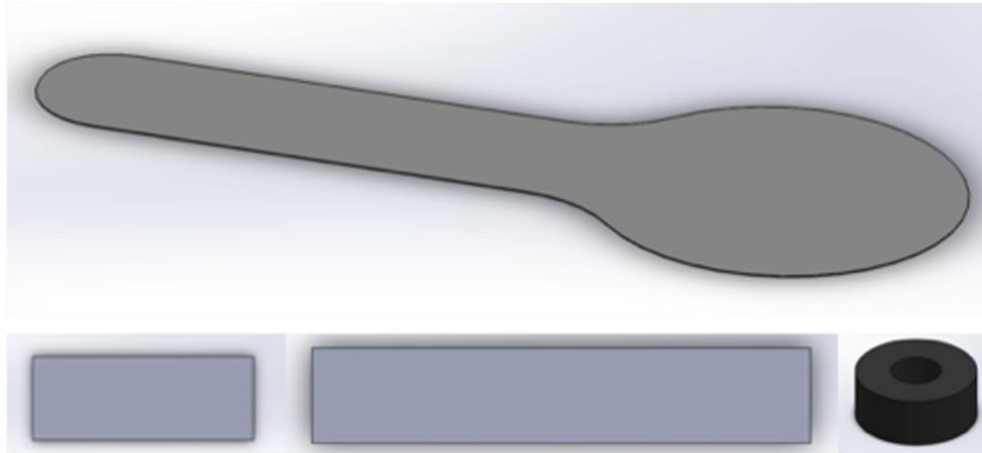


Imagen 24 Modelo en software 3D de la lámina de soporte (arriba), las piezas de film piezoeléctrico (abajo a la izquierda) y el elemento de contrapeso (abajo a la derecha)

La forma en que este primer conjunto de elementos debe acomodarse es la siguiente, el film piezoeléctrico debe estar en la parte superior de la lámina de soporte acero, y el elemento de contrapeso debe estar en la parte inferior. Este arreglo se hace para que el film tenga interferencia con el contrapeso, además, de que se aprovecha la caída de las gotas que impactan el en cuerpo de la lámina, provocando una pulsación directa con el film, lo que ayuda con la generación de energía.

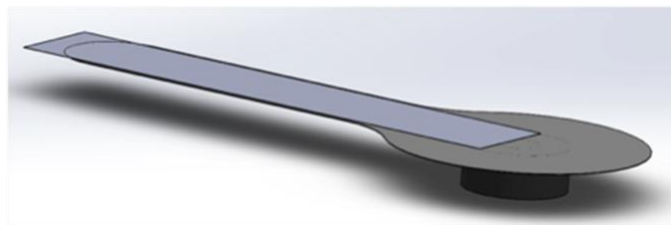


Imagen 25 Modelo en 3D del arreglo de los tres elementos principales trabajando en conjunto.

Paso siguiente fue modelar los elementos que actúan como prensa de sujeción del arreglo anterior, los cuales se denominaran como “tapas”, el modelado de estas tapas en conjunto con el primer arreglo se ve de la siguiente forma. Para ver los detalles de como se llevo a este modelado, las condiciones que se tomaron en cuenta y los pasos para llegar a este, véase el anexo A4-6.

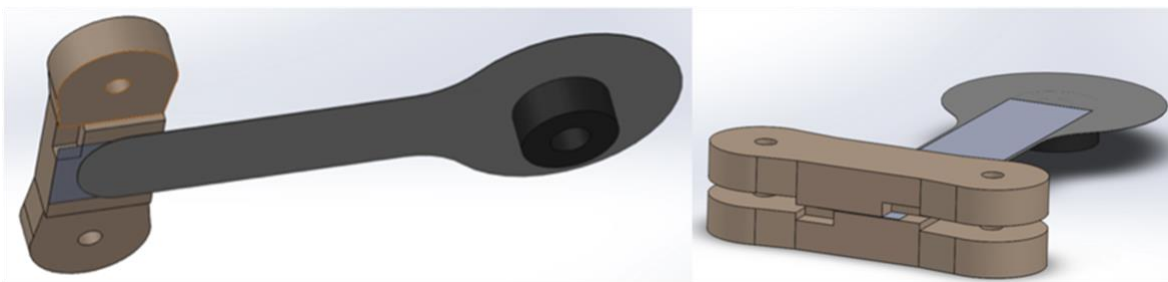


Imagen 26 Modelado en 3D de los elementos de sujeción ‘tapas’, en la imagen de la derecha se puede ver el par de tapas superior e inferior.

La pieza que actuará como base de soporte en la cual se puedan montar **diez sensores laminares** con sus respectivas par de tapas (se le llamara arreglo 2), será un polígono de diez caras en forma de torre, donde en cada cara se pueda montar uno de estos arreglos. El modelado de los diez ‘arreglos 2’ montados sobre la ‘torre base de soporte’ se puede apreciar en las siguientes imágenes, para ver los detalles de este modelado véase el anexo A4-6.

Esta idea esta pensada principalmente para que los diez sensores puedan trabajar en conjunto, teniendo cierta independencia cada uno, pero que a su vez puedan sumar su generación eléctrica como un solo sistema, esto debido a que las gotas impactarán en forma desigual, en diferentes momentos y a diferentes velocidades a cada uno de los sensores. **Este es una primera aproximación, por lo que la idea se va a seguir desarrollando.**

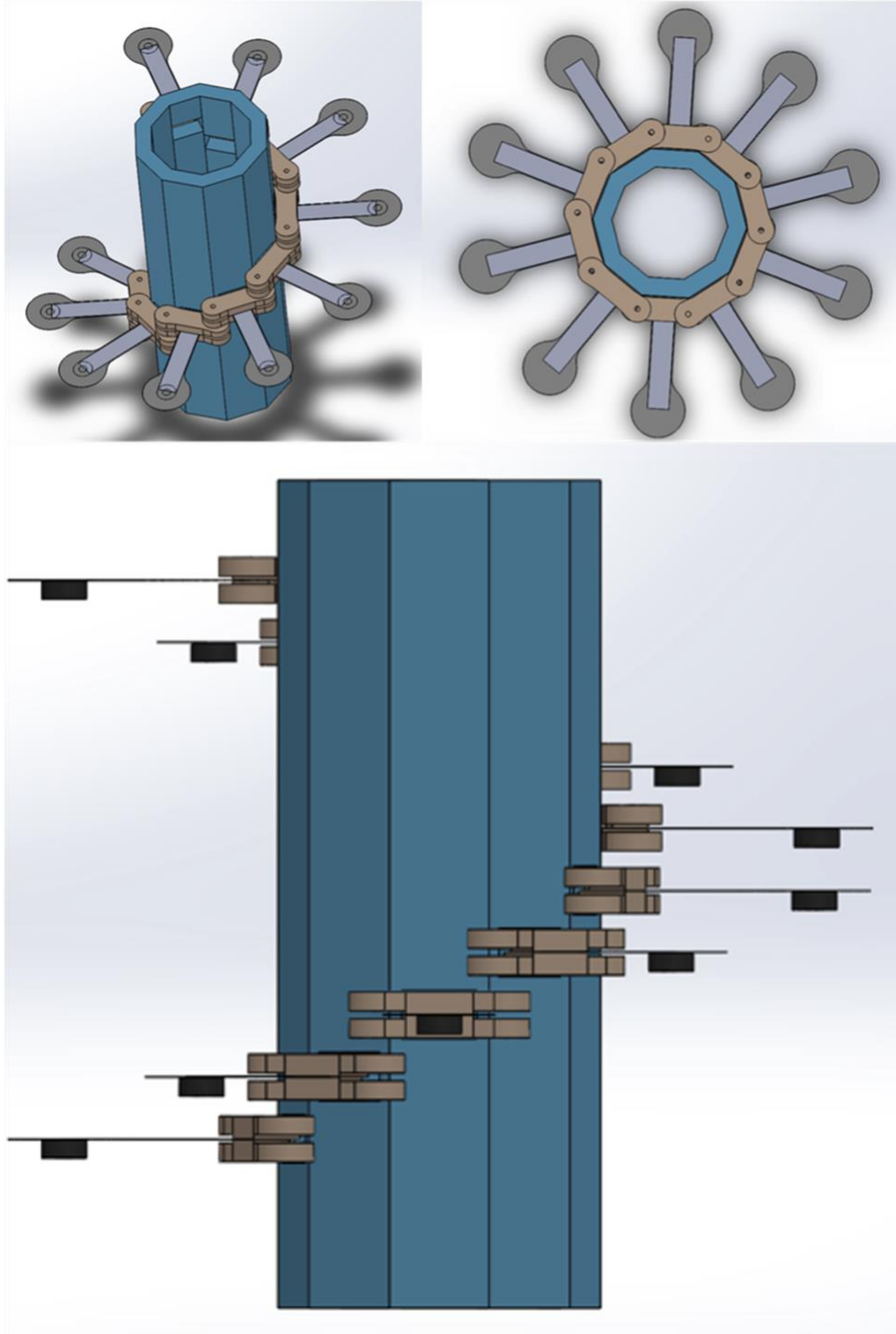


Imagen 27 Modelo 3D de los diez arreglos de film piezoeléctricos montados sobre la torre de soporte

Serie de experimentos: 4. Prueba de la impresión 3D del modelado en software

Para conocer la funcionalidad del modelo en 3D propuesto anteriormente, se necesitó experimentar con alguna sección de este. Se decidió seccionar la torre base de soporte en solo dos montajes de sensores laminares, de esta forma se hizo más fácil la experimentación. Esto se hizo con la impresión en 3D de la mitad del decágono para tener un mejor acceso a las conexiones que se deben hacer sobre los sensores, para ver los detalles de la prueba véase el anexo A4-7. Los resultados obtenidos mostraron que esta configuración solo funcionaba y creaba una señal de voltaje si se vibraba el sensor por elementos externos como la fuerza de un dedo, pero cuando se probaba en el sistema generador de gotas, estas no tenían la fuerza necesaria para poder moverlo. Esto sucedió con la geometría de cuchara, la cual se creía más fácil de mover, por lo que se cambió a una geometría rectangular. El comportamiento con la geometría rectangular fue muy similar que con la de cuchara, aunque, la primera pudo ser movida un poco por el impacto de la gota. Por el poco movimiento obtenido en las láminas sin importar su geometría, la generación de una señal de energía fue prácticamente nula, no se pudo visualizar ninguna señal concreta de voltaje. Esta prueba nos deja las siguientes conclusiones:

- ❖ *No hubo movimiento en las láminas de latón cuando les impactaba una gota.*
- ❖ *Se necesita reformular alguna de las variables usadas para poder producir una señal eléctrica.*

Utilización de aluminio de lata como lámina de soporte

Dentro de las conjeturas que se tuvieron sobre que aspecto cambiar del modelo anterior, se analizaron tanto los materiales utilizados como la estructura de montaje. Se observaron las primeras pruebas con las láminas del calibrador y se compararon con el sensor conformado por la lámina de soporte de latón y el film piezoeléctrico. Se dedujo que el material de soporte de latón tenía una menor vibración que el material de acero, por este motivo, se consideró cambiar el material de soporte de lámina de latón a un material que fuera fácil de conseguir, que tuviera dimensiones similares y principalmente que tuviera una propiedad mecánica de vibración mayor a la del latón. El material que se encontró que cumplía con estas condiciones era una lámina de aluminio proveniente de una lata de refresco, la cual tiene un grosor similar a los 0.10mm que se requerían. Se hizo la prueba de vibración con este material, primero se cortó en forma horizontal la lata, evitando hacer alguna deformación con el corte. Las dimensiones a la que fue cortada fueron las mismas que la lámina de latón, su forma geométrica es la de un rectángulo, quitando la forma de cuchara en su extremo debido a los resultados anteriores, los cuales mostraban un ligero mejor comportamiento de vibración con esta geometría.



Imagen 28 Fotografía del sensor laminar con lámina de aluminio de una lata de refresco como soporte.

Para este nuevo montaje se eliminó el recubrimiento de plástico, ya que no fue efectivo en evitar que se filtrara agua, además de que amortiguaba el impacto de la gota en el sensor. Se recubrió el material piezoeléctrico con una cinta de asilar, que además de ayudar a mantener en su lugar al film, esta evita el paso del agua y no amortigua el impacto de la gota de agua. Hecha la prueba en la que se accionó el sensor con este nuevo material, se obtuvieron los siguientes resultados.

- ❖ *El material de aluminio resultó un mejor conductor de vibración*
- ❖ *La señal generada es una vibración casi perfecta, cuando impacta la gota se produce un pico máximo que va decreciendo hasta volver a su estado inicial cero.*
- ❖ *El montaje no quitaba fuerza de impacto de la gota sobre la lámina*

Por este comportamiento, se decidió que el material de una lata de aluminio es idóneo para ser utilizado como lámina de soporte, por lo que de ahora en adelante este será el que se use.

Incrementar las características del piezoeléctrico con cambio de geometría

Antes de declarar a este arreglo de sensor laminar como definitivo y el que se utilizará para crear todo el dispositivo que se tiene en mente, con sus diez arreglos, se tiene la intención de buscar la geometría de la viga y del film piezoeléctrico que mejor generación produzca. Esto debido a que otra de las posibilidades que trae el utilizar un sensor piezoeléctrico de tipo laminar en cantilever, es el de poder incrementar el desempeño de la generación de energía modificando la geometría de la lámina de soporte y del film piezoeléctrico, sin depender exclusivamente en la gota de lluvia y sus características (velocidad, tamaño, energía cinética). Los elementos que se pueden modificar son los siguientes:

- ❖ *La geometría de la pieza de film piezoeléctrico*
- ❖ *La longitud total del sensor laminar, debido a que mientras esta sea mayor el momento será mayor en el empotramiento.*

Todas las suposiciones, pruebas y resultados que se han visto hasta ahora sobre el desempeño de sensores de tipo laminar, han sido utilizando una geometría simple de forma rectangular, con un ancho (grosor), alto, y largo, lo que ha dado a creer que esta es la forma idónea de utilizar este tipo de sensores. Chattaraj & Ganguli (2016) han preguntado si esta afirmación es cierta, encontrando que la variación en la geometría clásica (rectangular) de este tipo sensores, no es necesariamente la que mejor desempeño puede lograr. Tomando en cuenta que para que se logre el accionar del piezoeléctrico, este debe estar empotrado como viga en cantilever, Chattaraj & Ganguli (2016) han propuesto que no se necesita de todo el rectángulo en la viga, sino que han planteado que una geometría trapezoidal tiene un mejor desempeño, esta geometría se puede ver en la siguiente imagen, los detalles de las dimensiones de la geometría usadas, así como las características de la experimentación de este estudio se pueden ver en el anexo A4-8.

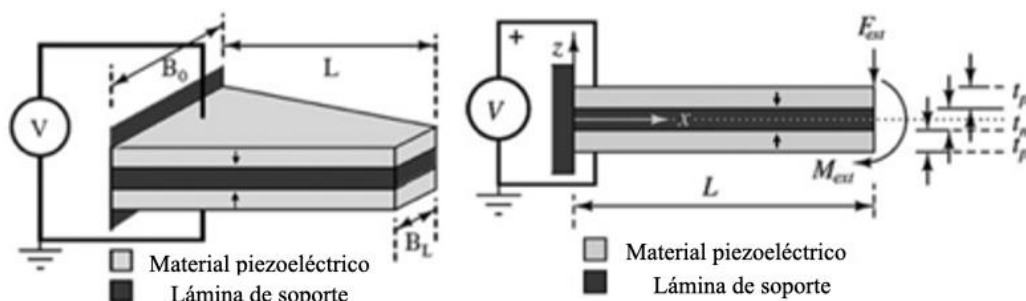


Imagen 29 Esquema de la geometría trapezoidal de un sensor laminar piezoeléctrico (Chattaraj & Ganguli, 2016).

Los resultados que muestra este estudio sobre la eficiencia de energía producida, así como la energía neta de salida, tienen una mejora de hasta en un 25 % en la configuración geométrica de trapecoide a comparación de la rectangular. Debido a estos resultados, se hará la experimentación con los materiales ya establecidos para encontrar la geometría que mejor generación de energía produzca, en las condiciones propias de laboratorio.

Serie de experimentos: 5. Experimentación de sensores con diferentes geometrías

La hipótesis que se tiene sobre la utilización de sensores piezoeléctricos con medidas geométricas hechas a medida es:

- ❖ ***“El cambiar la geometría del film piezoeléctrico puede ayudar a mejorar la generación de energía eléctrica”***

Para validar esta suposición se hizo la prueba de generación eléctrica con por seis diferentes formas geométricas de sensor laminar. La experimentación mostró el valor numérico de la generación, así como el comportamiento de cada una de estos sensores. A continuación, se muestran los seis sensores con sus films piezoeléctricos con sus distintas geometrías, en algunos de ellos lo que cambio fue solo la pieza de film piezoeléctrico manteniendo la misma geometría en su lámina de soporte, en otros cambió tanto la lámina de soporte como su pieza de film piezoeléctrico, ambas siguiendo la misma figura geométrica, para ver los detalles de estos sensores, así como sus resultados de generación, véase el anexo A4-9.



Imagen 30 Imagen de las laminas usadas para experimentación con diferentes formas geométricas, se analizaron cómo piezo 1, piezo 2, piezo 3, piezo 4, piezo 5, piezo 6, representados en la imagen de izquierda a derecha.

En sensor laminar con mejor rendimiento fue el piezoeléctrico 2, sus características son:

- ❖ Lamina de soporte, hecha de material de aluminio, dimensiones de 13 mm X 62 mm
- ❖ Pieza de film piezoeléctrico de 42 mm X 12 mm con grosor de 40 micras
- ❖ La generación pico a pico fue de 800 mV a -500mV, la duración de su señal de vibración por el impacto de una gota fue de 750 ms, se alcanzo una generación máxima en su pico mas alto de 1.3V

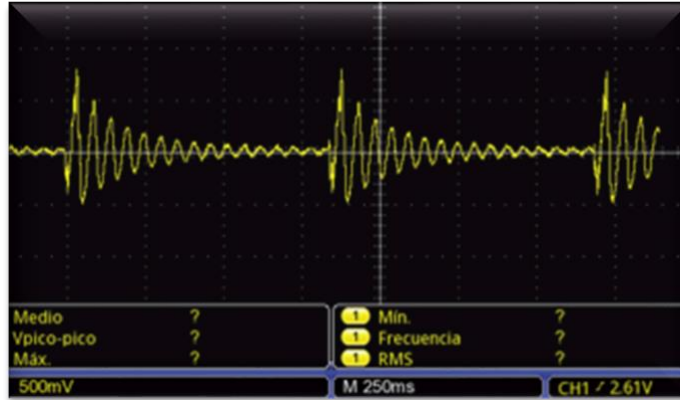


Imagen 31 Gráfica del piezoeléctrico con mejor desempeño, la forma geométrica fue rectangular de 42 mm X 12 mm

Haciendo una comparación con el valor máximo sin cargas de caracterización en los estudios analizados, el cual fue de un *Voltaje máximo de 1.003 V entre los grosores de 20 y 30 micro metros*. Con esto se puede decir que la manipulación de la geometría si resulto en un mejor comportamiento y generación de energía que con las mediciones propias hechas anteriormente y a su vez **también prueba que, SI se mejoró la generación de energía de todas las investigaciones antes mostradas que utilizaban piezoeléctricos comerciales, lo cual ya es un hallazgo en la tesis.**

Capítulo 5

Diseño de un sistema de generación de energía por medio del impacto de gotas de lluvia

Capítulo 5 Diseño de un sistema de generación de energía por medio del impacto de gotas de lluvia

Principio de elaboración de la propuesta de diseño abierto del proyecto del sistema de generación

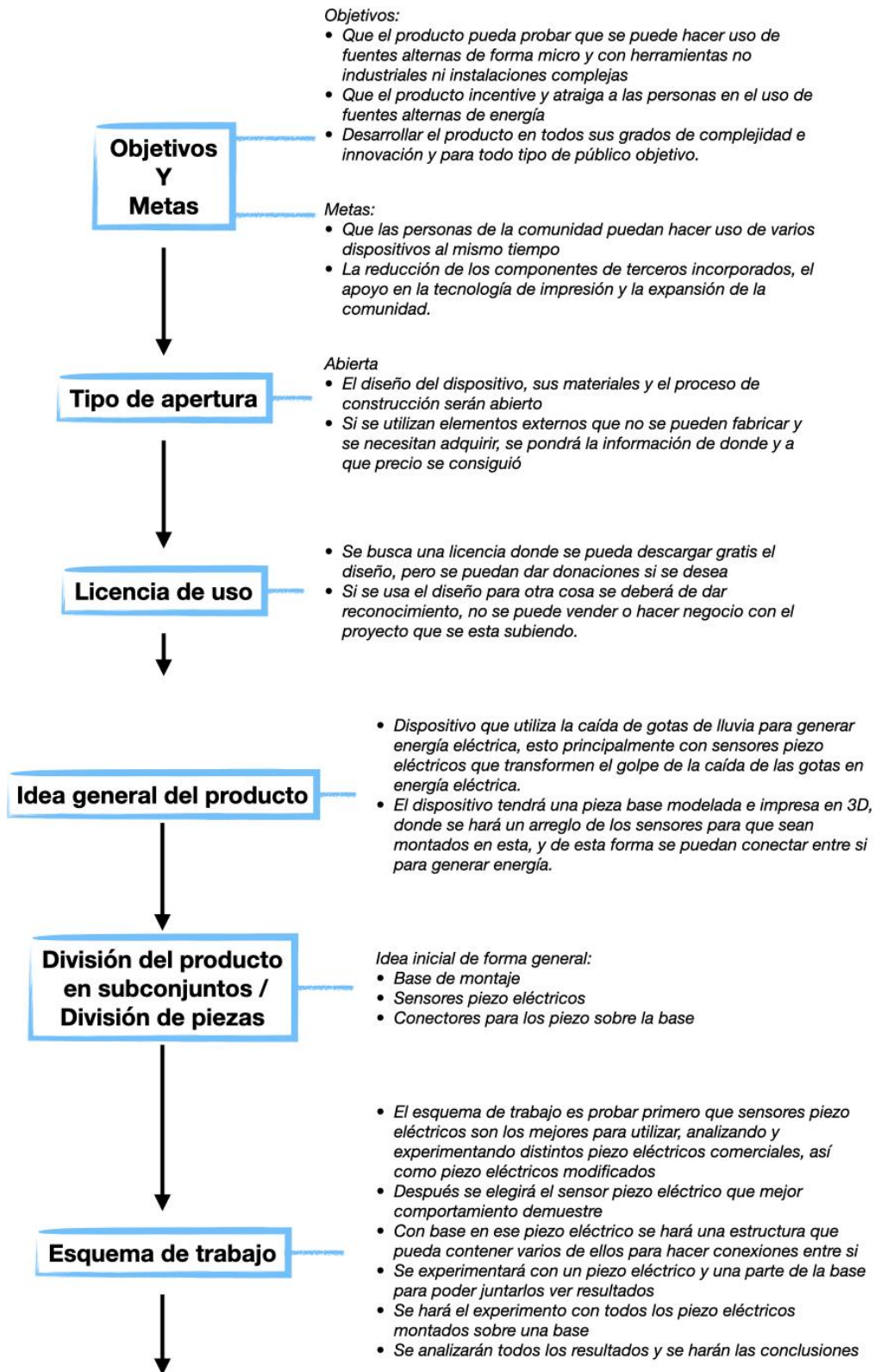
Una de las razones de esta tesis es la de hacer que sistema de generación de energía que se diseñe, sea un incentivo para que personas se adentren en el tema de las energías renovables, empezando por que el sistema sea lo más fácil de fabricar e instalar para que cualquiera lo pueda hacer, añadiendo que se pueda modificar. Para lograr esto, primero se debe de hacer que el sistema se centre en ser un dispositivo u objeto, de modo que se simplifique la fabricación e instalación, sea fácil de replicar, modificar o conectar varios de estos entre si, sin mucho problema. Una de las premisas es que para que cualquier persona pueda lograr todo esto con el dispositivo, este deberá de ser compartido como proyecto de diseño abierto, con lo cual se pretende que se logre incentivar y motivar el uso de este tipo de sistemas de generación. Por lo cual, la meta del diseño del sistema de generación, teniendo como condición también ser compartido como proyecto de diseño abierto es: *que las personas se adueñen del dispositivo, se entusiasmen por el tema de energía renovable y quieran seguir utilizando, desarrollando y modificándolo o en su caso, se cree el interés de usar dispositivos similares, con la misma temática y propósito.* Para acercarse lo mas posible a esta meta, primero se tienen que plantear los dos casos que pueden suceder, dependiendo de los resultados de generación de energía obtenidos en el diseño final del dispositivo, será como se redondeará la propuesta del proyecto de diseño abierto, estos casos son los siguientes:

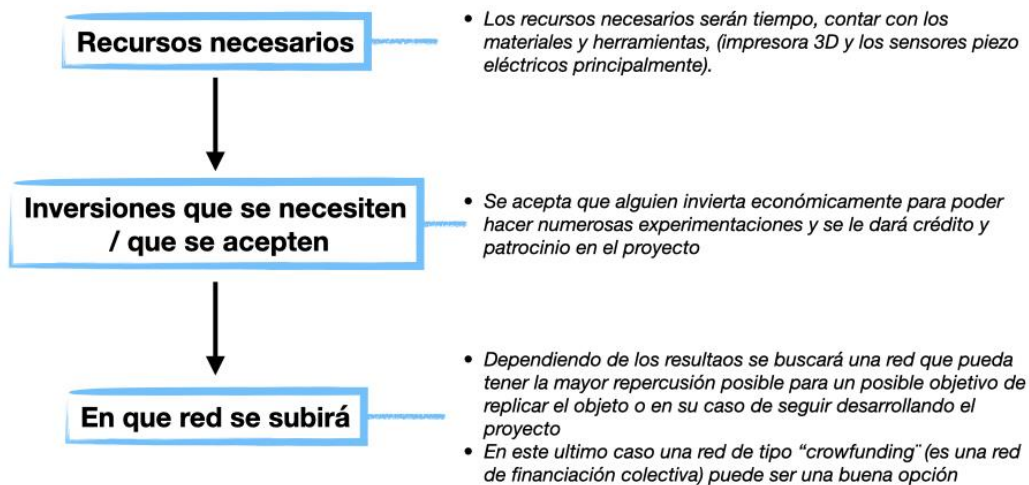
- I. *El dispositivo final si generó energía aprovechable, por lo que su objetivo de diseño abierto es el de ser replicado, conectándose uno o varios al mismo tiempo (esto ya es decisión de quien lo replica) o el ser modificado parcial o totalmente a voluntad.*
- II. *El dispositivo final NO generó energía de una forma satisfactoria, por lo que el diseño al que se llegó requiera que alguien siga desarrollando alguna idea inconclusa que se presente y que no se pueda realizar por falta de recursos, como, por ejemplo, hacer varios dispositivos y conectarlos entre si.*

Inclusión de la propuesta de proyecto de diseño abierto en el diseño final del dispositivo

La propuesta de proyecto de diseño abierto estará representada en el dispositivo final que se haya fabricado, esto es, todo lo que implica esta propuesta se verá reflejado en cada paso, cada decisión y cada etapa de desarrollo que llevó al dispositivo final que se presente. Esto se hace porque, aun cuando se va a presentar esta propuesta, esto solo será como un ejemplo de como se debe hacer. **La propuesta NO se evaluará en esta tesis, NO esta dentro de los objetivos de la tesis ni dentro de sus alcances, para evaluar una propuesta de este tipo se necesita un análisis posterior a su publicación, recabando información de la repercusión que ésta tuvo, para lo cual se necesita de un periodo prolongado de tiempo (años).** Lo que se presenta a continuación es la propuesta del proyecto de diseño abierto del sistema de generación de energía por medio del impacto de gotas de lluvia, desarrollada en un esquema para llegar a su realización, así como el marco con los seis aspectos para estudiar y desarrollar la innovación en el dispositivo.

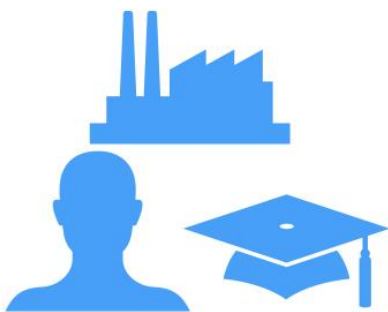
Propuesta de proyecto de diseño abierto: Dispositivo generador de energía a través de gotas de lluvia





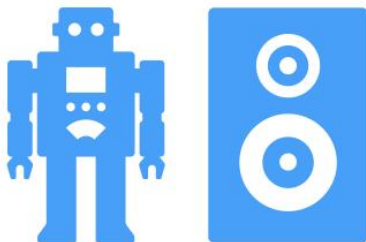
Marco con seis aspectos para estudiar y desarrollar la innovación en el proyecto de diseño abierto

1 Actores



- Creador del proyecto: Yo
- Participantes: cualquier personas interesada podrá acceder al diseño
- Requerimientos participantes: Si desean modificar el objeto deberán de tener conocimientos previos, si desean rediseñar el dispositivo deberán de tener experiencia en tema
- Inversionistas: Cualquier empresa puede participar, se busca de ella recurso para hacer múltiples iteraciones de diseño y experimentaciones

2 Objeto



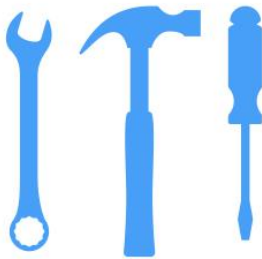
- Objeto central: Dispositivo diseñado para generar energía eléctrica a través de gotas de lluvia
- Podrá ser replicado, modificado, rediseñado o en su caso deberá de seguir siendo desarrollado por los actores participantes del proyecto.
- Desde su inicio se diseñó con la intención para que su fabricación sea lo más sencilla posible, así como las herramientas que se necesiten no sean tan complejas, para que mas personas puedan acceder a este.

3 Estructura de Gobierno



- Se tiene la idea de abrir el diseño abierto con toda la información referente a este, planos, materiales instructivos, y modelos 3D, serán abiertos,
- Nadie se puede adueñar del diseño ni tampoco hacer uso comercial de este sin autorización.
- También estará la posibilidad de donar al creador en este caso mi persona, lo que se desee, como ya es habitual en paginas que promueven estos proyectos.

4 Proceso de desarrollo



- Será una guía constante de cómo se va haciendo y experimentando con el sistema de generación de gotas de lluvia.
- En un inicio se plantea usar impresión 3D, donde esta utilizará plástico
- Se utilizarán sensores piezo eléctricos para generar la electricidad cuando una gota de lluvia caiga sobre ellos; estos podrán ser comerciales, modificados o de fabricación propia.

Todas las experimentaciones serán documentadas, existirá la información de como se fabrico, los pasos para su ensamble, así como las instrucciones para usarlo.

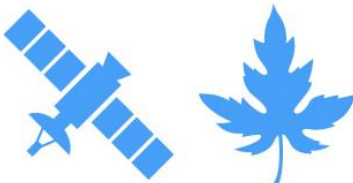
5 Resultado Innovador



- El resultado innovador que se busca en el sistema de generación de gotas de lluvia, es crear un dispositivo que cumple con esta sentencia, sin tener en cuenta cuanta energía eléctrica produce o si se puede almacenar
- Se hace esta aclaración, debido a que, si la generación que se hace por parte de este dispositivo es considerable y almacenable entonces tendrá otro grado de éxito

Por otra parte, si la generación que genera no es mucho o no puede almacenarse lo que se genera, entonces este diseño de dispositivo deberá de ser considerado como un proyecto aun en desarrollo que será planteado como un producto que requiere de seguir trabajando con este, por lo que se necesita de una comunidad centrada en este. Esto ya como algo mas allá de esta tesis.

6 Medio ambiente



- El dispositivo al ser un sistema que genere electricidad por medio de gotas de lluvia debe de estar dentro de la temática de energías, de recursos renovables.
- Después el dispositivo deberá de estar categorizado como un producto que se desea que pueda fabricarse con manufactura no industrial, como lo es una impresora 3D comercial

Conclusión del diseño final del dispositivo

Presentada la propuesta de proyecto de diseño final de sistema, tomada como guía para la conclusión del diseño final, ahora se muestran los procesos a desarrollar para llegar a este fin. Se retomará la idea del modelo del sistema ya planteada en el capítulo anterior, siguiendo la propuesta como guía para realizar las iteraciones de diseño que sean necesarias, hasta que se llegue al diseño final del dispositivo, el cual deberá de estar en condiciones para realizar una experimentación final, de la que se obtengan los resultados, hallazgos y conclusiones finales de este trabajo de tesis.

Iteraciones de diseño para llegar al diseño final del sistema de generación

A la mejora continua en el diseño de un objeto o producto se le puede denominar iteración de diseño; en esta tesis se denominará como iteración de diseño a cada nueva modificación sustancial al diseño del dispositivo. Cada iteración será puesta a prueba para obtener resultados sobre sus modificaciones, los cuales nos indicarán si se esta mejorando el diseño. Se harán las iteraciones de diseños que se crean necesarias para llegar a un diseño final del dispositivo, el cual dará los resultados y conclusiones finales de la tesis; estos también darán a conocer como se redondeará la propuesta del proyecto de diseño abierto. Con los resultados del primer modelo planteado (capítulo 4), se conocieron algunas de las falencias que su modelado 3D tuvo, así como sus consideraciones iniciales acertadas. A continuación, se enumerarán los aspectos que se deben mejorar, como también los aspectos que se deben mantener.

- ❖ *Mantener el sensor laminar en su lugar de montaje fue difícil (dentro de la sujeción de las tapas de presión), se **necesita rediseñar la forma de hacer esto.***
- ❖ *Se necesita agregar una guía que ayude a que el mecanismo de tapas de presión se mantenga en su lugar. **Se necesita modificar el diseño para que las tapas ‘entren’ de mejor forma a la torre base, ya sea en la torre, en las tapas o en ambas.***
- ❖ *Hacer las conexiones entre el film piezoeléctrico y el material conductor que transmitía la energía que se generaba fue demasiado complejo y sufría de muchos desajustes, **se necesita mejorar la forma de hacer esas conexiones.***
- ❖ ***Se debe mejorar la forma de hacer el cableado si se quiere trabajar con más de un sensor laminar al mismo tiempo.***
- ❖ ***La geometría de la torre base resultó ser correcta, con gran maniobrabilidad, observándose que en esta se pueden montar de buena forma los piezoeléctricos que se necesitan.***

Primera Iteración de diseño

Con estos aspectos mencionados, se debe de plantear mejorar todo lo negativo y mantener todo lo que funcionó de forma correcta, siendo esto el propósito de la primera iteración de diseño del sistema. Para lograr esto, primero se debe mantener lo positivo, el tamaño de la base torre y la idea de hacer un polígono de diez caras funcionaron correctamente, logrando que los espacios sean ideales para trabajar, de forma que la base torre seguirá siendo el punto de partida de las modificaciones que se desean hacer. Establecido esto, ahora se deben de solucionar los problemas en el funcionamiento del ensamble de los componentes. Uno de los mayores inconvenientes que se tuvieron a la hora de hacer el ensamble del conjunto de ‘tapas’ y de los sensores laminares a la torre base, fue que no existía una guía que ayudara a unir las tapas inferior y superior, por lo que además de sujetar al sensor también se debía de tener cuidado en no mover las tapas para que quedaran en posición y pudieran ser montadas a la torre base, lo cual fue sumamente complicado. Se hicieron tres modificaciones para solucionar estas cuestiones, estas se pueden ver detalladamente en el anexo A5.1. Se realizó la impresión del modelo con estas tres modificaciones para las mejoras que suponen.

Impresión 3D

Antes de hacer la impresión 3D de toda la torre base, se hizo una prueba de impresión de solo una sección de esta pieza, para conocer los problemas que se tengan en las tolerancias, dado que la impresión 3D no siempre es totalmente precisa. Esto se debe evitar porque los ensambles que se modelaron deben de ser lo mas precisos posible para tener un buen funcionamiento.

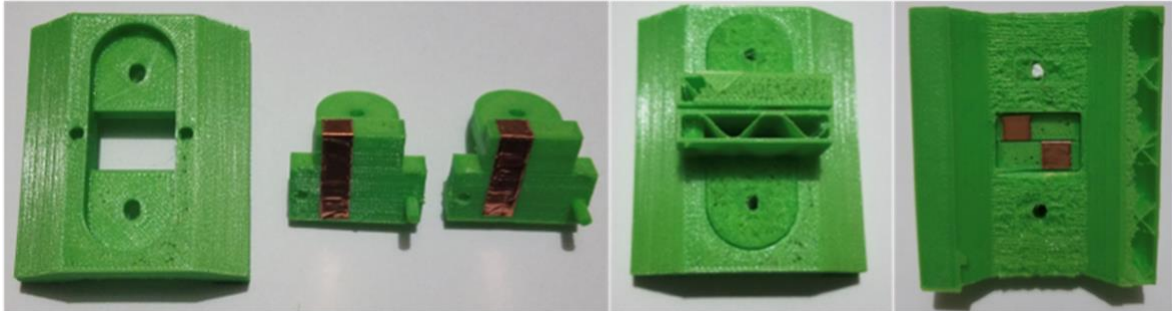


Imagen 32 Prueba impresa en 3D de la segunda iteración de diseño, de izquierda a derecha: sección de la torre base, tapa inferior, tapa superior, ensamble de las dos tapas dentro de la sección de la torre base vista frontal y trasera.

Se imprimió en 3D las tapas inferiores como superiores, así como la sección de la torre base, en esta ultima se encuentra el hueco en el que deben de ir montadas las dos tapas, una vez que estas estén sujetas una sobre otra (ver imagen anterior). Esta impresión en 3D nos muestra que los modelos en software 3D si se pueden llevar a cabo con éxito, además, también se comprobó que las laminas de cobre tienen un grosor delgado, el cual no afecta en ningún momento con el ensamble. Las conexiones se harán desde la parte trasera del ensamble de las tapas, así como adentro de la torre, asimismo se deberá de soldar sobre la cinta de cobre pines para cables, los cuales ayudarán a conectar los sensores entre si. Los aspectos de esta impresión en 3D que se deben corregir son:

- ❖ Se debe mejorar la calidad de impresión, el porcentaje de relleno de las piezas no fue el adecuado, se debe de aumentar.
- ❖ Las guías de cada tapa (cilindros salientes) deben de tener un mayor diámetro para que no se rompan
- ❖ Las tolerancias deben de ser menores para no re trabajar la pieza (lijarla).

Serie de experimentos: 6. Impresión 3D de un modelo físico de la iteración de diseño

Realizada la prueba para conocer las tolerancias que se tienen en la impresión 3D, se hicieron las correcciones necesarias, para pasar a hacer la impresión 3D de una sección de la torre base en la que se puedan montar tres sensores de tipo laminar. Con esto se realizaron pruebas para que determinar la generación producía, tanto por cada sensor por separado como los tres sensores en serie. Primero se midió por separado la generación producida por cada uno de sensores, para esto se montó cada sensor sobre la sección de la torre. Para generar la señal de generación se hizo vibrar cada sensor independientemente, los resultados obtenidos se muestran a continuación, para ver los detalles de la experimentación ver el anexo A5.2.1

- **Sensor 1:** Se obtuvo un voltaje pico a pico de alrededor de **-400 mV a 400 mV, con una generación total de 800 mV, y una señal que decrece hasta volver a cero.**
- **Sensor 2:** Se obtuvo en promedio por pulso, un voltaje pico a pico de **-1V a 800 mV, una generación total de alrededor de 1.8V y su descenso a 0 V en casi 500 ms.**
- **Sensor 3:** Se obtuvo en promedio por pulso, un voltaje pico a pico de **-1V a 1V, una generación total de 2V, y un descenso a cero en alrededor de 400 ms.**

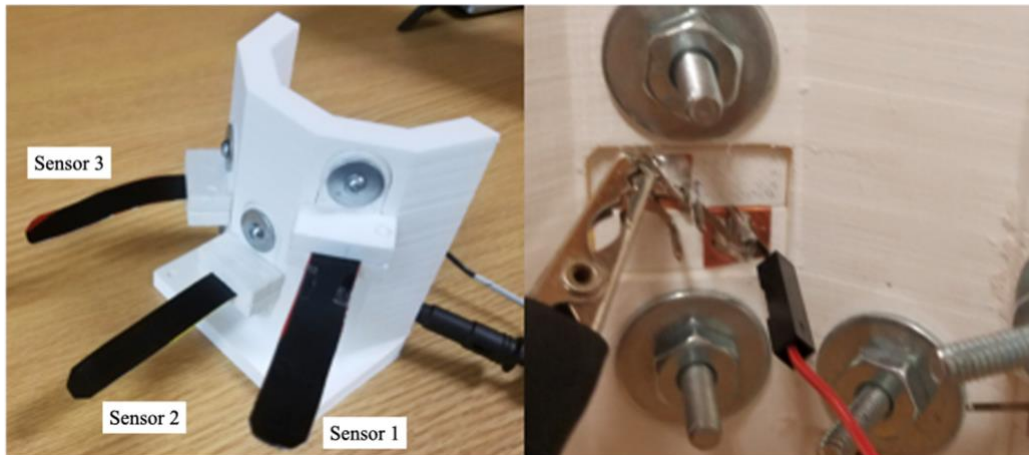


Imagen 33 Impresión 3D del modelo con tres sensores, b) Conexión con los pines soldados a las láminas de cobre

Como paso siguiente se conectaron los tres sensores en serie, buscando que se sumen sus corrientes eléctricas y que esto mejore el almacenamiento de esta energía. Se hizo vibrar los tres sensores tanto al mismo tiempo como a destiempo, la señal que se generó se puede apreciar en la siguiente imagen. Como puede verse, **el pico de la señal de los tres sensores tiene en promedio una reducción en comparación con lo mostrado por un único sensor, pero, por otro lado, la señal de generación no decrece y no tiene puntos donde llegue a cero**, esto es de utilidad debido a que la señal es relativamente constante, por lo que en teoría tendría que ser mas fácil de almacenar.

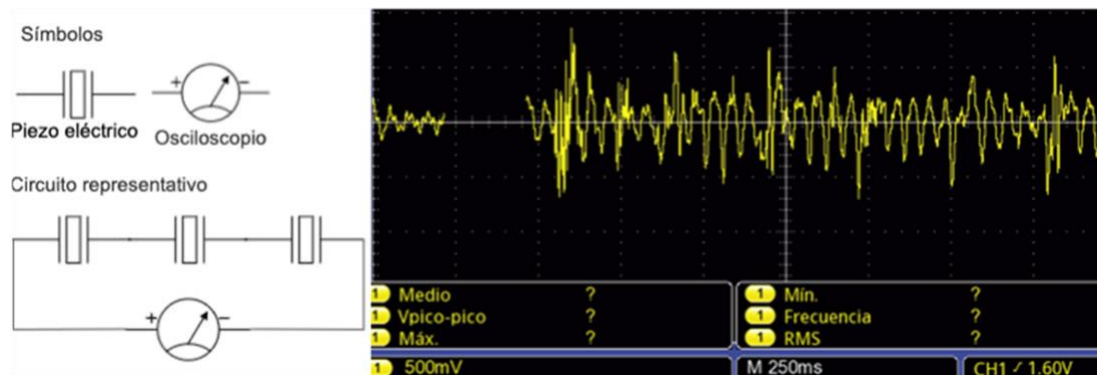


Imagen 34 a) Circuito representativo de la conexión en serie de los sensores, b) Captura de la señal de generación obtenida por los tres sensores conectados en serie y siendo accionados al mismo tiempo.

Hallazgos y consideraciones paralelos a los resultados de generación

Se hicieron hallazgos importantes en estas pruebas, estos afectan directamente a la generación de energía y a la lectura que el osciloscopio le hace, estos se deben evitar para conseguir datos mas precisos de lo que esta pasando. Estos hallazgos son los siguientes:

- **El osciloscopio debe estar conectado a tierra aislada.**
- **No debe haber aparatos eléctricos conectados cerca de la conexión entre el osciloscopio y el dispositivo de generación.**

El osciloscopio debe de estar conectado a tierra, de lo contrario se produce una señal de ruido que es más grande que las señales que el dispositivo esta generando, asimismo, los dispositivos eléctricos (computadoras, celulares, etc.) NO deben de estar cerca del dispositivo mientras estén conectados a un enchufe, porque también generan ruido en la señal.

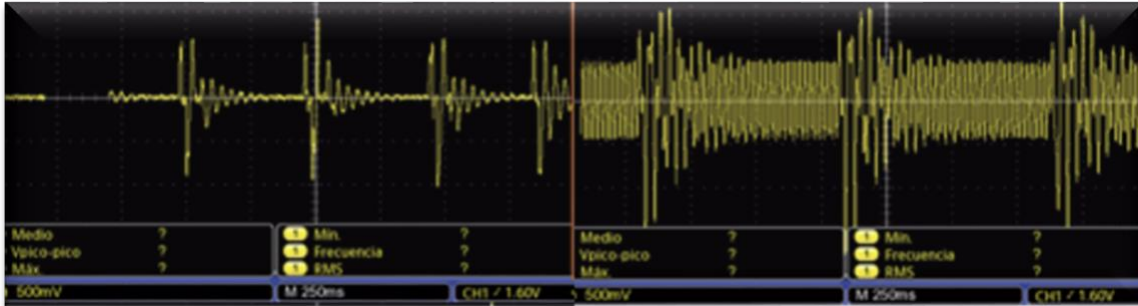


Imagen 35 Comparación de señales generadas por el sensor laminar, la parte de la izquierda muestra la señal sin ruido, y la parte de la derecha muestra la señal con ruido externo.

Impermeabilización de la sección de torre con sensores laminares

El aislamiento del dispositivo contra el agua es una de los aspectos que menos se han tenido en cuenta en las investigaciones sobre la generación de electricidad por medio de gotas de lluvia, ya sea porque nunca se planteo un sistema real presentado en un dispositivo o porque solo se tenía la necesidad de centrarse en los valores de generación. Para que el dispositivo que se está desarrollando sea lo más apegado a las condiciones reales de uso, las pruebas para su realización deben de estar en contacto con el agua, motivo por el cual todos los componentes que estén expuestos deben de ser impermeabilizados. La filtración de agua no solo provocará que no se tenga medición de energía, también puede llegar a dañar los componentes importantes como lo son las piezas de film piezoeléctrico. Por esto se probarán diversas formas de aislar los materiales antes mencionados, empezando con proponer los siguientes métodos:

- ❖ Se forrará la parte trasera de la sección de prueba con plástico (el dispositivo definitivo será cerrado, por lo que esta opción no será necesaria).
- ❖ Las ranuras donde se coloca las tapas que sostienen el 'arreglo 2' quedaran selladas con silicón, el cual podrá ser removido posteriormente si se desean quitar las tapas.
- ❖ Se utilizará pegamento instantáneo líquido (tipo 'kola loka') para sellar los bordes del sensor laminar, teniendo cuidado que no toque al film piezoeléctrico para que no dañe al material

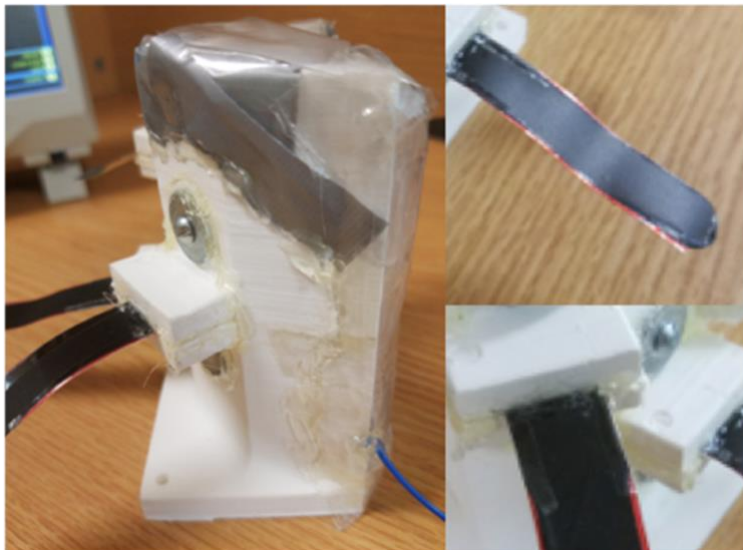


Imagen 36 Fotografía del sellado y aislamiento que se hizo, en la imagen de la izquierda se puede apreciar el sellado de la parte trasera de la sección de prueba, en la imagen superior derecha se observa el sellado que se hizo en los bordes con pegamento líquido, en la imagen inferior derecha se pueden ver las ranuras entre componentes selladas con silicón.

Segunda parte del experimento: Prueba de la impermeabilización aislamiento y de la generación de energía bajo el goteo de una regadera

Es necesario realizar una prueba con condiciones que se asemejen a la realidad, esto es, la caída de gotas de agua de forma constante y con un área que cubra toda la sección de torre que se este probando. El propósito de esta prueba es conocer la eficacia de la impermeabilización que se hizo a la sección de torre con sus tres sensores laminares, de forma que se tenga respuesta a si esta es la manera correcta de impedir que existan filtraciones en los componentes que están en contacto con la energía eléctrica generada. El rendimiento obtenido fue el siguiente, para ver los detalles de esta prueba véase el anexo A5.2.2. *Los resultados no pudieron ser concluidos en su totalidad debido a un fallo en la impermeabilización, lo que originó que las mediciones variaran demasiado, hasta el punto donde ya no eran servibles, dando por terminada la experimentación, aun cuando no había caído la totalidad de las gotas de lluvia.* Viendo la forma en como se impermeabilizó y de como sucedieron las fallas por las que se filtro el agua, se tienen las siguientes conclusiones.

- ❖ *Se debe eliminar la tornillería para mejorar la facilidad con la que se montan los sensores sobre la torre base, de forma que se usen los menores elementos posibles*
- ❖ *El diseño debe dejar las menores ranuras entre los elementos para hacer mas fácil la impermeabilización*

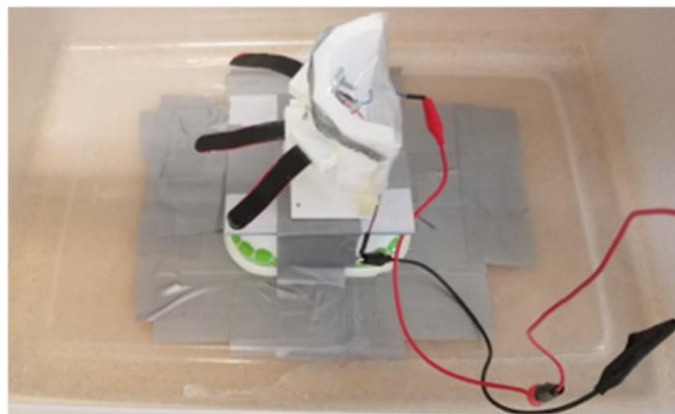


Imagen 37 Fotografía de la sección de prueba impermeabilizada dentro de una tina de contención

Segunda iteración de diseño

Hechas la experimentación sobre la primera iteración de diseño, tanto en la puesta a punto de la impresión 3D calibrando tolerancias, como en la realización de una sección de la torre para montar y conectar en serie mas de un sensor, se ha recabado información sobre lo que ha funcionado y también sobre los fallos que aun se tienen en el diseño. Esto se tratará de corregir en una segunda iteración de diseño. Las ideas planteadas que han funcionado correctamente son las siguientes:

- ❖ *Las guías en las 'tapas' ayudan a mejorar la estabilidad al momento de sujetar el sensor y en especial, la pieza de film piezoeléctrico.*
- ❖ *La conectividad de las láminas de cobre con el film piezoeléctrico hizo el montaje más sencillo, ayudando sustancialmente en la transmisión de la energía generada*
- ❖ *La idea de soldar pines sobre la saliente que contenía a la lámina de cobre hizo que las conexiones con cables con puntas hembra no tuvieran complejidad y funcionaran correctamente.*

Las partes a modificar en esta segunda iteración de diseño son las siguientes:

- ❖ Se necesita mejorar la forma de montar el conjunto de ‘tapas’ y ‘arreglo 2’ en la torre base de montaje
- ❖ Se debe hacer que exista una menor cantidad de ranuras que se tengan que rellenar
- ❖ Se debe eliminar los tornillos como forma montaje de las tapas sobre la torre, se necesita proponer otro mecanismo.
- ❖ Se debe hacer un canal en la tapa inferior o superior donde se indique y se mantenga en posición al sensor laminar

Mecanismo de sujeción “giro-cierre” entre los elementos tapas de presión y torre base

La necesidad de cambiar la forma en que se montan las tapas sobre la torre base hizo que se analizaran diferentes tipos de mecanismos de sujeción, dentro de estos, se encontró el mecanismo de cierre que cuentan algunos relojes, controles remotos etc., el cual será usado para cumplir esta función. En este nuevo mecanismo la función de las tapas de presión sería la misma, se tendrían dos tapas, una inferior y otra superior que sujetaran al laminar, con sus respectivas guías y canales para las laminas, haciendo que, al momento de unión, las tapas funcionen como un solo elemento, para después usar el principio del mecanismo anterior, el cual es entrar sobre la torre de montaje para después girar en ángulo hasta llegar a un tope que lo deje en su lugar. Se conceptualizó esta idea modelándola en software de CAD 3D, esto se puede ver en las siguientes imágenes.

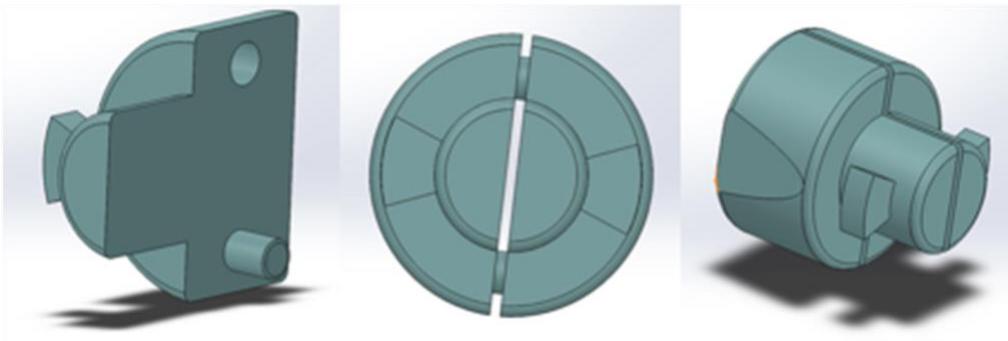


Imagen 38 Modelo en CAD 3D de las tapas de sujeción en su nueva iteración de diseño, con la función añadida de ser un elemento del mecanismo de giro cierre con la torre base

A continuación, se muestra la forma en que se deben ubicar las tapas de presión para que actúen como un solo elemento, de forma que este se introduzca dentro de la torre base para después girar y quedar fijo. Para ver los detalles de como se llegó a este modelado, véase el anexo A5.3.

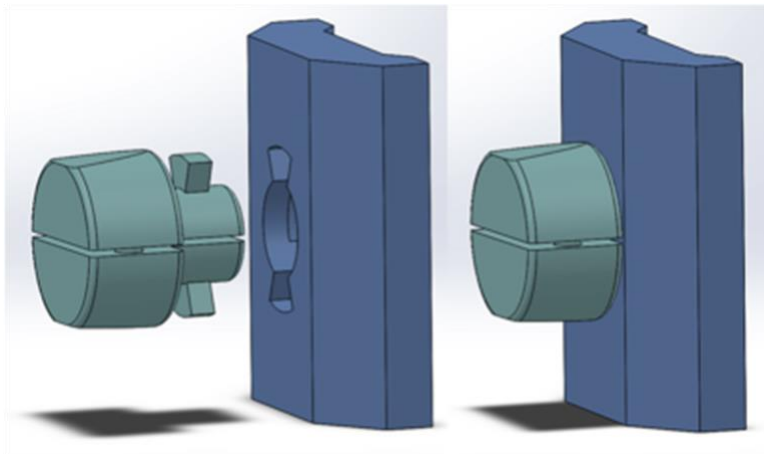


Imagen 39 Modelo en CAD 3D del ensamble de las tapas con sus pestañas dentro de la torre de sujeción.

Impresión 3D del mecanismo de giro-cierre

Se hizo la impresión en 3D del mecanismo de giro-cierre propuesto, para verificar que las piezas tengan las tolerancias necesarias para poder hacer los ensambles y la funcionalidad del mecanismo sea correcta. A continuación, se muestra la impresión de las tapas de presión con su pestaña y su ensamble, para ver los detalles de la impresión en 3D de estas piezas, véase el anexo A5.3.

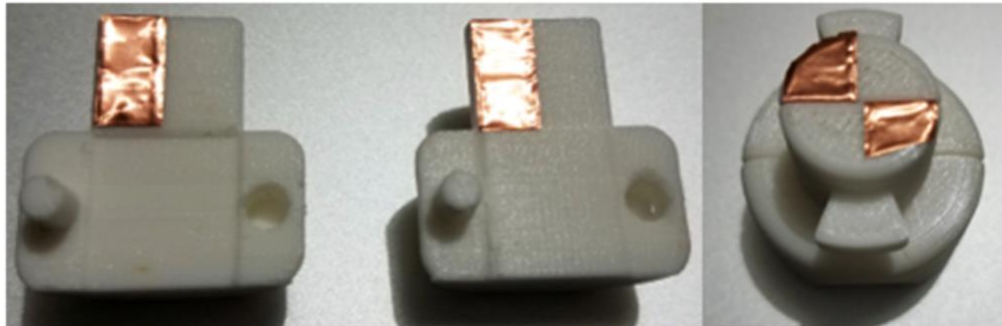


Imagen 40 Captura de las tapas inferior y superior impresas en 3D, mostrándose en la imagen de la derecha el correcto ensamble entre las dos partes.

El ensamble y las tolerancias de las tapas fueron correctos, asimismo, la sección de la torre base con el orificio y los canales donde pasaran las pestañas se imprimieron correctamente.

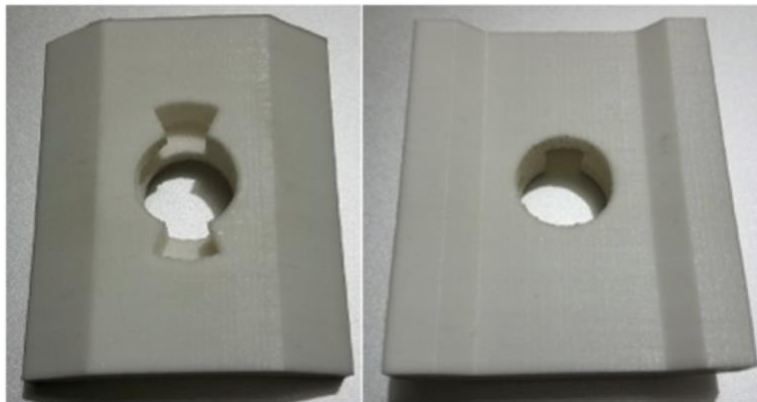


Imagen 41 Impresión en 3D de la sección de la torre base con el orificio y los canales donde pasaran las pestañas

Se hizo una guía de pasos de como ensamblar el sensor laminar con el sistema de giro-cierre dentro de la torre base, esta se puede ver en el anexo A5.4, el ensamble final se muestra a continuación.

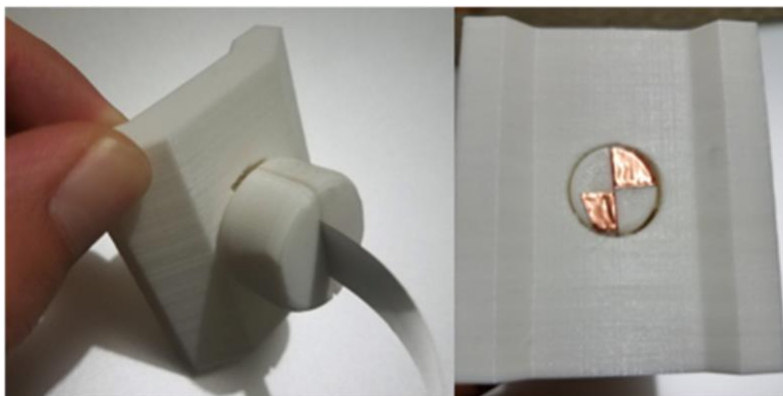


Imagen 42 Ensamble final del mecanismo de giro-cierre entre las tapas, el sensor y la torre base

Mecanismo de sujeción por rosca entre los elementos torre base y tapas de cierre

El paso siguiente de esta segunda iteración de diseño es encontrar la forma en que la torre base tenga un cierre hermético en su parte superior e inferior. Este cierre se hará con unas tapas que se nombrarán como tapas de cierre, teniendo en cuenta que estas tapas deberán de tener otra función, la de ser un elemento que ayude a conectar el dispositivo a una estructura que lo mantenga en posición para que las gotas de lluvia le impacten, esta estructura además será la encargada de asegurar el dispositivo al suelo o a una pared. De los diferentes mecanismos que existen para unir y cerrar dos piezas, teniendo en cuenta la manufactura de impresión 3D que se está utilizando; se ha decidido emplear el mecanismo de roscas internas y externas, como es el caso del cierre de una botella de refresco con una tapa rosca. Después de varias pruebas tanto de diseño del mecanismo como de la calidad de su impresión en 3D, se logró el correcto funcionamiento de este. Este diseño final del mecanismo y sus condiciones de impresión se ejemplifican en las piezas siguientes (para ver los detalles de como se llegó ahí, véase el anexo A5.3), la tapa de cierre superior (pieza blanca) y una pieza de prueba con cuerda externa (pieza verde).



Imagen 43 Fotografía de la conexión de la tapa de cierre superior (pieza blanca) y una pieza de prueba con cuerda externa (pieza verde).

Diseño final de la torre base de montaje

Anteriormente se había impreso una pequeña sección representativa de la torre base de montaje (sección blanca rectangular), en donde se había hecho el orificio con los canales necesarios para poder conectar el conjunto de tapas de presión con el sensor de sándwich laminar. La torre cuenta con diez caras planas y simétricas que forman un decágono, en las cuales se harán los orificios con canales para montar los diez conjuntos de tapas de presión con sus sensores laminares. Para lograr que no exista interferencia entre cada uno de los diez orificios, estos están dispuestos de forma que haya cinco arriba y cinco abajo, intercalándose uno a uno. Se hizo la fabricación de la torre en impresión 3D y una vez que se tuvo la pieza de la torre en físico su pudo constatar el tamaño y el peso de este modelo, el cual es satisfactorio (para ver los detalles de como se llegó ahí, véase el anexo A5.3). Se debe mencionar que, uno de los problemas que se tienen al momento de fabricar piezas a través de impresión 3D, es el re-trabajo que se le debe dar a la pieza para quitar todos los soportes que se necesitan para que se pueda imprimir en tres dimensiones. En la impresión del modelo de la torre base, se debieron imprimir soportes que ayudaron a generar los orificios que se necesitan, lo cual origina un problema, el cual radica en poder quitarlos después de la impresión, sobretodo en los canales. Una sección de la torre que muestra los detalles de su interior se muestra a continuación, en esta se puede ver la cuerda interna en la parte inferior, además de la sección interior de los canales dentro de cada orificio, también se presenta una fotografía de la impresión 3D de la torre.

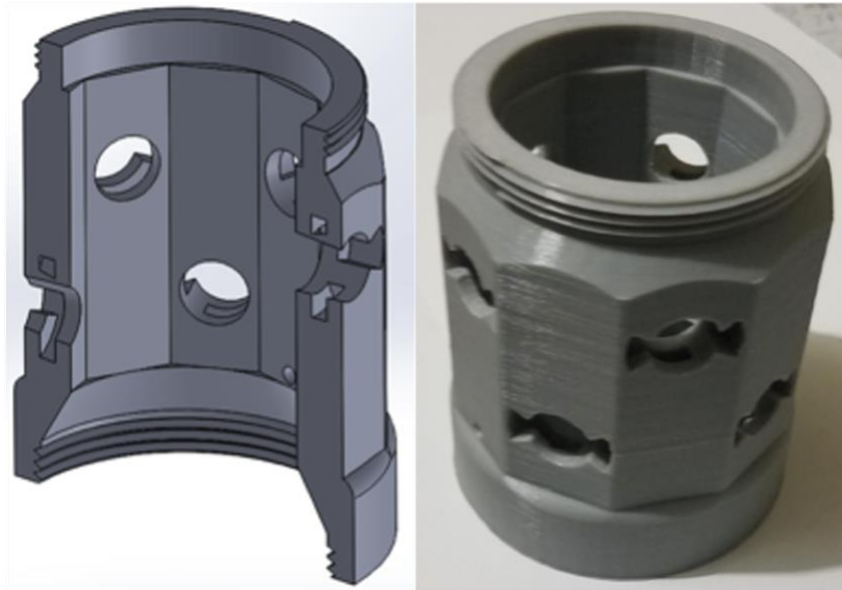


Imagen 44 a) Detalles del interior de la torre de montaje, b) Impresión 3D de la torre base de montaje

Iteración de diseño de la geometría exterior de las tapas de presión

Otro elemento que se ha modificado para mejorar su funcionamiento, es el conjunto de tapas de presión, cambiando su geometría externa para ayudar a tener un mejor agarre. Esta geometría externa ya contaba con una pequeña sección de corte la cual ayuda a su agarre, pero al momento de ser usada con los modelos físicos de prueba, se vio que este agarre no era del todo bueno por lo que debía mejorar. Es por esto que ese corte se hizo mas grande y profundo, de forma que los dedos de la mano tengan un mejor soporte al momento de agarrar este conjunto de tapas de presión; todo esto también con la idea de que el agua no quede estancada en este nuevo corte. A continuación, se muestra el modelo 3D, así como la impresión 3D.

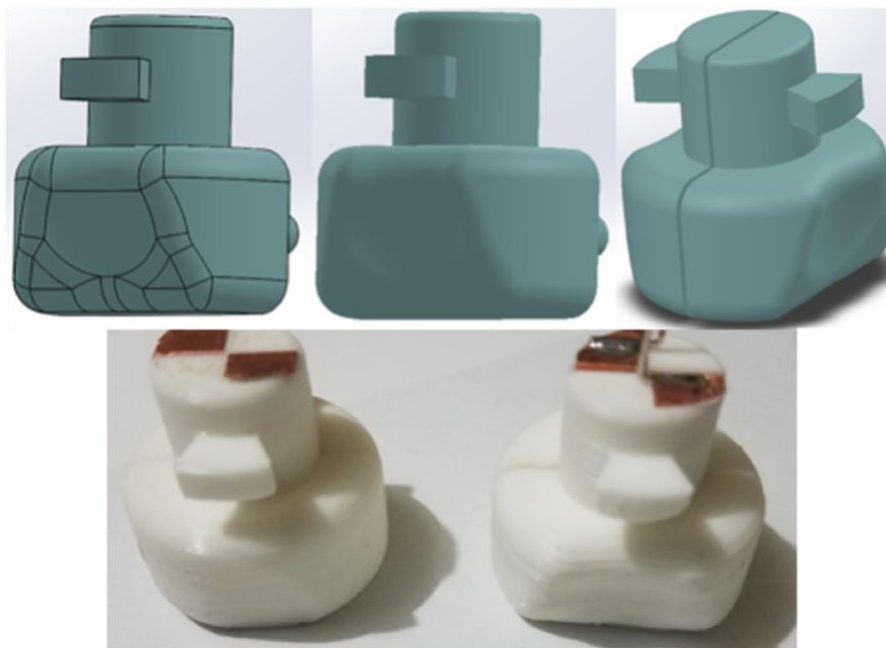


Imagen 45 Modelo e impresión en 3D de la nueva iteración de diseño sobre las tapas de sujeción.

Ensamble de las tapas de cierre inferior y superior con la torre base de montaje

El ensamble de estos tres componentes ha sido modelado en primera instancia en software 3D, en donde se comprobó el aspecto general del dispositivo, así como la visualización de algunos detalles como la parte interna de la torre. La tapa superior tiene cuerda interna mientras que la parte superior de la torre tiene cuerda externa, en contraparte, la tapa inferior tiene cuerda externa mientras que la parte inferior de torre base tiene cuerda interna.

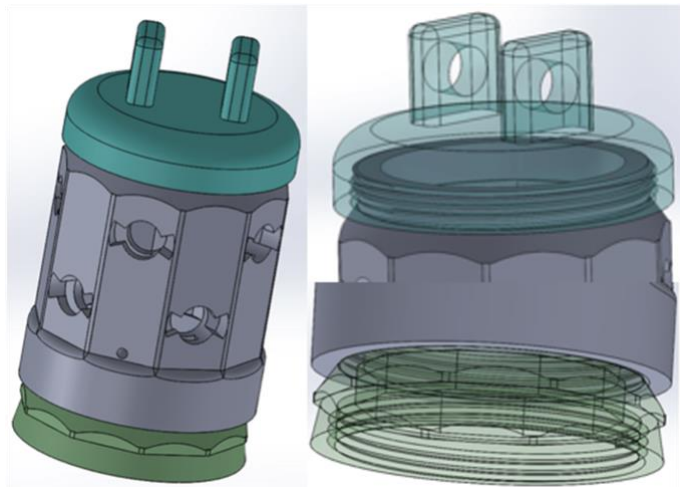


Imagen 46 Modelo en 3D del ensamble de la torre de montaje con su tapas inferior y superior.

Con las tres piezas impresas en 3D, se hizo el ensamble de este modelo, con en que se pudo comprobar la estabilidad y hermetismo que se tiene con el mecanismo de conexión entre piezas, el cual funciona de manera correcta.



Imagen 47 a) Fotografía del ensamble de las piezas, b) Fotografía del ensamble de dos torres de montaje.

La razón de que la torre de montaje tenga una cuerda externa en su parte superior y una cuerda interna en su parte inferior, es debido a que de esta manera se pueda añadir (**opcionalmente**) otra torre base, de tal forma que se agreguen diez sensores más al sistema, lo cual ayuda en la generación, pero perjudica en tamaño y peso, lo que puede afectar la maniobrabilidad en su instalación o la facilidad de ser replicado.

Proceso de manufactura del ‘arreglo 2’: conjunto de tapas de presión y sensor laminar

Parte de la idea de poder subir el diseño final del dispositivo de generación como proyecto de diseño abierto, es poder mostrar parte de algunos de los procesos que se deben hacer para fabricar las diferentes piezas. Por lo tanto, para poder cumplir parte de esta idea de diseño abierto, se llevará a cabo una pequeña guía, en la cual se puedan ver detalles de estos procesos de manufactura de algunos componentes que se han probado y que son necesarias para el sistema de generación. Esta pequeña guía sirve más que nada para mostrar la elaboración de los sensores laminares, mostrando como se debe de cortar la lámina de aluminio de una lata de refresco, como se monta con la pieza de piezoeléctrico y la cinta de aislar, además de mostrar como se puede hacer para quitar una pieza de film piezoeléctrico de un sensor dañado para hacer uno nuevo. Este proceso se puede ver en su totalidad en el anexo A5.5. A continuación, se muestran las fotografías de algunos de los componentes necesarios para este proceso.



Imagen 48 a) Fotografía de los elementos que contiene el sensor laminar, en la izquierda esta la lámina de aluminio, en el centro esta la cinta de aislar y en la derecha esta el film piezoeléctrico, b) Fotografía del proceso de recuperación del film piezoeléctrico de sensor deteriorado.

Colocación de las láminas de cobre en las tapas de presión

Se debe de colocar dentro de las tapas de presión una lámina auto adherente de cobre, la cual sirve para transmitir la energía que se produce en el film piezoeléctrico a un pin que será soldado en la parte trasera de esta lámina, el pin sirve para conectar el cableado con todos los otros sensores. Esta lamina de cobre auto adherente se debe de colocar en la parte interior de cada una de las tapas inferiores como superiores, como se muestra en las siguientes fotografías. Este proceso se debe de repetir en cada uno de los diez pares de tapas de presión, siendo en total veinte láminas de cobre que se deben colocar y veinte pines que se deben soldar sobre esas láminas. Paso seguido se colocan dentro de las tapas de presión los sensores laminares. Es importante recalcar que el rectángulo saliente de film piezoeléctrico que se dejo anteriormente, es el que estará en contacto con las laminas de cobre, de manera que estas transmitan la energía generada por la vibración del sensor laminar a los pines que se les han soldado.

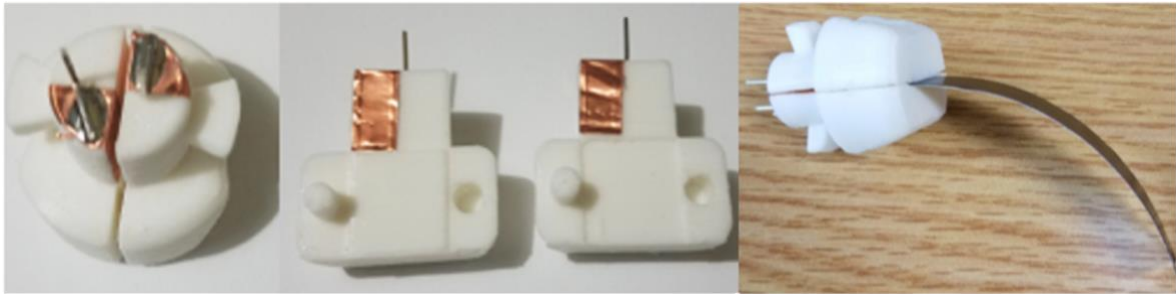


Imagen 49 a) Fotografía las tapas de presión con la lámina de cobre y los pines soldados, b) Fotografía de todo el ensamble

Ensamble de los componentes de la segunda iteración de diseño

Se hizo el ensamble de los componentes que se han estado trabajando en esta segunda iteración de diseño. Para realizar este ensamble, primero se debe de tener listo un primer sub ensamble, el ‘arreglo 2’, el cual es el conjunto de tapas de presión aprisionando el sensor laminar. Este sub ensamble debe de ir dentro de la torre base de montaje, para lo cual se debe de hacer uso del sistema de giro-cierre para mantenerlo en su lugar y sin moverse, como se ve en la captura siguiente. Este proceso se debe de repetir con los diez conjuntos de tapas de presión con su respectivo sensor laminar, montando cada conjunto en la torre base con el mecanismo de gire-cierre, para que de esta manera quede ensamblado en su totalidad el dispositivo propuesto en su segunda iteración de diseño.



Imagen 50 Imagen del ensamble del conjunto de tapas de presión aprisionando el sensor laminar, ya adentro de la torre base y a medio giro de quedar en su posición final.

Serie de experimentos: 7. Prueba de generación de energía y ejemplo de un uso real

Se desea conocer la capacidad de la energía generada en términos de uso, de las modificaciones de esta segunda iteración de diseño, en concreto de lo que genere un solo sensor laminar, para conocer si este puede accionar o prender algún elemento eléctrico. El elemento que se pretende prender es un LED, se determina probar con este elemento porque sus valores de energía requerida para prender son muy parecidos a los valores que se han obtenido de generación de un sensor. Para esto, primero se midió la generación del sensor con las nuevas modificaciones, resultando en aumento de energía, teniendo un valor aproximado de **5V a -7V pico a pico**. **Esta señal muestra los niveles de voltaje mas altos que se han obtenido hasta ahora**. Después de esto, se transformo la señal del sensor a corriente directa (CD) con un diodo rectificador y se obtuvieron los siguientes resultados, para ver la explicación completa de como se hizo la prueba, véase el anexo A5.6.

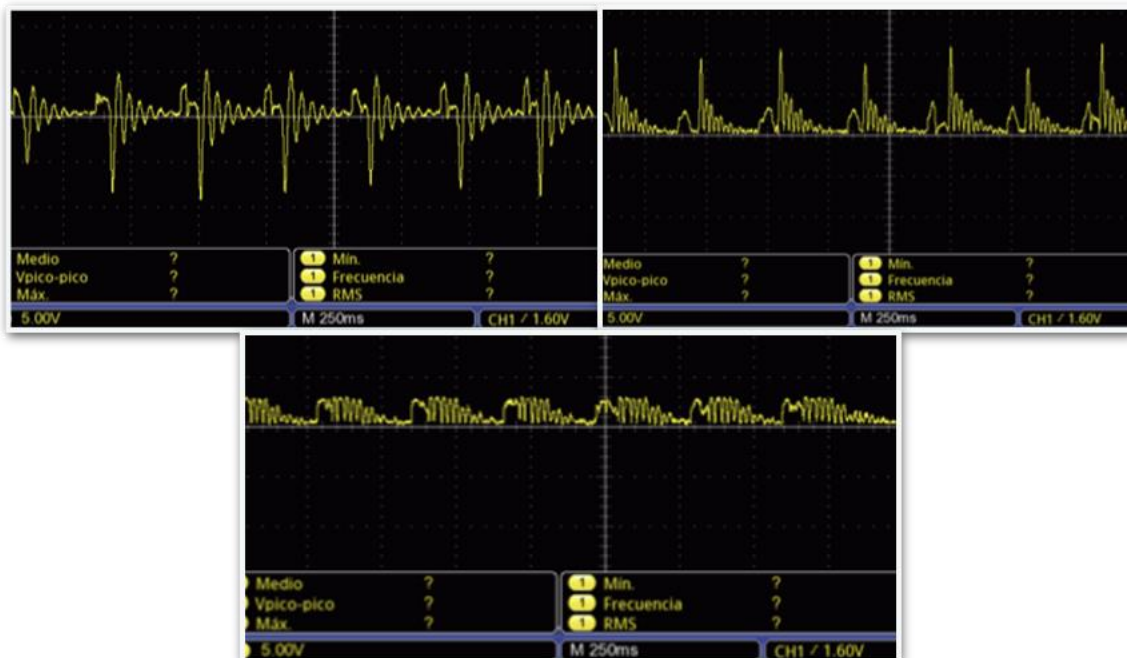


Imagen 51 Imagen de arriba a la izquierda: Captura de la señal producida por el sensor, imagen de arriba a la derecha: Medición de la señal de salida del diodo rectificador, imagen de abajo: Captura de la señal en el LED.

Se comprobó que la energía generada si es capaz de prender el LED en el momento en que se produce la vibración máxima. Esta pequeña demostración, nos asegura que la energía producida si se puede usar en un caso práctico, por lo que es aprovechable. Este resultado positivo, valida la siguiente hipótesis, **un sensor hecho desde cero y manufacturado con especificaciones propias es capaz de prender un elemento eléctrico, como lo es un LED**.

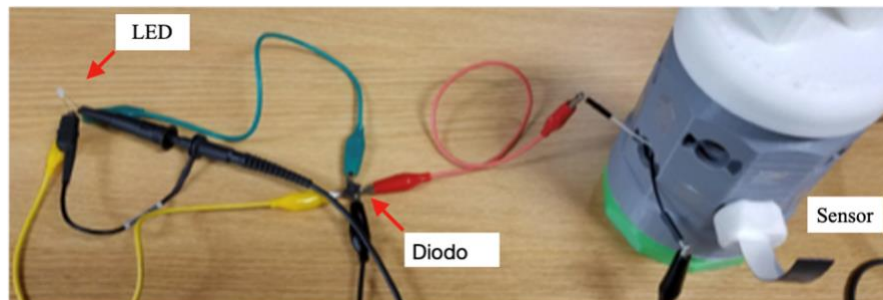


Imagen 52 Imagen de los elementos conectados para hacer prender un foco de LED.

Prueba de impermeabilización

Se necesita hacer una prueba de la impermeabilización que se plantea hacer sobre este modelo modificado, ya en experimentaciones anteriores se han producido resultados positivos en el funcionamiento de sus componentes, pero cuando se han probado en condiciones donde cae agua constantemente, han ocurrido filtraciones que han causado problemas en la generación de energía, al punto de estropear las pruebas. Resolver estos problemas es una necesidad primordial para el correcto funcionamiento del dispositivo, siendo una cuestión independiente de la cantidad de energía que el dispositivo genere. Ya se han modificado elementos del dispositivo por la única razón de hacer más fácil la impermeabilización, por ejemplo, se cambio la forma de conexión del conjunto de tapas de presión que sujetan al sensor laminar. A continuación, se plantea la forma de impermeabilizar el ensamble del conjunto de tapas de presión y el sensor laminar una vez montados sobre la torre base, esta forma es descrita a detalle en el anexo A5.7. En esta guía, también se hizo una pequeña prueba con agua para ver si existían filtraciones, teniendo como resultado, ninguna filtración dentro del sensor, lo que en teoría asegura que la impermeabilización funciona.

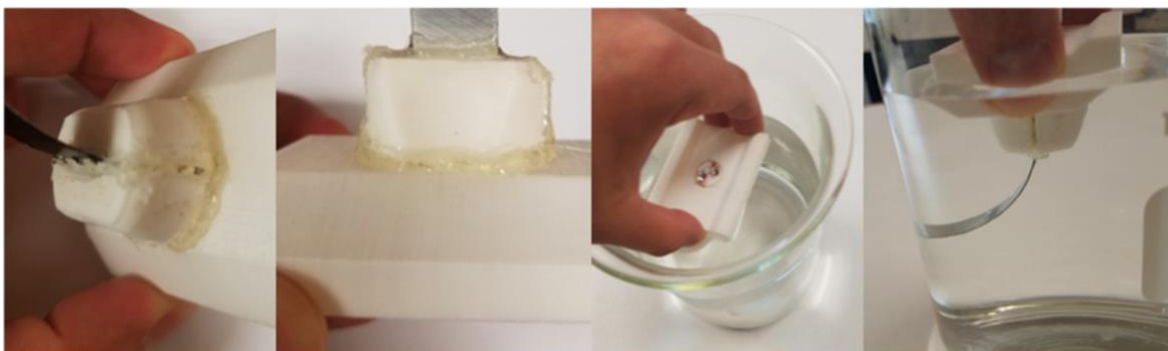


Imagen 53 Las dos primeras de izquierda a derecha muestran el sellado en los elementos, las últimas dos imágenes de izquierda a derecha muestran la forma en que se sumergió el ensamble sellado dentro de un contenedor con agua.

Esta prueba nos indica que la impermeabilización tuvo éxito, que la generación de energía no sufrió cambio, por lo que se debe de repetir el mismo proceso ahora con los diez conjuntos de tapas de presión y sensores, de forma que se obtenga un dispositivo final con el que hacer las últimas pruebas.

Presentación del diseño final del dispositivo de generación de energía

Después de todas las iteraciones de diseño realizadas y de sus pruebas de resultados, se presenta el diseño final del dispositivo de generación de energía, con el montaje de sus diez sensores sobre la torre base de montaje. Esta versión final del dispositivo representa la propuesta de un sistema para generar energía por medio del impacto de gotas de lluvia, el cual deberá de ser puesto a prueba en una experimentación final con condiciones semejantes a la realidad del fenómeno de la lluvia. De esta prueba final se obtendrán resultados finales, con los cuales se expondrán los hallazgos y conclusiones de la tesis. En estos se discutirá el lugar a donde llego este diseño final, de manera que se pueda saber como concluir su propuesta de proyecto de diseño abierto, esto es, si los resultados obtenidos nos muestran y prueban que este sistema esta listo para ser un producto final, entonces este ya podrá ser compartido para replicado o modificado por cualquier persona o si en contra, todavía necesita de más desarrollo, este proyecto será propuesto para buscar una comunidad que pueda proveer los recursos necesarios para terminar en un producto final. Con todo esto en mente, se presenta el modelo físico al que se ha llegado, viéndose el ensamble de todos los componentes que se han modelado, fabricado y modificado: la torre base de montaje, los diez conjuntos de tapas de sujeción con sus diez sensores y las tapas de cierre.

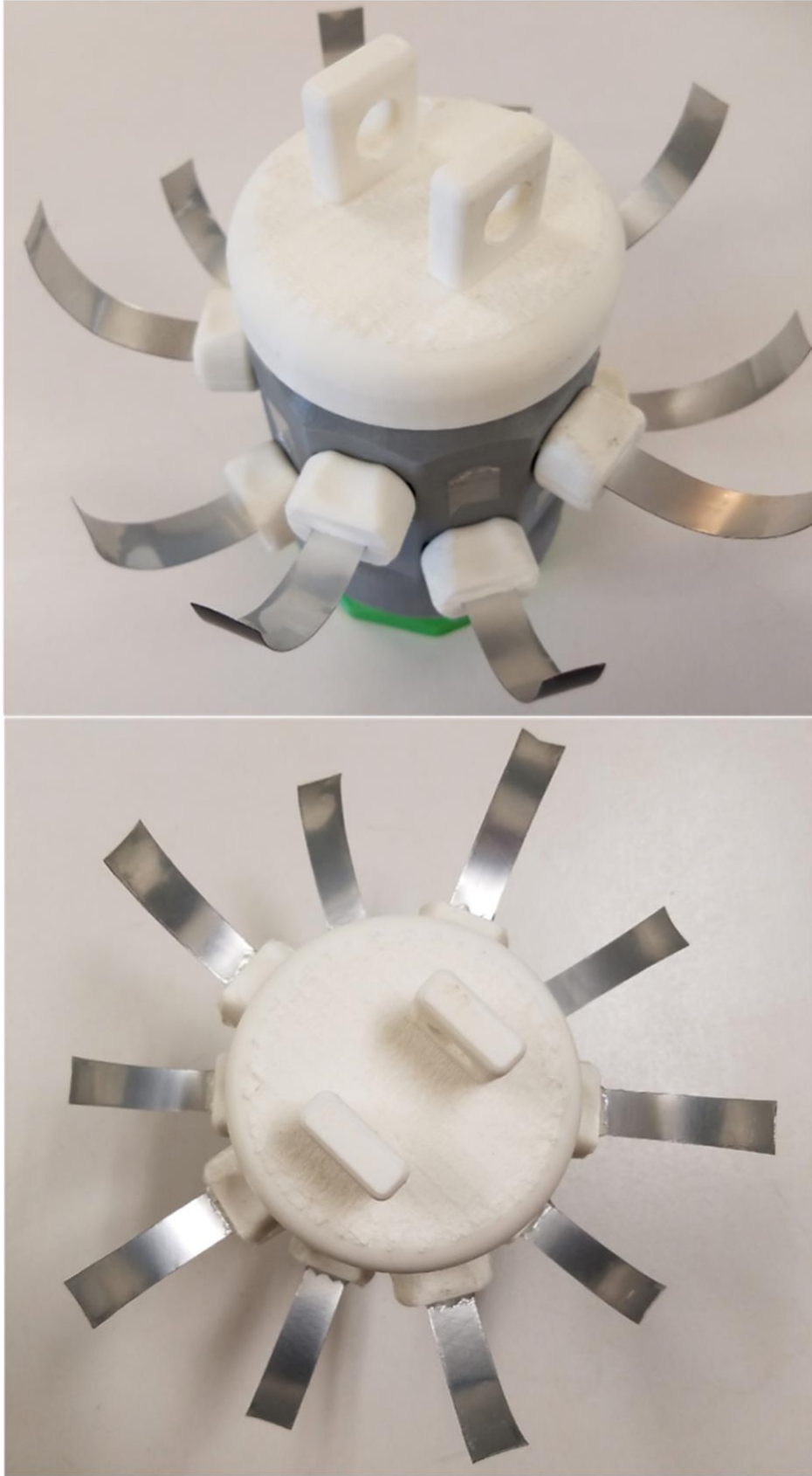


Imagen 54 Modelo físico del diseño final del sistema de generación de energía, vistas frontal y superior

Las conexiones y cableado se encuentran en el espacio interior de la torre base de montaje, se utilizaran cables jumper de 5 centímetros con puntas hembra-hembra en sus extremos, para hacer las conexiones entre los sensores, la secuencia de conexión todavía esta por definir y se verá en el siguiente capítulo, además, se tiene un pequeño espacio entre la parte inferior y este cableado de los para poder colocar el circuito de almacenamiento, el cual, cuando este definido se hará una versión final en una placa impresa que quepa en ese lugar. Esto se observa en la siguiente captura, cabe aclarar que se puede ver gracias a la pieza de prueba (pieza verde) que sirve en este momento como tapa inferior, para realizar la experimentación final esta pieza será reemplazada por una tapa inferior hermética.

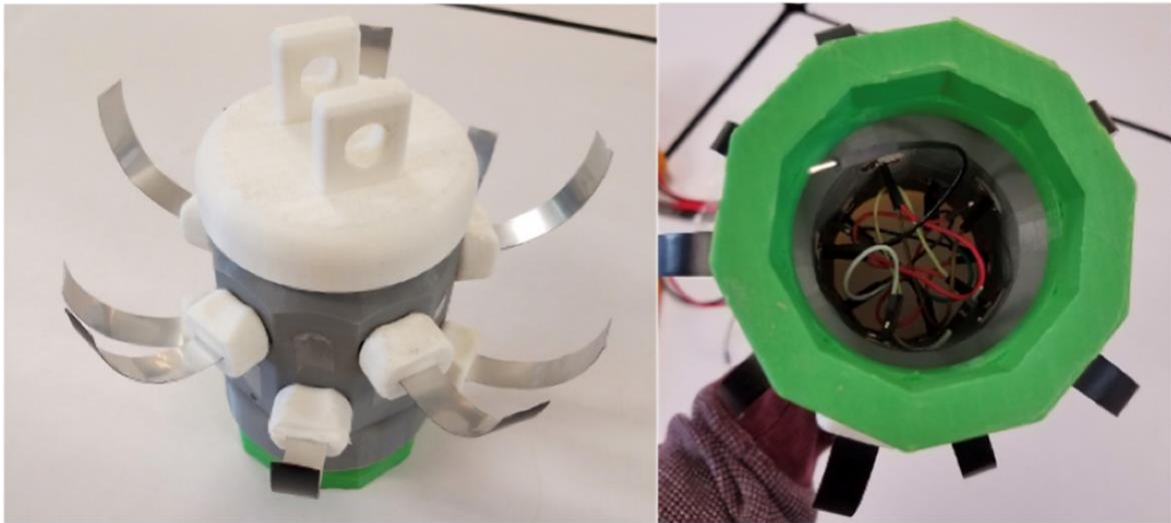


Imagen 55 Diseño final del dispositivo de generación, y su espacio interior para el cableado y conexiones de sensores.

Datos a resaltar obtenidos de la realización del dispositivo final

- ❖ *Utilizar la impresión aditiva para realizar piezas, modificaciones e iteraciones de diseño ha sido benéfico por que se puede modelar y crear en físico casi cualquier pieza y ensamble, siendo un proceso rápido (tomando en cuenta que las piezas hechas tienen geometrías complejas) a comparación de otros procesos de manufactura como lo sería el uso de un torno o fresadora. Un ejemplo de esto, es la modificación que se le hizo a las tapas de sujeción en sus agarraderas, haciéndose de forma rápida y mejorando de forma notoria el agarre que se tiene cuando se toma con los dedos, pudiendo montar el ensamble en la torre con una sola mano.*
- ❖ *El diseño y la forma de montaje de los sensores laminares han sido resultado del análisis de investigaciones y de la experimentación propia, pero esto no quiere decir que sea la forma definitiva de poder emplearlos, las personas que deseen modificar el sistema, pueden experimentar con otras formas de crear sensores, de forma que queda abierto la optimización del sistema, con un análisis mecánico a fondo sobre el modelo de vibraciones de las estructuras en cantilever, modificando los valores de masa, o tipo de film piezoeléctrico, etc. de los materiales empleados, así como la construcción del mecanismo o estructura donde estén montados.*

Medidas y materiales para el Diseño Abierto del dispositivo final

Mediciones

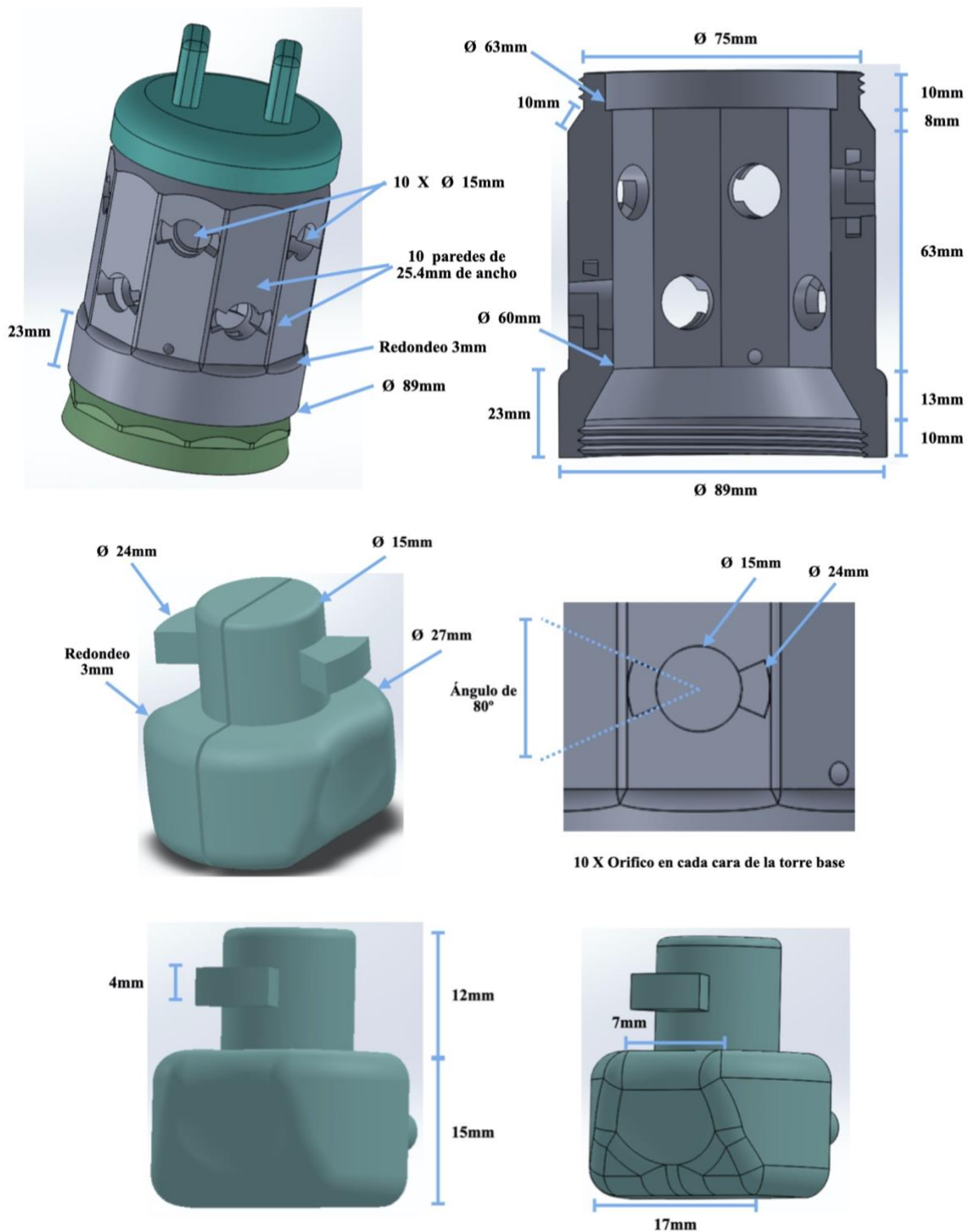


Imagen 56 Mediciones de los elementos del dispositivo

NOTA: La tolerancia para el ensamble debe de ser de -0.3mm en la geometría de las tapas

Materiales

Los materiales utilizados fueron los siguientes:

<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>
Material de impresión PLA	0.8-1 rollo	\$ 600
Film piezoeléctrico	1 hoja de film (para 1 DGL solo se usa 1/10 de la hoja)	\$ 4 000
Aluminio de lata	2 latas	\$15
Cables y conectores	10 jumpers (de 5cm de largo) + pines	\$50
Total		\$4 665

Con esto se puede ver que el costo sin contar la energía que las impresoras 3D necesitan, ni la mano de obra, fue de entre \$4,500 y \$5,000 pesos mexicanos, todo esto siendo cotizado con fecha de octubre de 2020.

Conexiones

Las conexiones entre cada uno de los sensores se muestran en la siguiente imagen, estas conexiones representan un del circuito de dos filas en serie de cinco sensores en paralelo, los cinco sensores en paralelo están cableados con las líneas negra y azul, y las dos filas en serie con los cables en verde.

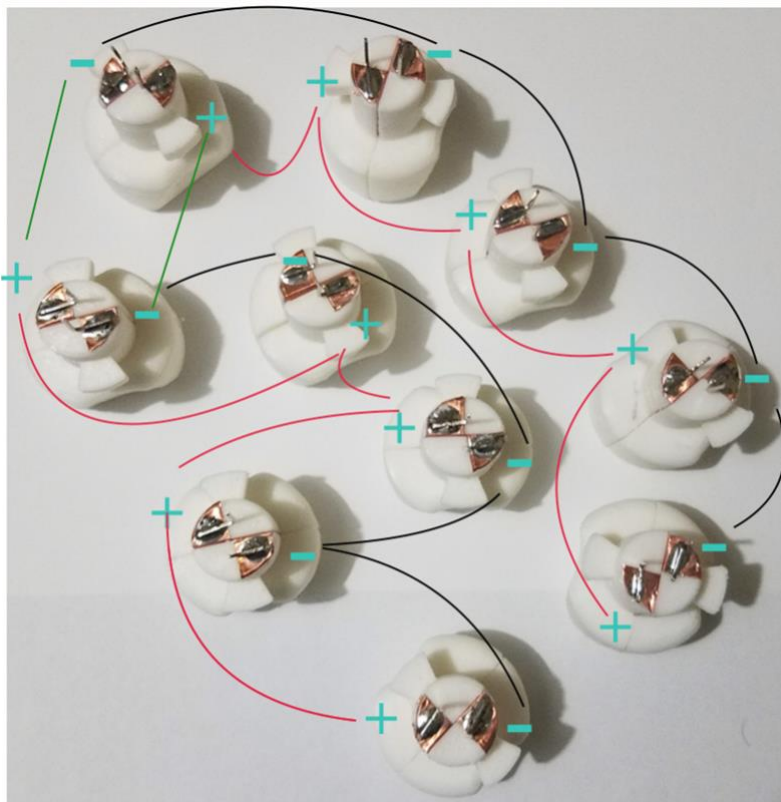


Imagen 57 Esquema grafico de las conexiones entre sensores

Capítulo 6

Diseño final del dispositivo, pruebas y experimentos finales de su producción de energía

Capítulo 6 Diseño final del dispositivo, pruebas y experimentos finales para la producción de energía

Arreglo de las conexiones de los diez sensores del dispositivo

Se debe recordar que los sensores son elementos de generación de energía no constantes, mismos que requieren de una fuerza externa para funcionar, por lo que, tomando esto en cuenta, se debe de conocer la forma en que se deben de conectar entre si, de modo que, la generación total tenga cierta constancia aun cuando cada sensor sea accionado aleatoriamente y sin ninguna sincronía. La mejor forma de conectar los diez sensores está definida por dos condiciones principales:

- ❖ *La generación de energía individual de cada uno de los sensores por separado (de 13V pico a pico) deberá de tener una disminución mínima en cada uno de estos, cuando se encuentren conectados entre si.*
- ❖ *La generación total de los diez sensores conectados deberá de tener una señal con valores mayores o un comportamiento más estable que la de un único sensor.*

El arreglo de conexión que cumplió esas condiciones fue el siguiente. Se hizo la conexión de dos cadenas de cinco sensores en serie para después conéctalas en paralelo, para ver la selección de este arreglo y ver otras conexiones probadas, ver el anexo A6.1. Este arreglo tiene un comportamiento importante, el tiene una explicación derivada de la teoría de circuitos, la cual dice que, cuando se conectan elementos eléctricos en serie, su voltaje se suma y la corriente se mantiene igual y cuando se conectan los elementos en paralelo, su corriente total se suma y su voltaje individual se mantiene igual. De esta forma, el voltaje total de todo el arreglo es igual a la suma de los voltajes de una de las cadenas de cinco sensores (se suma el voltaje de estos cinco sensores), el cual debe ser igual al de la otra cadena, la corriente total del arreglo es igual a la suma de las corrientes de las dos cadenas (la corriente de cada cadena es igual a la corriente generada por un sensor). Esto en teoría⁵, hace que se aumente la generación de energía, tanto en su voltaje (se mide en volts) como en su corriente (se mide en amperes). De forma experimental, se obtuvieron los siguientes resultados, la generación promedio individual de los diez sensores, mientras están conectados de esta forma, es de valores **pico a pico de 12 V**, esta medición se puede ver en la siguiente imagen.

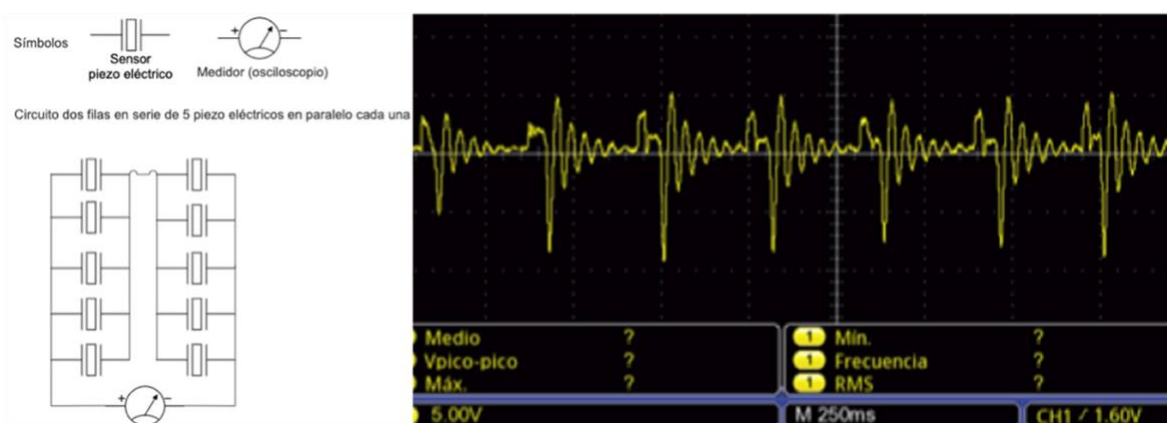


Imagen 58 a) Esquema del circuito de dos filas en serie de cinco sensores en paralelo, b) Medición promedio individual de los diez sensores.

⁵ El análisis a fondo del circuito y su matemática queda para ser estudiada a detalle en un trabajo aparte, en la tesis hecha se utilizan los valores obtenidos de forma experimental.

Circuito de almacenamiento de energía eléctrica

Una de las variables más importantes del sistema de generación es el circuito de almacenamiento y debido a que esta energía depende principalmente del golpeteo de las gotas sobre los sensores, las cuales tienen una aleatoriedad muy grande, hace que sin importar la forma en que se desee generar energía por este medio, esta no será constante. Estos problemas son los condicionantes por los que almacenar la energía es complejo y por lo cual, se requiere de un circuito especializado. Es por esto que en las pruebas que ya se han hecho, no ha sido posible almacenar la energía que se ha generado, de modo que ahora, se necesita construir un circuito de almacenamiento con base en las especificaciones que se tienen del dispositivo final. El circuito propuesto también entrará en evaluación y dependiendo de su rendimiento en las pruebas finales que se realicen en conjunto con el dispositivo final, esta variable también puede ser un punto del que se tenga que mejorar, para lo que se necesite con una mayor experiencia sobre el tema. “La viabilidad de una propuesta para la recolección de energía a menudo depende de componentes que puedan extraer de manera eficiente niveles muy bajos de energía a baja corriente y / o bajo voltaje, y entregarlos a una batería de almacenamiento o condensador. La premisa es simple: los recolectores de energía ambiental dependen solo de lo que se les da y lo que está disponible, a veces más, a veces menos” (Scansen, 2012). Se encontró que un elemento en común de circuitos con propósitos semejantes, es un chip convertidor elevador de voltaje ultra bajo y cosechador de energía. Este será el elemento central del circuito de almacenamiento, utilizando concretamente el chip de la marca Linear **LTC3108 - Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager**. En el manual de este chip vienen circuitos propuestos con propósitos similares al que se necesita, razón por la cual se adaptó uno de ellos para ser utilizado. Este circuito tiene la función de ser almacenándola en su entrada de voltaje por la salida de voltaje del dispositivo de generación, transformando esta energía y transfiriéndola a un súper capacitor en condiciones que este puede almacenar dicha energía. Este circuito funciona con una entrada de voltaje en corriente directa, por lo que se necesitará de un diodo rectificador de corriente, el cual consume energía, de forma paralela también se adaptó un circuito que necesita de corriente alterna para poder trabajar, con la desventaja que este necesita de una señal constante, la cual no genera el dispositivo. Haciendo una prueba del funcionamiento del circuito en CD con una fuente de energía constante (una celda solar) se comprobó que este sí carga al súper capacitor, por lo que se espera que lo pueda cargar de igual forma con el dispositivo de generación, para ver los detalles de circuito, de como se eligió, sus diagramas y las pruebas que se llevaron a cabo con este, véase el anexo A6.2. Las conclusiones importantes de la selección y prueba de este circuito son las siguientes:

- ❖ *El circuito elaborado almacena energía mediante un súper capacitor, mientras se le suministre un voltaje y una corriente constante en su entrada.*
- ❖ *Se tiene la hipótesis de que este circuito también puede almacenar señales de voltajes y corrientes **no constantes**, como la que produce el dispositivo de generación.*

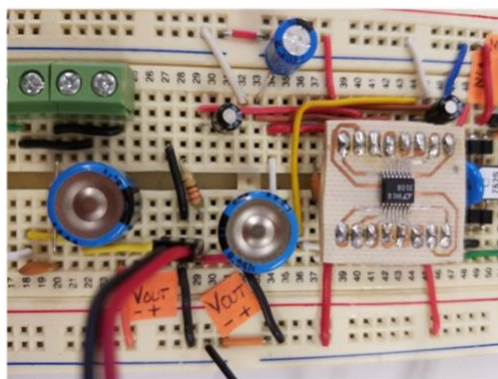


Imagen 59 Fotografía del circuito de almacenamiento, diagrama del circuito en el anexo A6.2.

Puesta a punto del dispositivo final para la experimentación de generación de energía

Después de revisar que todos los sensores trabajen correctamente, que su generación este dentro del rango medio propuesto, estableciendo la forma en que están conectados, así como el circuito de almacenamiento que se empleará, se preparó el dispositivo de generación para la simulación de lluvia, proponiendo la forma en que pueda ser instalado en cualquier superficie mientras esta expuesto al medio ambiente. Por lo que, para hacer esta puesta a punto, primero se debe de crear una tapa inferior que lo cierre con todas las conexiones de los sensores dentro, sin que existan filtraciones de agua, para lo que se utilizará el mismo mecanismo de cierre que el de la tapa superior, además, esta debe de contar con una conexión que sirva de enlace para colocar diferentes módulos, los cuales permitan situar el dispositivo en diferentes terrenos, ya sea una superficie plana, un tubo, una pared etc. En estas pruebas se hará un modulo que mantenga al dispositivo en posición de recibir gotas de lluvia en una en una superficie plana, sin que se mueva y sin que interfiera en ninguno de los sensores, para que las gotas golpeen libremente a todos los sensores. Para lograr esto, se modeló una pieza de conexión que une la tapa inferior del dispositivo con cuatro patas, las cuales servirán como soporte para mantener al dispositivo en sitio, sin moverse. Estas tres piezas, la tapa inferior, la pieza central de conexión, así como las patas (las cuatro son iguales), fueron modeladas primero en software 3D, para verificar su funcionamiento y que no hubiera interferencia entres sus piezas, para posteriormente ser impresas en 3D. Con las piezas impresas, se hizo el ensamble final del dispositivo, hacienda que ahora, se mantenga erguido y estable. Además, con el peso del dispositivo (5kg aproximadamente), se puede mantener la estabilidad ante condiciones de viento y lluvia de baja y mediana intensidad, mientras que para una alta intensidad de lluvia y viento se deberá recurrir un anclaje en el suelo (de momento esto no es necesario).

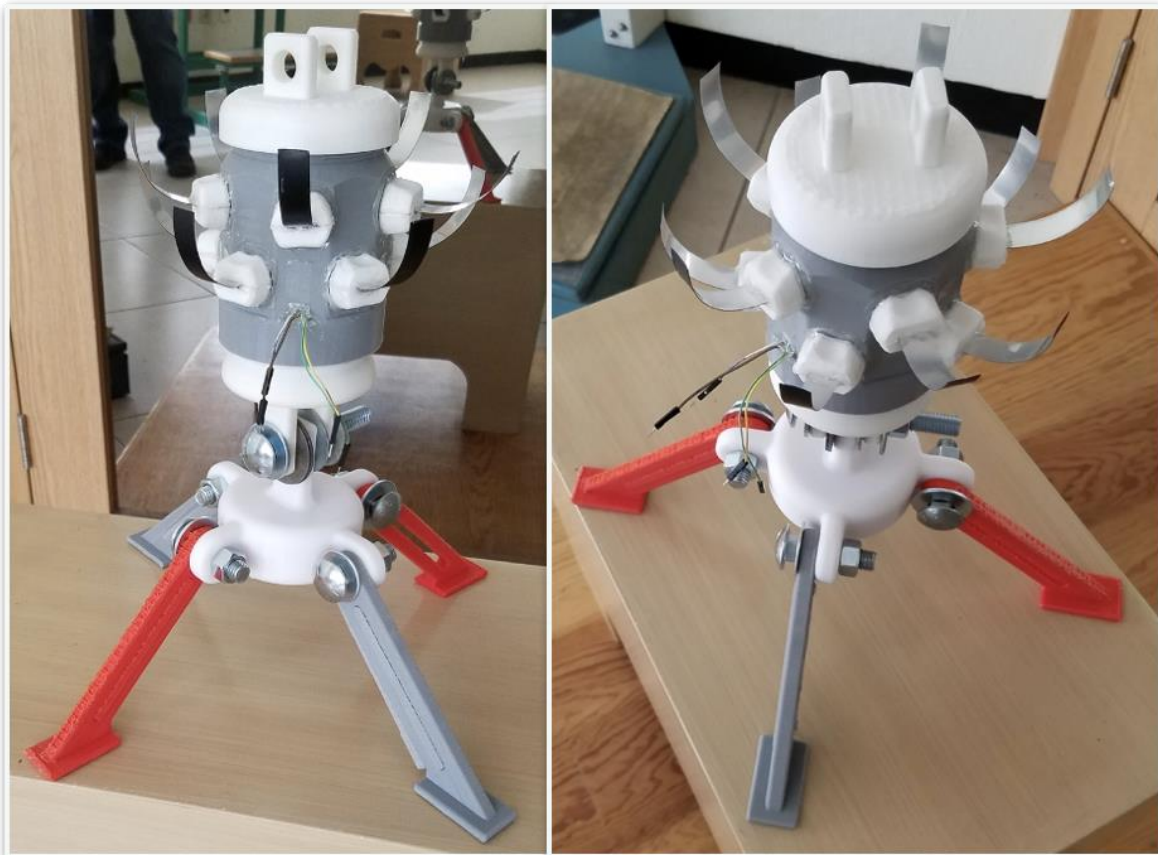


Imagen 60 Fotografías del ensamble final del dispositivo de generación

Otro aspecto que se puede observar después de hacer el ensamble final, es la estabilidad que se tiene en todos los sensores, lo cual ayuda a su vibración, ya que, debido al peso que se tiene en todo el ensamble, los sensores se pueden mover sin que muevan al dispositivo, lo que ayuda a que no se amortigüen las vibraciones. Con esta configuración final, se busca que el dispositivo sea expuesto a condiciones similares a las de una lluvia real, para que este muestre un funcionamiento lo mas apegado a la realidad, con la intención de que se obtenga el mayor numero de datos relacionados con su generación, así como la evaluación de la idea planteada para llegar a las conclusiones sobre la utilización de una fuente renovable no común como la caída de gotas de lluvia.

Notas sobre las pruebas y experimentaciones finales

El dispositivo de generación de energía al que se ha llegado, es visto como un prototipo final, debido a que es hasta aquí hasta donde se puede llegar con los recursos económicos y de tiempo que se tienen, pero primordialmente, porque después de todo el proceso que se ha hecho, se han aumentado las posibilidades de que el dispositivo genere energía eléctrica que sea aprovechable o por lo menos, se muestre que se esta muy cerca de lograrlo. Ya se ha probado que los sensores piezoeléctricos que se han fabricado, con procesos propios de manufactura y especificaciones hechas a medida, han resultado en elementos con una generación mayor que los que han sido utilizados en las investigaciones que se han analizado, esto, sumado a la forma en que se ha propuesto que se usen nuestros sensores, la forma de se montaje, la manera en que se han conectado entre si y el modo en como se comportan cuando las gotas de agua los golpean, hacen pensar que se esta cerca de aprovechar la generación de energía que producen. De tal manera que, por lo expuesto a lo largo de la tesis, se sabe que se el dispositivo de generación producirá energía mientras una lluvia recreada artificialmente le cae encima, pero se desconocen los valores funcionales necesarios para que sea aprovechable, razón por la que se necesita hacer pruebas y experimentaciones finales.

Prueba control: captura de la señal de generación de energía

Se realizó una prueba de control para verificar que la medición de la señal de generación es capturada correctamente, antes de llevar al dispositivo, el equipo para hacer las mediciones y los elementos que generarán las gotas de lluvia, a su posición para hacer las pruebas finales a la intemperie. En la prueba, primero se conectó el dispositivo de generación a la tarjeta de medición para comprobar que su software lee, cuantifica y graba la señal de energía producida por los sensores. Para después, realizar la grabación de la señal en CD, mientras se hacia vibrar uno de los sensores durante un tiempo de cinco segundos. Con esto se obtuvieron resultados de generación real en los picos de la señal producida, con un **voltaje** que va de entre los **2.66V a los 3.13V** y una **corriente eléctrica** que va de entre los **10.7mA a los 12.59mA**, para ver los detalles de esta prueba y como se llegó a estos resultados, véase el anexo A6.3. Al obtener estos valores, se comprobó el correcto funcionamiento del dispositivo de generación, así como la verificación de los sensores de captura y monitorización. Además, se pudo comprobar que:

- ❖ ***Existe una producción cuantificable de energía eléctrica de CD, aún después del rectificado de la señal eléctrica.***

Descripción del sistema de pruebas para la simulación de lluvia

Se deben de recrear condiciones similares a las que se pueden encontrar en una lluvia común, para realizar las pruebas que den resultados finales parecidos a los que se tendrían en una lluvia natural, haciéndose de esta manera artificial para tener control sobre la intensidad y el tiempo de caída de las gotas de agua. Para empezar con las pruebas, se necesitan hacer algunos preparativos previos, en

principio, se debe de decidir y proponer como se llevará a cabo la experimentación, de forma que se conozcan todos los requerimientos necesarios en cuanto materiales y espacio. El lugar, los elementos para generar las gotas de lluvia, así como los elementos para medir y grabar la señal del dispositivo, son las condicionantes y variables que deben estar acotadas para trabajar en conjunto y llevar a la correcta realización de las pruebas. Elementos importantes como el rociador, manguera, cables y conexiones han sido detallados en funciones, dentro de la estructura de la practica en el anexo A6.4, ahí también se describe con mayor precisión como se llega al siguiente esquema, el cual presenta la forma en que se acomodarán y trabajarán entre si todos los elementos y variables que existen para realizar las siguientes pruebas.

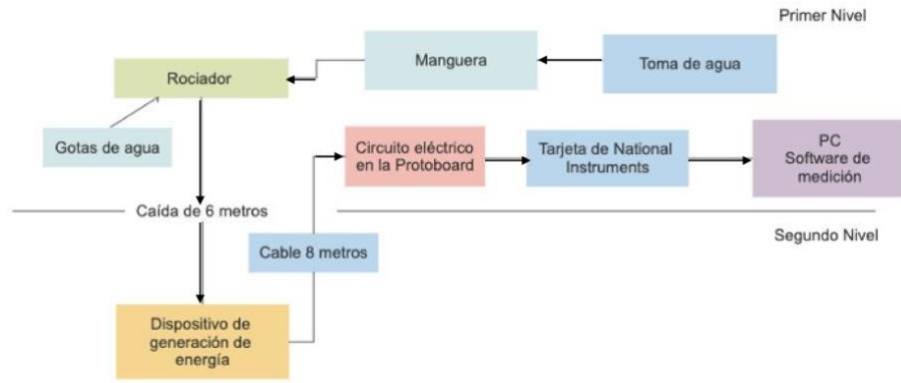


Imagen 61 Esquema de elementos para realizar las pruebas finales

Primera prueba de generación de energía simulando las condiciones de una lluvia

Con todos los elementos listos y en posición, se realizó la primera prueba de generación de energía, simulando las condiciones de una lluvia, produciendo gotas de agua que caigan de forma muy similar, tanto en tamaño como en velocidad, de forma que estas impacten en los sensores del dispositivo como lo harían gotas de lluvia naturales.



Imagen 62 Fotografía del momento en que las gotas de lluvia impactan a los sensores del dispositivo de generación

En esta prueba se plantearon cuatro experimentos, en los cuales se debía grabar la señal de generación eléctrica que produce el dispositivo cuando esta recibiendo los impactos de las gotas. Para ver las características de planteadas de cada uno de estos experimentos, así como todo el desarrollo de la prueba, véase el anexo A6.5.



Imagen 63 Fotografía de la creación de las gotas de lluvia, su distancia de recorrido y el momento de impacto sobre el dispositivo

Resultados

Los resultados obtenidos de la primera experimentación son los siguientes:

<i>Valores</i>	Picos máximos	Picos mínimos	RMS
<i>Voltaje</i>	10.9 V	-9.22V	4.52V
<i>Corriente</i>	49.63mA	-41.91mV	20.55mA

Para conocer el valor promedio de generación de energía que se tuvo, se tomo el valor de RMS (root mean square o valor eficaz) del voltaje como de la corriente eléctrica, cuyos valores se asemejan más a la producción que se tuvo durante el tiempo que duró el experimento, ya que los valores de máximos y mínimos representan la variación que se tiene en la señal, al mismo tiempo que indican los picos máximos a los que se puede llegar, pero no determinan la energía producida durante el tiempo de experimentación, esto debido la falta de una tierra física en el circuito, lo cual provoca que tarde en estabilizarse, véase la Imagen-A6. 1 del anexo A6. Para el *segundo experimento*, se observó que existía un poco de humedad dentro de la torre base y en el circuito interno, además de que se encontraron algunas gotas de agua, lo que confirma que se filtró agua al dispositivo, poniendo fin esta primera prueba. Con lo cual se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- ❖ *Se generó energía en el primer experimento propuesto*
- ❖ *Se generaron filtraciones de agua que inutilizaron algunos elementos (como los sensores piezoeléctricos), por lo que se necesita mejorar la impermeabilización del dispositivo.*

Modificaciones hechas para la segunda prueba

Se realizaron algunas modificaciones para corregir los problemas que ocasionaron que no pudieran terminar los cuatro experimentos de la primera prueba, estas modificaciones se enuncian a continuación, para los detalles de cada una de estas véase el anexo A6.6.

- ❖ *Impermeabilización del dispositivo con grasa para bujías*
- ❖ *Modificación del cable de transmisión de señal (se recorto de 10m a 2m)*
- ❖ *Cambio de la disposición de algunos elementos (se colocaron los elementos de medición al nivel del dispositivo)*



Imagen 64 Fotografía de la nueva impermeabilización del dispositivo, una capa de grasa para bujías impide el paso del agua a las ranuras que dejan los ensambles de los elementos.

De esta forma, la configuración del sistema para la segunda prueba queda de la siguiente manera, la toma de agua y la generación de gotas quedan posicionadas como en la prueba anterior, manteniéndose la misma altura de caída de las gotas, por lo que la energía cinética no cambia. Los demás elementos cambian de posición como se muestra en el siguiente esquema.

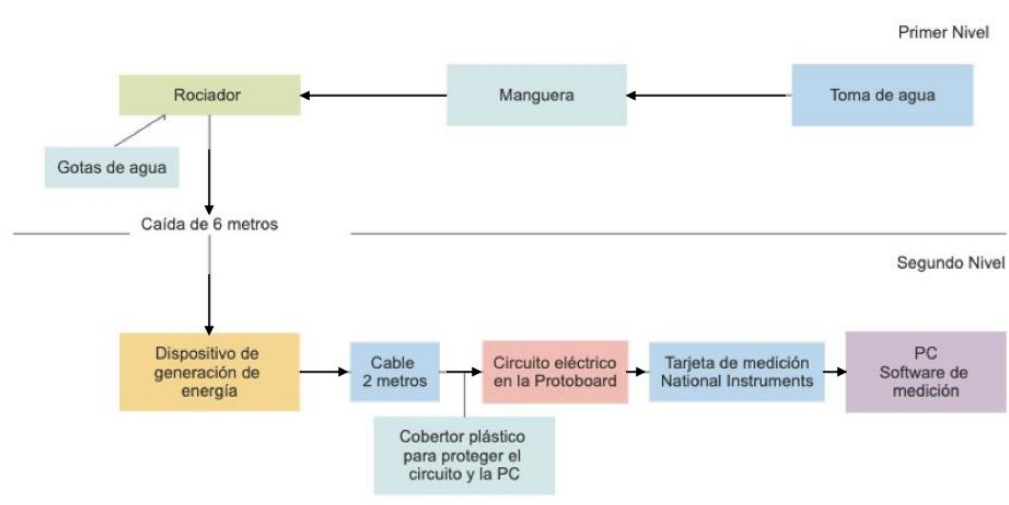


Imagen 65 Esquema de elementos para realizar la segunda prueba de generación.

Segunda prueba de generación de energía simulando las condiciones de una lluvia

Después de realizar las modificaciones pertinentes, se llevará a cabo la segunda prueba de generación de energía del dispositivo, donde se obtengan datos relevantes que ayuden a conocer tanto los niveles de generación, como si es posible almacenar y aprovechar la energía. Previo al experimento, se realizó un pequeño ensayo para probar la impermeabilidad hecha, dejando caer gotas de agua durante un minuto, para después dejar reposar el dispositivo 5 minutos. Pasado este tiempo se conectó el dispositivo a los elementos de medición para verificar que se siguiera produciendo señal de energía, lo cual sucedió, de esta forma se verificó que la impermeabilización hecha funciona correctamente, esto es un nuevo hallazgo que debe reportarse.

- *Impermeabilizar el dispositivo con una ligera capa de grasa de bujías, ha resultado ser un método efectivo para evitar filtraciones de agua.*



Imagen 66 Fotografía del dispositivo cubierto con grasa de bujía después de haberle caído gotas de agua durante un minuto

Resultados

Verificado esto, se realizó la segunda prueba de generación de energía, en la cual se plantearon y se desarrollaron *cuatro experimentos* con diferentes configuraciones, para obtener un mayor entendimiento no solo de la energía que se esta generando, sino de su comportamiento, del circuito de almacenamiento y de la forma en que se puede o no usar. Los resultados, hallazgos y conclusiones de esta prueba se presentan a continuación, todos los detalles de cada uno de los experimentos, de como se plantearon y desarrollaron se pueden ver en el anexo A6.7. Los resultados de generación mas relevantes obtenidos, fueron los del primer experimento, los cuales indican la cantidad de energía en corriente directa que sale del diodo rectificador, estos se presentan en la siguiente tabla.

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	10.63V	40.80mV	2.18V
Corriente	42.56mA	181.04 μ A	0.0088A o 8.80mA

Estos valores se toman como considerables, por lo que se deben de analizar para conocer si se puede predecir un funcionamiento teórico posterior, mas allá de que si en este momento no se ha podido almacenar esta energía. A partir de estos valores, se pueda teorizar sobre algunas posibilidades de utilización de esta energía, tomando como caso hipotético que su almacenamiento se pueda solucionar en un futuro.



Imagen 67 Gráfica de la señal obtenida a la salida del diodo rectificador en CD, las líneas amarillas representan al voltaje y su escala de medición reportada son de -10 a 11 volts, las líneas azules representan la corriente eléctrica y su escala de medición va de los -4.02E-2 a los 0.05 amperes.

Los demás experimentos mostraron que aun no se puede concluir que sé es posible almacenar o no esta energía eléctrica, por lo que, los datos a resaltar en esta segunda prueba son los siguientes:

- ❖ *Los valores de generación del dispositivo en CD son considerables*
- ❖ *La señal de salida del súper capacitor no presenta suficiente variación para afirmar que se esta cargando y, por consiguiente, aun no se ha podido almacenar la energía del dispositivo.*
- ❖ *Se abre la posibilidad de que sean necesarios más de un dispositivo para generar la energía para cargar al capacitor*
- ❖ *Existe la posibilidad que el circuito de almacenamiento que se ha fabricado no sea el adecuado para cargar al capacitor con la energía que genera el dispositivo*

Análisis de resistencia y durabilidad de los sensores

Antes de realizar la tercera prueba, se hicieron mediciones dentro del laboratorio sobre la generación de energía que producen los sensores del dispositivo después de haber sido expuestos a dos pruebas, donde les han caído gotas de agua por periodos prolongados de tiempo, de forma que la generación producida probará que tanta resistencia y durabilidad tienen. Se empezó vibrando los sensores con el dedo y se vio que todos producen prácticamente la misma señal de energía. Después se tomo uno de los sensores que tenía una generación media de entre los diez sensores, para medir su señal cuando se le hacía vibrar con un dedo, se hizo captura de la señal tanto en CA (señal cruda) como en CD (señal rectificada). Los valores obtenidos son los siguientes:

Tipo de señal	Voltaje máximo	Voltaje mínimo	Voltaje pico a pico	Corriente máxima	Corriente mínima
Señal en CA	3.5V	-6.1V	9.6V	14.17mA	-24.58mA
Señal en CD	6.79V	142.07mV	-	27.32mA	589µA

Estos resultados muestran que los sensores siguen generando energía de igual manera que como la primera vez, por tanto, se puede afirmar lo siguiente:

- ❖ *El diseño que se ha hecho de los sensores piezoeléctricos es resistente y durable bajo condiciones de lluvia de intensidad máxima normal, es decir de lluvias fuertes, pero sin ser tormentas o huracanes.*

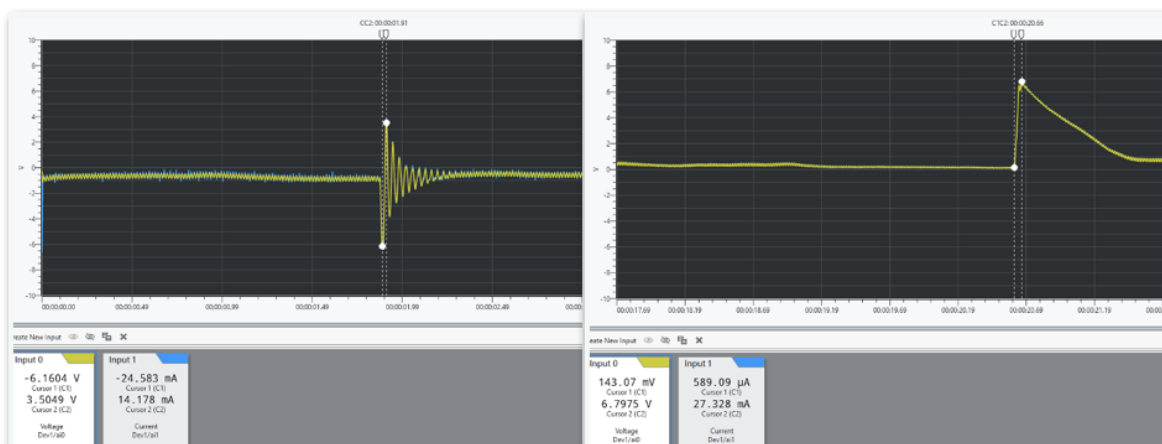


Imagen 68 a) Gráfica de la señal cruda generada por la vibración de un sensor en CA, b) Gráfica de la señal generada por un sensor después de pasar por un diodo rectificador en CD.

Otro paso previo para realizar la tercera prueba, fue cambiar el súper capacitor por otro con diferentes especificaciones, las cuales pueden ayudar a que el circuito pueda cargarlo, además de que con esto se comprobará si la variable del súper capacitor es algo determinante en el aprovechamiento de la energía que se genera. Este nuevo súper capacitor tiene un menor voltaje nominal, pero una mucho mayor capacitancia que el súper capacitor anterior, esto puede ayudar a almacenar energía mas fácilmente, porque lo que se necesita es almacenar energía sin importar el voltaje de salida que se tenga. Las características de este nuevo supe capacitor son las siguientes:

- 2.7V de voltaje y 500F de capacitancia



Imagen 69 Súper capacitor que utilizará en la tercera prueba

Tercera prueba de generación de energía simulando las condiciones de una lluvia

Estas pruebas están hechas en días diferentes, por lo que esta tercera prueba, al ser realizada en un tercer día no consecutivo, elimina la variable de un solo evento con condiciones climatológicas únicas, ya que características como el viento o la hora, son diferentes. Con esto en mente, se procedió con la realización de esta prueba, la cual fue desarrollada de la misma manera que las anteriores, haciendo cuatro experimentaciones, en las cuales se cambiaban algunas variables para obtener diferentes mediciones sobre la generación de energía, así como su posible almacenamiento. Los resultados, hallazgos y conclusiones mas relevantes que se obtuvieron, se mencionan a continuación, todos los pasos que se siguieron, el planteamiento de los experimentos, así como los detalles de la prueba, se pueden ver en el anexo A6.7



Imagen 70 fotografía del instante en que las gotas de lluvia golpean al dispositivo en la tercera prueba

Resultados

Esta tercera prueba deja dos resultados importantes sobre la generación de energía que se ha obtenido del dispositivo, en concreto, de su generación cruda en corriente alterna (CA) y de su generación cuando a sido rectificada a corriente directa (CD). Sus valores y la captura de su señal son los siguientes:

Generación cruda en corriente alterna CA

Valores	Máximo	Mínimo	RMS
Voltaje	10.691V	-10.631V	2.07V
Corriente	44.588mA	-42.696mA	0.008289A

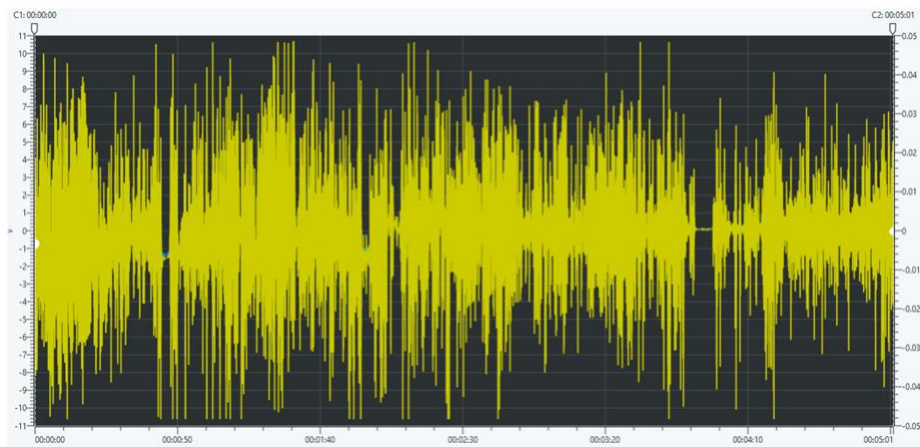


Imagen 71 Captura de la señal cruda en CA producida por el dispositivo

Generación en corriente directa (CD) después de haber pasado por un rectificador

Valores	Máximo	Mínimo	RMS
Voltaje	10.791V	-10.49mV	2.957V
Corriente	42.55mA	-13.084μA	0.0119A

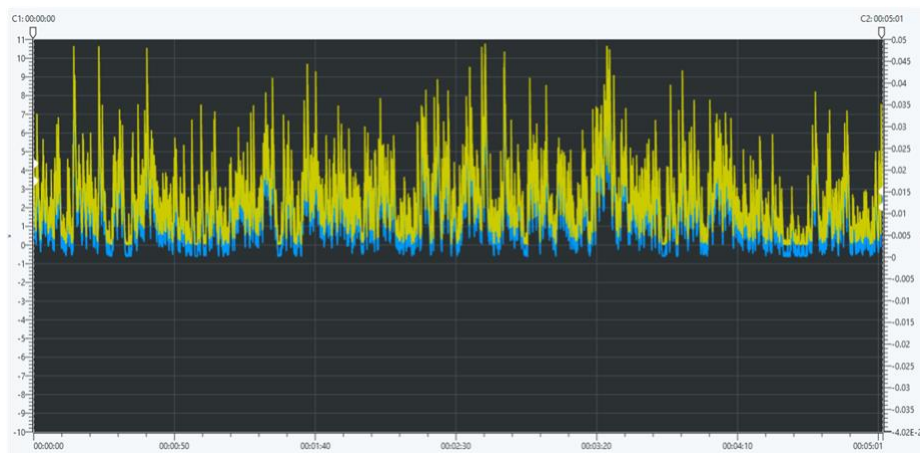


Imagen 72 Captura de la señal en CD del dispositivo después de ser rectificada

En este caso los valores máximos y mínimos no son importantes, aunque con la grafica de su señal, se puede ver hasta que valores en sus picos positivos y negativos puede llegar esta generación de energía. El valor que da una mejor referencia sobre generación de energía producida es el valor RMS, valores que, bajo los rangos que se han obtenido y se han visto en investigaciones, son considerables y con los cuales se puede teorizar sobre posibles aplicaciones que pueden usar esta generación. Esto debido a que no se ha podido almacenar esta energía en un súper capacitor, lo que nos lleva valorar variables como el circuito de almacenamiento, el cual no cumplió su cometido, mas allá de la propia señal de energía, la cual puede ser discutida si, por como son sus características y su comportamiento es o no aprovechable, **pero por los valores que se alcanzan, se cree que el circuito tiene una mayor responsabilidad sobre el almacenamiento que la energía generada.** Con esto se pueden dar las conclusiones sobre esta prueba, que al mismo tiempo son las conclusiones de las tres pruebas finales realizadas, ya que los resultados obtenidos son casi iguales.

Conclusiones de las tres pruebas finales de producción de energía

- ❖ ***El sistema genera mayor energía mientras mayor sea el tiempo que se este expuesto al impacto de gotas, por lo que se concluye que mientras mayor sea la duración de una lluvia, mayor generación de energía se produce.***
- ❖ ***La mayor generación de energía que se ha obtenido es la del segundo experimento de la tercera prueba, generándose en valor RMS de 2.957V de voltaje y 0.0119A de corriente eléctrica.***
- ❖ ***La carga que se le hizo al súper capacitor es demasiado pequeña, por lo que no se puede concluir que se estaba cargando. De esta manera y como paso en todas las pruebas, la energía generada por el dispositivo y que pasa por el circuito de almacenamiento, no puede cargar al súper capacitor de forma contundente.***
- ❖ ***Por los resultados obtenidos sobre el almacenamiento de la energía, se cree que el circuito utilizado es un factor determinante para que no se pueda cumplir con esta meta. Esto se plantea porque, la señal cruda del dispositivo esta en CA y los métodos que se probaron para almacenarla tienen que pasar a CD por un rectificador, el cual se come una porción de la energía, que para estos valores que se están manejando, es una cantidad importante y, aun así, se generan valores importantes de energía. Por lo que el circuito cosechador no está diseñado específicamente para esta aplicación, no existen circuitos para lo que se desea, ya que, al ser una propuesta nueva, se requiere trabajar en el desarrollo de cosechadores más versátiles.***
- ❖ ***No se puede descartar la generación hecha por el dispositivo por el hecho de no se haber podido cargar al súper capacitor, ya que los resultados de la energía generada y el diseño del dispositivo, abren la posibilidad de poder usar mas de un dispositivo a la vez, de forma que la energía crezca en sus valores y de esta manera se pueda cargar a un súper capacitor o algún otro elemento de almacenamiento.***

Propuestas sobre el uso de la energía del dispositivo

La conexión modular de varios dispositivos

Desde el planteamiento inicial, se buscó crear un sistema modular en el que se puedan ir conectando y sumando dispositivos para obtener una mayor potencia, esto ahora, pasa a tener una mayor relevancia. El dispositivo final que se ha desarrollado es modular en la forma en que se le puede añadir **otra torre base** con otros **diez sensores piezoeléctricos**, lo cual, en teoría, doblaría los valores de producción, pero un sistema total puede ser mucho más grande. El sistema total puede contemplar la utilización de múltiples dispositivos conectados entre si, teniendo como escenario propuesto conectar N dispositivos en un área a la intemperie para entregar **1 watt de potencia** eléctrica. Por lo cual, se hicieron cálculos con los valores obtenidos, para obtener, por ejemplo, ese numero N de

dispositivos. A continuación, se presenta un resumen de los cálculos hechos y de las aplicaciones que se pueden hacer, para ver todos los detalles, véase el anexo A6.8. ***Esto se hace para dar una dimensión a lo que se puede lograr ya que estos datos son representativos y teóricos de la energía que se generó con el dispositivo fabricado.*** La generación de energía de varios dispositivos conectados entre si ***puede SER o NO SER lineal***, donde la generación total sea igual a la suma de lo obtenido por un dispositivo por el numero de dispositivos que existen. La generación de energía por varios dispositivos conectados entre si puede tener un comportamiento diferente, el cual puede hacer que la generación se sume o solo se incremente un poco, sea mayor o menor, para lo que se necesitan hacer pruebas forzosamente.

Cálculos de la generación de energía producida

La mayor generación de energía obtenida fue el valor eficaz promedio RMS, ***de 2.957V de voltaje y 0.0119A*** de corriente eléctrica, esto en un tiempo de cinco minutos. Estos datos sirven para teorizar sobre la potencia obtenida en este lapso de tiempo, siendo la siguiente:

$$P_{en_5min} = (2.957V) \cdot (0.0119A) = \mathbf{0.035105\ Watts}$$

Esta potencia se puede expresar de mejor forma, si se presenta como potencia por minuto o ***watt·min***, por lo tanto, la potencia eléctrica promedio por minuto es igual a la potencia registrada de ***0.035105 watts sobre el tiempo*** en que se produjo (***5 minutos***), dando como resultado:

$$P = 0.007021\ watts \cdot min$$

Con esto se plantea lo siguiente, se considera que, si un solo dispositivo genera esta cantidad de energía, entonces dos generan el doble de energía, tres el triple y así sucesivamente, por lo tanto, si se desea una cantidad precisa de energía, entonces se debe calcular primero, cuantos dispositivos se necesitan para generar un ***1 watt de potencia***. Si con 1 dispositivo se puede generar en 1 minuto 0.007021 watt·min, entonces, para generar un ***1 watt·min*** se necesita del siguiente numero de dispositivos (NºD) = ***143 dispositivos***. De esto se hace la siguiente tabla:

Tiempo (minutos)	Generación eléctrica Watts	NºD para generar 1 watt	Potencia Watts·min	Potencia Watts·hr
1	0.007021	142.42 -> 143	0.007021	0.000117
5	0.035105	28.48 -> 29		
10	0.07021	14.24 -> 15		

Esta tabla presenta el número de dispositivos que se necesitan para poder generar 1 watt de potencia en 1, 5, y 10 minutos respectivamente, presentando estos valores de tiempo debido a que es la duración que puede tener una lluvia. Para conocer cuantos dispositivos se pueden tener en un área determinada, primero se mide el diámetro aproximado del dispositivo, el cual es de entre 20 a 22 centímetros, viéndose desde una vista superior, por lo que se puede estimar que, si se ve al dispositivo como una circunferencia de 23 cm de diámetro, entonces pueden caber dentro de 1 m², 16 dispositivos, esto se puede observar en la siguiente imagen:

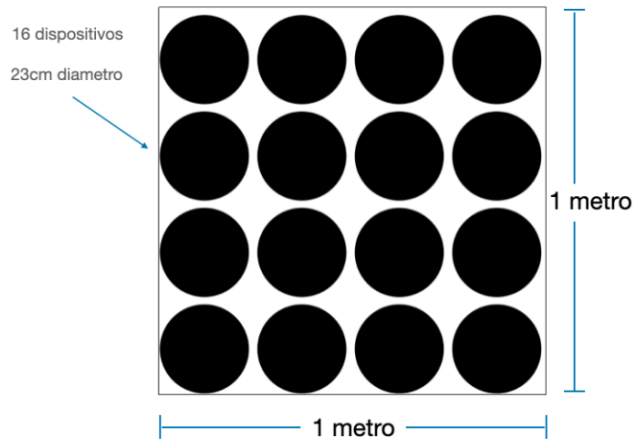


Imagen 73 Diagrama del área de 1 m² cubierto de dispositivos de generación

Para tener una relación entre número de dispositivos y metros cuadrados, se divide la cantidad de dispositivos necesarios para producir **1 watt** entre el número de dispositivos que caben en 1 m² (16).

<i>Nº de dispositivos para generar 1 watt</i>	<i>Metros cuadrados necesarios para contener los dispositivos (en 1 m² caben 16)</i>	<i>Metros cuadrados exactos</i>	<i>Nº Dispositivos exactos</i>
142.4298533	8.901865831	9	144
28.48597066	1.780373166	2	32
14.24298533	0.890186583	1	16

La energía generada de esas cantidades de dispositivos en 1, 5 y 10 minutos es la siguiente:

<i>Nº Disp.</i>	<i>Tiempo de generación (minutos)</i>	<i>Generación eléctrica (Watts)</i>	<i>Potencia (Watts·min)</i>	<i>Potencia (Watts·hr)</i>
144	1	1.011024	1.011024	0.01685
32	5	1.12336	0.224672	0.00374
16	10	1.12336	0.112336	0.00187

Con esto planteado, se puede hacer una primera comparación de energía, de modo que, para tener la misma potencia o hacer funcionar algún dispositivito común, por ejemplo, para tener la misma potencia que un cargador de celular convencional con una potencia de 5 watts, si un dispositivo de generación de lluvia (DGL) produce 0.007021 *watts·min*, entonces se necesitan de 713 dispositivos para obtener esa potencia, así como un área de 45 m². De esta forma se puede hacer la siguiente tabla con los siguientes elementos⁶

<i>Aplicación</i>	<i>Potencia requerida (Watts)</i>	<i>Nº Disp. que se necesitan</i>	<i>Nº de m² ocupados</i>
Apple TV	3	428	27
Cargador estándar de celular	5	713	45
Laptop	50	7122	446

⁶ Datos sacados de <https://www.daftlogic.com/information-appliance-power-consumption.htm>

Esta información se puede redondear, si se quiere comparar la potencia eléctrica que tiene el DGL con las fuentes energía renovables actuales, en sus versiones comerciales no industriales, (todas trabajando en condiciones optimas, con su generación máxima):

- *Paneles solares modernos (15% eficiencia)*⁷ = **150 watts por metro cuadrado**
- *Turbina de viento*⁸ (rotor de 120cm de diámetro) = **400 watts con vientos de 12.5 m/s**
- *Dispositivo de Generación por lluvia (DGL)* = **0.112336 watts por metro cuadrado**

Derivado de la observación de estos valores, se puede ver que esta comparación es dispar, la generación de energía del DGL está muy por debajo de un panel solar o un generador de turbina eólica, así como también se esta por debajo de la energía requerida para que aparatos de uso común funcionen. ***Es por esto que la energía generada por el DGL debe de ser tomada en un nivel de micro generación, y no de una generación normal, por lo que las aplicaciones que se deseen dar deben estar en este terreno.*** Por esta razón, se plantea proponer como un primer uso a esta energía, el cargar baterías pequeñas de celular o de denominación AA, AAA, etc. así como hacer funcionar elementos que trabajen con estas cantidades bajas de energía, como sensores, antenas pequeñas, etc. Con esto en mente, se puede presentar la cantidad de DGL necesarios para generar los mili amperes que contiene una batería, haciéndose esto porque, comúnmente las baterías están expresadas por el numero de mili amperes que tienen de capacidad, por lo tanto, primero se calcula la cantidad de mili amperes (mA) que 1 dispositivo genera.

<i>Nº D.</i>	<i>Tiempo de lluvia (minutos)</i>	<i>Mili Amperes (mA)</i>	<i>Mili Ampere por minuto (mA·min)</i>
1	1	2.38	2.38
1	5	11.9	
1	10	23.8	

Entonces para poder tener una referencia del valor de los mili amperes producidos, se tienen los ejemplos de dos dispositivos comunes que almacenan energía haciendo referencia a la cantidad de mili amperes que su batería tiene de capacidad, estos dispositivos son:

- iPhone 11 Pro con una batería de 3190mA
- Batería Energizer Accu Recarga Extreme AA de 2300mA

<i>Nº Dispositivos</i>	<i>iPhone Pro 3190mA (minutos)</i>	<i>Pila AA 2300mA (minutos)</i>
1	1340.3	966.38
16	83.7	60.39
32	41.8	30.19
144	9.3	6.71

Con esto no se pretende usar una gran cantidad de dispositivos para poder generar la energía equivalente a la que una batería de celular o AA almacena, ya que es un escenario poco realista, debido a que se necesita de una gran cantidad de material y de un espacio que no cualquiera dispone, por esta razón se presenta un mejor escenario, mas apegado a la realidad de cualquier usuario, aun cuando esto es un caso hipotético, se puede ir dirigiendo hacia donde se debe ir. El escenario que

⁷ Datos de <https://www.solar-electric.com/learning-center/solar-insolation-maps.html/>

⁸Datos de <https://www.homedepot.com/p/Nature-Power-400-Watt-Marine-Grade-Wind-Turbine-Power-Generator-70500/203916953>

tiene las características que mejor se pueden acoplar a cualquier circunstancia, tiene que ver con los minutos de duración que pueda tener cualquier lluvia, así como la cantidad de espacio que una casa o terreno puede tener para instalar varios DGL. Con esto en mente, se propone como un escenario realista el que una persona pueda usar 2 m² de superficie en su techo o en su jardín, por lo cual, en estos dos metros se pueden instalar 32 dispositivos, los cuales (como se menciona anteriormente) producirán **1.12336 watts en 5 minutos de lluvia de mediana intensidad**, lo cual también es factible, ya que las lluvias fácilmente pueden tener esa duración. En resumen, el escenario propuesto por usuario o en una mejor medida, por casa, es la siguiente:

<i>Nº D</i>	<i>Área</i>	<i>Tiempo de lluvia (minutos)</i>	<i>Energía producida (watts)</i>	<i>Mili amperes producidos</i>	<i>Potencia (Watts·min)</i>
32	2 m ²	5	1.12336	380.8mA	0.22467

Con este escenario propuesto, se puede seguir con la intención de usar esta energía para cargar baterías de celular o AA, por lo que, para realizar dicho trabajo, se necesita de la siguiente cantidad de lluvias o de una lluvia de una duración de minutos de:

<i>32 GDL / 2 m²</i>	<i>3190mA del iPhone 11 Pro</i>	<i>2300mA de una Pila AA</i>
<i>Nº de lluvias</i>	9	6
<i>Nº de minutos en una sola lluvia</i>	41.8	30.19

Estos datos se toman como aceptables, debido a la etapa en que se encuentra el DGL, donde apenas se esta iniciando su desarrollo, por lo tanto, para poder ser un dispositivo de micro generación de energía de uso comercial, deberá ser equivalente a los sistemas o dispositivos de micro generación de otras fuentes, para que pueda ser un complemento en un sistema mayor, en el cual, cuando un dispositivo no produzca su generación media o máxima por la disminución de las condiciones con las que trabaja, por ejemplo, cuando la luz solar no irradia toda su potencia a las celdas solares por el clima o por la hora del día y en ese mismo momento empiece a llover, entonces se seguirá generando energía por el DGL. De esta forma, se debe de tener como meta a futuro el poder llevar al DGL a una generación de energía en el escenario propuesto, equivalente a lo que un dispositivo de micro generación puede producir hoy en día (enero 2021), como por ejemplo el siguiente panel solar comercial de micro generación.

Panel solar⁹ = **5.2 W (potencia máxima en condiciones optimas de luz solar), a 12V con corriente que va de 0 a 433mA.**

Costo del dispositivo físico experimental (precios redondeados, a 2020 cuando se hizo el dispositivo)

A continuación, se presenta el costo que tuvo el dispositivo físico experimental de generación de lluvia, así como el calculo de lo que serian los 32 DGL empleados en el escenario propuesto, haciéndose esto, para dar una idea de donde se esta parado en términos económicos y como se deberá de bajar los costos a futuro para hacer más accesible el dispositivo.

⁹Datos de https://www.amazon.com.mx/Silicio-Policristalino-Alimentaci%C3%B3n-Cargador-Bater%C3%ADa/dp/B07D3VHSQR/ref=psdc_9687442011_t1_B07S1P67HL

<i>Material</i>	<i>Cantidad para 1 DGL</i>	<i>Costo de 1 DGL</i>	<i>Cantidad para 32 DGL</i>	<i>Costo de 32 DGL</i>
Material de impresión PLA	0.8-1 rollo	\$ 600	26-27 rollos	\$ 16 000
Film piezoeléctrico	1 hoja de film (para 1 DGL solo se usa 1/10 de hoja)	\$ 4 000	3 hojas de film	\$ 12 000
Aluminio de lata	2 latas	\$15	60 latas	\$450
Cables y conectores	10 jumpers + pines	\$50	Paquetes de jumpers + pines	\$1 200
Total		\$4 665		\$29 650

Se puede apreciar que el costo de un solo DGL fue de casi cinco mil pesos y que el costo del escenario propuesto es de alrededor de treinta mil pesos, el cual produce 1 watt de energía, por lo que se puede concluir que:

- ***El precio de 1 watt con el DGL experimental, tiene un valor aproximado de \$30 000.00 MXN***

Este valor sólo sirve como referencia, ya que este modelo es experimental y por ende el costo económico es alto, pero si se llega a desarrollar hasta el punto de hacer un prototipo completamente funcional, se puede llevar a una evaluación en su proceso de manufactura, para que se fabrique con técnicas industriales, con lo que se bajaría el precio notoriamente, al punto de poderlo comercializar a un precio competitivo. De la misma forma, si se quiere que se replique de forma individual para cada persona que tenga acceso a una impresora 3D, también se deberá evaluar su técnica y materiales de manufactura en una posterior iteración de diseño, por lo que también se pueden reducir costos de manera considerable.

Ejemplo demostrativo de la propuesta de proyecto de diseño abierto

Ejemplo demostrativo de la propuesta de proyecto de diseño abierto

La disertación de la presente tesis termina aquí. Sin embargo, se plantea un ejemplo de como el trabajo de investigación continúe desarrollándose, pero como un desarrollo de un investigador independiente, esto para ser un plan de transferencia tecnológica que cualquier investigador pueda tomar en cuenta, y si esta dentro de sus posibilidades pueda llevarla a cabo. Las consideraciones que se tomaron del diseño del dispositivo para crear este plan son: debido a los resultados obtenidos en las pruebas finales sobre la generación de energía registradas, se ve la necesidad de proponer un ejemplo de una futura continuación y desarrollo del mismo, pero a diferencia de lo que se había planteado, este no será un diseño abierto donde se suba la información a una web para que pueda ser replicado, ahora, se cambiará el enfoque a un proyecto de diseño abierto, donde ya se tiene un inicio, una etapa de experimentación, algunas iteraciones de diseño, la llegada a un dispositivo final y resultados de generación, buscando que con este proyecto se pueda “madurar” la tecnología de generación de energía por medio de gotas de lluvia. Como punto de partida del proyecto, se tiene en mente revisar y mejorar algunas variables del sistema (como un circuito de almacenamiento específico para el dispositivo) y/o un estudio de viabilidad para la implementación en un sistema mayor (conexión de múltiples dispositivos), por lo que se necesita de recursos (económicos, de especialistas en diseño de circuitos, etc.) que ayuden a llevar esto a cabo. Para enfocar esto al proyecto de diseño abierto se tiene la idea de primero buscar interesados en un contexto regional (en la misma universidad, con los investigadores del país, con las instituciones de desarrollo científico, con el sector privado etc.) para que se comparta la idea y se pueda llegar a un acuerdo de trabajo de forma más sencilla a comparación de llevarlo a una escala global. Esto se hace también, porque se sigue teniendo la misma finalidad con el dispositivo, la cual es ayudar a adentrar a cualquier persona a la fabricación, desarrollo y modificación de sistemas o dispositivos de generación de energía por medio de fuentes renovables. Por lo cual el objetivo sigue siendo el mismo:

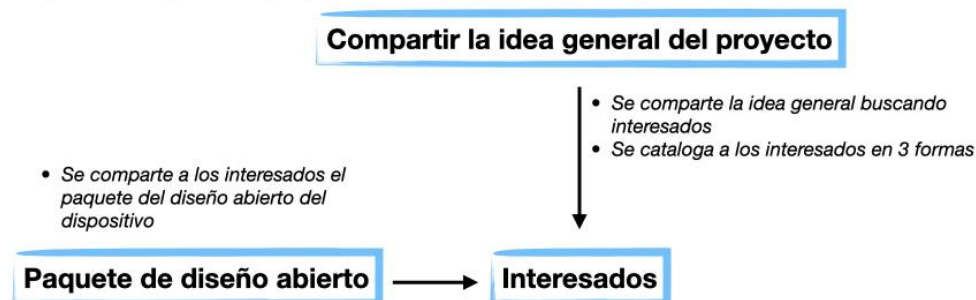
El objetivo es, el de compartir el diseño final del sistema en un diseño abierto, por lo tanto:

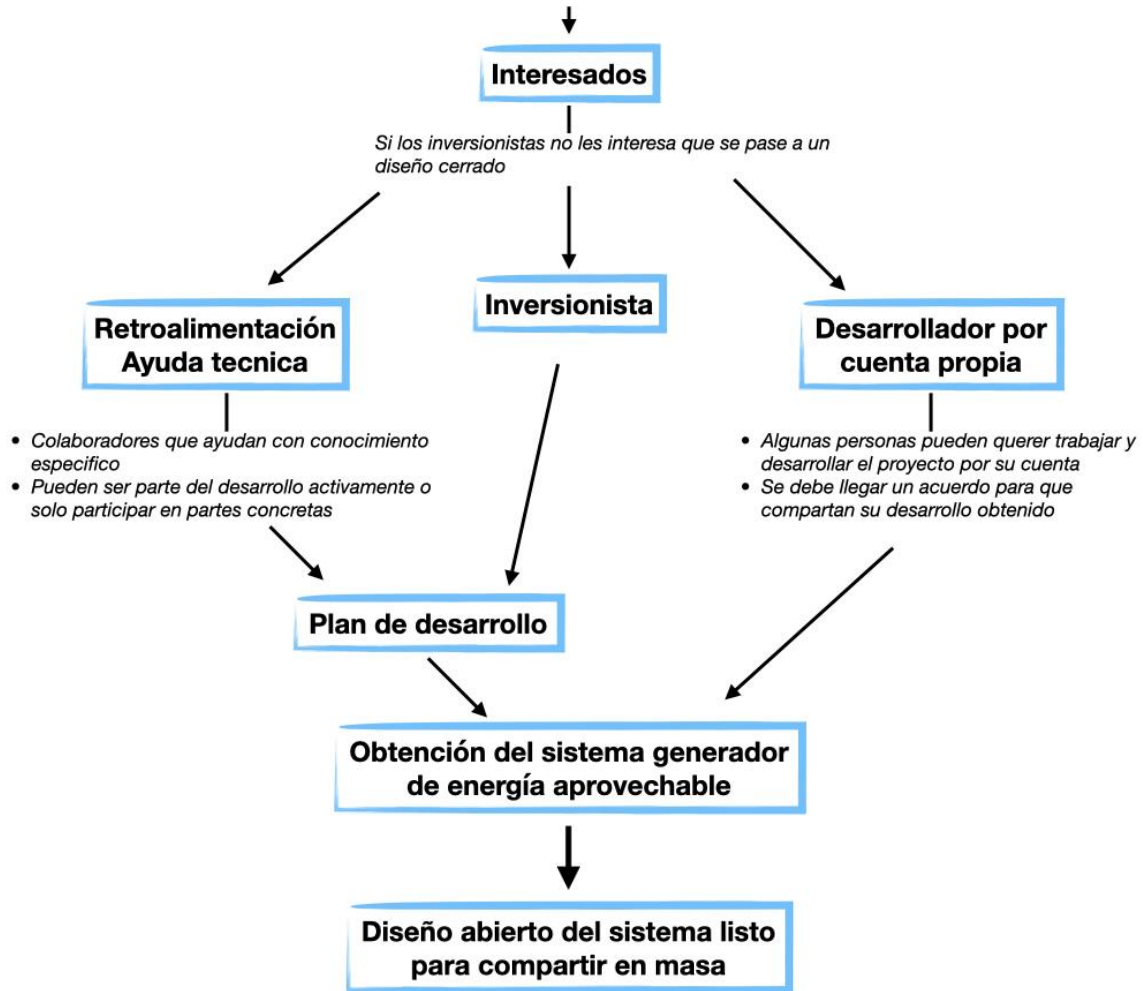
Se pasa de diseño abierto a proyecto de diseño abierto, para crear un objeto y/o sistema funcional con resultados de una generación de energía aprovechable, si se consigue, entonces se volverá a pasar a un diseño abierto para compartir de forma masiva.

Esto puede no ser del agrado de las personas que quieran participar en el proyecto, por lo que, en caso de presentarse esa situación, se necesitará llegar a un acuerdo. Se propone, por todo lo anterior, la siguiente forma de compartir el diseño abierto de este trabajo:

- Si los inversionistas no desean colaborar bajo un marco de diseño cerrado, o solo son colaboradores que ayudan financiando el proyecto con lo que deseen aportar, lo que se le conoce como “crowdfunding”:

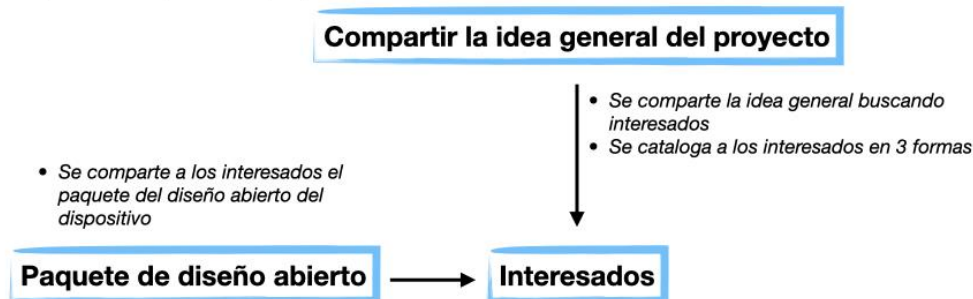
Etapas: “Compartir el proyecto”

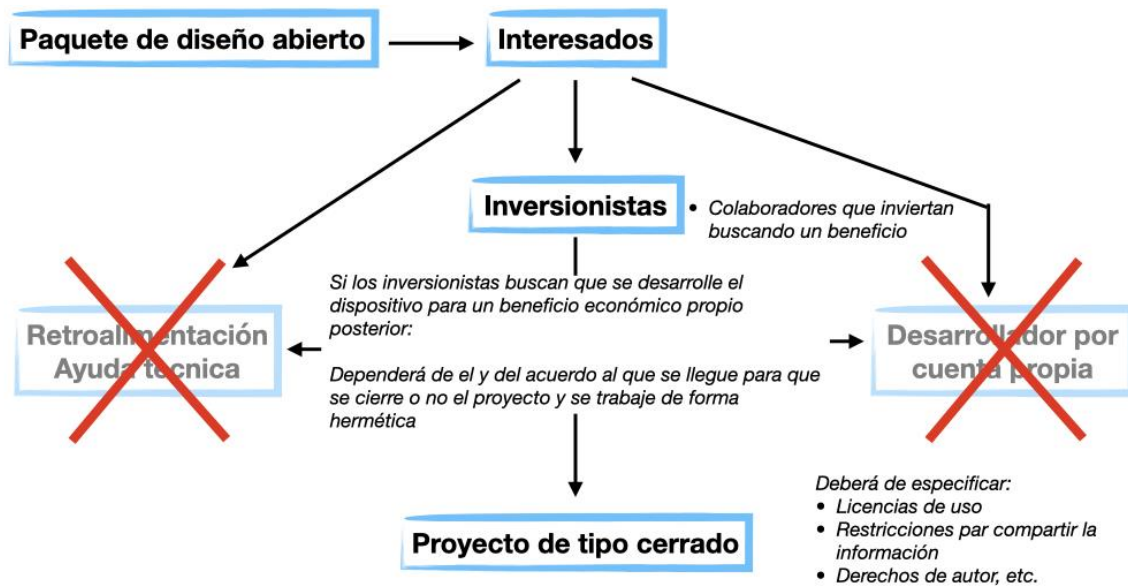




- Si existen inversionistas directos (empresas, desarrolladores, etc.) que deseen proveer de los recursos necesarios (especialmente el económico) para llevar a cabo el proyecto, con la intención de obtener un beneficio posterior y desean hacer al proyecto en un diseño cerrado.

Etapas: "Compartir el proyecto"





Paquete del diseño abierto

El paquete del diseño abierto es el compendio donde se incluirán todos los archivos necesarios para poder crear el dispositivo y a su vez, también sirve como una presentación del proyecto del diseño abierto, donde se expongan las razones del proyecto, así como sus objetivos, este será compartido de la siguiente forma:

- Nombre Proyecto:
 - Diseño de un sistema de generación de energía por medio de gotas de lluvia
- Abstracto
- Razón del proyecto
 - Seguir el desarrollo del dispositivo de generación por medio del impacto de gotas de lluvia, desde donde se dejó
- Objetivos
 - Llegar a un dispositivo y/o sistema de generación de energía por medio del impacto de gotas de lluvia totalmente funcional, que produzca energía aprovechable (que sea almacenable y con valores que permitan que pueda ser usada después)
 - Compartir el diseño final del sistema en un diseño abierto de forma masiva, para llegar al mayor numero de personas y que estas puedan adentrarse al tema de generación de energía
- Contenido
 - Este trabajo en PDF (opcional)
 - Lista de materiales utilizados
 - Archivos en CAD 3D de las piezas que se imprimieron
 - Planos técnicos de las piezas impresas en 3D
 - Instructivos de fabricación de elementos no hechos en impresión 3D
 - Instructivos de ensamble

Desarrollo en conjunto

- Establecer etapas de desarrollo,
 - Pueden ser por elementos del dispositivo (piezas, circuitos, ensambles, etc.)
 - Pueden ser pruebas (conectar varios dispositivos para obtener resultados)
 - Pueden ser por resultados (hacer dispositivos hasta que la conexión entre ellos genere energía que se pueda almacenar y se pueda utilizar para otras cosas, como prender leds o prender motores pequeños, etc.)
- Hacer sesiones de trabajo
 - Si se está desarrollando presencialmente el proyecto en conjunto, entonces hacer discusiones de lo que se está haciendo
 - Si se trabaja por separado
 - Dar a conocer los avances
 - Si alguien desarrolla un elemento que mejore el rendimiento del dispositivo, por ejemplo, el circuito de almacenamiento, entonces que pueda compartir la información.

Compartir el diseño abierto del dispositivo globalmente

Si no se obtienen interesados que puedan participar de forma activa, o que ayuden sustancialmente al proyecto, entonces se publicará el trabajo como diseño abierto en una red global y se dejará ahí, para que pueda ser retomado por cualquier persona, esto con la noción de que no hay tiempo de cuando esto pueda suceder, por lo que es difícil establecer un plan de trabajo. Asimismo, si el proyecto de diseño abierto del dispositivo tiene éxito y se llega a un sistema total con generación de energía aprovechable, teniendo todos los acuerdos para que este dispositivo sea un diseño abierto, entonces se subirá a la red para que pueda ser compartido de forma masiva a una escala global, pudiendo lograr esto mediante la subida del diseño (paquete de archivos para fabricar el dispositivo) a sitios de internet dedicados a este tipo de contenido, como thinkiverse, patreon, foros de diseño abierto etc.

Resultados, hallazgos y conclusiones

Resultados, hallazgos y conclusiones

Hallazgos

Hallazgos generales de todo el trabajo desarrollado

Desarrollar un nuevo sistema o dispositivo que genere energía por medio de una fuente poco investigada como el impacto de gotas de lluvia **es un tema complejo**. Las propuestas en investigaciones para generar energía son variadas, pero poco desarrolladas a fondo, **NO existe un camino claro** que seguir, por lo que **tomar un rumbo viene de la prueba y error** de ideas propias que se van proponiendo, las cuales requieren ser puestas en práctica para conocer su viabilidad. De esta forma, **se está es una etapa muy temprana** de desarrollo, por lo que **todavía falta tiempo** para que se llegue a **una maduración en la tecnología** que aprovecha esta fuente de energía, con todo su potencial. **Lo que si se probó con este trabajo** es que **se puede generar** una idea que abarque toda la información sobre la energía del impacto de las gotas de lluvia, para crear **un dispositivo que genere energía**, aun cuando sus resultados de generación no son lo que se necesita para llegar a ser un producto final, si muestra un potencial para que este dispositivo sea una base fundamental para poder llegar a un sistema totalmente funcional. Un claro ejemplo de esto, es que **la decisión de modificar y hacer sensores piezoeléctricos a medida** (tomando referencias de las investigaciones revisadas) ha **sido un gran acierto**, debido a que no solo se mejoró el desempeño, sino que se pudo **llegar a una mayor comprensión** de lo que es un sensor piezoeléctrico y de como manipular sus materiales para fabricarlo. De este modo, **la fabricación de sensores a medida**, ha sido un **punto de inflexión** en el trabajo, ya que, desde este punto, **se vio posible modelar un dispositivo tangible** que montara y uniera varios de estos sensores, como no se ha planteado a fondo en las investigaciones analizadas.

Hallazgos sobre los resultados obtenidos en las pruebas finales

Los valores obtenidos de las pruebas finales, pueden parecer bajos y no estables, sobretodo si se comparan con los de fuentes con mayor desarrollo (como la solar o eólica), siendo esto disparate, ya que es difícil establecer esta comparación en potencia y generación eléctrica del sistema diseñado con equipos comerciales solares o eólicos de última generación, los cuales son el resultado de 40 años de desarrollo y mejoras técnicas continuas. Por el otro lado, los valores que se han obtenido, son los resultados de generación de una primera versión física experimental del dispositivo, lográndose resultados promedio por sensor piezoeléctrico, mayores a los de las investigaciones analizadas y, además, se presenta **el diseño de un arreglo de sensores en un dispositivo, lo cual no se ha hecho o se ha hecho muy poco, siendo esto un resultado positivo de la investigación realizada**. Lo que no se ha podido hacer de momento, **es almacenar** la energía generada, siendo algo que **se tiene que trabajar a futuro**. Esto no es un resultado negativo definitivo, ya que las pruebas finales demuestran que **se ha obtenido un desarrollo** importante desde la idea, la investigación y la implementación de un sistema a través de un dispositivo, sobre la generación de energía por medio del impacto de gotas de lluvia, lo cual es un paso importante para llegar a un sistema totalmente funcional que produzca, almacene y aproveche energía.

Hallazgos desde el punto de vista del usuario del dispositivo

Haber hecho este trabajo de tesis como se hizo, **de plantearlo** desde la inquietud de utilizar la lluvia como fuente de energía, **hasta llevarlo a la creación** de un dispositivo de generación, hizo que **uno se involucre a fondo** en el tema de **producción energética**. Siendo esto uno de los objetivos que se plantearon, y al probarse, se puede ver que esta motivación, puede hacer que cualquier persona se adentre en el tema, desarrollándose un potencial interés por adquirir o fabricar estas tecnologías, lo

cual se podrá lograr con un conocimiento mínimo sobre generación de energía. Para realizar esta tesis, *se necesitó* de cierto *conocimiento específico* sobre la generación de energía, pero también se demostró que fue debido a la complejidad de la fuente que se utilizó, por lo que, si en este trabajo se pudo llegar a un dispositivo final, *se tiene la hipótesis que si una persona desea usar* fuentes establecidas y comerciales (como la solar o eólica), esta *podrá lograr implementar un sistema* personalizado *de forma más sencilla* y sin la necesidad de tener un conocimiento profundo sobre el tema, siempre y cuando *se apoye en las comunidades de diseño abierto* de este tipo de sistemas.

Hallazgos del dispositivo de generación como proyecto de diseño abierto

Para *seguir desarrollando* el dispositivo, el *trabajo pasa de ser un trabajo de diseño de una persona* a un *proyecto de diseño abierto*, en el que se busque obtener colaboradores (personas, empresas, etc.), que puedan *proveer los recursos que se necesitan* para seguir este desarrollo, hasta que se pueda llegar a un sistema total de generación de energía por medio del impacto de gotas de lluvia. De esta forma, el dispositivo final al que se llegó, es *un punto de partida para seguir iterando* en el diseño, por lo que se puede decir que se cumple en cierto modo con la expectativa de hacer un diseño abierto, ya que *el dispositivo tiene un desarrollo dinámico*, que hace que no se pare, sino que pueda seguir evolucionando y solventando los problemas o resultados adversos que surjan en el camino. Por lo tanto, el ejemplo mostrado de como se plantearía el *proyecto de diseño abierto* del dispositivo de generación, *es la continuación de este trabajo*, por lo cual se limitaron las acciones que pueden llevar a cabo, haciendo que *las personas interesadas se centren* en el desarrollo posterior de lo que se hizo, de manera que *se siga con la misma ruta específica*, siguiendo con la misma idea general del dispositivo, para *obtener primero los resultados* que se desean respecto a *las variables que hacen falta por experimentar a fondo*.

Resultados

Resultados más significativos de la generación de energía del diseño final del dispositivo

Generación de energía de los sensores laminares fabricados manualmente (generación de un solo sensor, por medio de un pulso leve con un dedo similar a la fuerza de una gota)

❖ Generación de energía cruda en corriente alterna (CA). Ver Imagen 74.

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Pico a Pico</i>
Voltaje	3.5V	-6.1V	9.6V
Corriente	14.17mA	-24.58mA	38.75mA

❖ Generación de energía rectificada en corriente directa (CD). Ver Imagen 75.

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>
Voltaje	6.79V	142.07mV
Corriente	27.32mA	589µA

Generación de energía cruda en CA del dispositivo final, mientras sus diez sensores son golpeados durante 5 minutos por lluvia artificial. Ver Imagen 76.

Valores	RMS
Voltaje	2.07 V
Corriente	0.0082A o 8.28mA

Generación de energía rectificada en CD del dispositivo final, mientras sus diez sensores son golpeados durante 5 minutos por lluvia artificial. Ver Imagen 77.

Valores	Valor eficaz promedio (RMS)
Voltaje	2.95 V
Corriente	0.0119 A o 11.9mA

Almacenamiento de la energía generada en CD por el dispositivo durante 5 minutos de lluvia artificial, a través de la carga de un súper capacitor

	Valores	Máximo	Mínimo	RMS
<i>Pasando por el circuito de almacenamiento.</i>	Voltaje	101.96mV	99.005mV	0.1003V
	Corriente	408.17μA	397.61μA	0.4mA
<i>Conexión directa sin pasar por el circuito</i>	Voltaje	222.64mV	219.64mV	0.2209V
	Corriente	1.33mA	710.58μA	0.95mA

Conclusiones

Conclusiones generales de todo el trabajo desarrollado

La **idea general** que se propuso y se llevo a cabo **fue correcta**, ya que **se genero energía** y se pudieron **solventar todos los inconvenientes** que se iban presentando sin la necesidad de un rediseño total o cambio de idea, **las piezas del dispositivo fueron evolucionando** con iteraciones de diseño anterior. Todo el modelado, fabricación y desarrollo de los componentes **llevaron una secuencia lógica basada en el desarrollo de un diseño abierto**, hasta llegar a la versión final del dispositivo con la que obtuvieron los resultados finales. Así mismo, **se probó que** se pueden **mejorar los sensores** piezoeléctricos **si se modifican y se hacen a medida**, de igual manera, se **probó que** el **cambio de geometría** en los **sensores afecta la generación de energía**. Esto hizo que los sensores fabricados, tuvieran **mayores valores de producción** de energía que los que se encontraron en la revisión de investigaciones. Teniendo, además, una **fabricación sencilla**, con gran parte de **sus materiales** de fácil acceso. De esta forma, **fabricar sensores propios** hizo que fuera **más fácil plantear** y llevar a cabo una idea de como crear un dispositivo de generación de energía por medio de gotas de lluvia. Por lo tanto, los **sensores piezoeléctricos** fabricados **a especificación propia** y de **forma manual**, son una prueba de que se puede hacer un sistema de generación de energía de **forma no industrial**, y por consiguiente, **fabricar los elementos del dispositivo** de forma **específica y a medida**, ayudó a **plantear el trabajo como un diseño abierto**, no solo porque de esta forma se indica como hacer los componentes del trabajo, sino que **de esta manera se invita** a que **cada persona pueda fabricar** sus **propios elementos** para hacer las modificaciones que desee en el dispositivo y/o sistema.

Conclusiones sobre los resultados obtenidos en las pruebas finales

La energía eléctrica que se genera *es fácilmente apreciable, monitoreable y medible*. Los valores de energía que entrega el dispositivo final, en su *generación cruda en CA* y en su posterior *señal rectificada en CD*, son *considerables y prometedores*, esto dentro de lo que es un sistema de generación en una escala micro (en un único dispositivo), además de que se produce por una fuente no estable ni continua como las gotas de lluvia. La energía generada *NO ha podido* ser almacenada *de momento*, pero *se considera que la energía generada puede ser almacenable y aprovechable en un futuro*, esto debido a que *existen variables que pueden modificar los resultados de almacenamiento* de la energía generada, las cuales no han sido desarrolladas ni llevadas a cabo por *falta de recursos económicos*, así como de conocimientos más detallados y específicos.

Conclusiones de las variables a trabajar, modificar y desarrollar a futuro

El circuito de almacenamiento que se creó, *no cumplió la función* de almacenar la energía que generaba el dispositivo final. Su elección se hizo por la información obtenida de diferentes investigaciones y la prueba hecha con una pequeña celda solar, que produjo resultados satisfactorios en cuanto a cómo el circuito ayuda a almacenar la energía en un súper capacitor. Pero al analizar los resultados de las pruebas finales, se puede apreciar que *la energía que genera el dispositivo tiene un comportamiento muy específico*, la señal de energía no es estable y tampoco es constante, la generación depende del impacto de las gotas de agua sobre los sensores, los cuales son totalmente aleatorios, por lo que se obtiene una señal con picos de generación aleatorios tanto en su magnitud como en su incidencia. La implementación de un *circuito especial*, en el sentido que sea *diseñado específicamente para almacenar el tipo de energía que genera el dispositivo*, ayudará significativamente a su aprovechamiento. Esto no es sencillo, de hecho, se necesita una investigación propia para desarrollar este circuito. De forma que se utilice la señal cruda en CA que produce el dispositivo, para que ningún elemento de rectificado se coma voltaje en el proceso de convertir la señal a CD. *Otra variable a explorar* que puede mejorar los valores de generación de energía, así como *facilitar su almacenamiento, es la de conectar múltiples dispositivos* entre si, teniendo en mente la conexión de un número de dispositivos que se considere práctica y dentro de posibilidades reales, esto es, que se proponga un escenario alcanzable en términos de espacio y de material a utilizar. *La conexión de múltiples dispositivos* puede parecer una idea no muy congruente, debido a la cantidad de recursos materiales que se necesitan, pero debido a que practicante todas las piezas están hechas por impresión 3D, se pueden explorar formas de eficientar este proceso, por ejemplo, se puede utilizar materiales de reusó como el material PET, entre otras ideas, las cuales deberán de ser analizadas y desarrolladas para que lleguen a ser adoptadas. De igual forma, *en un futuro*, se pueden realizar iteraciones de diseño que reduzcan el número de componentes y/o o las dimensiones de estos, lo cual ayudaría en la utilización de una menor cantidad de material, siendo esta *continuación en la iteración de diseño, otra variable* a tomar en cuenta.

Conclusiones desde el punto de vista del usuario del dispositivo

La idea de crear un dispositivo de generación de energía por cuenta propia, *puede ayudar a motivar a personas a que se adentren en el tema de energía sustentable*, ya que, trabajar en el desarrollo del dispositivo que se fabricó creo una conexión con el tema. Esto debido a que, al crear un *dispositivo tangible*, hace más *fácil visualizar* a las gotas de lluvia como una fuente de energía considerable, de hecho, *se hace más visible proponer mejoras* o nuevas formas de implementar las ideas que hay detrás del dispositivo, ya que en la mayoría de las investigaciones analizadas, no se ha hecho una implementación en un dispositivo como la que se hizo, fabricando un modelo físico experimental para realizar pruebas y obtener resultados reales, con los que se ha obtenido información valiosa que

impulsa la utilización de gotas de lluvia como fuente energética. Por lo cual, en resumen, *se construyó* un dispositivo que se puede *fabricar y ensamblar en un taller casero*, de forma *no industrial*, cumpliendo con lo propuesto de hacer este dispositivo *lo más accesible posible* para la *mayor cantidad de personas*, gracias a la utilización de una *manufactura alcanzable*, motivo por el cual se utilizó impresión 3D (la cual cada día es mas accesible para el publico en general) para crear los componentes del dispositivo, así como también, se utilizaron materiales comunes para construir los sensores laminares, donde solamente se necesito de un material especifico, el film piezoeléctrico. De tal manera que *el trabajo se relaciona con un diseño abierto desde su narrativa*, razón por la que se va narrando lo que se esta haciendo, siendo en algunas partes anecdótico. De manera que no solo se da información, datos o instrucciones para crear el dispositivo, también se muestra todo el proceso de desarrollo como un panorama general de lo que es crear un dispositivo desde cero. Esto puede tener un valor mas significativo que solo proporcionar resultados de generación energética, ya que, con esto, se ayuda a que quien quiera desarrollar un dispositivo de generación de cualquier tipo de fuente, pueda guiarse o tener como referencia este trabajo. Por lo tanto, desde *cierta perspectiva, este trabajo ya es un diseño abierto* del dispositivo, ya que se cuenta con toda la información para replicar o modificar al dispositivo.

Conclusiones de la utilización de la energía generada por el dispositivo

Derivado de los cálculos hechos sobre la producción de energía del dispositivo de generación de lluvia (DGL) se concluye que:

- ❖ *La energía generada por el DGL debe de ser tomada en un nivel de micro generación, y no de una generación normal (esto es, sin compararse con sistemas modernos de energía solar o eólica), por lo que las aplicaciones que se deseen dar deben estar en este terreno.*

Por lo tanto, se propone el siguiente escenario ideal por usuario o en una mejor medida, por casa:

Nº D	Área	Tiempo de lluvia (minutos)	Energía producida (watts)	Mili amperes producidos	Potencia (Watts·min)
32	2 m ²	5	1.12336	380.8mA	0.22467

Se toma como aplicación principal de micro generación de energía, la de cargar baterías pequeñas, como las de un celular o pila AA, por lo que, para realizar dicho trabajo, se necesita de la siguiente cantidad de lluvias o de una lluvia de una duración de minutos de:

32 GDL / 2 m ²	3190mA del iPhone 11 Pro	2300mA de una Pila AA
Nº de lluvias	9	6
Nº de minutos en una sola lluvia	41.8	30.19

Estos *datos se toman como aceptables*, debido a la etapa en que se encuentra el DGL, donde apenas se esta iniciando su desarrollo, *teniendo como meta a futuro el poder llevar al DGL a una generación de energía en el escenario propuesto, equivalente a lo que un dispositivo de micro generación puede producir hoy en día* (enero 2021), (por ejemplo, la potencia de una celda solar de micro generación de 5.2 W de potencia). Con el costo del dispositivo físico experimental de generación de lluvia y en concreto, el costo del escenario ideal propuesto (los 32 DGL) se concluye lo siguiente:

- ***El precio de 1 watt con el DGL experimental, tiene un valor aproximado de \$30 000.00 MXN***

Este valor se muestra como como referencia, ya que este modelo es experimental y por ende el costo económico es alto, pero al mismo tiempo, sirve para ser el punto de partida para seguir trabajando tanto en su manufactura como en su diseño para poder bajar los costos y llevarlos a un coste competitivo en comparación de los dispositivos de micro generación actuales.

Anexos

Anexo 1

A1.1 Estudio de la de distribución de los tamaños de gota de un evento fuertemente erosivo.

Bienes, Ruiz, Arévalo, Sastre, y Marqués (2011) documentan un trabajo donde se analiza la distribución de los tamaños de gota de un evento fuertemente erosivo. Las características del caso:

- Se realizó el estudio a una mesocuenca (2,44 has)
- Situada en un olivar intensivo (marco de plantación 7 x 7 m²) en la localidad de Aranjuez, al sudeste de Madrid (España)
- Clima Mediterráneo semiárido (Temperatura media anual = 13,6 °C, Pmedia anual = 380 mm y ETP anual (Thornthwaite) = 769 mm).
- Datos recabados de una tormenta el día 3 de octubre de 2007
- Cayeron 42 mm de lluvia llegándose a alcanzar una intensidad máxima en 10 minutos de 55,2 mm/h.

Se obtuvo el diámetro medio de las gotas de lluvia que sucedieron durante la tormenta, llevándose a cabo la recolección de muestras de costras de la zona de sedimentación en las que estaban impresas las huellas de las gotas de la tormenta. Para tener una mejor valoración sobre los datos recolectados se utilizó un analizador de imagen Delta-T Devices Ltd. con el software WindDIAS, el cual determinaba el diámetro de las manchas.

Resultados obtenidos:

- El diámetro medio es llamado D₅₀.
- Con intensidades de 10 mm/h el D₅₀ era de 2 mm
- Subía a 2,5 mm para intensidades de 25 mm/h.
- El D₅₀ es de 2,92 mm derivado del estudio de la distribución de los diferentes tamaños de gota.

Anexo 2

A2.1 Precipitación promedio mensual al día en la CDMX

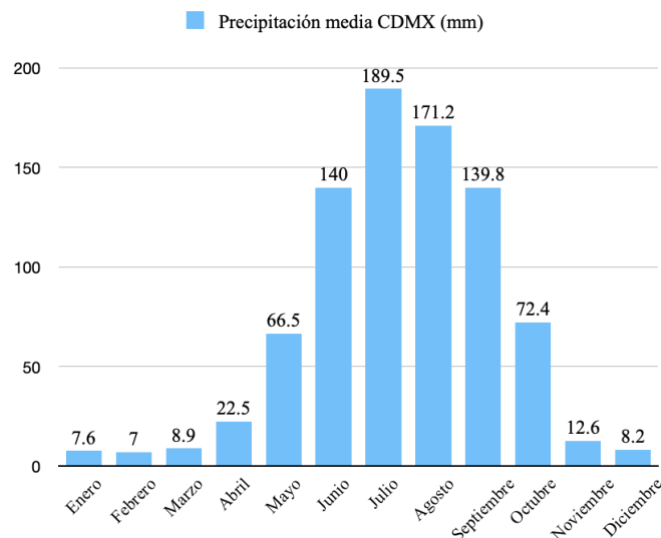
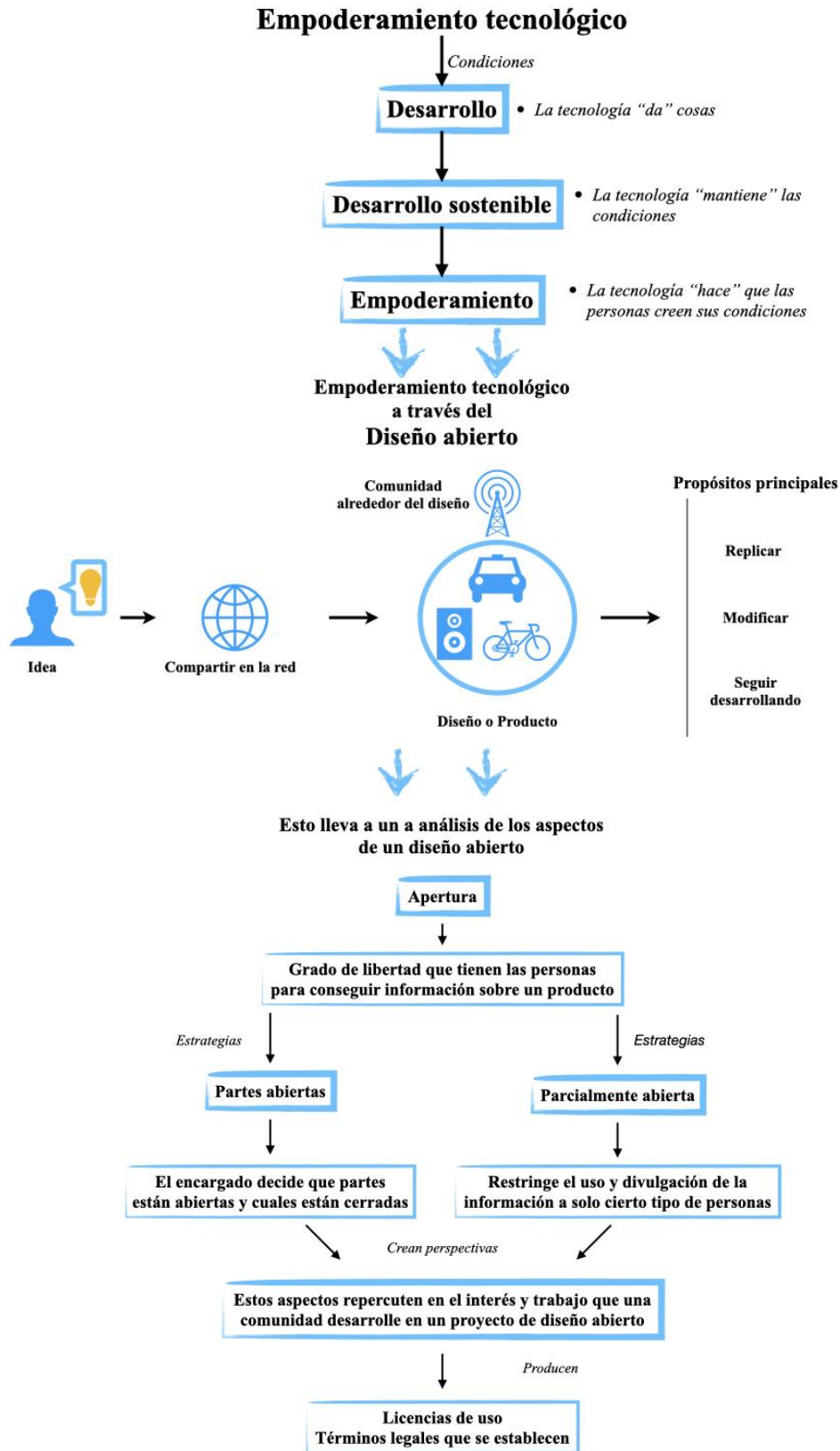


Imagen-A2. 1 Precipitación promedio mensual al día en la CDMX (Weather-mx & CONAGUA, 2020)

Anexo 3



Anexo 4

A4.1.1 Serie de experimentos: 1. Caída de gotas sobre un sensor piezoeléctrico de tipo 'buzz'

Resumen

En este experimento se analizó el comportamiento de un piezoeléctrico de tipo 'buzz' cuando una gota de agua cae sobre él, simulando una gota de lluvia, pero en un ambiente controlado, analizando los valores de generación obtenidos para decidir si se necesita volver a experimentar o ya se pueden utilizar en el diseño final del sistema de generación.

Introducción

Se experimentó con sensores piezoeléctricos tipo 'buzz' para conocer la generación de energía eléctrica obtenida, para esto, se hizo uso de un dispositivo hacedor de gotas, en cual cuenta con un gotero que produce gotas de alrededor de 5mm de diámetro, además se utilizó un osciloscopio para medir y capturar las señales de energía eléctrica generadas por el sensor.

Procedimiento experimental

Primero se tomó una medición de control para conocer el funcionamiento y generación de este tipo de sensor piezoeléctrico de tipo buzz, para esto se tomaron los valores que se producen al momento de pulsar el sensor cuando se le aprieta ligeramente con un dedo contra una superficie, esto con el fin de conocer la diferencia que se tiene con respecto a lo que ocurra con el impacto de gotas de agua, en la siguiente imagen se muestra la forma en que se hizo la pulsación.

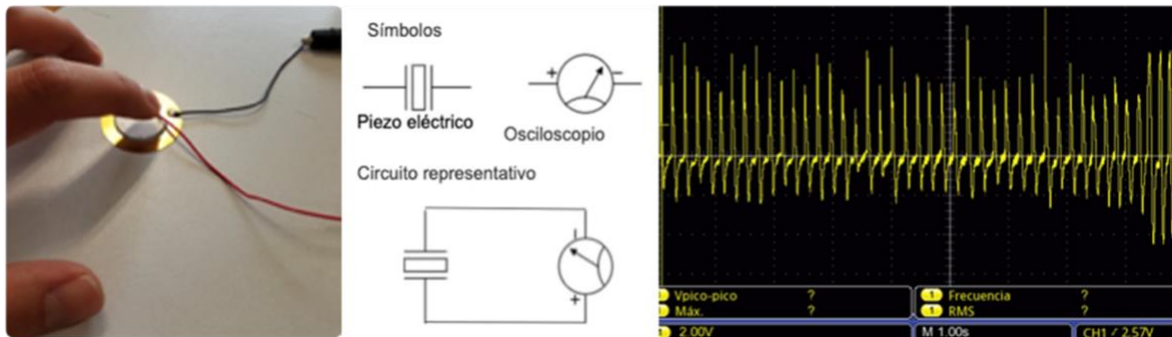


Imagen-A4. 1 Pulsación del disco piezoeléctrico con el dedo índice, el circuito representativo de la forma en que se genero y midió la energía producida y la medición que se obtuvo en el osciloscopio.

Las mediciones que se obtuvieron en el osciloscopio son las siguientes: **producción por pulsación fue de -1V a 7V con un promedio de 8 V de pico a pico**. Con estos datos de control se hizo la prueba con gotas de agua, las cuales caen directamente desde una válvula generadora hasta una base, en esta se marcó el lugar de caída; la válvula esta a una altura de **1.52 m** a la marca de la base y las gotas de agua tienen un diámetro de 5mm aproximadamente. Posteriormente se colocó sensor en el lugar marcado, se impermeabilizaron los cables que van del osciloscopio al sensor para que el agua no genere interferencia y no dañe al equipo. Se abrió la válvula para que las gotas cayeran e impactaran el sensor produciéndose energía eléctrica que era medida por el osciloscopio. La medición que dio el osciloscopio nos mostró que el voltaje va desde **0.3V pico a pico a alrededor de 1.5V pico a pico** por impacto, de una gota, cabe mencionar que los picos grandes no son muy recurrentes. Se volvió a hacer la medición variando un poco el tamaño de las gotas y la velocidad con la que caen, mostrándonos que las mediciones varían muy poco con respecto a la primera.

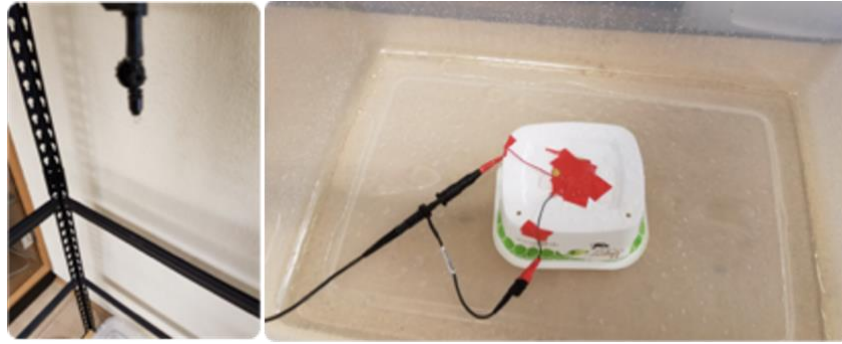


Imagen-A4. 2 Válvula de generación de gotas agua y zona de impacto con el sensor conectado al osciloscopio

Debido a estas mediciones, se trató de mejorar las condiciones de montaje del sensor modificando la forma en que esta colocado en la base, dejando un claro entre este y la base, lo que hará que exista una mayor deformación y que la base no absorba parte del impacto. Para este nuevo acomodo se hicieron varias mediciones, variando el tamaño de la gota y su velocidad. Se encontró que, si existe una generación de energía mayor a comparación del acomodo anterior, aunque no es sustancial, pero si mas uniforme, esta va de **0.3V pico a pico a 2.2V pico a pico**; como en las mediciones anteriores, los picos grandes no son recurrentes.

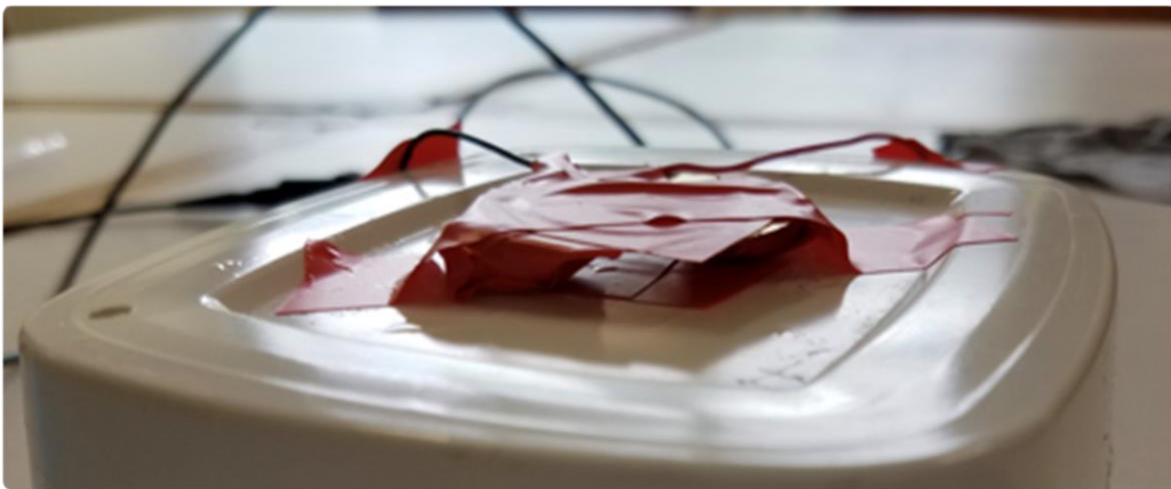


Ilustración 1 Claro entre la base y el disco piezoeléctrico

Resultados

Por cada gota de agua que impacta en sensor piezoeléctrico de tipo buzz se produjo una señal eléctrica que va de los **0.3V a los 2.2V, la cual no es constante.**

Discusión

Esta generación de energía se considera como no suficiente, pero se tiene que tener en cuenta que solo se uso un sensor piezoeléctrico, faltando medir el comportamiento al conectar varios sensores, ya sea en paralelo o en serie, para que se cubra una mayor área de impacto y se reciba un mayor numero de gotas.

Conclusiones

La energía de generación no es buena, por lo que se necesita hacer experimentaciones con varios sensores tipo 'buzz' conectados en serie o paralelo para determinar si estos sensores serán usados en el diseño final del sistema de generación.

A4.1.2 Segunda parte: 1. Caída de gotas sobre un sensor piezoeléctrico de tipo ‘buzz’

Resumen

En esta continuación de la experimentación con sensores piezoeléctricos de tipo ‘buzz’, se verificó la premisa anterior de la subida en la generación de energía si se conectaban varios de estos sensores entre si.

Introducción

Esta práctica se respondió a la premisa de que conectar varios sensores de tipo buzz entre si aumentaría la generación eléctrica notablemente, conectando los sensores en serie (conexión que suma sus voltajes) para que sean golpeados por gotas de agua, mientras se median y analizaban los resultados que se producían.

Procedimiento experimental

Se conectaron diez sensores piezoeléctricos tipo buzz entre si, la conexión que se hizo fue en serie, conexión que teóricamente suma los voltajes de cada sensor. Contrario a lo que se suponía, las señales de generación eléctrica que mandaban los diez sensores **no sumaban totalmente su voltaje**, lo que sucedía fue que la señal era muy parecida a la señal genera por un solo sensor, pero **ahora la frecuencia de los picos de generación era mayor, tanto los picos pequeños como los grandes**.

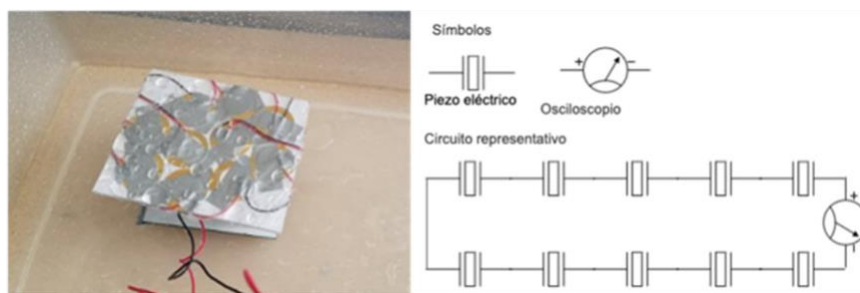


Imagen-A4. 3 a) Fotografía de los diez sensores conectados en serie mientras eran golpeados por gotas de agua, b) Circuito de la conexión de los diez sensores piezoeléctricos en serie

La señal de voltaje producida por los diez sensores se muestra en la siguiente imagen. Mientras los sensores reciben el golpeteo de gotas de agua se puede apreciar la disparidad de los picos generados, unos son muy grandes y otros muy pequeños, manteniéndose la generación en aproximadamente **0.3V a los 2.2V pico a pico**. Posteriormente se trató de almacenar esta energía generada, para lo cual se conectó la salida de voltaje del arreglo de los diez sensores a un rectificador para después pasar a una batería, con la intención de que la batería se cargara.

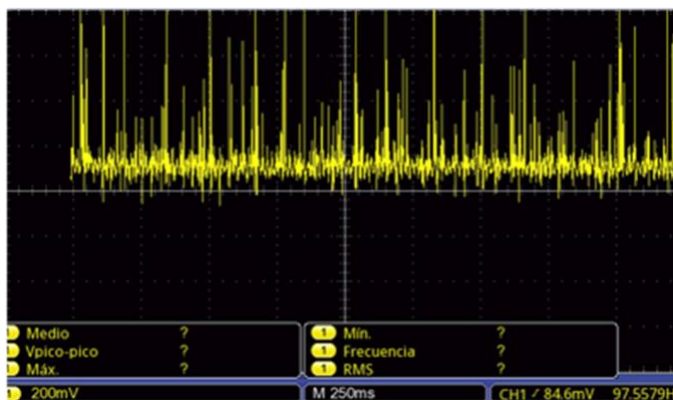


Imagen-A4. 4 Medición de la señal de voltaje producida por el impacto de gotas de agua sobre los diez sensores

Como en la señal generada por los sensores se muestra que casi no hay picos negativos y los que hay no son significativos, se conectó directamente la salida de voltaje a la batería, esperando que esta se cargara. La carga de la batería y por ende el almacenaje de la energía generada por los sensores al momento de que les caían gotas de agua **fue nulo**, al medir la cantidad de energía que registra la batería se pudo confirmar que esta nunca vario, aun cuando la caída de gotas de agua duro 10 minutos.

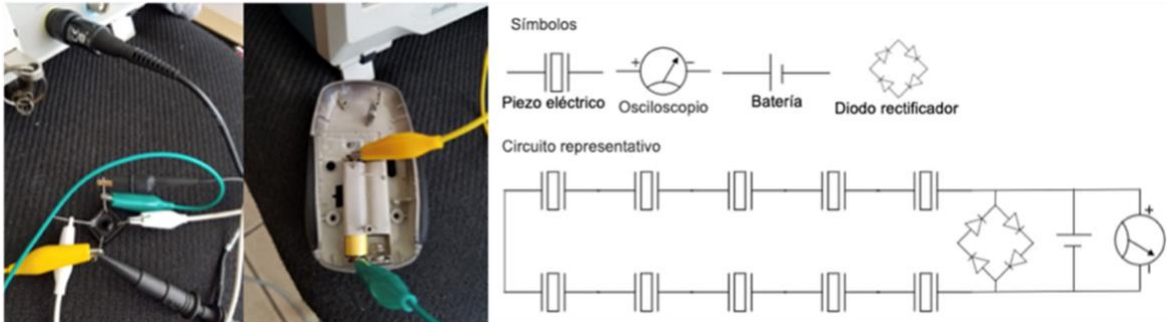


Imagen-A4. 5 a) Fotografía de la conexión del arreglo de sensores en serie, pasando primero al diodo rectificador y después a una batería AAA, b) Esquema del circuito de conexión.

Resultados

La generación de energía producida por la conexión en serie de diez sensores piezoeléctricos fue similar en valor a la de un solo sensor, pero la constancia y número de picos de voltaje fue notablemente mayor, los valores de los picos generados fueron de **0.3V a los 2.2V pico a pico**. Con esta energía generada se intentó cargar una batería, lo cual nos aseguraba que esta energía era utilizable; esto no ocurrió y **la batería no mostro ninguna variación en su voltaje de salida**.

- ❖ *No se pudo cargar una batería, la señal emitida de la misma siempre fue la misma sin importar el tiempo de conexión*
- ❖ *Cuando se conecta a una batería o diodo la señal producida por los sensores disminuye considerablemente*

Discusión

Los resultados obtenidos muestran que la energía generada tanto por un sensor como por diez sensores no tienen una generación constante, tiene un comportamiento por pulsos, lo cual hace que, al conectarles un diodo rectificador o algún elemento electrónico para poder utilizar esta energía, esta se vuelve prácticamente nula. Esto nos indica que esta energía no puede ser utilizable

Conclusiones

- ❖ Los resultados obtenidos de esta experimentación rechazan el uso de sensores piezoeléctricos de tipo buzz en el diseño del sistema de generación.

A4.2 Serie de experimentos: 2. Vibración generada por una gota de agua sobre láminas de diferentes grosores

Resumen

Para conocer el grosor ideal necesario que debe de tener la lámina de soporte del sensor piezoeléctrico se va a fabricar, se probó con láminas de diferentes grosores mientras eran golpeadas una gota de agua, de forma que se conoció cual de estas tiene una mayor vibración.

Introducción

Esta prueba consistió en dejar caer una gota de agua a una altura determinada y ver la reacción que tienen las diferentes láminas, con esto se conoció que grosor de lámina es ideal para usar como estructura de soporte del sensor laminar que se va a fabricar. Las láminas que se usaron fueron de un calibrador de láminas comercial, el cual cuenta con diferentes grosores (en milímetros). Se fabricó una estructura con acrílico, en la cual se podrá montar el calibrador, en donde la lámina que se desea estudiar quede expuesta, para que la gota caiga en su extremo, esta configuración se le conoce como viga en cantilever.



Imagen-A4. 6 Estructura de soporte del calibrador de láminas, con una lámina expuesta como viga en cantilever

Fue necesario conocer el tamaño exacto de la gota que se produce desde el gotero, para esto se tomaron medidas del gotero. Se tomó un video en cámara lenta para ver la formación de la gota de agua que sale del gotero, viéndose que al momento en que la gota ha adquirido su tamaño máximo justo antes de caer ligeramente mayor a la circunferencia de la boca del gotero, esto se nos indica que la gota es un poco mayor a **los 5 milímetros**, esto fue idóneo ya este diámetro representa el valor máximo promedio una lluvia, por lo tanto, estas vibraciones de vigas representarán lo máximo a lo que se puede llegar. Las medidas de las láminas están tomadas a partir de la parte del calibrador donde están sujetas por un tornillo, por consiguiente, las medidas consideradas de láminas que serán golpeadas por una gota de agua y que representan una viga rectangular empotrada en cantiléver fueron de **60 milímetros de largo por 13 milímetros de ancho**. Además, se midió la distancia que se tiene desde el gotero donde se encuentra la lámina que recibirá el impacto de la gota de agua, esta distancia es de **114 centímetros**.



Imagen-A4. 7 a) Foto de la lámina de 0.05 mm expuesta sobre el soporte, b) Medición de la distancia entre el gotero y la lámina a ser golpeada.

Procedimiento experimental

Se dejaron caer gotas de agua sobre las láminas de diferentes grosores, así se conoció la forma en que vibran, principalmente la amplitud que se logra, para conocer este comportamiento, se capturó el momento en que láminas eran golpeadas por las gotas con una cámara lenta, conservándose detalladamente este evento.

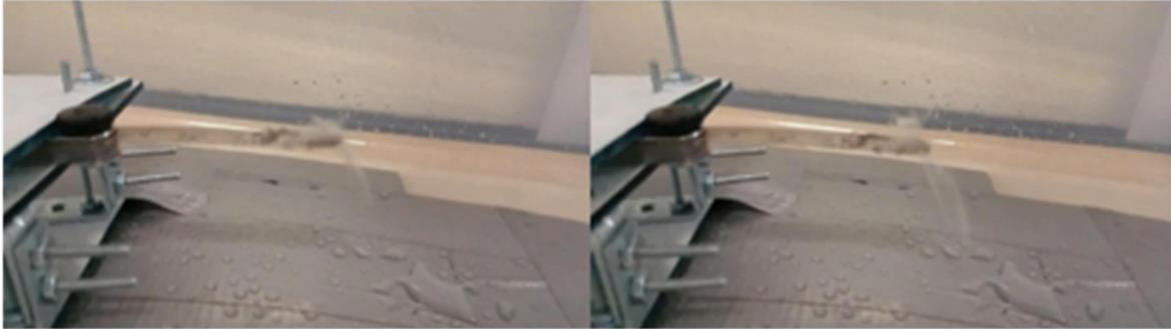


Imagen-A4. 8 Momento del golpe de una gota de agua sobre la lámina del calibrador.

Se empezó con la lámina de menor grosor hasta que la gota de agua ya no pudo mover de forma satisfactoria a la lámina. Se debe recordar que estas láminas solo representan la estructura de soporte del sensor laminar, aun falta sumarles el grosor de la lámina de piezoeléctrico. La primera lámina que fue utilizada tuvo un grosor de **0.05 milímetros**, usando la regla de un flexómetro de fondo se mide como actúa al ser golpeada por la gota de agua. Se capturaron tres momentos claves de este evento, primero la posición inicial de la lámina (antes del impacto), después su posición máxima inferior (justo después del impacto), prosiguiendo con su posición máxima superior.



Imagen-A4. 9 a) Posición inicial (posición cero), b) Posición máxima inferior (posición máxima negativa), c) posición máxima superior

Se debe mencionar que en la prueba no se pudo partir desde el reposo absoluto, por lo que esta posición inicial de la lámina es después de ser golpeada por una gota y estar prácticamente de nuevo en su posición cero, para inmediatamente después ser golpeada por otra gota de agua y tener la captura de como actúa esta lámina.

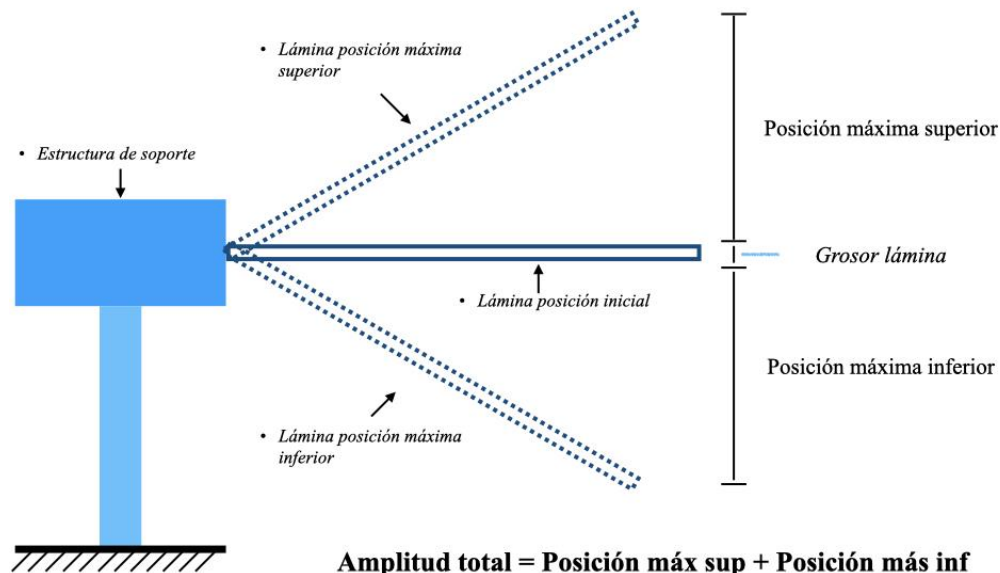
Resultados

Se hicieron las pruebas sobre las láminas que podían ser movidas por una gota de agua, las cuales tuvieron los siguientes grosores:

- ❖ **Lámina 1, grosor de 0.05 mm**
- ❖ **Lámina 2, grosor de 0.10 mm**
- ❖ **Lámina 3, grosor de 0.15 mm**

Después de este grosor de lámina de 0.15 mm la gota de agua ya no movía significativamente ninguna otra lámina con grosores mayores. La amplitud alcanzada por las láminas que se sometieron a experimentación, están dadas por la suma de la posición máxima inferior más la posición máxima superior que se alcanza después de que se genera el impacto. La amplitud alcanzada en estas tres láminas se indica en el siguiente diagrama.

Resultados láminas de grosores de 0.05, 0.10 y 0.15 mm



Amplitud total = Posición máx sup + Posición más inf

Amplitud lámina de 0.05 mm = 28 mm + 40 mm = 68 mm

Amplitud lámina de 0.10 mm = 10 mm + 13 mm = 23 mm

Amplitud lámina de 0.15 mm = 9 mm + 8 mm = 17 mm

Discusión

En teoría mientras más sea la amplitud mayor será la vibración que se genera en la lámina, esto se traduce a que una vez que este montado todo el sensor laminar con las láminas de piezoeléctrico y la lámina de soporte, la generación producida dependerá de la amplitud que se consiga. Esto hace pensar que la lámina con menor grosor será la indicada para ser usada en el diseño final del sistema, pero puede que esto no sea así debido a que también esta lámina es la más débil y puede presentar inconvenientes, como deformarse más rápido con el tiempo o no vibrar de forma uniforme.

Conclusiones

- ❖ El grosor máximo que una gota puede hacer vibrar de forma considerable es de 0.15 mm
- ❖ El sensor laminar que se quiere fabricar debe tener un grosor entre los 0.05 mm y los 0.15 mm, menor a la estructura es demasiado débil y mayor a eso el sensor no se moverá.

A4.3 Características del film piezoeléctrico

Hoja film de piezoeléctrico metalizado de 28 micro metros 1-1004346-0, Measurement Specialties, INC. Sus características son las siguientes:

Piezo Film Sheet 1-1004346-0

Descripción	28 µm piezo film
A film	8.00 in (203mm)
B electrodo	7.50 in (190mm)
C film	11.00 in (280mm)
D electrodo	10.50 in (267mm)
Grosor (micrómetros)	40
Recubrimiento metálico	Silver Ink
Numero de parte	1-1004346-0

A4.4 Serie de experimentos: 3. Energía generada por la vibración de láminas

Resumen

Esta prueba sirve para conocer el comportamiento que tiene el sensor laminar con dos capas, cada una con un grosor diferente, una es la lámina de metal de soporte y la otra es el film piezoeléctrico.

Introducción

Mientras se hacía se colocaba el sensor laminar en la estructura de montaje se observaron algunos detalles para la experimentación, siendo estos los siguientes:

- ❖ *Se debe de tener aislado todo el material que este en contacto con el film piezoeléctrico*
- ❖ *Se debe de tener cuidado en la forma en que se colocan las conexiones eléctricas en las caras del film piezoeléctrico, ya que de esto depende la calidad en la señal que se puede obtener*

El sensor se fabricó de la siguiente manera, se preparó una pieza de film piezoeléctrico (el tamaño correspondió al presentado en investigaciones previas) con medidas de **12mm de ancho X 30 mm de largo**. Como lámina de soporte se utilizó una lámina del calibrador de 13 X 70 mm, en la prueba anterior se observó que la vibración de la lámina de 0.05 mm es demasiado débil en comparación con la de 0.10 mm, pero con una vibración mayor. Esto lleva a querer usar la lámina de 0.10 mm por su rigidez mostrada, pero con la amplitud que tiene la de 0.05 mm, para lograr este fin, se ideó la forma de añadir un peso en el extremo de la lámina para que ayude a que la amplitud en la lámina de 0.10 mm sea igual a la de 0.05 mm. Además, se colocó una lámina de plástico con la forma de una cuchara (geometría circular) en la punta de la lámina de soporte, para tener una mayor área de contacto.



Imagen-A4. 10 Imagen de la lámina de metal y la pieza de film piezoeléctrico, b) Imagen del sensor laminar armado.

Procedimiento experimental

Se realizaron vibraciones manualmente en el sensor, monitoreando la señal generada en el osciloscopio. Se hizo la captura de la señal, su comportamiento se describe de la siguiente forma: ***Existe una señal inicial de ruido que se presenta en el sistema, después al momento en que empieza la vibración en las láminas, ocurre un pico en la señal el cual tiene un periodo muy corto casi instantáneo, al que le sigue una pequeña oscilación de la señal que va decreciendo hasta volver a la misma señal estable de ruido inicial.***

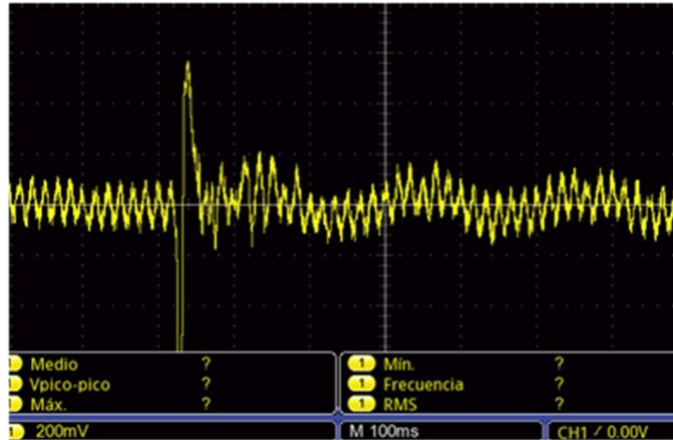


Imagen-A4. 11 Medición detallada de la vibración de las láminas

Se modificó la lámina de film piezoeléctrico, haciéndola esta vez mas grande, para saber si se mejora la señal de generación. Las medidas de esta pieza fueron de **12 mm X 62 mm**, y este será montado sobre la lámina de soporte de 0.10 mm con medidas de 13 mm X 70 mm, para posteriormente probar su comportamiento. Se hicieron dos mediciones, la primera muestra el estado inicial de la señal y la segunda muestra el comportamiento de la señal después de hacer la vibración. La primera medición mostró la existencia de un ruido continuo el cual va aproximadamente desde los -40 mili volts a los 50 mili volts. En la segunda medición se observó que la señal generada en la segunda pieza de film es mayor al de la primera, con un periodo de vibración también mayor, otro detalle que se encontró fue que la señal tiene oscilaciones decrecientes mas consistentes, sin picos que sobresalgan.

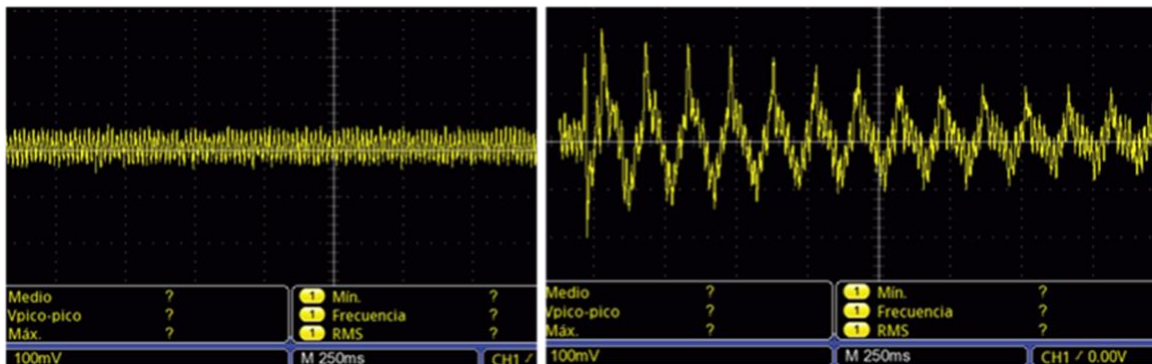


Imagen-A4. 12 Captura de señal producida por el film piezoeléctrico sin ningún movimiento de este

Con esta señal se trató de cargar un elemento de almacenamiento de energía, un capacitor para ser específicos. Se conectó el capacitor al sensor para conocer si la señal del sensor produce una variación instantánea en la salida del mismo capacitor. Se tomó una captura de la posición inicial, la señal amarilla representa la señal del sensor y la señal azul la del capacitor.

Resultados

La captura después de hacer la vibración en el sensor reveló que la señal amarilla de la salida del film piezoeléctrico se mantiene igual, mientras que la señal azul del capacitor muestra una salida estable practicante de valor cero.

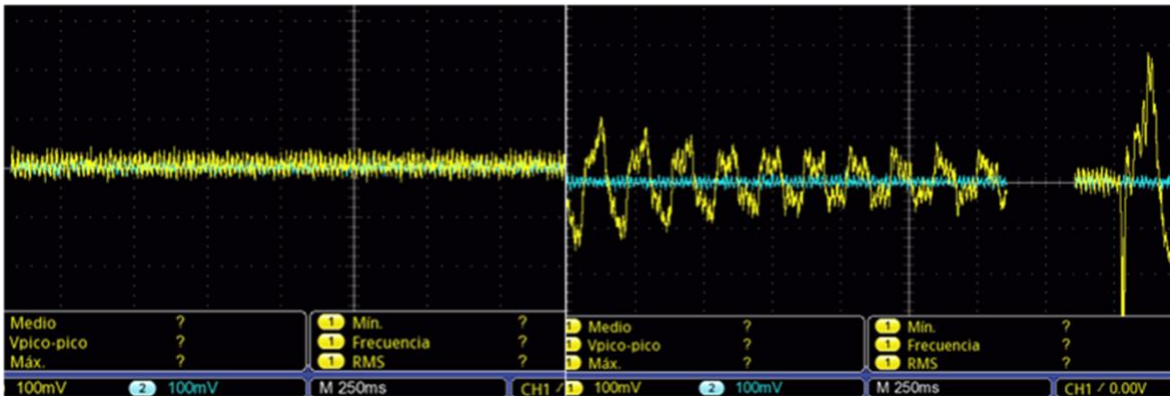


Imagen-A4. 13 a) Captura de la señal estable del sensor y capacitor, b) Captura de la señal del sensor y del capacitor después la vibración.

Este detalle nos hizo preguntarnos cual es la energía generada por la vibración, se sabe que es una energía muy pequeña que esta dentro de los parámetros de voltaje en mili volts y que existe un ruido que no pertenece a la producción de energía el cual hace difícil conocer exactamente la cantidad de energía que se genera, pero haciendo una captura más detalla de la señal se pudo ver que, si existe una variación y que el ruido también se ve afectado por la vibración del sistema; los picos de la señal del piezoeléctrico (señal amarilla) varían entre los **-60 mili volts a los 80 mili volts**.

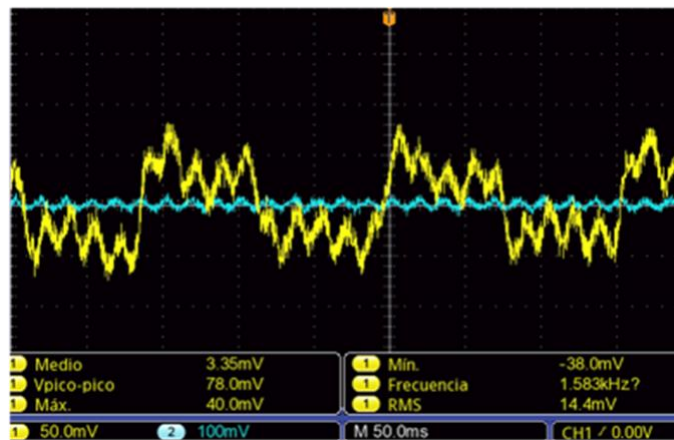


Imagen-A4. 14 Detalle de la señal producida al momento que el sistema entra en vibración

Discusión

La energía producida por esta configuración no fue suficiente ni en términos de valor de voltajes, ya que son muy pequeños (mili volts), ni en el poder ser almacenada en un capacitor. Para aumentar el valor de la generación eléctrica y almacenarla en un capacitor, se necesitará de otras pruebas, donde se utilice otro tipo de capacitor y las vibraciones tenga un periodo de tiempo establecido.

Conclusiones

Esto indicó que una sola vibración en el sistema no es suficiente poderosa para hacer una variación en el capacitor.

A4.5 Continuación al experimento: Prueba para cargar un elemento almacenador de energía eléctrica

Resumen

Prueba con un proceso detallado para intentar cargar un súper capacitor.

Introducción

Este proceso consiste en conectar la salida del sensor laminar al súper capacitor, mientras se le hicieron varias vibraciones, de forma que se conoció si se pudo almacenar un poco de energía.

Procedimiento experimental

Se conectó directamente la salida de señal del sensor al capacitor, la producción en CA del sensor están tan pequeña que no afecta al capacitor. El súper capacitor utilizado fue de 6.3V y 0.047F. Se utilizó un voltímetro para medir la señal que da el capacitor, las condiciones iniciales de capacitor sin ninguna conexión fueron de **13.5 mV en su señal de salida**.



Imagen-A4. 15 Súper capacitor utilizado

Resultados

El sensor laminar se hizo vibrar **10 veces**, posteriormente se volvió a medir la señal de salida del capacitor y se obtuvo **el mismo resultado**, lo que indica que la poca generación de energía producida no se pudo almacenar. Se volvió a medir la señal del capacitor sin tener ninguna conexión, dando **12.2 mV** en su señal salida, para nuevamente hacer vibrar el sensor, esta vez **50 veces**, con lo que ahora se obtuvo una señal de salida en el capacitor **12.3mV**.

<i>Medición del súper capacitor antes de las vibraciones</i>	<i>Numero de vibraciones</i>	<i>Medición después de las vibraciones en el súper capacitor</i>
13.5 mV	10	13.5 mV
12.2 mV	50	12.3 mV

Discusión

Esto no necesariamente quiere decir que se pudo generar y almacenar energía, esta variación se pudo deber a la manera en que se midió el capacitor, teniendo algún error en la primera medición antes de conectar algo, o en la segunda medición, ya habiendo hecho las vibraciones.

Conclusiones

- ❖ Con esta evidencia, no se puede afirmar que la energía generada por las vibraciones n el sensor laminar fue suficiente para cargar un súper capacitor.
- ❖ Se necesitan realizar otras pruebas, pero ahora con un mayor número de sensores.

A4.6 Modelado 3D

Tapas de sujeción

Los elementos a modelar después de presentar el arreglo de los tres elementos principales (lámina de soporte, film piezoeléctrico y contrapeso) son el par de soportes de sujeción superior e inferior, los cuales tienen las siguientes funciones:

- ❖ *Sujetar el sensor laminar (primer arreglo), de forma que este pueda vibrar de arriba abajo, pero sin movimientos en su base, para que no se pierda energía de vibración.*
- ❖ *Poder tener contacto del lado superior e inferior del film piezoeléctrico para poder transmitir la energía que se produzca, por medio de algún elemento conductor que se posicione en ese lugar.*
- ❖ *Poder ser colocados en una estructura de base, la cual actúe como principal soporte de los diez sensores.*

Se ideó la creación de dos elementos que actúan como prensa de sujeción, los se denominaron como “tapas”, en la siguiente imagen se puede ver el modelo en 3D de estos elementos, donde, además se puede observar la ranura en donde se colocará un elemento conductor para poder transmitir la energía producida por el film piezoeléctrico. Estos elementos de conducción funcionan de la siguiente manera: al ser colocados uno en la tapa superior tocando la parte superior del film y el otro en la tapa inferior tocando la parte inferior del film, transmiten la energía a través de cables soldados a estos. No se conectaron directamente los cables al film porque la soldadura lo quemada, tampoco se colocaron cables con pinza, porque también lo deformaban.

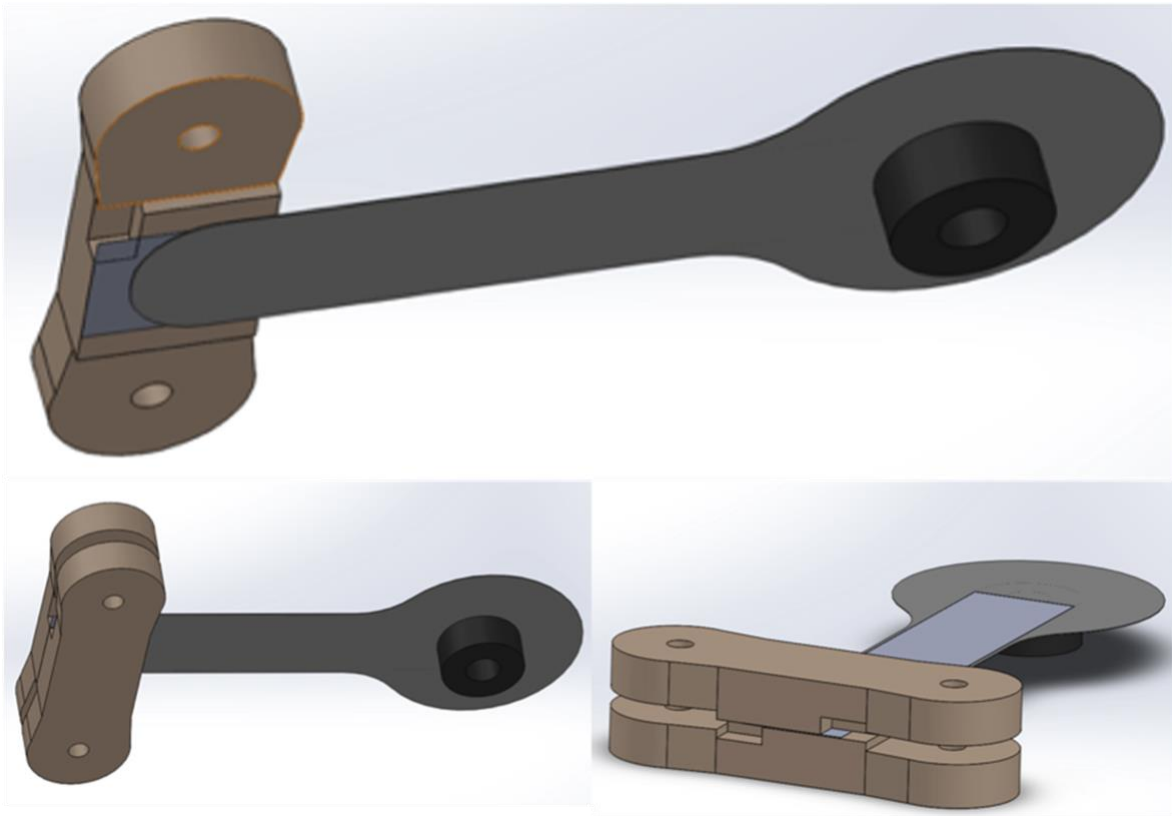


Imagen-A4. 16 Modelado en 3D de los elementos de sujeción 'tapas'.

Base de soporte

La pieza que actúa como base de soporte en la cual se puedan montar **diez sensores laminares** con sus respectivas par de tapas (se le llamara arreglo 2), será un polígono de diez caras en forma de torre, donde en cada cara se pueda montar uno de estos arreglos. Los ‘arreglos 2’ no estarán montados a la misma altura, para que no interfieran uno con otro y para que tengan mayor espacio para poder vibrar. Se decidió que la altura del primer ‘arreglo 2’ a la planta de la torre sea 45 mm, esta altura se obtuvo gracias a la prueba en la que se midió la amplitud máxima inferior de una lámina. En la siguiente imagen se muestra el modelo en 3D de la estructura “torre base de soporte” con sus diez caras. Siguiendo las anotaciones vistas para la apropiación de un sistema a través del diseño abierto, se estableció que entre mayor sea la facilidad para usar o ensamblar el objeto se obtendrá una mejor respuesta por parte de las personas que lo usen, por lo tanto, el montaje de los diez arreglos deberá de ser lo mas sencillo posible, tanto para ponerlos como para quitarlos. A continuación, se pueden apreciar imágenes de cómo se deben ir montando los elementos a la estructura

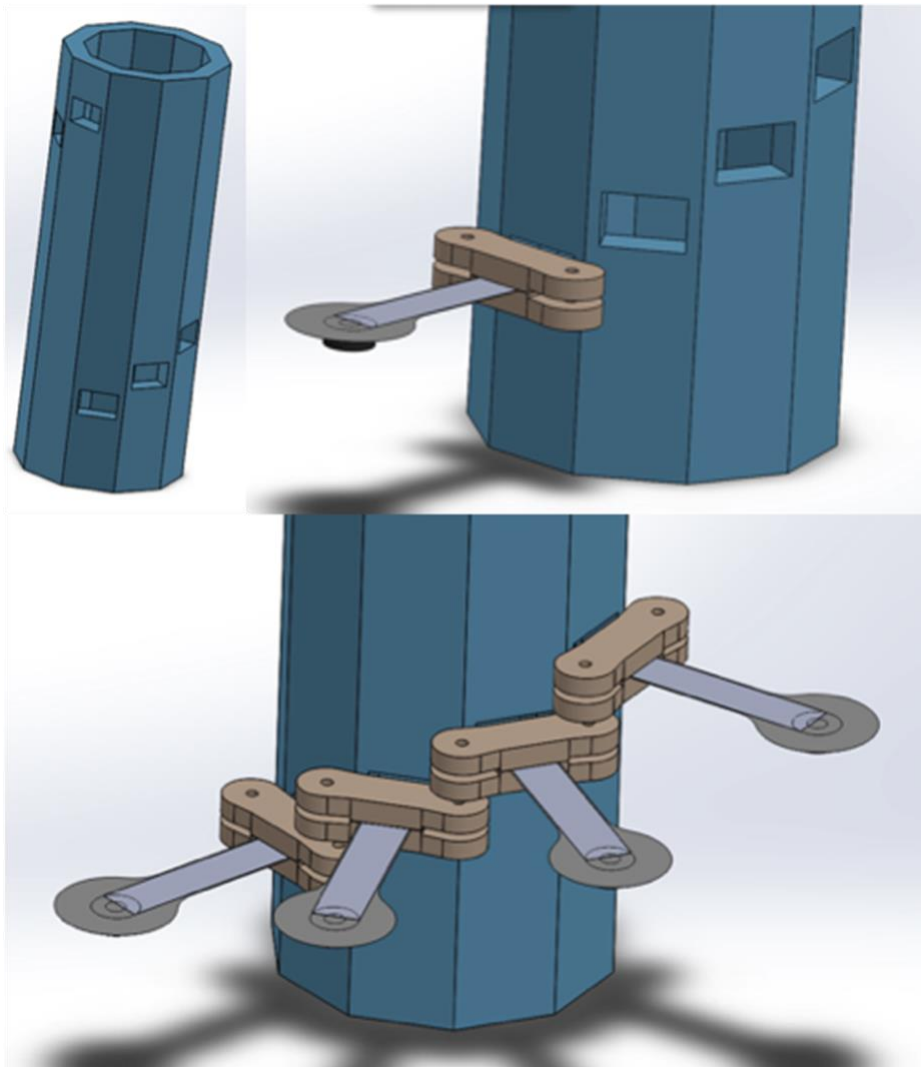


Imagen-A4. 17 Modelo en 3D de la torre base de soporte (arriba a la izquierda), modelado del montaje de un ‘arreglo 2’ a la torre (arriba a la derecha), modelado del montaje de varios ‘arreglos 2’ a la torre

La torre base de soporte en donde van a ir montados los ‘arreglos 2’ tiene por diseño con un hueco en su interior para poder hacer las conexiones entre los diez arreglos, además de que se tiene un espacio en su interior para poder maniobrar.

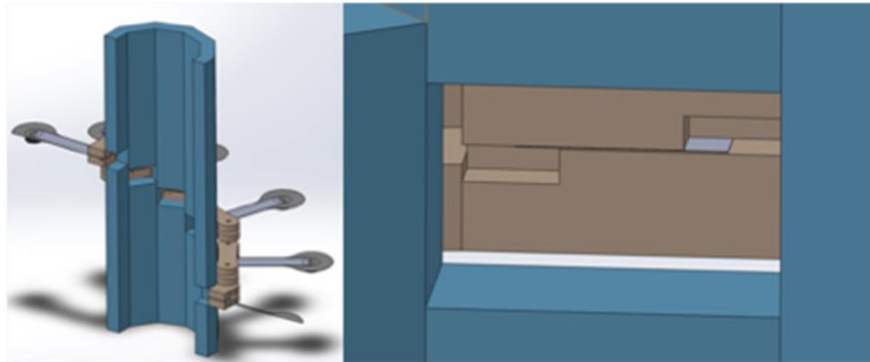


Imagen-A4. 18 Vista interna de la estructura de 'torre base de soporte' donde se realizarán las conexiones de cada film piezoeléctrico

El modelado de los diez 'arreglos 2' montados sobre la 'torre base de soporte' se puede apreciar en la siguiente imagen. La idea esta pensada principalmente para que los diez sensores puedan trabajar en conjunto, teniendo cierta independencia cada uno, pero que a su vez puedan sumar su generación eléctrica como un solo sistema, esto debido a que las gotas impactarán en forma desigual, en diferentes momentos y a diferentes velocidades a cada uno de los sensores.

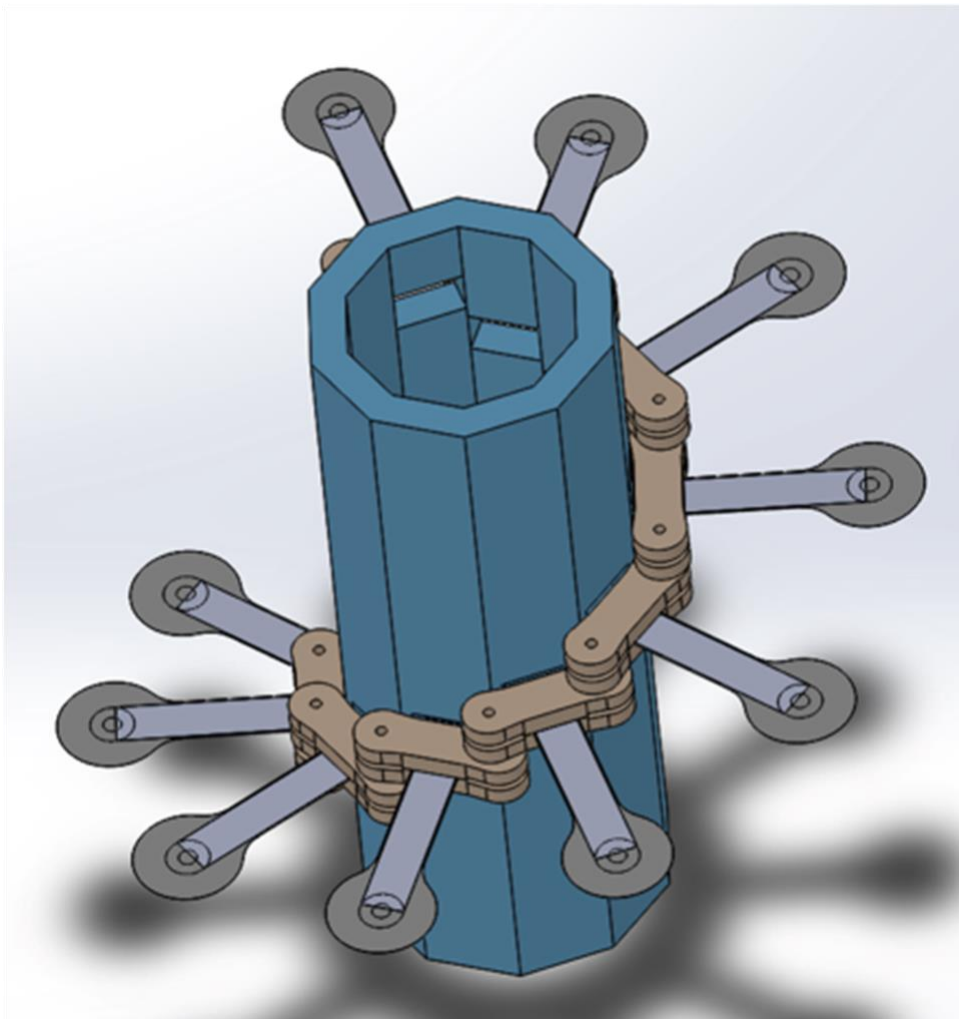


Imagen-A4. 19 Modelo 3D de los diez arreglos de film piezoeléctricos montados sobre la torre de soporte

A4.7 Serie de experimentos: 4. Prueba de la impresión 3D del modelado en software

Resumen

Esta prueba se hizo para conocer la funcionalidad del modelo en 3D propuesto. Se decidió seccionar la torre base de soporte en solo dos montajes de sensores laminares, de esta forma se hizo más fácil la experimentación.

Introducción

Se inició imprimiendo en 3D la mitad del decágono para tener un mejor acceso a las conexiones que se deben hacer sobre los sensores. Dentro del sensor, se utilizó como material de lámina de soporte, metal de latón de grosor de 0.10 mm, el cual se recubrió con pintura en aerosol para crear una capa que no condujera la electricidad, la geometría usada fue de cuchara y de viga rectangular.

Procedimiento experimental

Se utilizó el osciloscopio para poder analizar las señales de voltaje generadas por el film piezoeléctrico, este material fue montado sobre la lámina de latón y recubierta por una capa de plástico comercial de muy poco grosor, para evitar que las salpicaduras de agua entren en contacto con este material, causando una falla en la generación de energía o en la lectura de la señal.



Imagen-A4. 20 a) Modelo experimental con dos salientes impreso en 3D, b) Fotografía las láminas de latón, la lámina de cuchara de la izquierda muestra al latón sin ser cubierto por pintura, las láminas de la derecha están cubiertas por pintura en aerosol.

Resultados

Esta configuración mostrada solo funcionaba y creaba una señal de voltaje si se vibraba el sensor por elementos externos como la fuerza de un dedo, pero cuando se probaba en el sistema generador de gotas (5mm diámetro cayendo a una distancia de 1.48 m), estas no tenían la fuerza necesaria para poder moverlo. Esto sucedió con la geometría de cuchara, la cual se creía mas fácil de mover, por lo que se cambio a una geometría rectangular. El comportamiento con la geometría rectangular fue muy similar que con la de cuchara, aunque, la primera pudo ser movida un poco por el impacto de la gota.

Discusión

Por el poco movimiento obtenido en las láminas sin importar su geometría, la generación de una señal de energía fue prácticamente nula, no se pudo visualizar ninguna señal concreta de voltaje.

Conclusiones

- ❖ *No hubo movimiento en las láminas de latón cuando les impactaba una gota.*
- ❖ *Se necesita reformular alguna de las variables usadas para poder producir una señal eléctrica.*

A4.8 Características cambio de geometría

Chattaraj & Ganguli (2018) han podido documentar los resultados obtenidos sobre las diferencias en el rendimiento de dos sensores con las dos geométricas diferentes de interés, la rectangular y trapezoidal. Para obtener los resultados utilizaron la siguiente relación:

$$\gamma = \frac{B_0}{B_L}$$

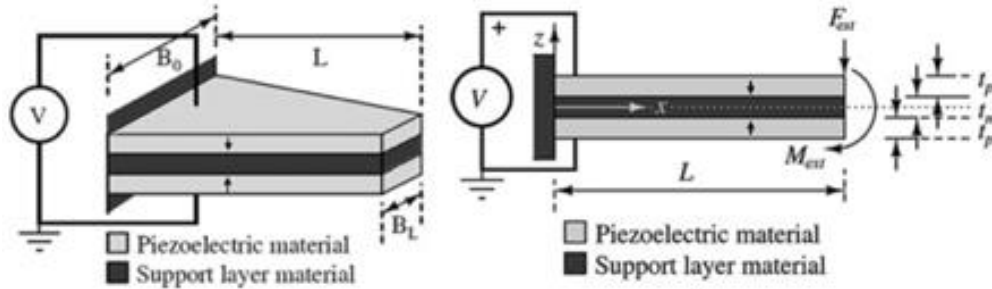


Imagen-A4. 21 Esquema de la geometría trapezoidal de un sensor laminar piezoeléctrico (Chattaraj & Ganguli, 2018).

Las variables que se muestran en el esquema anterior tuvieron los siguientes valores para hacer la comparación entre las dos geometrías:

- Voltaje = 100 V
- L = 40 mm
- B_L = 5 mm
- γ = 1 (rectángulo)
- γ = 4 (trapecio)
- t_p = 300 μ m
- t_m = 400 μ m

Resultados de los análisis hechos sobre las diferencias de una geometría rectangular a una trapezoidal de un piezo eléctrico bimorfo (Chattaraj & Ganguli, 2018).

Parámetro	Símbolo	Rectangular ($\gamma = 1$)	Trapezio ($\gamma = 4$)	Mejora
Capacitancia	C_V	84 nF		Igual
Energía de entrada	U_V	0.41 mJ		Igual
Masa	m_a	2.12 g		Igual
Ángulo de la punta	α_v	0.012 rad		Igual
Desviación de la punta	d_v	245 μ m		Igual
Rigidez	k_F	3.6 kN/m	4.5 kN/m	25%
Fuerza de bloqueo	F_{bl}	0.88 N	1.09 N	24%
Energía de tensión de salida	U_{Fbl}	0.107 mJ	0.134 mJ	25%
Densidad de energía de salida	ED_{Fbl}	0.05 J/kg	0.06 J/kg	20%
Eficiencia energética	N_{Fbl}	25.5%	31.9%	25%

A4.9 Serie de experimentos: 5. Experimentación de sensores con diferentes geometrías

Resumen

Esta prueba se hizo para analizar la suposición de que “el cambiar la geometría del film piezoeléctrico puede ayudar a mejorar la generación de energía eléctrica”.

Introducción

Para validar esta suposición se hizo la prueba de generación eléctrica con por seis diferentes formas geométricas de sensor laminar, en esta se mostró el valor numérico de la generación, así como el comportamiento de cada una de estos.

Planteamiento del problema y abordaje

Las condiciones iniciales de la prueba fueron:

- ❖ *La distancia de la salida de la gota al sándwich laminar es de 148 cm*
- ❖ *El tamaño de la gota es de alrededor de 5 mm de diámetro*
- ❖ *No existe viento que añada o reste fuerza de impacto a la gota, por lo que la gota tiene una caída libre sin interrupciones*

Las figuras geométricas usadas para experimentar en los sensores laminares fueron cuatro rectangulares y 2 trapezoides. Se hicieron las mediciones de laboratorio con el osciloscopio, obteniendo los siguientes resultados:

	<i>Figura</i>	<i>Geometría total</i>	<i>Área total</i>	<i>Geometría cantiléver</i>	<i>en Área en cantiléver</i>
Piezo 1	Rectángulo	22 mm X 12 mm	264 mm ²	7 mm X 12 mm	84 mm ²
Piezo 2	Rectángulo	42 mm X 12 mm	504 mm ²	27 mm X 12 mm	324 mm ²
Piezo 3	Rectángulo	63 mm X 12 mm	756 mm ²	48 mm X 12 mm	576 mm ²
Piezo 4	Rectángulo	75 mm X 10 mm	750 mm ²	60 mm X 12 mm	720 mm ²
Piezo 5	Trapezio + Rectángulo	20 mm(B) X 5 mm(b) X 40 mm (H) + 11mm X 8 mm	588 mm ²	20 mm(B) X 5 mm(b) X 40 mm (H)	500 mm ²
Piezo 6	Trapezio + Rectángulo	13 mm(B) X 5 mm(b) X 26 mm (H) + 13mm X 6 mm	312 mm ²	13 mm(B) X 5 mm(b) X 26 mm (H)	234 mm ²

Se debe de tener en cuenta que una parte del film piezoeléctrico de cada lámina usada estaba dentro de las tapas de sujeción, estando en contacto con los materiales conductores que iban a las conexiones del osciloscopio. Las geometrías usadas en los sensores fueron, cuatro rectangulares con variaciones en las dimensiones de sus piezoeléctricos y dos trapezoidales, los cuales tenían la forma de trapezio más una pequeña parte rectangular que esta en contacto con los materiales conductores de las tapas de presión.

Resultados

Los valores de voltaje obtenidos por los seis arreglos de piezoeléctricos son los siguientes:

	<i>Señal Pico a Pico V</i>	<i>Duración milisegundos</i>	<i>Señal de vibración descendiente</i>
Piezo 1	160 mV a - 160 mV	250 ms	Si, con ruido de 80 V a - 80V
Piezo 2	800 mV a -500mV	750 ms	Si, sin ruido
Piezo 3	500 mV a - 400 mV	450 ms	Si, sin ruido
Piezo 4	500 mV a - 400mV	500 ms	Si, sin ruido
Piezo 5	100 mV a 0 mV	Instantáneo	No, solo un pulso
Piezo 6	200 mV a 0 mV	50 ms	No, solo un pulso

Como puede apreciarse las formas geométricas que tiene dimensiones parecidas como el piezo 3 y el 4 tienen prácticamente los mismos valores. Esto prueba que no porque se emplee piezas de film piezoeléctrico con dimensiones mas grandes el resultado será proporcional. El sensor con mejor desempeño fue el piezo 2 con dimensiones de **42 mm X 12 mm**, y la cual también tuvo un mayor tiempo de vibración con **750 ms** de duración. A continuación, se presenta la gráfica capturada del osciloscopio de la señal generada por esta geometría:

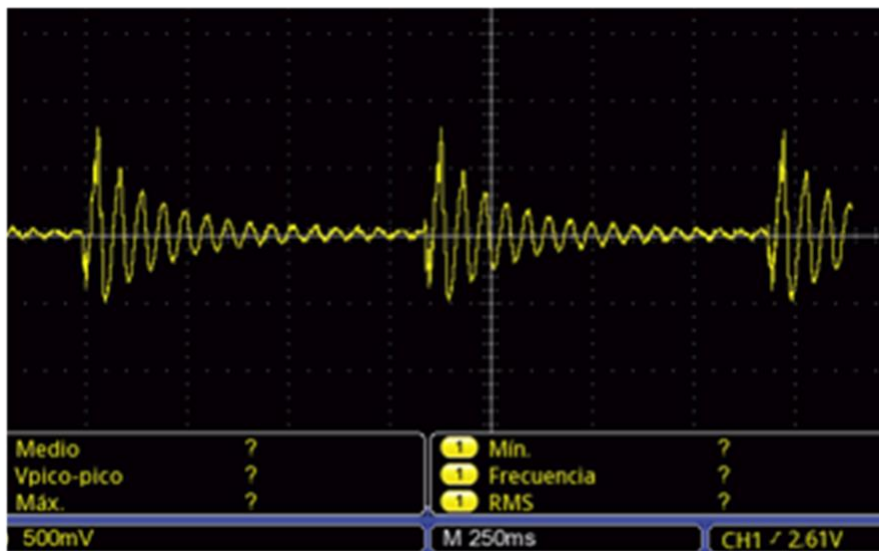


Imagen-A4. 22 Gráfica de la forma geométrica rectangular de 42 mm X 12 mm con mejor desempeño

Discusión

Con estos datos se puede decir que la manipulación de la geometría si resulto en un mejor comportamiento y generación de energía.

Conclusiones

- ❖ *SI se mejoró la generación de energía con el análisis de diferentes geometrías*
- ❖ *Se mejoró le generación a comparación de todas las investigaciones antes analizadas, que utilizaban piezoeléctricos comerciales, lo cual ya es un hallazgo en la tesis.*

Anexo 5

A5.1 Primera iteración, modificaciones

Primera Modificación

Debido a esto, se decidió cambiar la disposición y función de los tornillos sujetadores, por lo que ya no tendrán que sujetar y fijar las tapas al mismo tiempo, ahora solo tendrán la función de sujetar las tapas, dejando la función de fijar las tapas en su lugar en la torre base a la introducción de un hueco con la forma geométrica de las tapas. Este hueco por su forma, ayuda visualmente a entender que el conjunto de tapas de presión y sensor laminar deben de ser introducidas ahí, el modelado en 3D se ve en la siguiente imagen.

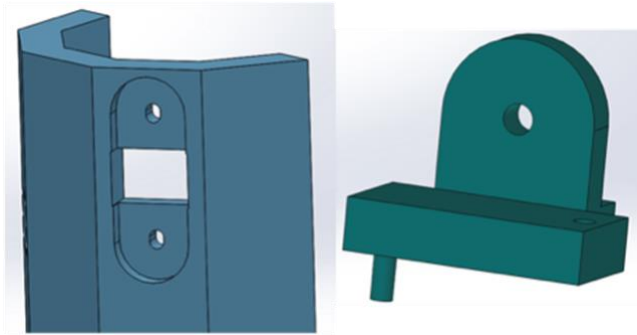


Ilustración 2 Modelo en 3D de la modificación de las tapas de presión y el hueco generado con la misma forma en la torre base

Segunda modificación

La segunda modificación fue colocar una guía que ayude en el prensado de las tapas inferior y posterior, lo cual supone una mejora en la estabilidad de este conjunto en el 'arreglo 2', logrando una mayor facilidad a la hora de sujetar las láminas de piezoeléctrico. Esta modificación se puede apreciar en la siguiente imagen, en donde la guía que ayuda al prensado de las tapas, es un cilindro que sale tanto de la tapa inferior como de la superior, al mismo tiempo que un barreno con el mismo diámetro es hecho en la dirección opuesta para que se unan las dos piezas con mayor precisión.

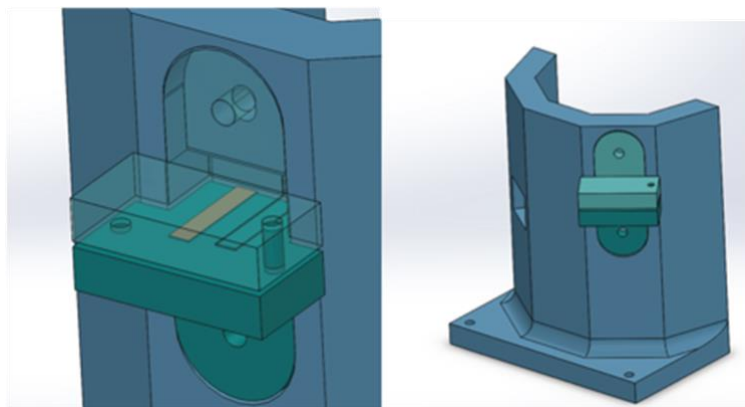


Ilustración 3 Modelo en 3D de la nueva iteración de diseño, vistas del ensamble de las tapas dentro de la base.

Tercera modificación

La tercera modificación fue mejorar la conexión de las piezas de film piezoeléctrico con un material conductor. Para solucionarlo se utilizó cobre en forma de cinta adhesiva, este material conductor está compuesto en una de sus caras por cobre y en la otra por un recubrimiento adhesivo, además esta cinta cuenta con un grosor muy delgado que ayuda a no modificar las tolerancias planteadas. Cada tapa inferior como superior tendrá una línea de esta cinta de cobre, lo que permitirá hacer contacto con la parte superior e inferior del film piezoeléctrico, de forma que se tenga una mayor facilidad en el ensamble y en la lectura de la señal eléctrica generada.

A5.2.1 Practica modificaciones primeras iteración

Resumen

Se hizo la impresión 3D de una sección de la torre base en la que se puedan montar tres sensores de tipo laminar, para realizar pruebas que determinen la generación producía, tanto por cada sensor por separado como los tres sensores en serie.

Introducción

Se imprimió en 3D una sección de la torre que presenta cinco de las diez caras que la conforman, en donde solo tres tienen el hueco en donde deberán de ir montados los 'arreglos 2'. En la siguiente imagen se pueden apreciar estos tres conjuntos de piezas montados sobre la torre base, así como los pines soldados a sus cintas de cobre.

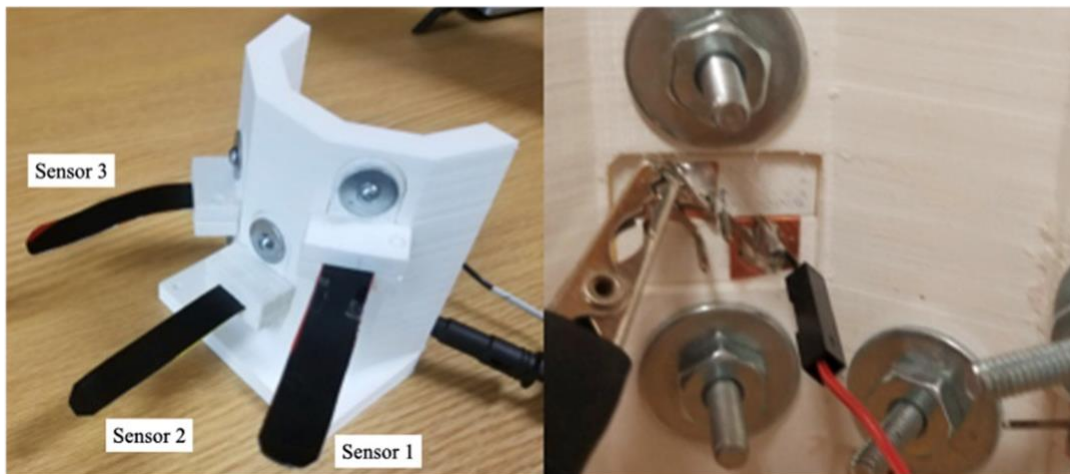


Imagen-A5. 1 a) Impresión 3D del modelo con tres sensores, b) Pines soldados a las láminas de cobre conectados a cables para medición.

Procedimiento experimental

Primero se midió por separado la generación producida por cada uno de sensores, para esto se montó cada sensor sobre la sección de la torre. Para generar la señal de generación se hizo vibrar cada sensor independientemente, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

- **Sensor 1:** Se obtuvo un voltaje pico a pico de alrededor de **-400 mV a 400 mV**, con una **generación total de 800 mV**, y una **señal que decrece hasta volver a cero**.
- **Sensor 2:** Se obtuvo en promedio por pulso, un voltaje **pico a pico de -1V a 800 mV**, una **generación total de alrededor de 1.8V** y su **descenso a 0 V en casi 500 ms**.

- *Sensor 3*: Se obtuvo en promedio por pulso, un voltaje **pico a pico de -1V a 1V**, una **generación total de 2V**, y un **descenso a cero en alrededor de 400 ms**.

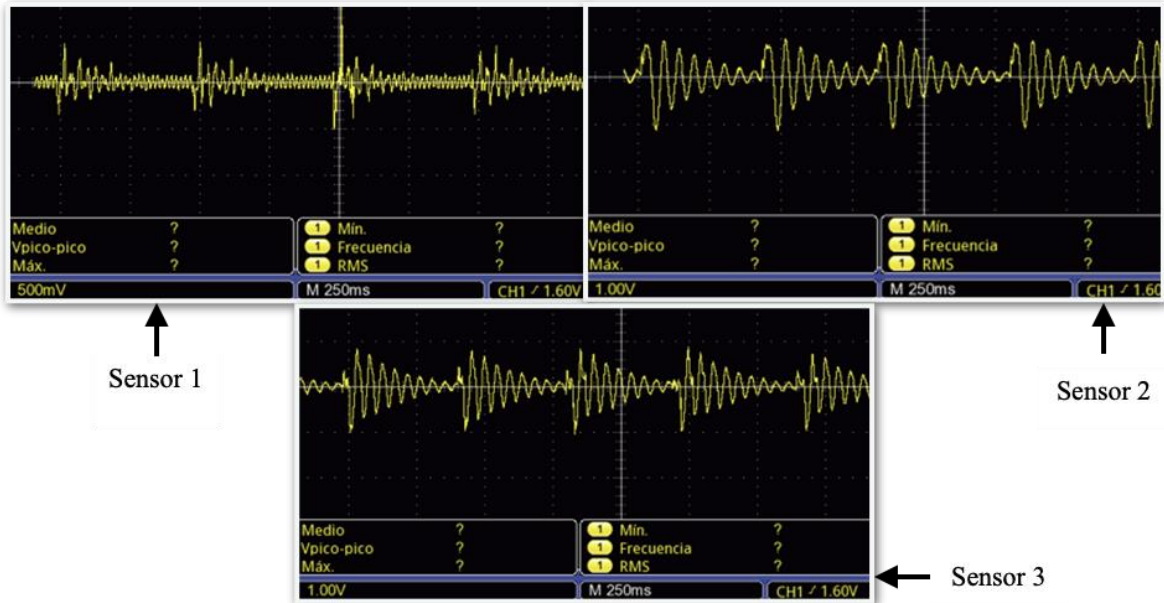


Imagen-A5. 2 Captura de la medición de la señal obtenida del sensor 1, sensor 2 y sensor 3.

Resultados

Como siguiente paso se hizo la conexión de los tres sensores en serie, buscando que se sumen sus corrientes eléctricas, de forma que se pueda mejorar el almacenamiento de esta energía. Se hicieron vibrar los sensores para validar si la generación de la señal de energía era igual a cuando se midieron por separado, sin estar conectados entre si o no. La experimentación tuvo la siguiente respuesta, **los sensores generan la misma señal de energía al ser vibrados por separado, estando conectados en serie entre si o sin estar conectados entre si**. Después se procedió a hacer vibrar los tres sensores tanto al mismo tiempo como a destiempo, mientras seguían conectados en serie, la señal que se generó se puede apreciar en la siguiente imagen. Como puede verse, **el pico de la señal de los tres sensores tiene en promedio una reducción en comparación con lo mostrado anteriormente, pero, por otro lado, la señal de generación no decrece y no tiene puntos donde llegue a cero**, esto es de utilidad debido a que la señal es relativamente constante, por lo que en teoría tendría que ser mas fácil de almacenar.

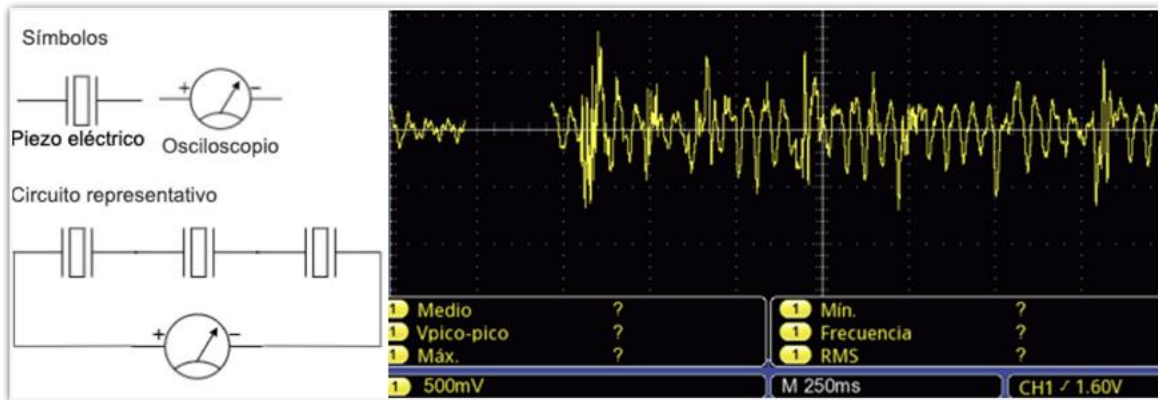


Imagen-A5. 3 a) Circuito representativo de la conexión en serie de los sensores, b) Captura de la señal de generación obtenida por los tres sensores conectados en serie y siendo accionados al mismo tiempo.

Discusión

Esta prueba realizada nos indica que, por ahora la señal generada entre tres sensores laminares conectados en serie, no decae a cero debido a que estos se “ayudan entre si”, esto es, si uno esta regresando a una posición de reposo después de haber vibrado, otro sensor es accionado provocando que empiece a vibrar, esto hace que siempre existe un sensor en vibración, por lo que en teoría siempre se generará energía de forma constante.

Conclusiones

Los tres sensores conectados en serie mostraron que la generación de energía no decae a cero, generándose constantemente, pero aun con variaciones en su señal.

A5.2.2 Continuación: Practica modificaciones primeras iteración

Resumen

Se probó la impermeabilización hecha sobre la sección de prueba con el fin de conocer su funcionamiento, visualizar las fallas que se tengan y proponer soluciones.

Introducción

Para esta prueba sobre la impermeabilización, se tomó en cuenta la información obtenida anteriormente, sobretodo los detalles que ayudan a tener una mejor lectura sin ruido de la medición de la señal en el osciloscopio.

Procedimiento experimental

Se conectaron los cables de medición del osciloscopio con el modelo físico de prueba, mientras se ubicaba en el lugar donde le caerán las gotas de agua. Se midió la señal de ruido inicial que se tiene, la cual resultado ser una señal con valores cercanos a los **50 mV pico a pico**, con estos valores se puede dejar de lado su transcendencia en las señales posteriores de generación. Las condiciones iniciales de la prueba de impermeabilización son las siguientes:

- ❖ Se dejará caer 1 litro de agua sobre el dispositivo. El agua caerá en forma de gotas de alrededor de 5 mm de diámetro.
- ❖ La duración aproximada de la caída de 1 litro de agua en gotas es de 3 minutos.
- ❖ La altura de impacto desde la regadera hacia el dispositivo es de 148cm.

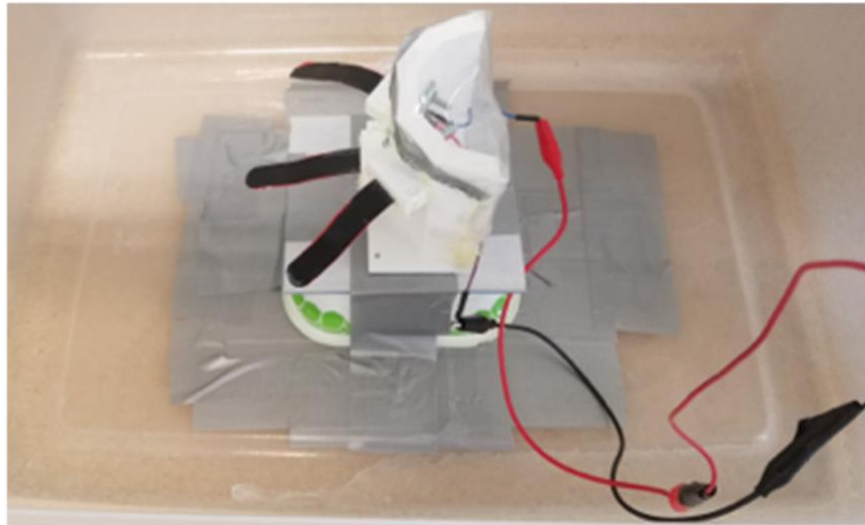


Imagen-A5. 4 Fotografía de la sección de prueba impermeabilizada dentro de una tina de contención

Resultados

Después de hacer caer las gotas de agua sobre la sección de prueba y de monitorear las mediciones que el osciloscopio hacia se obtuvo lo siguiente. Los resultados no pudieron ser concluidos en su totalidad debido a **un fallo en la impermeabilización**, lo que origino que las mediciones variaran demasiado, hasta el punto donde ya no eran servibles, dando por terminada la experimentación, aun cuando no había caído la totalidad de las gotas de lluvia.

Discusión

Analizando detalladamente lo sucedido se puede apreciar que en un primer instante antes de que el agua entrara por el fallo de impermeabilización, si se estaba generando energía debido a que registró cuando una gota golpeaba a los sensores. Esto nos resalta la importancia que tiene la impermeabilización, siendo una característica importante que debe ser tomada en cuenta en el diseño del dispositivo final.

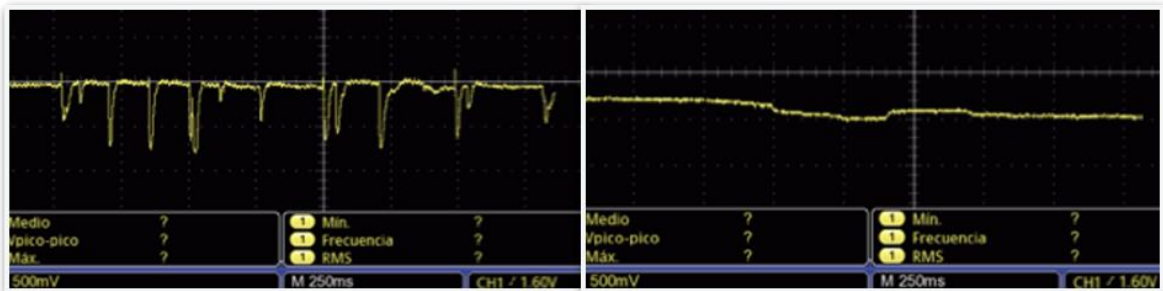


Imagen-A5. 5 Captura de la señal de generación eléctrica, la imagen de la izquierda muestra la señal antes de la filtración y la imagen de la derecha muestra la señal una vez que se filtro el agua.

Conclusiones

Viendo la forma en como se impermeabilizo y de como sucedieron las fallas por las que se filtro el agua, se tienen las siguientes conclusiones.

- ❖ Se debe eliminar la tornillería para mejorar la facilidad con la que se montan los sensores sobre la torre base, de forma que se usen los menores elementos posibles
- ❖ El diseño debe dejar las menores ranuras entre los elementos para hacer mas fácil la impermeabilización

A5.3 Segunda iteración, modificaciones e impresión

Mecanismo de sujeción giro-cierre

El mecanismo que se uso para de cambiar la forma en que se montan las tapas sobre la torre base, es el que se encuentra en algunos relojes. Este mecanismo tiene la función de quitar o fijar la tapa donde se encuentra la batería del reloj, para lo cual se necesita presionar hacia adentro y al mismo tiempo girar a la izquierda o a la derecha. Estos mecanismos son simples en su geometría, pero complejos en su manufactura, ya que las tolerancias que presentan son de milésimas de milímetro, esto trae dificultades si se quiere replicar usando la impresión en 3D que se tiene a disposición, por lo que la geometría en las piezas a utilizar deberá ser mas grande que en el ejemplo de un reloj, para que las tolerancias que se necesitan sean de décimas de milímetro. En este nuevo mecanismo la función de las tapas de presión seria la misma, se tendrían dos tapas, una inferior y otra superior que sujetaran al sensor laminar, haciendo que, al momento de unión, las tapas funcionen como un solo elemento, para después usar el principio del mecanismo anterior, el cual es entrar sobre la torre de montaje para después girar en ángulo hasta llegar a un tope que lo deje en su lugar.

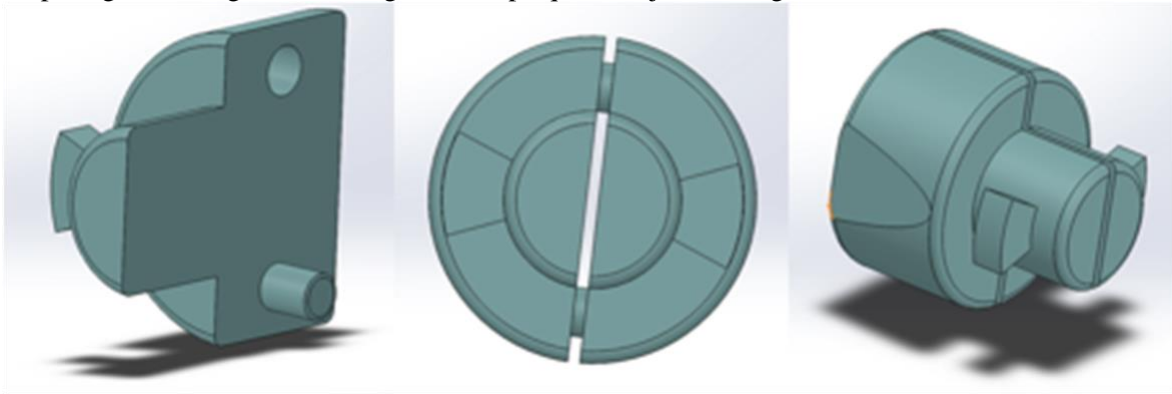


Imagen-A5. 6 Modelo en CAD 3D de la nueva iteración de diseño de las tapas de

Para que el mecanismo planteado de giro-cierre funcionara se decidió cambiar la geometría de las tapas de presión a una circular, este cambio también ayuda a que halla menos ranuras al momento del montaje sobre la torre base. En este diseño se tienen la característica de tener dos pestañas que sirven como elementos principales de la de sujeción en la torre base, siendo estas las que se coloquen dentro, sigan un canal al momento que se les gire y de esta manera cierran el mecanismo. El otro elemento del mecanismo es la torre base, ahora deberá tener un orificio circular que vaya de pared a pared y el canal de deben de seguir las pestañas de las tapas. A continuación, se muestra la torre con el orificio del mecanismo, así como la forma en que se deben de ubicar las tapas de presión para que actúen como un solo elemento, para que después este se introduzca dentro de la torre para girar y quedar fijo.

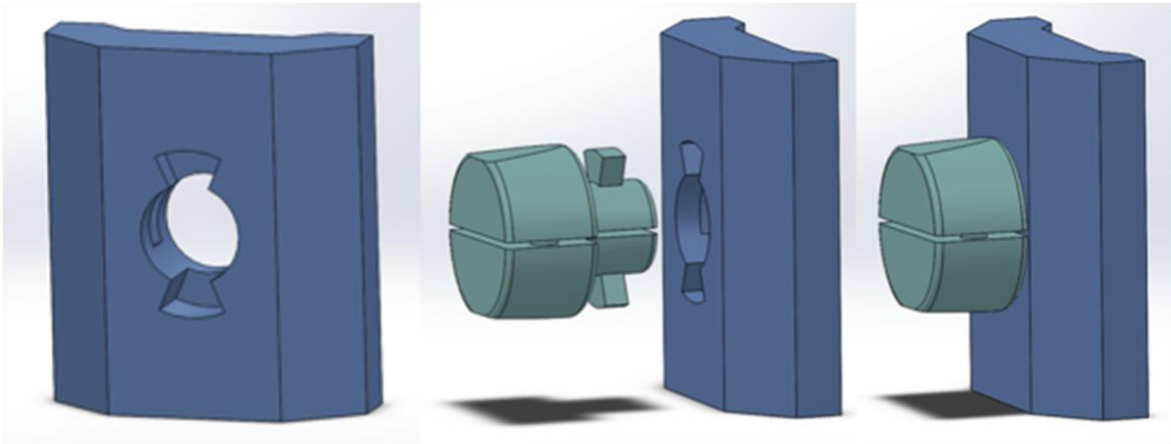


Imagen-A5. 7 a) Modelo en CAD 3D de una sección de la torre de sujeción con el orificio, b) Secuencia en que las tapas deben de introducirse en la torre base para quedarse montadas a este.

Impresión 3D del mecanismo de giro-cierre

Se hizo la impresión en 3D del mecanismo de giro-cierre propuesto, para verificar que las piezas tengan las tolerancias necesarias para poder hacer los ensambles y la funcionalidad del mecanismo sea correcta. Primero se imprimieron las tapas superior e inferior, poniendo especial atención en el “canal” que se dejó para indicar dónde se debe colocar el sensor laminar. Después se imprimió en 3D de una sección representativa de la torre base de montaje, con el orificio y canales internos en una de sus caras. Como se puede apreciar en las siguientes fotografías, el ensamble entre las dos tapas fue correcto y la geometría en todas sus secciones en especial las pestañas de sujeción tienen tolerancias adecuadas, de la misma manera, la impresión de la sección de la torre fue correcta y el mecanismo de sujeción de giro-cierre entre estos componentes funcionó adecuadamente.

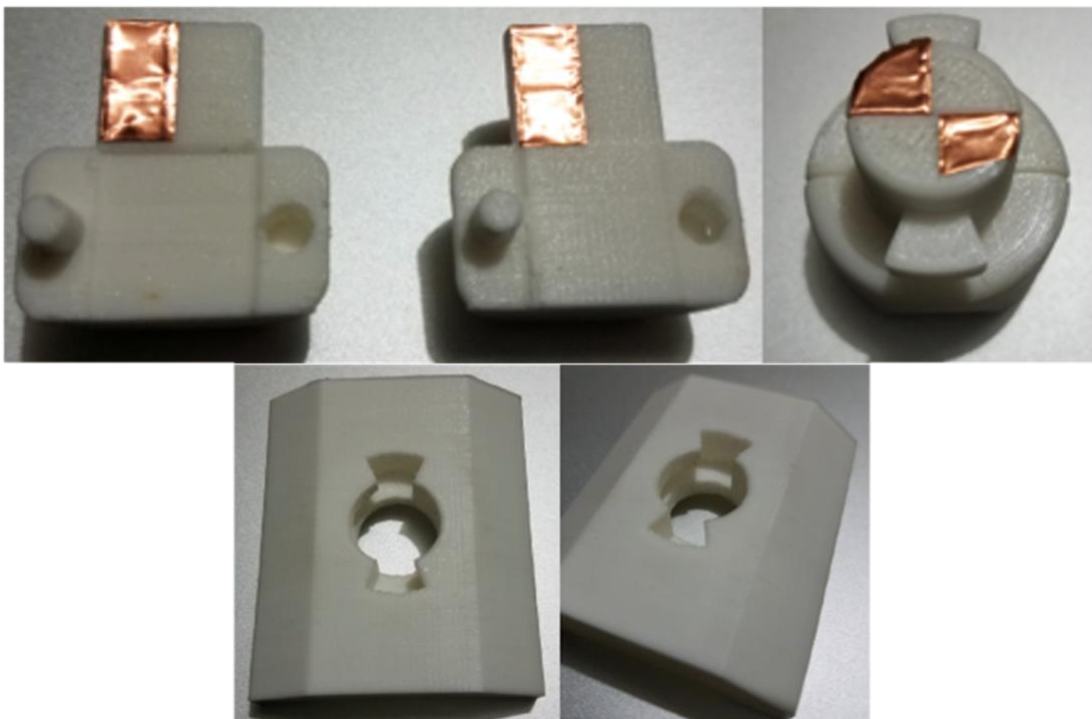


Imagen-A5. 8 Fotografía de arriba: tapas inferior y superior impresas en 3D, mostrándose en la imagen de la derecha el correcto ensamble entre las dos piezas, fotografía de abajo: Sección de la torre base con el orificio y canal interno.

Mecanismo de sujeción por rosca entre los elementos torre base y tapas de sellado

En este mecanismo de cierre, una pieza debe tener una cuerda interna y la otra una cuerda externa para poder unirse, además, se debe tener como punto principal que al momento de hacer la conexión esta queda hermética para que ningún líquido pase por ahí. Para lograr esto existen varios métodos, el método elegido consiste en agregar a uno de los elementos del mecanismo, una inclinación en la proyección de su cuerda la pieza, si es en la pieza con rosca externa la cuerda proyectada debe estar inclinada hacia afuera y si es en la pieza con rosca interna la cuerda debe estar proyectada con inclinación hacia adentro. Para fabricar este mecanismo, se optó por hacer la inclinación en la cuerda externa, debido a que de esta manera se tiene una menor complicación en su manufactura de impresión 3D; esta proyección se puede ver en la imagen siguiente. Esta inclinación en la cuerda externa, provoca que al momento de girar una de las partes para hacer la conexión, esta apriete y cierre herméticamente sin la necesidad de llegar a un tope, esto sucede por la fricción y la geometría.

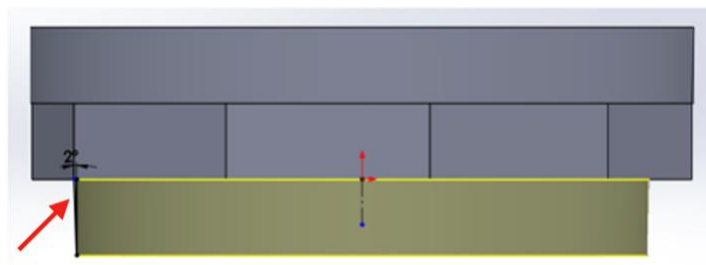


Imagen-A5. 9 Modelado de la rosca externa con un ángulo de 2 grados para hacer un cierre hermético.

Se necesitaron hacer varios test en la fabricación de esta rosca, imprimiendo varias piezas de prueba, debido a que las tolerancias que se dan en la impresión 3D varían mucho y dependen de las condiciones que se tienen, como la calibración de la máquina, la temperatura del cuarto de impresión etc. A continuación, se puede ver con más detalle el modelado de las cuerdas internas como externas sobre una pieza de prueba, así como la impresión 3D de esta pieza.

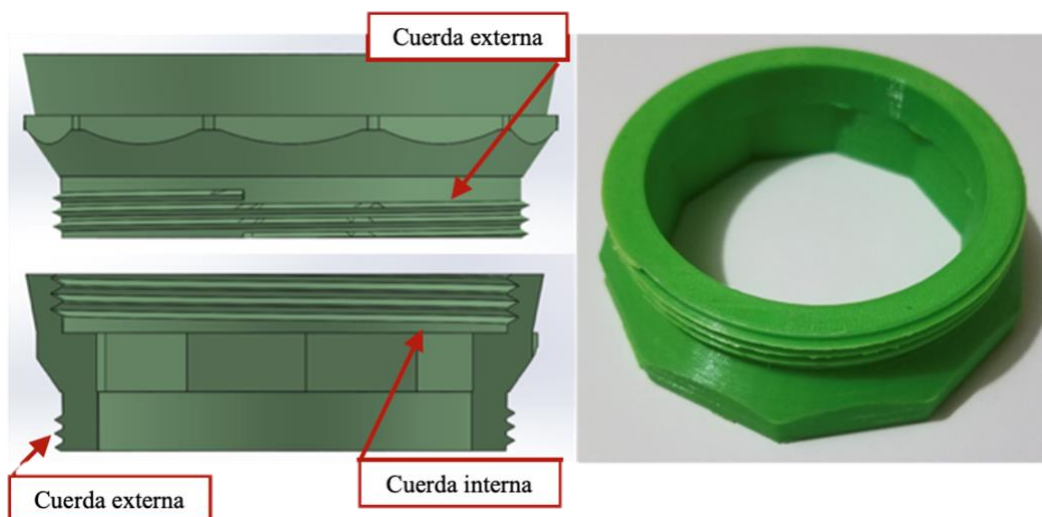


Imagen-A5. 10 a) Vista de la cuerda exterior (imagen superior) y la cuerda interior (imagen inferior), b) Pieza impresa

Después de realizar varias impresiones de las cuerdas para tener unas tolerancias que sean funcionales, se pudieron crear dos piezas que pueden ser unidas por medio de sus cuerdas internas y externas, haciendo a este mecanismo propuesto un éxito para unir piezas. Ahora, se deberá de

trasladar estas características a las piezas que se necesitan fabricar para la creación del dispositivo. Una de estas piezas necesarias son la tapa inferior como la tapa superior que deberá de tener la torre base, las que llamaremos ‘tapas de cierre’. Teniendo en cuenta que estas tapas deberán de tener otra función aparte de la de tener que crear un cierre hermético en la torre base, siendo esta otra función la de ser un elemento que ayude a conectar el dispositivo a una estructura que lo mantenga en posición para que las gotas de lluvia le impacten, esta estructura además es la encargada de asegurar el dispositivo al suelo o a una pared. Se tiene como idea que estas tapas sean conectadas con diferentes módulos que a su vez se sujeten a diversas superficies, esto es, que se pueda instalar el dispositivo a través de la conexión que se hará en la tapa de cierre en cualquier marco, tubo o sobre una superficie plana, dando una libertad para poder tener un mejor aprovechamiento y facilidad en su uso. Para realizar esta conexión, se propuso modelar dos salientes sobre cada tapa de cierre, con orificios de media pulgada por los cuales otro modulo similar y simétrico será conectado por medio de un perno; este modulo será el que monte al dispositivo a un tubo, un piso, o una saliente de una pared. El modelado, así como la impresión 3D de la tapa de cierre superior con estas salientes, se puede ver en la siguiente captura:

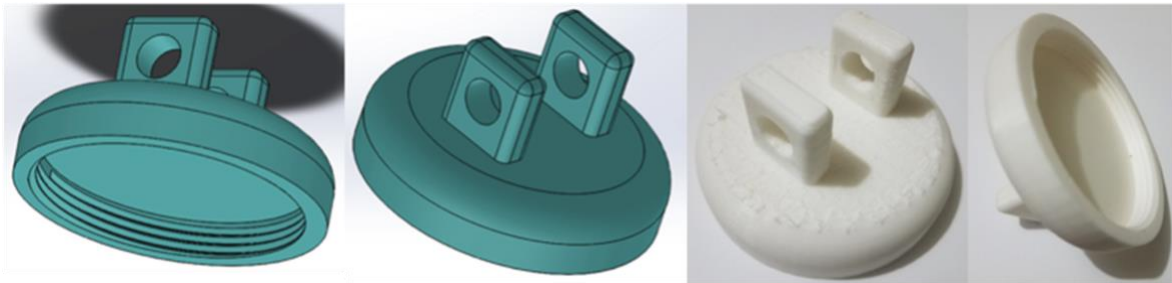


Imagen-A5. 11 Modelo en 3D de la tapa o base del dispositivo.

Después imprimir en 3D la tapa de cierre superior, se hizo la prueba de conexión con una de las piezas previas de prueba con cuerda externa (pieza verde), como se puede en la siguiente captura, la conexión entre las dos piezas funcionó correctamente, estas se conectan de tal manera que no hay movimiento en ninguna de estas y además el cierre que se logra es hermético.



Imagen-A5. 12 Fotografía de la conexión de la tapa de cierre superior (pieza blanca) y una pieza de prueba con cuerda externa (pieza verde).

Diseño final de la torre base de montaje

La torre base de montaje cuenta con diez caras planas y simétricas que forman un decágono, en las cuales se harán los orificios con canales para montar los diez conjuntos de tapas de presión con sus sensores laminares. Para lograr que no exista interferencia entre cada uno de los diez orificios, estos están dispuestos de forma que haya cinco arriba y cinco abajo, intercalándose uno a uno. Este acomodo se puede apreciar en la siguiente imagen, así como también, los detalles de los orificios, en los que se ven los canales seguir las pestañas de las tapas.

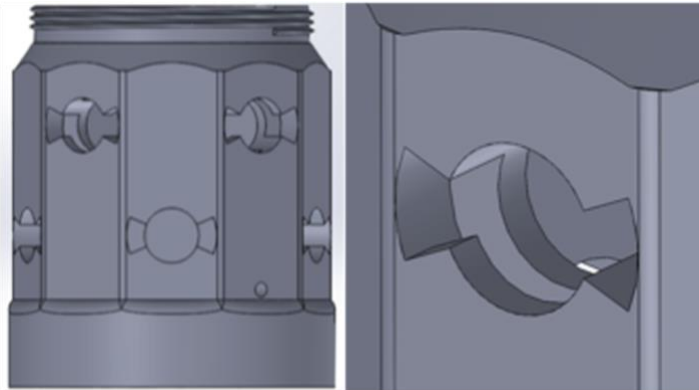


Imagen-A5. 13 a) Modelado 3D de la totalidad de la torre de montaje, b) Detalles del orificio y sus canales internos

La torre se modeló en su interior con suficiente maniobrabilidad para hacer las conexiones necesarias entre los sensores, el cual servirá para poder hacer todo el cableado de las conexiones de los sensores. Se hizo la fabricación de la torre en impresión 3D y una vez que se tuvo la pieza de la torre en físico se pudo constatar el tamaño y el peso de este modelo, el cual es satisfactorio. La torre llevará cuerda interna en su parte inferior y cuerda externa en su parte superior, esto debido a que solo de esta forma se puede imprimir en 3D las cuerdas sin necesidad de que haga soportes sobre ellas, afectando directamente su funcionamiento.

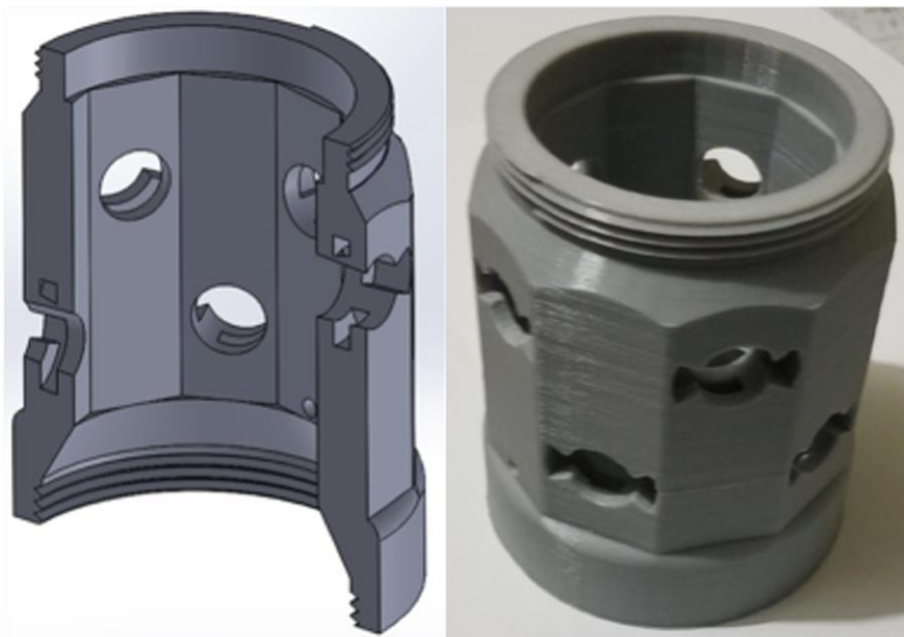


Imagen-A5. 14 a) Detalles del interior de la torre de montaje, se puede apreciar la cuerda interna en la parte inferior, además de la sección interior de las ranuras dentro de cada orificio, b) Impresión 3D de la torre base de montaje

Uno de los problemas que se tienen al momento de fabricar piezas a través de impresión 3D, es el re-trabajo que se le debe dar a la pieza para quitar todos los soportes que se necesitan para que se pueda imprimir en tres dimensiones; estos soportes ayudan a generar piezas con ángulos de 90 grados, así como los huecos que deban tener. En la impresión del modelo de la torre base, se debieron imprimir soportes que ayudaron a generar los orificios que se necesitan, lo cual origina un problema, el cual radica en poder quitarlos después de la impresión, sobretodo en los canales.

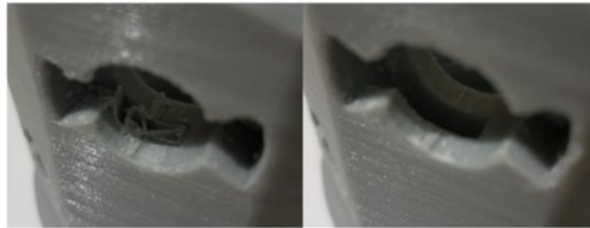


Imagen-A5. 15 Visualización del re trabajo que se le debe hacer a la pieza de torre de montaje para poder quitar todos los soportes dentro de las canales para el sistema de giro cierre.

A5.4 Guía de pasos a seguir para ensamblar el sensor laminar con las tapas de sujeción presión, dentro de la sección de la torre base.

- Paso 1: Se debe de colocar el sensor laminar dentro del canal hecho sobre la tapa inferior.
- Paso 2: Se debe de ensamblar la tapa inferior con la tapa superior, una sobre otra, haciendo que el cierre de las dos tapas deje en su lugar al sensor laminar, sin que este se mueva.
- Paso 3: Se coloca en posición el ensamble de las tapas para ser montado sobre la torre base de montaje, alineando las pestañas de las tapas con la geometría del hueco de la torre base.

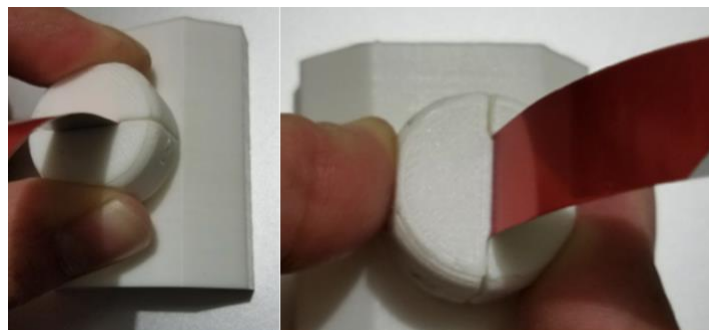


Paso 1

Paso 2

Paso 3

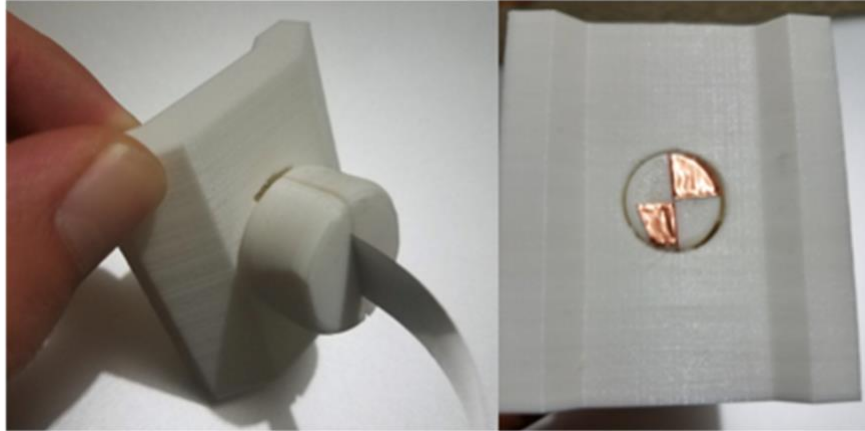
- Paso 4: Se introduce el ensamble de las tapas dentro del hueco de la sección de la torre base, hasta pegar con superficie.
- Paso 5: Se gira 90 grados hacia la izquierda para que el ensamble de las tapas quede en su lugar.



Paso 4

Paso 5

- **Ensamble final:** Las piezas están ensambladas en su posición final, el ensamble de las tapas queda en su lugar, en la parte trasera se puede apreciar las laminas de cobre donde se soldarán los pines para que se puedan conectar cables que transmitan la señal de energía generada por los piezoeléctricos.



A5.5 Proceso de manufactura del ‘arreglo 2’: conjunto de tapas de presión y sensor laminar

El principal conjunto de piezas que se necesita fabricar y que sus componentes no son impresos por manufactura 3D, es el sensor laminar, el cual tiene como principal componente la pieza de film piezoeléctrico; a este material lo único que se le debe hacer es cortarlo a la medida deseada de 12 X 40 mm. Los otros dos materiales que comprenden el sensor son la lámina de soporte de aluminio y la cinta de aislar. La lámina de aluminio se obtiene de latas de refresco. Los siguientes pasos muestran la fabricación de los sensores laminares.

- I. Primero se deben de cortar trozos rectangulares mayores a la medida que se ha estipulado de 13 X 60 mm, alrededor de 10 milímetros mas por lado.*
- II. Se debe de asegurar que el corte de la lámina a lo largo de se geometría siga la curvatura de la lata*
- III. Esto asegura una mejor vibración sobre el material al momento de que una gota de agua caiga sobre la lámina.*
- IV. Sobre los trozos rectangulares que ahora se tienen, se debe de pegar la cinta de aislar.*
- V. Ahora si se debe de cortar las láminas a la medida exacta de 13 X 60 mm*
- VI. Se debe de cortar un pedazo rectangular de la hoja de film piezoeléctrico con medidas de: 12 X 40 mm. **IMPORTANTE:** Para el correcto funcionamiento del film piezoeléctrico, se deben de ligar sus bordes de manera suave, tanto en su cara inferior como superior, esto asegura que no exista problemas de contacto entre las caras debido a la forma en que se corto el film.*
- VII. Se despega parte de la cinta de aislar (no toda) de la lámina de superficie, dejando espacio para la pieza de film piezoeléctrico.*
- VIII. Se coloca el film entre la lámina de soporte de aluminio y la parte despegada de la cinta de aislar, dejando una saliente del pedazo rectangular de alrededor de 5mm, este saliente del film será la que haga contacto con las láminas de cobre de las tapas de presión.*
- IX. Por ultimo, se debe de volver a pegar la cinta de aislar con el film dentro, sobre la lámina de soporte de aluminio.*

Con el tiempo, se deben de cambiar los sensores que estén desgastados o doblados, ya que esto provocando que se hayan mermado las características de vibración del sensor. Este proceso puede ser reutilizar las piezas de film piezoeléctrico en nuevos sensores con láminas de soporte nuevas, ya que

es el material más importante y difícil de conseguir. Para hacer este proceso, se debe de desprender con cuidado la cinta de aislar de la lámina de aluminio y del film piezoeléctrico, dejándolo libre para poder removerlo y reusarlo, que los otros dos materiales son desechables, de esta forma se volverá a fabricar desde un principio sensor laminar con ese film piezoeléctrico recuperado.



Imagen-A5- 16 a) Fotografía de los elementos que contiene el sensor laminar, en la izquierda esta la lámina de aluminio, en el centro esta la cinta de aislar y en la derecha esta el film piezoeléctrico, b) Fotografía del proceso de recuperación del film piezoeléctrico de sensor deteriorado.

A5.6 Prueba de un uso real de la energía generada por medio de uno de los sensores de sándwich laminar manufacturados

Resumen

Se quiere conocer cual es capacidad de la energía generada en términos de uso, de uno de los sensores cuando ya ha sido instalado en la torre base, con todas las modificaciones que se han hecho, de forma que se conozca si se puede accionar o prender algún tipo de elemento electrónico.

Introducción

El tipo de elemento que se puede prender o accionar debe de ir relacionado con la generación que se produce por medio del sensor, al momento de a este se le hace vibrar. Se probará con elementos simples como lo son unos focos de LED. El sentido de probar un LED, esto porque al momento de conectarlo al sensor, el funcionamiento del LED hace que se prenda (emitiendo una luz) si la energía que recibe es suficiente, de esta manera se comprueba si la energía del sensor es utilizable en términos más prácticos.

Procedimiento experimental

Se conectó un sensor laminar (previamente instalado sobre la torre base) al osciloscopio, donde será monitoreada su señal de generación. La energía que genera sensor cuando se le produce una vibración con el dedo, tiene un valor aproximado **de 5V a -7V pico a pico**, la señal tiene un comportamiento oscilante que va de un pico inicial positivo a su pico máximo negativo, para después alcanzar su pico máximo positivo y a partir de ahí va decreciendo hasta descender a cero, esta señal se puede apreciar en la siguiente capturada del osciloscopio. **Esta señal muestra los niveles de voltaje mas altos que se han obtenido hasta ahora**, lo cual se debe principalmente al re trabajo que se les dio a las piezas de film piezoeléctrico, este trabajo fue el de lijar sus bordes, lo cual ayuda de gran forma a la transmisión de energía. Debido a esta generación máxima que se ha obtenido hasta ahora, se tiene la curiosidad de ver que se puede hacer con ella, ya que este voltaje generado tiene teóricamente los valores suficientes para prender o accionar un elemento electrónico, aun cuando el elemento al momento de ser accionado consume corriente que debilite esta señal. El LED utilizado, funciona con un voltaje de 1.5V aproximadamente, los cuales, en teoría, ya son producidos por el sensor sin ningún problema. Pero antes se debe de atender la siguiente condición, la energía que necesita el LED par

funcionar debe estar en corriente directa (CD) y la energía que genera el sensor esta en corriente alterna (CA), siendo esta ultima la que se debe corregir, se debe de pasar a CA. Para esto se debe utilizar un dio rectificador, para poder pasar de la energía en corriente alterna a energía en corriente directa, con la desventaja que el diodo consume 0.7V cuando rectifica la señal.

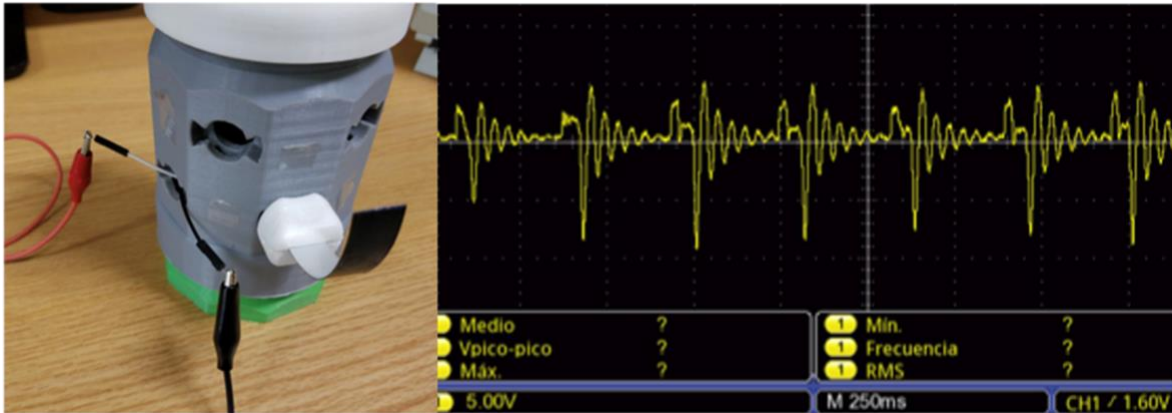


Imagen-A5. 17 a) Fotografía del sensor laminar sujetado a la torre base, conectando los pines que están por dentro con los cables que van al osciloscopio (cables rojo y negro), b) Captura de la señal producida por el sensor.

Resultados

Debido al consumo por parte del diodo rectificador, se hizo la medición de la señal producida por el sensor una vez que es rectificadada, la conexión se hizo conectando el diodo rectificador a la salida del sensor, mientras que la salida de señal del diodo se conecto al osciloscopio, esta señal se puede apreciar en la siguiente imagen. Al hacer esta conversión de corriente en la señal, se puede ver que en su comportamiento aun sigue habiendo un pico inicial máximo al momento de que se produce una vibración y el cual después sigue teniendo un descenso hasta llegar a cero. **Este pico máximo inicial tiene un valor aproximado de 10V, seguido de un segundo pico en 5V**, esto es sumamente importante porque con esto podemos decir, que aun cuando se pierde energía por el dio rectificador, la energía saliente aun es considerable.

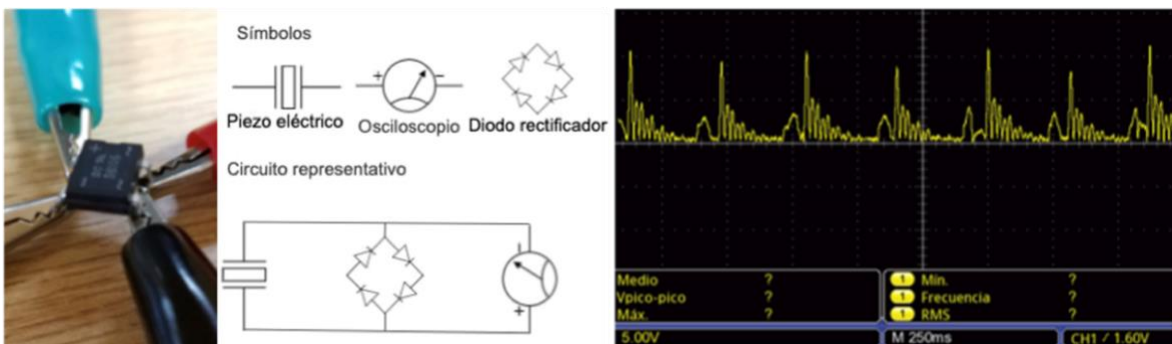


Imagen-A5. 18 a) Fotografía de la conexión de la salida de señal del sensor (cables rojo y negro) al diodo rectificador, cuyas salidas (negativo cable amarillo y positivo cable verde) van al osciloscopio, b) Circuito representativo, c) Medición de la señal de salida del diodo rectificador.

Con esta señal se debería de prender el LED en el momento del pico máximo, al menos en teoría, por lo que se conectó la salida del diodo rectificador a un LED que necesita de 1.3V para encenderse, midiendo también la lectura de salida del LED, con el entendimiento que la señal cambiara por la resistencia y corriente que este elemento consume. Se hizo la vibración del sensor con un dedo, con lo se comprobó que la energía generada si es capaz de prender el LED en el momento en que se produce la vibración máxima. Además, como era de esperarse la señal que se produce en el LED, cambia de forma, disminuyéndose el valor máximo de voltaje a la par que se disminuye la formación

descendente de picos, para pasar a una distribución mas uniforme, como se puede apreciar en la siguiente imagen. Esta captura nos hace ver que el voltaje baja hasta casi los 3V, pero se mantiene un tiempo mayor, alrededor de los 150ms, suficientes para poder prender al LED, para que después esta señal decrezca hasta cero en cuyo momento el LED se apaga.

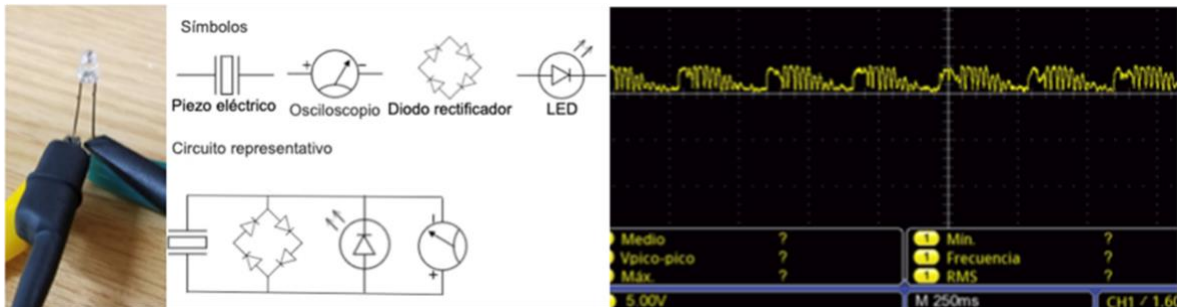


Imagen-A5. 19 a) Conexión de la salida del diodo rectificador (cables amarillo y verde) al LED, así como los cables de medición del osciloscopio (cables negros), b) Circuito rectificador c) Captura de la señal en el LED.

Discusión

Esta pequeña demostración, nos asegura que la energía producida si tiene una validez real y que es aprovechable, ya que aun cuando el tiempo que el LED este prendido es momentáneo y se considera muy corto (por sus 150ms de duración), se debe de tener en cuenta que este es solo un sensor y que en el montaje final serán diez sensores trabajando entre si. Por lo que se espera que cuando una lluvia constante caiga sobre el dispositivo, casi siempre alguno de los sensores estará accionado, logrando que este LED pueda estar prendido casi constantemente.

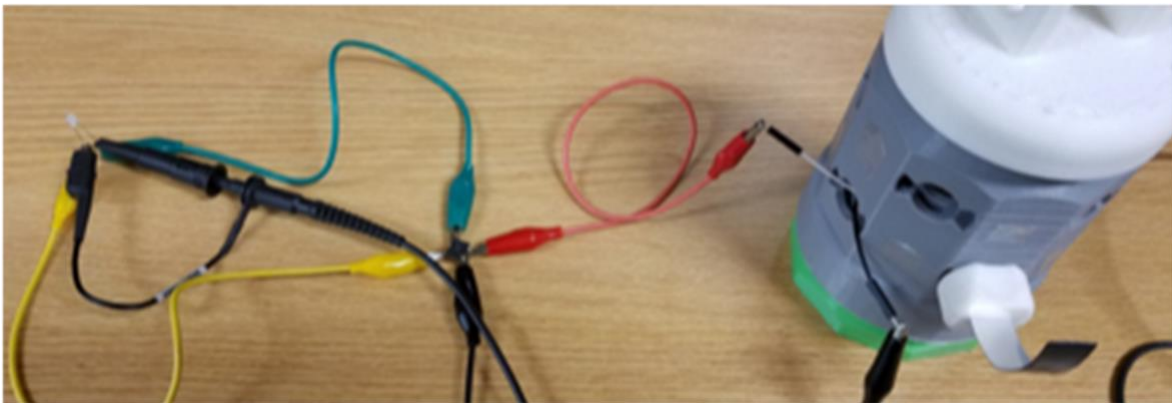


Imagen-A5. 20 Imagen de los elementos conectados para hacer prender un foco de LED.

Conclusiones

Esto es un resultado positivo que cumple con la siguiente hipótesis, ***un sensor hecho desde cero y manufacturado con especificaciones propias es capaz de prender un elemento eléctrico, como lo es un LED.***

Guía y prueba de la forma de impermeabilizar el ensamble del conjunto de tapas de presión y el sensor laminar una vez montados sobre la torre base

- I. Para lograr un cierre hermético entre las dos tapas pequeñas y el sensor, se coloco una pieza rectangular de cinta de aislar alado de la cinta de cobre, con la finalidad de que la parte de film piezoeléctrico que toca esa zona este mejor asegurada y se eviten filtraciones de agua.

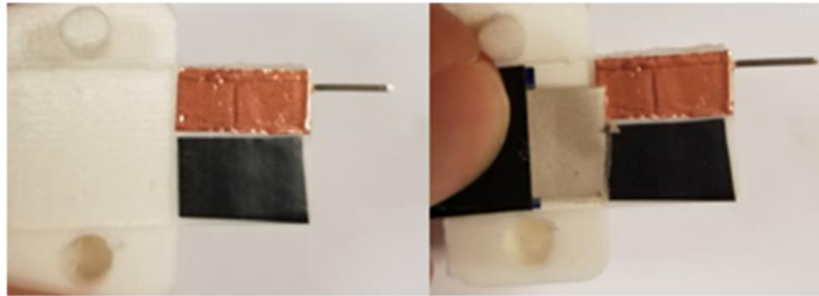


Imagen-A5. 21 Imagen de la colocaron de la cinta de aislar en las tapas pequeñas.

- II. Se prueba la conexión de este ensamble dentro de una pieza de prueba que simula a la torre base, se utiliza el mecanismo de giro-cierre para montar el ‘arreglo 2’ sobre la torre.
- III. Se prueba la generación de energía del sensor, comparando la generación producida con las mediciones anteriores, comprobándose que son casi iguales, por lo que no ha afectado en nada la colocación de cinta de aislar dentro de las tapas de presión.

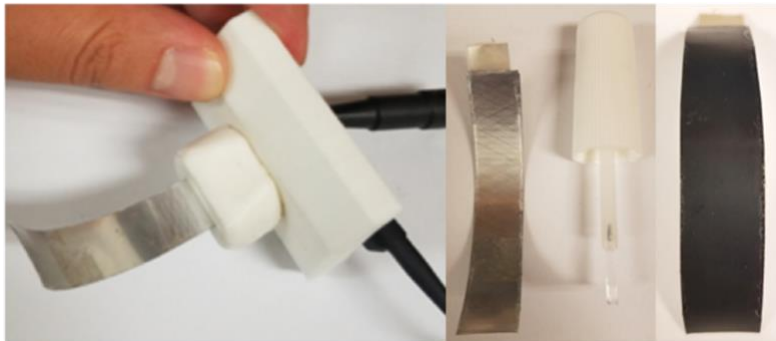


Imagen-A5. 22 a) Imagen de la izquierda: fotografía del paso 3, b) imagen de la derecha: fotografía del paso 4

- IV. Se sello el sensor laminar (elemento con mayor interacción con las gotas de lluvia) en su borde exterior con pegamento liquido de tipo instantáneo (marca ‘kola loka’).
- V. Se sellaron las ranuras que existen entre piezas con silicón, este también cumple con la función de poder quitarse si se desea hacer una modificación posterior, por lo que este sellado no fija de forma definitiva a los elementos.

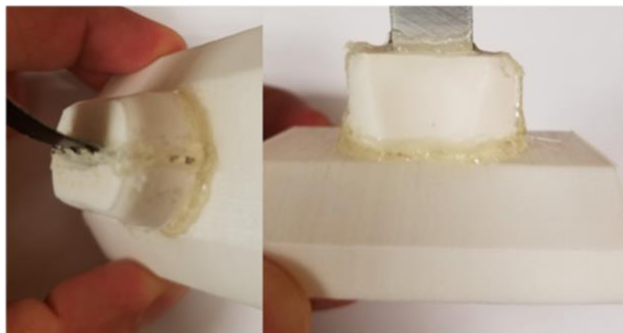


Ilustración 4 Imagen del sellado con silicón en las ranuras dejadas por el ensamble entre piezas.

- VI. Se probó el sellado sumergiéndolo en un pequeño contenedor con agua, de forma que todas las ranuras donde se hicieron los sellados con silicón y adhesivo liquido estuvieran en contacto directo con el agua.
- VII. después de sumergir el ensamble dentro del agua por un minuto, se midió la producción de energía que generaba el sensor en el osciloscopio.

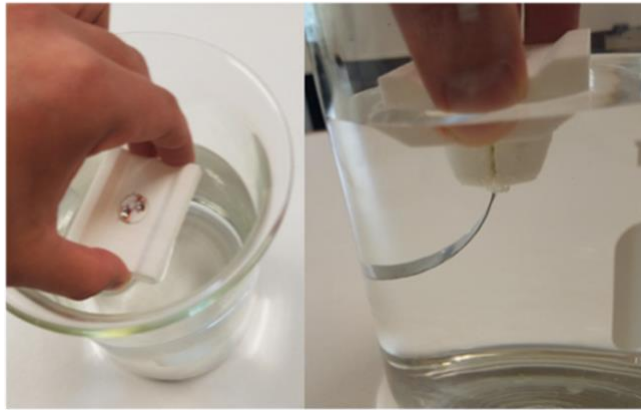


Imagen-A5. 23 Imagen de la forma en que se sumergió el ensamble sellado dentro del contenedor con agua

- VIII. Se comprueba que las mediciones sean las mismas, antes de impermeabilizar como después de impermeabilizar y sumergirse en agua.

Anexo 6

A6.1 Elección del tipo de conexión de los diez sensores piezoeléctricos

Para lograr esto, se empezó por lo mas sencillo y hasta cierto punto lógico, que es guiarse por la teoría, la cual nos indica que para que se sumen las corrientes eléctricas de fuentes de energía (en este caso los sensores) y su voltaje se mantenga igual, estas deben de conectarse en serie, esto deberá de facilitar el almacenamiento de la energía. Derivado de los resultados de las pruebas de generación que concluye que los valores de voltaje obtenidos son aceptables, de forma que lo que se desea es aumentar la corriente. De aquí, que se empiece por conectar los diez sensores en serie para que la corriente eléctrica de todos se sume. Se hicieron mediciones sobre este tipo de conexión entre los sensores y se vio que la generación de energía de cada uno al ser medido individualmente, en el momento que se hacia vibrar, su generación de energía no era igual a como si estuviera sin estar conectar a ningún otro elemento; esto sucedió con cada uno de los diez sensores. Además, la generación total al momento de vibrar todos los sensores en un periodo corto de tiempo, no generaba una señal de voltaje ni de corriente como se esperaba, no se veía un incremento notorio ni una estabilización. Esto llevo a la siguiente conclusión, **al conectar los diez sensores en serie, se produce un fenómeno en el cual los sensores se “comen” entre ellos la generación de energía.** Esto es, mientras se iban conectando sensores en serie, se llega a un punto dentro de la conexión, en la que, al momento de añadir otro sensor a la cadena, este elemento empieza ha actuar como una resistencia, lo que come el voltaje y corriente eléctrica de todo el sistema.

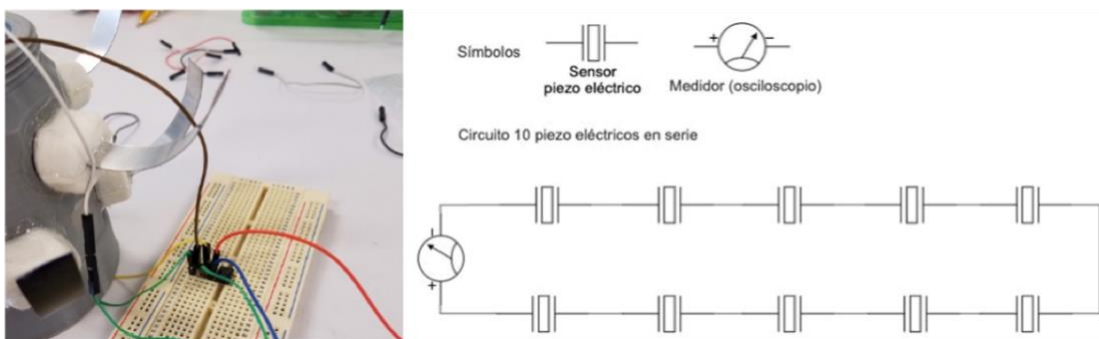


Imagen-A6. 2 a) Fotografía de las mediciones sobre la conexión en serie de los sensores, b) Esquema del circuito en serie

Por lo tanto, se buscó otra forma de conectar los diez sensores, en la que se deberá de dividir y mezclar la conexión de estos, entre cadenas en serie y en paralelo. Basándose en la geometría con la que se modeló y fabricó la torre base de montaje, en la cual se hizo que se colocaran cinco sensores arriba y cinco abajo, se ideó una forma de conexión. Se hicieron dos cadenas de cinco sensores en serie (los cinco sensores de arriba es una y los cinco sensores de abajo es otra), para después conéctalas en paralelo. Haciendo las pruebas sobre esta nueva conexión, se consiguieron buenos resultados, tanto en el accionar de un solo sensor, como cuando se accionaban todos los sensores piezoeléctricos. Cuando se accionaba un solo sensor, sea cual fuese, éste tenía casi la misma producción de energía que, como si no estuviera conectado a ningún otro elemento. Otro aspecto importante a resaltar, es que cuando se hacían vibrar todos los sensores en todas las formas posibles, se producía una señal de generación de energía que tenía un comportamiento en el cual, cada sensor parecía estar sumando al total de generación, aumentado su voltaje y corriente. Por tales motivos, se decidió que este es el mejor arreglo de conexión entre los diez sensores que se puede hacer y por consiguiente este será el que utilice finalmente, para las pruebas finales, además de ser parte de la descripción del dispositivo final.

Generación de energía, promedio individual

Con este nuevo arreglo de conexión, dentro de los diez sensores, existe una media de generación de energía, siendo este el siguiente:

<i>Valores medio Aproximados</i>	Pico máximo medio	Pico mínimo	Pico a Pico
<i>Voltaje</i>	4V	-6V	10V

Este valor medio, sirve como referencia al momento que se quieran hacer estimaciones, por ejemplo, cuando se quiera escalar a un mayor número de dispositivos conectados, por lo que para hacer el cálculo de cuánta energía se produce, se deberá de hacer la multiplicación entre el total de sensores que se tengan por este valor medio de generación de energía.

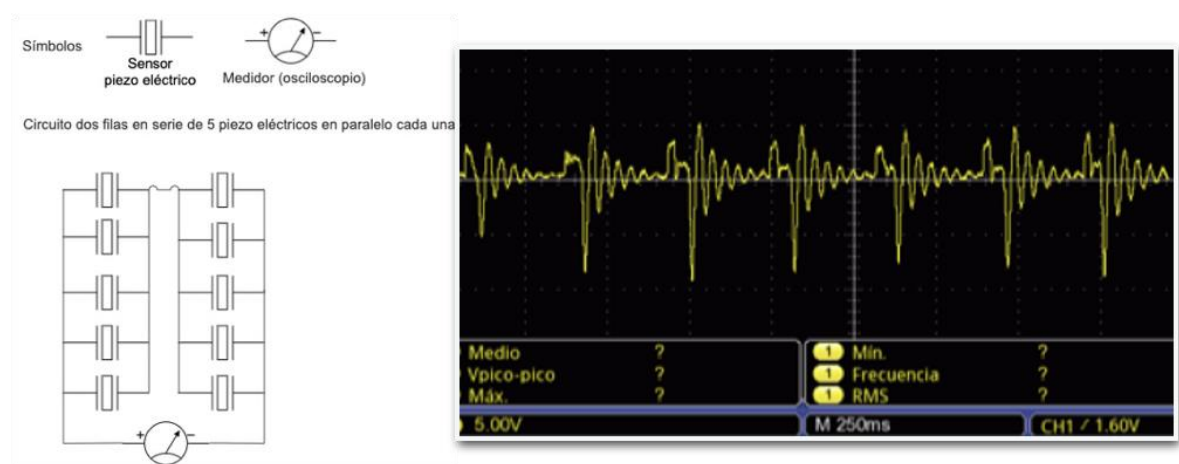


Imagen-A6. 3 a) imagen de la izquierda: Esquema del circuito de dos filas en serie de cinco sensores en paralelo, b) Imagen de la derecha: Medición promedio individual de los diez sensores

Se debe mencionar que, aun cuando se tiene un valor promedio individual de generación de los diez sensores, existen variaciones entre estos que no son muy grandes, se puede apreciar que unos producen un poco mas y otros un poco menos, es **decir unos tienen un mayor pico máximo que otros. Esto se debe a que la manufactura de los sensores fue a mano**, por lo que es difícil poder manipular los materiales de forma que se tengan resultados exactos en los diferentes procesos de

fabricación. Si se desea tener una mayor exactitud en la generación de energía en todos los sensores que se deseen usar, por algún motivo específico, como por ejemplo lograr que los sensores se puedan producir como un subproducto final para poder venderse; entonces se deberán de automatizar los procesos de manufactura, para hacerlos mas precisos y de esta forma evitar las variaciones que se producen cuando se trabaja manualmente.

A6.2 Circuito eléctrico del dispositivo de generación

Los circuitos analizados que cumplen con el almacenamiento de bajos voltajes y/o bajas corrientes eléctricas, tienen en común un elemento principal que antes no se tenía contemplado, un chip convertidor elevador de voltaje ultra bajo y administrador de energía. *“Esta verdad evidente les da gran importancia a productos como amplificadores de voltaje bajo, que son módulos autoalimentados que convierten una entrada de bajo voltaje de CC a una salida de voltaje de CA o CC más alta, adecuada para aplicaciones de recolección de energía de baja potencia que utilizan fotodiodos, generadores termoeléctricos o electromagnéticos como fuente de entrada”* (Scansen, 2012). Dentro de la búsqueda de un chip con estas funciones, se encontró uno que es de los mas recomendados y usados, el **LTC3108 - Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager**. Una pequeña descripción del fabricante es la siguiente: “El LTC®3108 es un convertidor DC / DC altamente integrado, ideal para cosechar y administrar el excedente de energía de fuentes de voltaje de entrada extremadamente bajas,” (linear, 2017).



Imagen-A6. 4 Fotografía y comparativa de tamaño del chip LTC3108

Diagrama del circuito eléctrico

Para poder guiarnos y realizar el circuito de almacenamiento que se necesita, el fabricante del chip LTC3108 proporciona una guía con varios circuitos de almacenamiento propuestos. De los cuales se utilizo el tiene como entrada corriente directa (CD) ya que cumple con los valores de generación que se tienen por parte de los sensores cuando se les hace rectificación de CA a CD, este circuito se muestra en la siguiente imagen. Se debe recordar que el elemento que rectifica la señal (diodo), se come una parte de la generación de energía, alrededor de 0.7V, lo cual es inevitable. Existe un circuito que, si necesita voltaje en CA en su entrada, como la que produce el dispositivo, pero a diferencia de esta, la señal que necesita este circuito necesita una frecuencia mayor a los 60 Hz, los cuales no se tienen. De todas maneras, se implementará este circuito a la par del primer circuito mencionado, para poder probar ambos circuitos y ver con cual se obtienen un mejor almacenamiento de energía. Por lo tanto, se utilizo el siguiente circuito de almacenamiento:

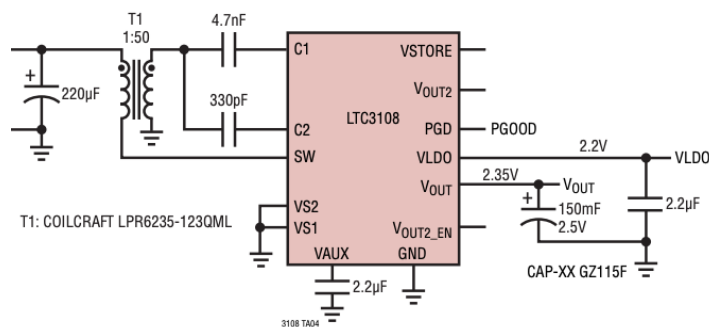


Imagen-A6. 5 Diagrama del circuito propuesto por el fabricante para almacenar voltajes y corrientes bajos (linear, 2017).

Otro elemento importante en el circuito propuesto, es el elemento que almacenará la energía, este elemento es un súper capacitor. El súper capacitor conseguido y que cumple con los requerimientos que se piden para el circuito se presenta en la siguiente captura, este cuenta con los siguientes valores, 6.3 V y 0.047 F. El objetivo principal de este circuito es almacenar la energía de entrada (que es la energía generada por el dispositivo) en los súper capacitores, para que estos mantengan la energía. Los súper capacitores son cargados mediante la salida de voltaje que entrega el circuito, el cual se puede configurar para dar diferentes valores; en este caso se desea dar una salida de 2.3 volts. El circuito armado luce de la siguiente forma.

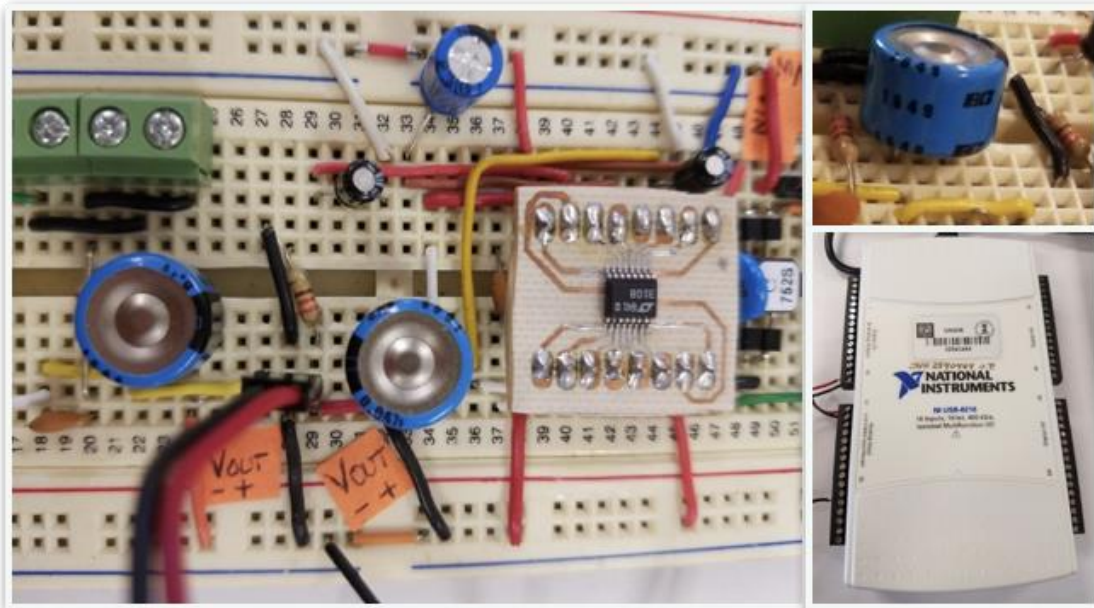


Imagen-A6. 6 a) Imagen de la izquierda: Fotografía del circuito de almacenamiento, b) Imagen de arriba a la derecha: Súper capacitor, c) imagen de abajo a la derecha: Instrumento de medición Instruments NI USB-6219

Nuevo instrumento de la medición de señal eléctrica: National Instruments NI USB-6216

Para estas pruebas finales del dispositivo de generación, se ha cambiado el instrumento de medición de las señales eléctricas, se dejará de utilizar el osciloscopio y ahora se utilizará la tarjeta de National Instruments NI USB-6219. Esta tarjeta tiene mejora la medición y monitoreo de las señales eléctricas, tanto en su voltaje como en su corriente eléctrica, además de que también se puede hacer la grabación por un periodo prolongado de tiempo. Otra ventaja es que el software de la tarjeta, puede realizar cálculos sobre la señal que se esta midiendo en el tiempo que esta ha sido grabada, pudiendo obtener valores medios de generación como el RMS de la señal. Con este instrumento, se añade la variable de tiempo de prueba a las experimentaciones que se van a realizar, por lo que se puede establecer la generación de energía en rangos de tiempo parecidos a los de la duración de una lluvia. Esto es esencial porque en el fenómeno de la lluvia, la intensidad mayor ocurre en un porcentaje mínimo del total de su duración. Además de que se puede establecer que si, en un periodo de tiempo propuesto, ocurre cierto valor generación de energía, se puede ir escalando conforme a este dato.

Practica: Prueba del circuito de almacenamiento

Resumen

Se hizo una prueba del circuito para conocer si este funcionaba correctamente y almacena energía.

Introducción

Como medida de control no se utilizo el dispositivo de generación, sino una fuente de generación ya probada y estable como los es una celda solar. La celda solar utilizada genera energía al momento de colocarle una luz producida por un foco común, la cual proporciona un voltaje aproximado de 2V y una corriente eléctrica aproximada de 8mA de forma constante. Se utilizo un súper capacitor como elemento de almacenaje de energía, sus características principales son, 6.3 V y 0.047 F.

Procedimiento experimental

Se conecto la salida de voltaje de la celda solar a la entrada del circuito, con lo cual ya se debería de cargar el súper capacitor. Para conocer si se cargaba el capacitor, se conecto al medidor de señal a la salida del capacitor, mientras este era cargado desde cero hasta el valor máximo que puede dar, recordando que el valor máximo teórico que indica el súper capacitor es de 6.3V.

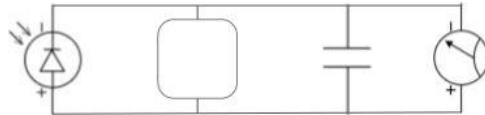


Imagen-A6. 7 Esquema de la conexión hecha para probar si el circuito funciona.

Resultados

El voltaje y corriente eléctrica máximos que se pudieron obtener en el súper capacitor fueron de 5.14V y 20.6 mA, todo en un tiempo de carga de 11 minutos con 50 segundos, después de esto el súper capacitor ya no subía en sus valores de lectura. La captura de esta señal obtenida por el súper capacitor después de ser cargado por la celda solar se puede ver en la siguiente imagen.

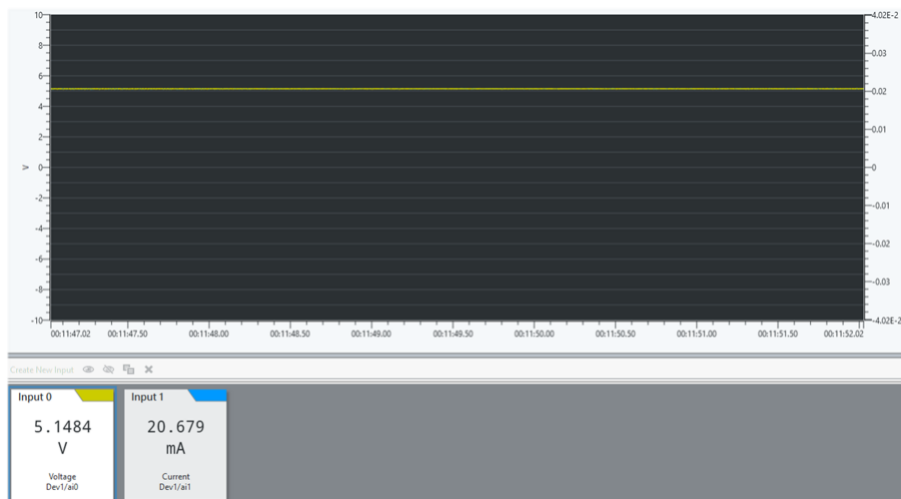


Imagen-A6. 8 Captura de la señal obtenida por el súper capacitor después de ser cargado por la celda solar

Discusión

Esto demuestra que el circuito funciona y cumple con su objetivo de cargar al súper capacitor, por lo que la energía que se genera por la celda solar es aprovechable, ahora esto se deberá de replicar al momento de hacer las pruebas con el dispositivo de generación, en donde si se obtiene el mismo

resultado que establezca que el súper capacitor se esta cargando, entonces se puede demostrar que la energía es almacenable y aprovechable. En caso de que esto no ocurra, entonces se deberá de conocer que es lo que esta pasando, si es el circuito el que no puede almacenar la energía, si es el dispositivo que no genera la energía suficiente o alguna otra variable que se pueda establecer conforme a lo sucedido en las pruebas.

Conclusiones

- ❖ El circuito que se ha elaborado puede almacenar energía en un súper capacitor, mientras se le suministra en su entrada un voltaje y una corriente constantes.
- ❖ Se cree que también puede almacenar voltajes y corrientes *no constantes*, como la que produce el dispositivo de generación.

A6.3 Prueba de control captura de la señal de generación de energía

Resumen

Prueba de control para verificar que la medición de la señal de generación es capturada correctamente.

Introducción

Antes de llevar al dispositivo, el equipo para grabar las mediciones y los elementos que generarán las gotas de lluvia a su posición para hacer las pruebas finales a la intemperie, primero se conectó el dispositivo de generación a la tarjeta de medición para comprobar que su software lee, cuantifica y graba la señal de energía producida por los sensores.

Procedimiento experimental

Para ver de forma clara los picos de la señal que se producía al momento de vibrar uno a uno los sensores, se rectificó de CA a CD, de manera que solo se muestren los picos positivos, haciendo mas fácil la interpretación de lo que esta ocurriendo. Se hizo esto porque la conexión entre el dispositivo y la tarjeta de medición carecen de una tierra física, por lo que la señal que se muestra cuando se hacen vibrar los sensores en CA es mas confusa que la de CD en la misma línea en el eje horizontal. Comprobado que la señal de energía del dispositivo es mostrada en el software, a la vez que se monitoreaban sus valores, se hizo la grabación durante un lapso de tiempo, de forma que al terminar la grabación se tenga toda la señal producida, obteniendo al mismo tiempo sus valores generales.

Resultados

Realizada la grabación de la señal mientras se hacia vibrar uno de los sensores, durante un tiempo de cinco segundos (tiempo suficiente para corroborar que todo ocurriera como se esperaba), se tuvieron las siguientes mediciones, que por la condición que se tiene de tierra flotante en el dispositivo y la tarjeta, se hicieron de la siguiente forma:

- Primero se dejó que se estabilizara la señal para conocer desde que valor se parte en el eje vertical del plano de coordenadas, inmediatamente antes de que se produzca el primer pico de generación de energía. En este *momento 1*, se pueden apreciar en la captura de la señal los valores donde se estabiliza la señal, estos empiezan aproximadamente en 279.20mV de voltaje y 1.113mA en corriente eléctrica.
- Después se midió el primer pico de generación que se obtuvo al momento de hacer vibrar el sensor. En este *momento 2*, el valor máximo del pico es de 3.4V y 13.7mA.
- Con los valores del *momento 1* y los del *momento 2*, se pueden conocer los valores de generación total de esa primera vibración, los cuales son los siguientes.

	Momento 1	Momento 2	Generación real
Voltaje	280mV	3.4V	3.13V
Corriente	1.11mA	13.7mA	12.59mA

- Se hicieron vibraciones consecuentes a esta primera, las cuales fueron hechas cuando el sensor casi volvía a estar en su posición inicial, sin movimiento.

La generación real del segundo pico se obtuvo de la variación de un **momento 3**, justo antes de hacer la vibración que genero este pico, cuando la señal viene de decrecer después del primer pico de generación y de un **momento 4**, cuando se alcanzaron los valores máximos del pico después de realizada la vibración sobre el sensor.

	Momento 3	Momento 4	Generación 2do Pico
Voltaje	2.18V	4.84V	2.66V
Corriente	8.78mA	19.485mA	10.7mA

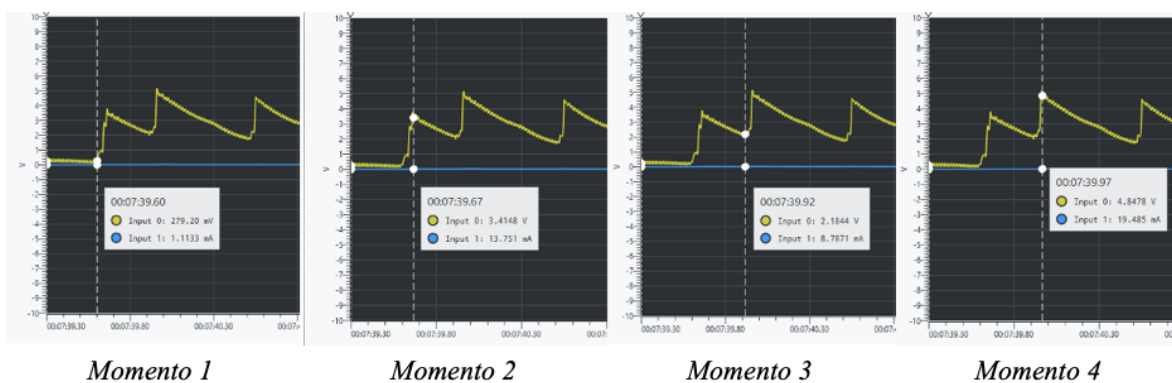


Imagen-A6. 9 Captura de los valores de cada uno de los momentos de los primeros dos picos de generación

Discusión

Con los resultados se corroboró el correcto funcionamiento tanto del dispositivo de generación como de la captura y monitoreo de su señal. Esta prueba también afirma que existe una producción de energía considerable por los sensores piezoeléctricos, aun cuando su señal de generación ha sido filtrada a CD.

Conclusiones

- ❖ Se midió y se grabó la señal de generación del dispositivo correctamente
- ❖ Se confirmó que existe una producción de energía por parte de un sensor, cuando se le hace vibrar este con un dedo.

A6.4 Detalles del acomodo de los elementos para recrear la lluvia y empezar las pruebas

Derivado de un análisis de ideas, estas son las condiciones principales que se necesitan para llevar a cabo las pruebas que recrean artificialmente la lluvia, así como la medición y grabación de la energía que se genere con el dispositivo.

Lugar

- Se necesita un lugar donde pueda dejar caer libremente las gotas de lluvia
- La superficie que se requiere debe de ser mayor al área que ocupa el dispositivo
- Se necesita estar a dos niveles, uno superior donde se producen las gotas de lluvia y otro inferior donde este el dispositivo

Generación de gotas de lluvia

- Se necesita de una fuente que proporcione un caudal de agua, puede ser cualquier toma de agua con una presión constante
- Se necesita de un elemento que lleve el agua desde la fuente hasta una parte superior donde se pueda crear gotas para que estén caigan sobre el dispositivo.

Elementos de medición de señal (computadora, circuito, cables, etc.)

- Se deben resguardar todos los elementos de medición como lo es una computadora que corra el software de medición, la tarjeta de NI, el circuito de almacenamiento, etc.
- Se necesita desarrollar una conexión entre el circuito de almacenamiento o la tarjeta de NI y el dispositivo de generación, **esta conexión debe ser impermeable**

Manguera y rociador

Dos elementos esenciales para recrear el fenómeno de la lluvia son: la manguera que transporte el flujo de agua que ofrece la toma del agua y el rociador conectado al final de la manguera, siendo este ultimo el que cree las gotas de agua que se asemejen a las gotas de una lluvia común, fijando nuestra atención en el tipo de gotas que se necesitan crear; estas deben ser lo mas parecidas a lo que suceda en una lluvia de intensidad normal a fuerte, ya que estas son las condiciones que se esperan puedan generar la mayor cantidad de energía en el dispositivo y al mismo tiempo, al ser condiciones máximas, estas ponen a prueba la resistencia y solidez de los elementos, piezas y ensamble del mismo. Con esto en mente, se optó por utilizar un rociador, cuyo modelo tiene diversas salidas para variar la forma en que el caudal de agua sale y genera las gotas. En concreto, utilizara la salida tipo “Jet”, que es la que produce las gotas de agua que mas se asemejan a una lluvia normal, además de que con esta se abarca un área de goteo suficiente para que todo el dispositivo de generación sea impactado por las gotas.



Imagen-A6. 10 a) Fotografía de las salidas de rociador, b) Fotografía de la toma de tiempo para llenar 1 L de agua

Las gotas producidas por el rociador, caen libremente desde el laboratorio a un piso debajo, teniendo una altura de caída aproximada desde que las gotas salen rociador hasta que golpean con los sensores del dispositivo, de **6 metros**. Se hizo una pequeña medición para conocer el caudal de agua que sale del rociador y en consecuencia el agua que caerá sobre el dispositivo, para esto, se relacionó la presión

máxima, velocidad y cantidad de agua que sale de la toma de agua, pasa por una manguera, llegar al rociador y sale de este, para obtener como resultado el llenado de un matraz graduado en 1 litro, en alrededor de 11 segundos, lo que nos da un aproximado de 0.0909 L/s o 90.90 mL/s de caudal de agua. Esto en términos prácticos, nos indica que:

Cantidad de agua que cae el dispositivo con la presión máxima de la toma de agua es de 5.45 L/min

Preparación elementos de medición

Antes de colocar en su lugar todos los elementos que servirán para medir y grabar la señal de generación del dispositivo, se debe de hacer un cableado que vaya desde el dispositivo hasta el circuito de almacenamiento. Para esto, se utilizó un cable de transmisión de datos de red telefónica, el cual cuenta con el numero de cables de cobre suficientes para hacer la conexión. Esta conexión va de la salida del circuito interno del dispositivo a la protoboard que contiene el circuito de almacenamiento. La longitud de este cable, depende de la longitud que se tenga entre la protoboard (que esta el laboratorio) y el dispositivo (que esta en un piso debajo). Para cumplir esto, se utilizo una longitud de cable de **8 metros**. Teniendo estos datos sobre el cable de conexión entre el dispositivo y los elementos de medición, así como los elementos que crearan las gotas de agua, se puede hacer la representación del acomodo para realizar la prueba final. Este acomodo se muestra en el siguiente esquema:

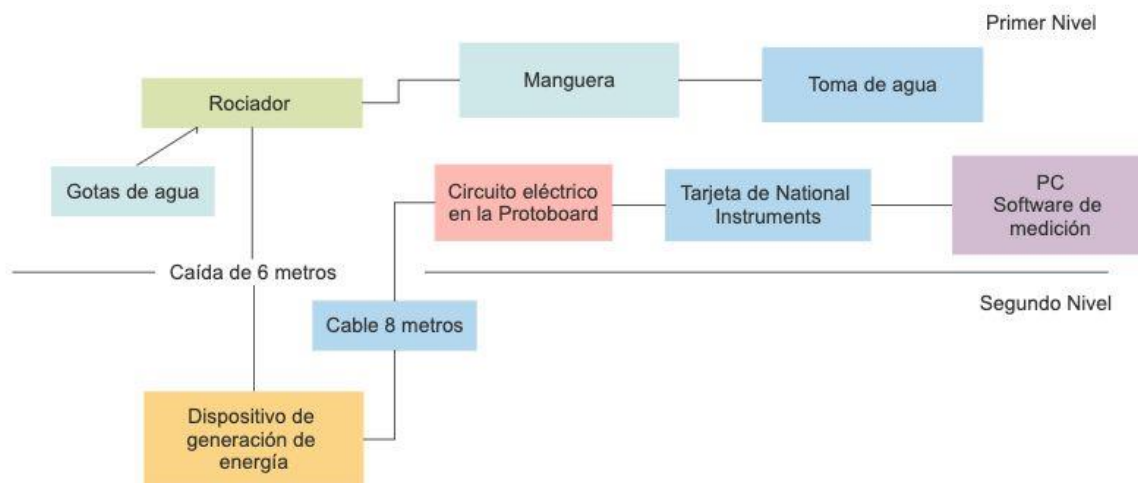


Imagen-A6. 11 Esquema de elementos para realizar las pruebas finales

A6.5 Practica: Primera prueba

Resumen

Primera prueba de generación de energía, simulando las condiciones de una lluvia que cae sobre el dispositivo.

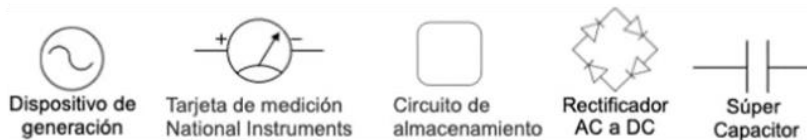
Introducción

Esta prueba consistirá en 4 experimentos, en los cuales se grabará la señal de generación eléctrica que produce el dispositivo cuando esta recibiendo los impactos de las gotas de lluvia. Los cuatro experimentos están planteados de la siguiente forma:

Tiempo de impacto de las gotas **¿Qué se va a medir?**

<i>Primer experimento</i>	5 minutos	Se mide la generación del dispositivo de forma cruda en CA, sin que ningún elemento intervenga entre la señal de salida del dispositivo a la tarjeta de medición.
<i>Segundo experimento</i>	5 minutos	Se mide la generación después de que la señal del dispositivo pasa por el diodo rectificador que convierte la señal cruda de CA a CD.
<i>Tercer experimento</i>	5 minutos	Se conecta la señal que sale del diodo rectificador (CD) a la entrada del circuito de almacenamiento, conectando al mismo tiempo un súper capacitor a su salida. Se mide la señal del súper capacitor, para ver si se esta cargando.
<i>Cuarto experimento</i>	5 minutos	Se vuelve a medir la señal que da el súper capacitor, mientras esta conectado al circuito de almacenamiento, esto para tener mas datos con que comparar (es el mismo esquema del circuito del tercer experimento).

Símbolos:



Circuitos:

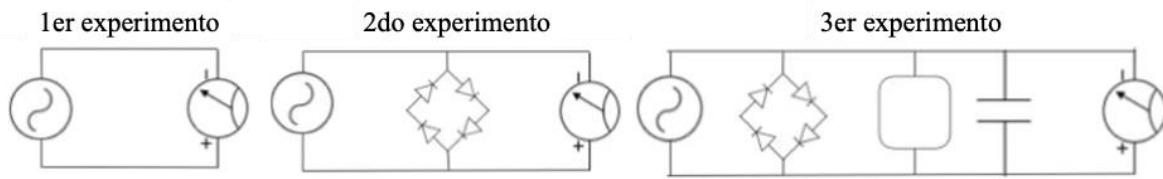


Imagen-A6. 12 Diagramas de los circuitos eléctricos de los cuatro experimentos

Procedimiento experimental

Se dejaron caer las gotas de agua sobre el dispositivo, mientras se medía y se grababa la señal de generación que producía el dispositivo, recopilando la información de los valores de voltaje y de corriente eléctrica.

Resultados

Primer experimento:

El experimento tuvo una duración de 8 minutos con 30 segundos, esto fue mas de los 5 minutos planteados originalmente, porque hasta después de los 3 minutos fue cuando la señal se estabilizó, aproximándose al cero del marco de referencia en el eje vertical que tiene el software. La señal que genero el dispositivo es la siguiente:



Imagen-A6. 13 Captura de la grabación de la señal, el voltaje es la gráfica en amarillo y la corriente la gráfica en azul.

La estadística que arroja el software sobre la señal se muestra en la siguiente tabla:

Valores	Máximos	Mínimos	RMS
Voltaje	10.9 V	-9.22V	4.52V
Corriente	49.63mA	-41.91mV	20.55mA

Segundo experimento:

Se volvió a producir las gotas de agua para que cayeran en el dispositivo, mientras se esperaba volver a medir y grabar la señal de generación, lo cual no sucedió. Se desconectó el circuito y se volvió a hacer la misma conexión que en el primer experimento para comprobar si el problema era por parte de las conexiones recién hechas, a lo que tampoco se obtuvo medición de energía, deteniendo el experimento para verificar el dispositivo. Al observar detalladamente, se observó que existía un poco de humedad dentro de la torre base y en el circuito interno, además de que se encontraron algunas gotas de agua, lo que confirma que se filtró agua al dispositivo, poniendo fin a esta primera prueba.

Discusión

Los valores de máximos y mínimos representan la variación que se tiene en la señal y nos indican a que niveles se puede llegar, pero no determinan nada en relación al valor promedio máximo de generación producida, debido a la tierra flotante de la conexión y el tiempo que tardó en estabilizarse. Para conocer el valor promedio de generación de energía que se tuvo, se tomó el valor de RMS del voltaje y de la corriente eléctrica, cuyos valores se asemejan más a la producción que se tuvo durante el tiempo que duró el experimento. Después de analizar detenidamente las filtraciones en el dispositivo, se conoció el porqué de estas, no hubo filtración de agua durante el primer experimento en sus 8 casi 9 minutos de duración, debido a que las gotas de lluvia caían constantemente, rebotando sobre el dispositivo, haciendo que no se estancara el agua, ya que esta fluía sobre todos sus elementos. Cuando se dejó de producir gotas de agua que cayeran sobre el dispositivo, el agua se estancó en el dispositivo, dejando una capa de agua sobre este, la que después de un tiempo causó filtraciones.

Conclusiones

- ❖ Se generaron filtraciones tras el primer experimento que no dejaron continuar con la prueba
- ❖ Se necesita impermeabilizar de mejor manera el dispositivo para volver a realizar otra prueba de generación

A6.6 Modificaciones para realizar una segunda prueba

Impermeabilización del dispositivo con grasa para bujías

Para evitar que el agua que cae sobre el dispositivo entre dentro de los sensores y dentro de el cableado interno, se tomo la decisión de cubrir todo el dispositivo con una ligera capa de grasa para bujías, cubriendo tanto sensores, como toda la parte externa de las piezas impresas en 3D que estén cerca de ranuras donde pude filtrarse el agua, así como las diferentes uniones que se tienen en todas sus piezas.

Modificación del cable de transmisión de señal

Después de analizar los resultados de la primera prueba, se observó un pequeño detalle que afecta la medición de la generación de energía. Se vio que, la producción del dispositivo era menor que en las mediciones previas a la prueba, por lo que se detectó que un elemento de la de conexión afectaba la señal. Este elemento era el cable de red telefónica que transmitía la señal del dispositivo a la protoboard y a la tarjeta de medición, siendo en concreto la longitud de cable y no el cable en si, lo que hacia decrecer la señal. La señal al ser una señal no constante con voltajes y corrientes eléctricas muy pequeñas, decrece en sus valores cuando pasa por un cable con una cierta longitud, ya que esta se “come” la señal. Esto es un impedimento para obtener mediciones reales que sirvan para valorar la generación del dispositivo, ya que, cuando el dispositivo sea un producto final, este no debe de tener cables para hacer una conexión de medición, todo debe de estar conectado internamente, el circuito interno de los sensores debe estar conectado directamente al circuito de almacenamiento y a su vez, todos estos elementos deben estar dentro del espacio interno de la torre base. La longitud del cable de paso de ser de 10 metros a solo 2 metros, siendo esta la longitud mínima para ir del dispositivo al circuito y tarjeta, al mismo tiempo que con esta longitud, la reducción de energía no es considerable.

Cambio de la disposición de algunos elementos

Para la segunda prueba, algunos elementos deberán de cambiar de posición, debido a la reducción de la longitud del cable conector que se va a utilizar, ahora los elementos de medición de la señal (la PC, el circuito y la tarjeta NI), estarán al mismo nivel que el dispositivo de generación, cuidando que ninguno de ellos sea salpicado por las gotas de lluvia.



Imagen-A6. 14 Fotografía de los elementos de medición y grabación al nivel del dispositivo de generación.

A6.7 Practica: Segunda prueba

Resumen

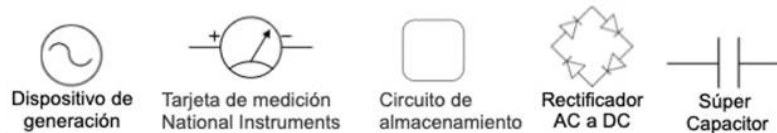
Prueba de generación de energía del dispositivo, donde se midió y se grabó esta señal para obtener sus valores de voltaje y corriente, así como conocer la posibilidad de almacenar esta energía.

Introducción

Se realizarán cuatro experimentos, empezando por donde se dejó la primera prueba, la forma en como se realizarán es la siguiente.

	Tiempo de impacto de las gotas	¿Qué se va a medir?
<i>Primer experimento</i>	5 minutos	Se mide la generación que se tiene después de que la señal del dispositivo pasa por el diodo rectificador que la convierte de CA a CD.
<i>Segundo experimento</i>	5 minutos	Se conecta la señal que sale del diodo rectificador (CD) a la entrada del circuito de almacenamiento, conectando al mismo tiempo un súper capacitor a su salida. Se mide la señal del súper capacitor, para ver si se esta cargando.
<i>Tercer experimento</i>	5 minutos	Se conecta la señal que sale del diodo rectificador (CD) directamente al súper capacitor, sin pasar por el circuito de almacenamiento, para ver si se puede cargar el súper capacitor mas fácilmente.
<i>Cuarto experimento</i>	5 minutos	Dependiendo de lo sucedido en el segundo y tercer experimento, se hará la conexión que mejor respuesta tenga sobre el capacitor, para ahora incrementar en tamaño de las gotas y ver si se produce una diferencia en la carga del capacitor.

Símbolos



Circuitos



Imagen-A6. 15 Diagramas de los circuitos eléctricos de los cuatro experimentos de la segunda prueba

Procedimiento experimental

Se crearon las gotas de agua con rociador y se dejaron caer sobre el dispositivo de generación, mientras se medía y se grababa la señal eléctrica que se producía por los sensores piezoeléctricos.



Imagen-A6. 16 Fotografía del instante en que las gotas de lluvia artificial impactan al dispositivo y a sus sensores

Resultados

Primer experimento:

El dispositivo de generación produjo los siguientes valores de energía, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 17

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	10.63V	40.80mV	2.18V
Corriente	42.56mA	181.04 μ A	0.0088A o 8.80mA

Segundo experimento:

Se tuvo la intención de cargar un súper capacitor, lo que aseguraría que la energía generada por dispositivo es almacenable y por ende aprovechable, por lo tanto, si mientras se mide la señal de salida del súper capacitor, se encuentra un incremento en su voltaje y en su corriente, entonces se probará que este se esta cargando. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 18

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	101.96mV	99.005mV	0.1003V
Corriente	408.17 μ A	397.61 μ A	0.000403A

Tercer experimento:

Se dejó de lado el circuito de almacenamiento, para conectar directamente la señal que proviene del rectificador en CD al súper capacitor y para verificar si existe algún cambio en su carga. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 19.

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	120.71mV	99.005mV	0.10056V
Corriente	7.14mA	-1.399mA	0.000480 ^a

Cuarto experimento:

Se producen y dejan caer gotas mas grandes sobre el dispositivo generador, provocando una mayor fuerza de impacto sobre los sensores, intuyendo una mayor producción de energía. Con esto se tiene la intención de comprobar que, si la intensidad de lluvia es alta, por ejemplo, una tormenta donde las gotas son mas grandes, la generación de energía será mayor. Esto se probará si existe una mejora en la carga del súper capacitor con esta variación en las gotas de agua. La conexión de este experimento fue igual a la del tercer experimento, no hay conexión con el circuito de almacenamiento, la señal de salida del rectificador en CD va directamente al súper capacitor. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 20.

Valores	Máximo	Mínimo	RMS
Voltaje	115.45mV	99.333mV	0.10081V
Corriente	20.82mA	-21.76mA	0.000510A

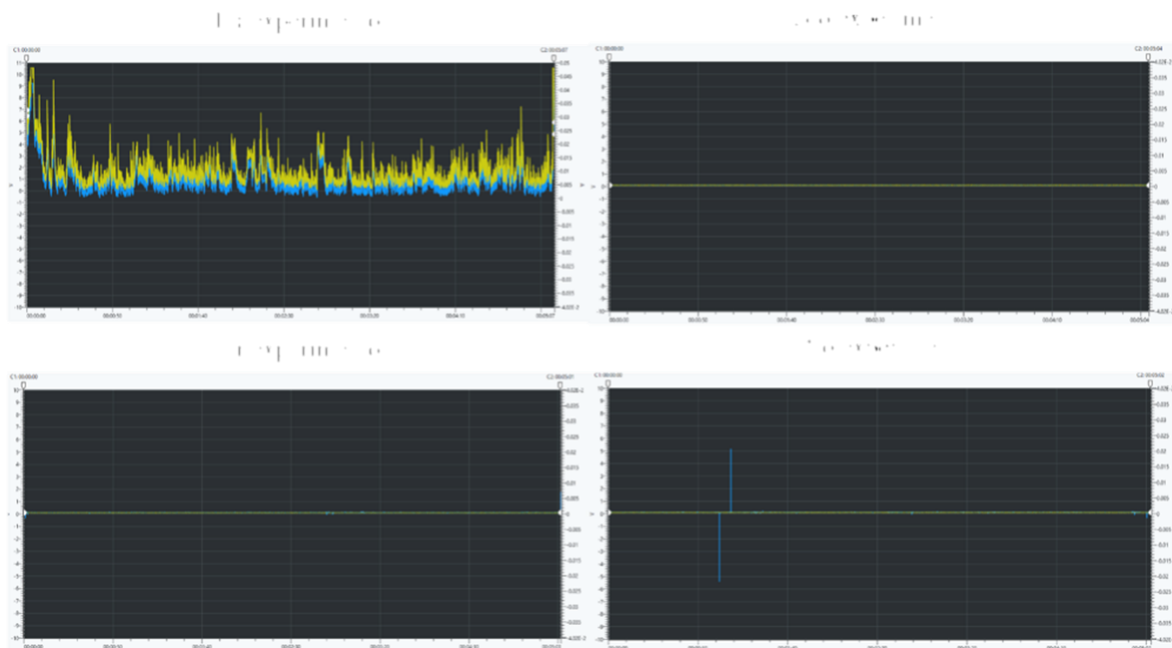


Imagen-A6. 21 Captura de las señales de generación de cada experimento

Discusión

Primer experimento:

Los valores de generación son considerables, por lo que se deben de analizar para conocer si con ellos se puede predecir un funcionamiento teórico posterior, mas allá de que si en este momento se puede almacenar esta energía. Estos valores pueden ser una base con la que se pueda teorizar algunas propuestas de utilización de esta energía, con vistas a que en un futuro se pueda solucionar su almacenamiento.

Segundo experimento:

Se pueden apreciar valores máximos y mínimos, pero sus variaciones son muy pequeñas, de 2mV de voltaje y 10 μ A de corriente eléctrica, por lo que pueden las variaciones del capacitor en si y no de la energía que esta recibiendo. Esto de momento asegura que no se esta cargando el súper capacitor.

Tercer experimento:

En este experimento si se pueden apreciar unos valores máximos y mínimos mas distantes, además de mostrar una tendencia de crecimiento, pero de forma demasiado lenta, lo cual no logra ser concluyente sobre si se esta cargando el súper capacitor, pero de una forma sumamente lenta. Esto deja abierta la posibilidad de lo que se necesita, es tener mas de un dispositivo para que se pueda cargar al súper capacitor

Cuarto experimento:

Los resultados son mínimamente superiores a los obtenidos en el tercer experimento, por lo que todavía no se puede concluir que se esta cargando el súper capacitor de forma tajante, esto no lleva a lo mismo que se discute en el tercer experimento.

Conclusiones

- ❖ *Los valores de generación en CD son considerables y se puede teorizar sobre seros*
- ❖ *La señal de salida del circuito no presenta suficiente variación para afirmar que se esta cargando el súper capacitor*
- ❖ *Se abre la posibilidad de que se necesiten mas de un dispositivo para generar la energía para cargar al capacitor*
- ❖ *Existe la posibilidad que el circuito de almacenamiento que se ha fabricado no sea el adecuado para cargar al capacitor con la energía que genera el dispositivo*

A6.7 Practica: Tercera prueba

Resumen

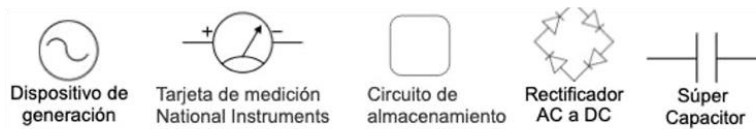
Prueba de generación de energía del dispositivo, donde se midió y se grabó esta señal para obtener sus valores de voltaje y corriente, así como conocer la posibilidad de almacenar esta energía.

Introducción

Esta tercera prueba consta de los siguientes 4 experimentos:

	Tiempo de impacto de las gotas	¿Qué se va a medir?
<i>Primer experimento</i>	5 minutos	Se mide la generación que tiene el dispositivo de forma cruda en CA, sin que ningún elemento intervenga entre la señal de salida del dispositivo a la tarjeta de medición.
<i>Segundo experimento</i>	5 minutos	Se mide la generación que se tiene después de que la señal de generación del dispositivo pasa por el elemento de rectificado que convierte la señal cruda de CA a CD.
<i>Tercer experimento</i>	5 minutos	Se conecta la señal que sale del diodo rectificador (CD) a la entrada del circuito de almacenamiento, conectando al mismo tiempo un súper capacitor a su salida. Se mide la señal del súper capacitor, para ver si se esta cargando.
<i>Cuarto experimento</i>	5 minutos	Se conecta la señal que sale del elemento de filtrado en CD directamente al súper capacitor, sin el circuito de almacenamiento, esto para ver si se puede cargar el súper capacitor de esta manera.

Símbolos



Circuitos

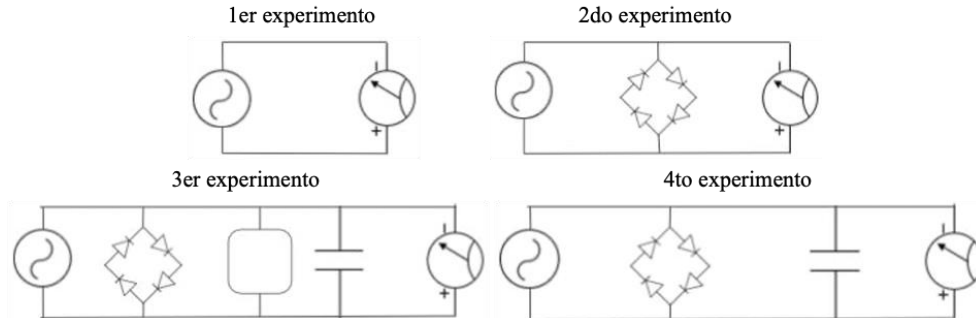


Imagen-A6. 22 Diagramas de los circuitos eléctricos de los cuatro experimentos de la segunda prueba

Procedimiento experimental

En esta prueba, se debe tomar en cuenta que en esta prueba la presión de la toma de agua, es un poco menor que en las pruebas anteriores, afectando el área de envergadura que tienen las gotas que se crean, esto en un principio parece no afectar, porque aun así se golpean todos los sensores, pero se debe tener mayor precisión en el manejo del aspersor.

Resultados

Primer experimento:

El dispositivo de generación produjo los siguientes valores de energía, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 23.

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	10.691V	-10.631V	2.07V
Corriente	44.588mA	-42.696mA	0.008289A

Segundo experimento:

En este segundo experimento se medirá la energía que genera el dispositivo cuando su señal pasa por un elemento de rectificado, convirtiéndola en corriente directa (CD), como ya se ha mencionado, esto se hace porque varias aplicaciones o elementos necesitan de este tipo de corriente, como por ejemplo motores, leds, sensores, etc. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 24.

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	10.791V	-10.49mV	2.957V
Corriente	42.55mA	-13.084μA	0.0119A

Tercer experimento:

En este experimento, se trató de almacenar la energía en CD a través del circuito de almacenamiento en el súper capacitor. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 25.

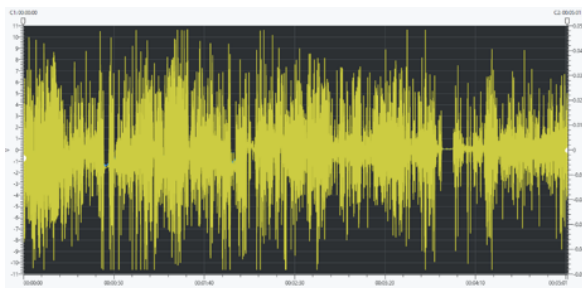
<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	222.64mV	219.68mV	0.2210V
Corriente	892.82 μ A	882.25 μ A	0.000888 ^a

Cuarto experimento:

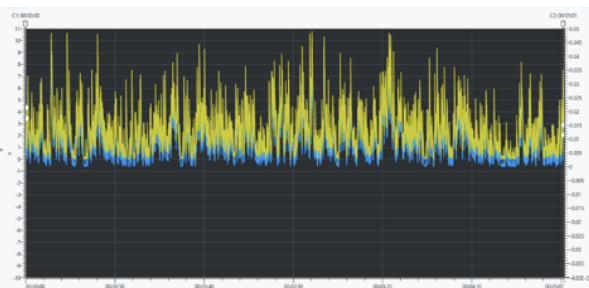
Se dejó de lado el circuito de almacenamiento, para conectar directamente la señal que proviene del rectificador en CD al súper capacitor y para verificar si existe algún cambio en su carga. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, la grafica de la señal se puede ver en la Imagen-A6. 26.

<i>Valores</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>RMS</i>
Voltaje	222.64mV	219.35mV	0.2209V
Corriente	1.3392mA	710.58 μ A	0.00095A

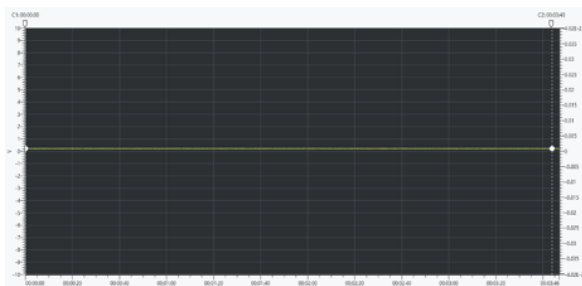
1er experimento



2do experimento



3er experimento



4to experimento

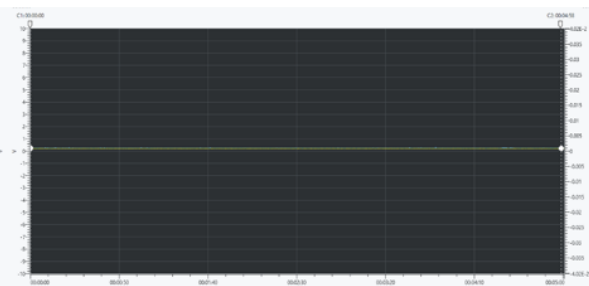


Imagen-A6. 27 Captura de las señales de generación de cada experimento

Discusión

Primer experimento:

En esta señal de energía aprecia una mayor estabilización en su gráfica que en pruebas pasadas, lo que resulta en una mayor precisión en la medición de sus valores. Los valores mínimos y máximo pueden no ser muy utiles para precisar la cantidad de energía generada, pero dan una idea de los picos que se pueden producir por el dispositivo. El dato con una mayor utilidad es el valor de RMS

tanto del voltaje como de la corriente eléctrica, estos valores son menores a los obtenidos en la primera prueba, pero se debe recordar que en la primera prueba el tiempo de generación fue de poco más de 8 minutos, con lo cual se comprueba que ***el sistema si genera mayor energía mientras mayor sea el tiempo que este expuesto al impacto de gotas***, por lo que en se puede decir que con este sistema ***a mayor duración que se tenga de una lluvia, mayor generación de energía se produce.***

Segundo experimento:

La señal de generación esta prácticamente centrada en el eje vertical, siendo esto benéfico porque ayuda a que los datos sean más fáciles de leer. En este caso los valores máximos y mínimos no son importantes, aunque se puede ver en la grafica que los picos de generación van más allá de los 5 volts, pero esto no quiere decir que este valor sea su media. El valor que da una mejor referencia sobre generación de energía producida es el valor RMS del voltaje y de la corriente eléctrica, estos valores son muy parecidos a los obtenidos en el primer experimento de esta segunda prueba, teniendo en cuenta que las condiciones son iguales, tanto en tiempo como en la forma de medir.

Tercer experimento:

En esta prueba hubo un contratiempo con la presión de la toma de agua, por lo que solo se pudo generar señal durante 3 minutos con 43 segundos, pero de igual forma, esto fue suficiente para comprobar que la carga del súper capacitor es muy pequeña, ***por lo que no se puede concluir que se estaba cargando.***

Cuarto experimento:

El súper capacitor practicante no cambio en su señal de salida, lo que confirma que no se ha podido almacenar la energía eléctrica que se ha generado, o al menos no de una forma realista. Esto nos lleva valorar los aspectos como el circuito de almacenamiento, el cual no cumplió su cometido, más allá de la propia señal de energía, la cual puede ser discutida si, por como son sus características y su comportamiento es o no aprovechable, ***pero por los valores que se alcanzan, se cree que el circuito tiene una mayor responsabilidad sobre el almacenamiento que la energía generada.***

Conclusiones

- ❖ ***El sistema genera mayor energía mientras mayor sea el tiempo que se este expuesto al impacto de gotas, por lo que se concluye que mientras mayor sea la duración de una lluvia, mayor generación de energía se produce.***
- ❖ ***La mayor generación de energía que se ha obtenido hasta ahora es la del segundo experimento de la tercera prueba, generándose en valor RMS, de 2.957V de voltaje y 0.0119A de corriente.***
- ❖ ***La carga que se le hizo al súper capacitor es demasiado pequeña, por lo que no se puede concluir que se estaba cargando. De esta manera y como paso en las pruebas pasadas, la energía generada que pasa por el circuito de almacenamiento, no puede cargar al súper capacitor de forma contundente.***
- ❖ ***Por los resultados obtenidos sobre el almacenamiento de la energía, se cree que el circuito utilizado es un factor determinante para no se pueda cumplir con esta meta. Esto se planteado porque, porque la señal cruda del dispositivo esta en CA y los métodos que se probaron para almacenarla tienen que pasar a CD por un rectificador, el cual se come una porción de la energía, que para estos valores que se están manejando, es una cantidad importante y, aun así, se generan valores importantes de energía.***

A6.8 Cálculos de la generación de energía producida

La mayor generación de energía obtenida fue el valor eficaz promedio RMS, *de 2.957V de voltaje y 0.0119A* de corriente eléctrica, esto en un tiempo de cinco minutos. Estos datos sirven para teorizar sobre la potencia obtenida en este lapso de tiempo, siendo la siguiente:

Potencia eléctrica = $V \cdot I$

$$P_{en_5min} = (2.957V) \cdot (0.0119A) = \mathbf{0.035105 \text{ Watts}}$$

Esta potencia se puede expresar de mejor forma, si se presenta como potencia por minuto o *watt·min*, por lo tanto, la potencia eléctrica promedio por minuto es igual a la potencia registrada de **0.035105 watts sobre el tiempo** en que se produjo (**5 minutos**), dando como resultado:

$$P = 0.007021 \text{ watts} \cdot \text{min}$$

Con esto se plantea lo siguiente, se considera que, si un solo dispositivo genera esta cantidad de energía, entonces dos generan el doble de energía, tres el triple y así sucesivamente, por lo tanto, si se desea una cantidad precisa de energía, entonces se debe calcular primero, cuantos dispositivos se necesitan para generar un **1 watt de potencia**. Si con 1 dispositivo se puede generar en 1 minuto 0.007021 watt·min, entonces, para generar un **1 watt·min** se necesita del siguiente numero de dispositivos (NºD):

$$N^{\circ}D = \frac{1}{0.007021} = 142.42 = 143 \text{ dispositivos}$$

De igual forma, si en 5 minutos con 1 dispositivo se generan 0.035105 watts, entonces para generar 1 watt en 5 minutos se necesita del siguiente numero de dispositivos (NºD):

$$N^{\circ}D = \frac{1}{0.035105} = 28.48 = 29 \text{ dispositivos}$$

Los 29 dispositivos generan alrededor de 1 watt en 5 minutos, entonces su generación expresada en watts·min es la siguiente:

$$\text{Generación de 29 dispositivos en 5 min} = 29 \cdot 0.035105 = 1.018 \text{ watts}$$

$$\text{La potencia de 29 dispositivos en watts} \cdot \text{min} = \frac{1.018}{5} = 0.2036 \text{ watts} \cdot \text{min}$$

De esto se hace la siguiente tabla, recordando que la conversión de 1 watts/min a 1 watts/hr es:

$$1\text{watt} \cdot \text{min} = 0.016666 \text{ watts} \cdot \text{hr}$$

Tiempo (minutos)	Generación eléctrica Watts	NºD para generar 1 watt	Potencia Watts·min	Potencia Watts·hr
1	0.007021	142.42 -> 143	0.007021	0.000117
5	0.035105	28.48 -> 29		
10	0.07021	14.24 -> 15		

Esta tabla presenta el numero de dispositivos que se necesitan para poder generar 1 watt de potencia en 1, 5, y 10 minutos respectivamente, presentando estos valores de tiempo debido a que es la duración que puede tener una lluvia. Para conocer cuantos dispositivos se pueden tener en un área

determinada, primero se mide el diámetro aproximado del dispositivo, el cual es de entre 20 a 22 centímetros, viéndose desde una vista superior, por lo que se puede estimar que, si se ve al dispositivo como una circunferencia de 23 cm de diámetro, entonces pueden caber dentro de 1 m², 16 dispositivos, esto se puede observar en la siguiente imagen:

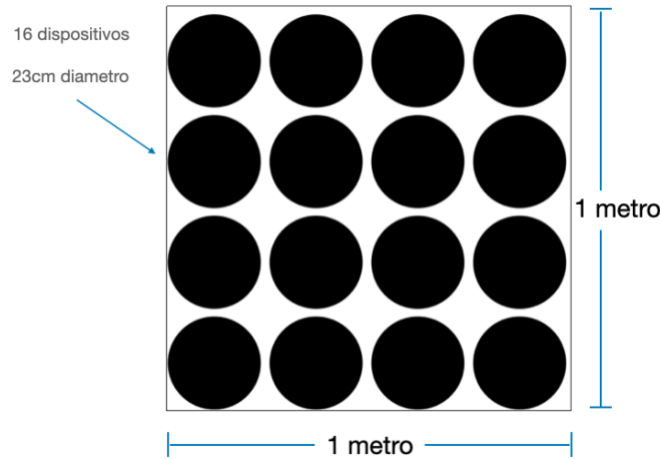


Imagen-A6. 28 Numero de dispositivos dentro de 1m²

Para tener una relación entre número de dispositivos y metros cuadrados, se divide la cantidad de dispositivos necesarios para producir **1 watt** entre el numero de dispositivos que caben en 1 m² (16).

<i>Nº de dispositivos para generar 1 watt</i>	<i>Metros cuadros necesarios para contener los dispositivos (en 1 m² caben 16)</i>	<i>Metros cuadrados exactos</i>	<i>Nº Dispositivos exactos</i>
142.4298533	8.901865831	9	144
28.48597066	1.780373166	2	32
14.24298533	0.890186583	1	16

La energía generada de esas cantidades de dispositivos en 1, 5 y 10 minutos es la siguiente:

<i>Nº Disp.</i>	<i>Tiempo de generación (minutos)</i>	<i>Generación eléctrica (Watts)</i>	<i>Potencia (Watts·min)</i>	<i>Potencia (Watts·hr)</i>
144	1	1.011024	1.011024	0.01685
32	5	1.12336	0.224672	0.00374
16	10	1.12336	0.112336	0.00187

Con esto planteado, se puede hacer una primera comparación de energía, de modo que, para tener la misma potencia o hacer funcionar algún dispositivito común, por ejemplo, para tener la misma potencia que un cargador de celular convencional con una potencia de 5 watts, si un dispositivo de generación de lluvia (DGL) produce 0.007021 *watts·min*, entonces se necesita el siguiente numero de dispositivos (NºD):

$$N^{\circ}D = \frac{5}{0.007021} = 712.14 = 713 \text{ dispositivos}$$

Numero de metros cuadrados requeridos

$$N^{\circ} m^2 = \frac{713}{16} = 44.56 = 45 m^2$$

De esta forma se puede hacer la siguiente tabla con los siguientes elementos¹⁰

<i>Aplicación</i>	<i>Potencia requerida (Watts)</i>	<i>Nº Disp. que se necesitan</i>	<i>Nº de m² ocupados</i>
Apple TV	3	428	27
Cargador estándar de celular	5	713	45
Humidificador	35	4986	312
Laptop	50	7122	446

Esta información se puede redondear, si se quiere comparar la potencia eléctrica que tiene el DGL con las fuentes energía renovables actuales, en sus versiones comerciales no industriales, (todas trabajando en condiciones optimas, con su generación máxima):

- *Paneles solares modernos (15% eficiencia)¹¹ = 150 watts por metro cuadrado*
- *Turbina de viento¹² (rotor de 120cm de diámetro) = 400 watts con vientos de 12.5 m/s*
- *Dispositivo de Generación por lluvia (DGL) = 0.112336 watts por metro cuadrado*

Derivado de la observación de estos valores, se puede ver que esta comparación es dispar, la generación de energía del DGL está muy por debajo de un panel solar o un generador de turbina eólica, así como también se esta por debajo de la energía requerida para que aparatos de uso común funcionen. ***Es por esto que la energía generada por el DGL debe de ser tomada en un nivel de micro generación, y no de una generación normal, por lo que las aplicaciones que se deseen dar deben estar en este terreno.*** Por esta razón, se plantea proponer como un primer uso a esta energía, el cargar baterías pequeñas de celular o de denominación AA, AAA, etc. así como hacer funcionar elementos que trabajen con estas cantidades bajas de energía, como sensores, antenas pequeñas, etc. Con esto en mente, se puede presentar la cantidad de DGL necesarios para generar los mili amperes que contiene una batería, haciéndose esto porque, comúnmente las baterías están expresadas por el numero de mili amperes que tienen de capacidad, por lo tanto, primero se calcula la cantidad de mili amperes (mA) que 1 dispositivo genera.

<i>Nº D.</i>	<i>Tiempo de lluvia (minutos)</i>	<i>Mili Amperes (mA)</i>	<i>Mili Ampere por minuto (mA·min)</i>
1	1	2.38	2.38
1	5	11.9	
1	10	23.8	

Entonces para poder tener una referencia del valor de los mili amperes producidos, se tienen los ejemplos de dos dispositivos comunes que almacenan energía haciendo referencia a la cantidad de mili amperes que su batería tiene de capacidad, estos dispositivos son:

¹⁰ Datos sacados de <https://www.daftlogic.com/information-appliance-power-consumption.htm>

¹¹ Datos de <https://www.solar-electric.com/learning-center/solar-insolation-maps.html/>

¹²Datos de <https://www.homedepot.com/p/Nature-Power-400-Watt-Marine-Grade-Wind-Turbine-Power-Generator-70500/203916953>

- iPhone 11 Pro con una batería de 3190mA
- Batería Energizer Accu Recarga Extreme AA de 2300mA

La cantidad de minutos que los N° D propuestos necesitan para poder generar la energía de las baterías

<i>N° Dispositivos</i>	<i>iPhone Pro 3190mA (minutos)</i>	<i>Pila AA 2300mA (minutos)</i>
1	1340.3	966.38
16	83.7	60.39
32	41.8	30.19
144	9.3	6.71

Con esto no se pretende usar una gran cantidad de dispositivos para poder generar la energía equivalente a la que una batería de celular o AA almacena, ya que es un escenario poco realista, debido a que se necesita de una gran cantidad de material y de un espacio que no cualquiera dispone, por esta razón se presenta un mejor escenario, mas apegado a la realidad de cualquier usuario, aun cuando esto es un caso hipotético, se puede ir dirigiendo hacia donde se debe ir. El escenario que tiene las características que mejor se pueden acoplar a cualquier circunstancia, tiene que ver con los minutos de duración que pueda tener cualquier lluvia, así como la cantidad de espacio que una casa o terreno puede tener para instalar varios DGL. Con esto en mente, se propone como un escenario realista el que una persona pueda usar 2 m² de superficie en su techo o en su jardín, por lo cual, en estos dos metros se pueden instalar 32 dispositivos, los cuales (como se menciona anteriormente) producirán **1.12336 watts en 5 minutos de lluvia de mediana intensidad**, lo cual también es factible, ya que las lluvias fácilmente pueden tener esa duración. En resumen, el escenario propuesto por usuario o en una mejor medida, por casa, es la siguiente:

<i>N° D</i>	<i>Área</i>	<i>Tiempo de lluvia (minutos)</i>	<i>Energía producida (watts)</i>	<i>Mili amperes producidos</i>	<i>Potencia (Watts·min)</i>
32	2 m ²	5	1.12336	380.8mA	0.22467

Con este escenario propuesto, se puede seguir con la intención de usar esta energía para cargar baterías de celular o AA, por lo que, para realizar dicho trabajo, se necesita de la siguiente cantidad de lluvias o de una lluvia de una duración de minutos de:

<i>32 GDL / 2 m²</i>	<i>3190mA del iPhone 11 Pro</i>	<i>2300mA de una Pila AA</i>
<i>N° de lluvias</i>	9	6
<i>N° de minutos en una sola lluvia</i>	41.8	30.19

Estos datos se toman como aceptables, debido a la etapa en que se encuentra el DGL, donde apenas se esta iniciando su desarrollo, por lo tanto, para poder ser un dispositivo de micro generación de energía de uso comercial, deberá ser equivalente a los sistemas o dispositivos de micro generación de otras fuentes, para que pueda ser un complemento en un sistema mayor, en el cual, cuando un dispositivo no produzca su generación media o máxima por la disminución de las condiciones con las que trabaja, por ejemplo, cuando la luz solar no irradia toda su potencia a las celdas solares por el clima o por la hora del día y en ese mismo momento empiece a llover, entonces se seguirá generando energía por el DGL. De esta forma, se debe de tener como meta a futuro el poder llevar al DGL a una generación de energía en el escenario propuesto, equivalente a lo que un dispositivo de micro

generación puede producir hoy en día (enero 2021), como por ejemplo el siguiente panel solar comercial de micro generación.

Panel solar¹³ = **5.2 W (potencia máxima en condiciones optimas de luz solar), a 12V con corriente que va de 0 a 433mA.**

Costo del dispositivo físico experimental (precios redondeados, a 2020 cuando se hizo el dispositivo)

A continuación, se presenta el costo que tuvo el dispositivo físico experimental de generación de lluvia, así como el calculo de lo que serian los 32 DGL empleados en el escenario propuesto, haciéndose esto, para dar una idea de donde se esta parado en términos económicos y como se deberá de bajar los costos a futuro para hacer más accesible el dispositivo.

<i>Material</i>	<i>Cantidad para 1 DGL</i>	<i>Costo de 1 DGL</i>	<i>Cantidad para 32 DGL</i>	<i>Costo de 32 DGL</i>
Material de impresión PLA	0.8-1 rollo	\$ 600	26-27 rollos	\$ 16 000
Film piezoeléctrico	1 hoja de film (para 1 DGL solo se usa 1/10 de hoja)	\$ 4 000	3 hojas de film	\$ 12 000
Aluminio de lata	2 latas	\$15	60 latas	\$450
Cables y conectores	10 jumpers + pines	\$50	Paquetes de jumpers + pines	\$1 200
Total		\$4 665		\$29 650

Se puede apreciar que el costo de un solo DGL fue de casi cinco mil pesos y que el costo del escenario propuesto es de alrededor de treinta mil pesos, el cual produce 1 watt de energía, por lo que se puede concluir que:

- ***El precio de 1 watt con el DGL experimental, tiene un valor aproximado de \$30 000.00 MXN***

Este valor sólo sirve como referencia, ya que este modelo es experimental y por ende el costo económico es alto, pero si se llega a desarrollar hasta el punto de hacer un prototipo completamente funcional, se puede llevar a una evaluación en su proceso de manufactura, para que se fabrique con técnicas industriales, con lo que se bajaría el precio notoriamente, al punto de poderlo comercializar a un precio competitivo. De la misma forma, si se quiere que se replique de forma individual para cada persona que tenga acceso a una impresora 3D, también se deberá evaluar su técnica y materiales de manufactura en una posterior iteración de diseño, por lo que también se pueden reducir costos de manera considerable.

¹³Datos de https://www.amazon.com.mx/Silicio-Policristalino-Alimentaci%C3%B3n-Cargador-Bater%C3%ADa/dp/B07D3VHSQR/ref=psdc_9687442011_t1_B07S1P67HL

Índice de Imágenes

<i>Imagen 1 Estructura de la producción de energía primaria en México (SENER, 2018)</i>	13
<i>Imagen 2 Gráfica del comportamiento del agua que cae sobre el territorio de la República Mexicana</i>	15
<i>Imagen 3 Precipitación pluvial anual, 2000-2015 (mm) (CONAGUA, 2016).</i>	16
<i>Imagen 4 Precipitación pluvial normal mensual, 1981-2010 (mm) (CONAGUA, 2016).</i>	16
<i>Imagen 5 Distribución de la precipitación pluvial: imagen de la izquierda representa el periodo de 1981-2010, imagen de la derecha representa el año 2015 (CONAGUA, 2016).</i>	17
<i>Imagen 6 Explicación gráfica del concepto de distribución del tamaño de gotas de lluvia (Schleiss, 2012).</i>	20
<i>Imagen 7 Acción de una gota de lluvia después de impactar con una superficie solida</i>	22
<i>Imagen 8 a) y b) muestran la forma esquemática del arreglo propuesto</i>	24
<i>Imagen 9 a) y b) son los dos tipos de aspas de motor analizado (Rosmin, Jauhari, Mustaamal, Husind y Hassane, 2014).</i>	24
<i>Imagen 10 Esquema del circuito eléctrico usado para rectificar la señal producida por un piezoeléctrico (Wong, Dahari, Manaf, & Miskam, 2014).</i>	29
<i>Imagen 11 Montaje del material piezoeléctrico: (a) en puente y (b) cantiléver (Wong, Dahari, Manaf y Miskam, 2014).</i>	30
<i>Imagen 12 Materiales piezoeléctricos utilizados, en la imagen a la izquierda (a) Piezoeléctrico de PZT V22B y V22BL, en la imagen de la derecha (b) Piezoeléctrico de PDVF “Meas LTD1-028k” (Viola, Romano, Miceli y Acciari, 2013).</i>	31
<i>Imagen 13 Dispositivo piezoeléctrico ‘Pro-Wave FS-2513P’ montado en cantiléver, posicionado debajo de una bureta (Adnan y Swingler, 2015).</i>	32
<i>Imagen 14 Perfil de salida de voltaje del dispositivo (Adnan y Swingler, 2015).</i>	32
<i>Imagen 15 Piezoeléctrico de tipo ‘buzz’ (Mecafenix, 2018).</i>	36
<i>Imagen 16 Esquema gráfico de un piezoeléctrico ‘bimorph’ como viga en cantiléver (Chattaraj & Ganguli, 2018), b) Esquema gráfico de los movimientos de flexión, torsión y estiramiento.</i>	37
<i>Imagen 17 Fotografías ilustrativas de la práctica con sensores piezoeléctricos tipo ‘buzz’, imagen arriba a la izquierda: base de impacto del piezoeléctrico, imagen de arriba al centro: gotero utilizado, imagen de arriba a la derecha: prueba de control del piezoeléctrico, imagen de abajo: modificación de la posición del piezoeléctrico sobre la base.</i>	59
<i>Imagen 18 Ejemplo de las mediciones tomadas con el osciloscopio cuando se generaba energía eléctrica por medio del impacto de gotas de agua sobre el sensor ‘buzz’</i>	60
<i>Imagen 19 Arreglo en serie de discos piezoeléctricos siendo golpeados por gotas de agua</i>	60
<i>Imagen 20 Diagrama esquemático de un sensor piezoeléctrico laminar de una capa empotrado en un extremo, siendo este accionado por una fuerza externa (Fu, Chen, & Bai, 2018).</i>	61
<i>Imagen 21 a) Gráfica de la señal dado por el accionar de un sensor tipo buzz, b) Gráfica del comportamiento de la señal eléctrica dada por el accionar de un sensor piezoeléctrico tipo laminar empotrado en cantilever (Adnan & Swingler, 2015).</i>	62
<i>Imagen 22 Fotografías del momento de impacto de una gota de agua sobre una lámina en cantiléver a) Posición inicial (posición cero), b) Posición máxima inferior (posición máxima negativa), c) posición máxima superior</i>	63
<i>Imagen 23 Imagen izquierda: Lámina de acero y film piezoeléctrico siendo sujetados por el soporte, imagen derecha: detalles de las conexiones eléctricas (piezas de metal) que están en contacto con el film piezoeléctrico para poder transmitir la energía generada.</i>	64
<i>Imagen 24 Modelo en software 3D de la lámina de soporte (arriba), las piezas de film piezoeléctrico (abajo a la izquierda) y el elemento de contrapeso (abajo a la derecha)</i>	66
<i>Imagen 25 Modelo en 3D del arreglo de los tres elementos principales trabajando en conjunto.</i>	66
<i>Imagen 26 Modelado en 3D de los elementos de sujeción ‘tapas’, en la imagen de la derecha se puede ver el par de tapas superior e inferior.</i>	66
<i>Imagen 27 Modelo 3D de los diez arreglos de film piezoeléctricos montados sobre la torre de soporte</i>	67
<i>Imagen 28 Fotografía del sensor laminar con lámina de aluminio de una lata de refresco como soporte.</i>	68
<i>Imagen 29 Esquema de la geométrica trapezoidal de un sensor laminar piezoeléctrico (Chattaraj & Ganguli, 2016).</i>	69
<i>Imagen 30 Imagen de las laminas usadas para experimentación con diferentes formas geométricas, se analizaron cómo piezo 1, piezo 2, piezo 3, piezo 4, piezo 5, piezo 6, representados en la imagen de izquierda a derecha.</i>	70

Imagen 31 Gráfica del piezoeléctrico con mejor desempeño, la forma geométrica fue rectangular de 42 mm X 12 mm	71
Imagen 32 Prueba impresa en 3D de la segunda iteración de diseño, de izquierda a derecha: sección de la torre base, tapa inferior, tapa superior, ensamble de las dos tapas dentro de la sección de la torre base vista frontal y trasera.	78
Imagen 33 Impresión 3D del modelo con tres sensores, b) Conexión con los pines soldados a las láminas de cobre	79
Imagen 34 a) Circuito representativo de la conexión en serie de los sensores, b) Captura de la señal de generación obtenida por los tres sensores conectados en serie y siendo accionados al mismo tiempo.	79
Imagen 35 Comparación de señales generadas por el sensor laminar, la parte de la izquierda muestra la señal sin ruido, y la parte de la derecha muestra la señal con ruido externo.	80
Imagen 36 Fotografía del sellado y aislamiento que se hizo, en la imagen de la izquierda se puede apreciar el sellado de la parte trasera de la sección de prueba, en la imagen superior derecha se observa el sellado que se hizo en los bordes con pegamento liquidado, en la imagen inferior derecha se pueden ver las ranuras entre componentes selladas con silicón.	80
Imagen 37 Fotografía de la sección de prueba impermeabilizada dentro de una tina de contención	81
Imagen 38 Modelo en CAD 3D de las tapas de sujeción en su nueva iteración de diseño, con la función añadida de ser un elemento del mecanismo de giro cierre con la torre base	82
Imagen 39 Modelo en CAD 3D del ensamble de las tapas con sus pestañas dentro de la torre de sujeción.	82
Imagen 40 Captura de las tapas inferior y superior impresas en 3D, mostrándose en la imagen de la derecha el correcto ensamble entre las dos partes.	83
Imagen 41 Impresión en 3D de la sección de la torre base con el orificio y los canales donde pasaran las pestañas	83
Imagen 42 Ensamble final del mecanismo de giro-cierre entre las tapas, el sensor y la torre base	83
Imagen 43 Fotografía de la conexión de la tapa de cierre superior (pieza blanca) y una pieza de prueba con cuerda externa (pieza verde).	84
Imagen 44 a) Detalles del interior de la torre de montaje, b) Impresión 3D de la torre base de montaje	85
Imagen 45 Modelo e impresión en 3D de la nueva iteración de diseño sobre las tapas de sujeción.	85
Imagen 46 Modelo en 3D del ensamble de la torre de montaje con su tapas inferior y superior.	86
Imagen 47 a) Fotografía del ensamble de las piezas, b) Fotografía del ensamble de dos torres de montaje.	86
Imagen 48 a) Fotografía de los elementos que contiene el sensor laminar, en la izquierda esta la lámina de aluminio, en el centro esta la cinta de aislar y en la derecha esta el film piezoeléctrico, b) Fotografía del proceso de recuperación del film piezoeléctrico de sensor deteriorado.	87
Imagen 49 a) Fotografía las tapas de presión con la lámina de cobre y los pines soldados, b) Fotografía de todo el ensamble	88
Imagen 50 Imagen del ensamble del conjunto de tapas de presión aprisionando el sensor laminar, ya adentro de la torre base y a medio giro de quedar en su posición final.	88
Imagen 51 Imagen de arriba a la izquierda: Captura de la señal producida por el sensor, imagen de arriba a la derecha: Medición de la señal de salida del diodo rectificador, imagen de abajo: Captura de la señal en el LED.	89
Imagen 52 Imagen de los elementos conectados para hacer prender un foco de LED.	89
Imagen 53 Las dos primeras de izquierda a derecha muestran el sellado en los elementos, las ultimas dos imágenes de izquierda a derecha muestran la forma en que se sumergió el ensamble sellado dentro de un contenedor con agua.	90
Imagen 54 Modelo físico del diseño final del sistema de generación de energía, vistas frontal y superior	91
Imagen 55 Diseño final del dispositivo de generación, y su espacio interior para el cableado y conexiones de sensores.	92
Imagen 56 Mediciones de los elementos del dispositivo	93
Imagen 57 Esquema grafico de las conexiones entre sensores	94
Imagen 58 a) Esquema del circuito de dos filas en serie de cinco sensores en paralelo, b) Medición promedio individual de los diez sensores.	96
Imagen 59 Fotografía del circuito de almacenamiento, diagrama del circuito en el anexo A6.2.	97
Imagen 60 Fotografías del ensamble final del dispositivo de generación	98
Imagen 61 Esquema de elementos para realizar las pruebas finales	100
Imagen 62 Fotografía del momento en que las gotas de lluvia impactan a los sensores del dispositivo de generación	100

Imagen 63 Fotografía de la creación de las gotas de lluvia, su distancia de recorrido y el momento de impacto sobre el dispositivo	101
Imagen 64 Fotografía de la nueva impermeabilización del dispositivo, una capa de grasa para bujías impide el paso del agua a las ranuras que dejan los ensambles de los elementos.	102
Imagen 65 Esquema de elementos para realizar la segunda prueba de generación.	103
Imagen 66 Fotografía del dispositivo cubierto con grasa de bujía después de haberle caído gotas de agua durante un minuto	103
Imagen 67 Gráfica de la señal obtenida a la salida del diodo rectificador en CD, las líneas amarillas representan al voltaje y su escala de medición reportada son de -10 a 11 volts, las líneas azules representan la corriente eléctrica y su escala de medición va de los $-4.02E-2$ a los 0.05 amperes.	104
Imagen 68 a) Gráfica de la señal cruda generada por la vibración de un sensor en CA, b) Gráfica de la señal generada por un sensor después de pasar por un diodo rectificador en CD.	105
Imagen 69 Súper capacitor que utilizará en la tercera prueba	106
Imagen 70 fotografía del instante en que las gotas de lluvia golpean al dispositivo en la tercera prueba	106
Imagen 71 Captura de la señal cruda en CA producida por el dispositivo	107
Imagen 72 Captura de la señal en CD del dispositivo después de ser rectificada	107
Imagen 73 Diagrama del área de 1 m ² cubierto de dispositivos de generación	110
❖ Generación de energía cruda en corriente alterna (CA). Ver Imagen 74.	121
❖ Generación de energía rectificada en corriente directa (CD). Ver Imagen 75.	121
Generación de energía cruda en CA del dispositivo final, mientras sus diez sensores son golpeados durante 5 minutos por lluvia artificial. Ver Imagen 76.	122
Generación de energía rectificada en CD del dispositivo final, mientras sus diez sensores son golpeados durante 5 minutos por lluvia artificial. Ver Imagen 77.	122

Índice de diagramas

Diagrama 1 Aspectos para tener como base en el desarrollo del diseño del sistema	26
Diagrama 2 Esquema de experimentación con los sensores piezoeléctricos	35
Diagrama 3 Esquema del planteamiento de desarrollar y compartir el diseño del dispositivo de generación como diseño abierto	42
Diagrama 4 Esquema de la codificación de un objeto a su código fuente para ser compartido.	43
Diagrama 5 Esquema de la partición modular de un objeto o producto y su valor como parte de su desarrollo	44
Diagrama 6 Nichos del diseño abierto y sus beneficios	44
Diagrama 7 Esquema de la utilización de los aspectos a considerar en el desarrollo del dispositivo	46
Diagrama 8 Inconvenientes en el desarrollo de un diseño abierto	47
Diagrama 9 Esquema de la creación de valor de un producto	49
Diagrama 10 Resumen de los seis aspectos que conforman el marco que define un proyecto de diseño abierto	56

Bibliografía

- Campos-Aranda. (2010). Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la república mexicana. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 179-188.
- Llasat, M. (2001). An objective classification of rainfall events on the bases of their convective features. Application to rainfall intensity in the north-east of Spain . *International Journal of Climatology*, 1385-1400.
- Chattaraj, N., & Ganguli, R. (2018). Performance improvement of a piezoelectric bimorph actuator by tailoring geometry. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 829-835.
- Chenaut, V. (2017). Impactos sociales y ambientales de la explotación de hidrocarburos en el municipio de Papantla, Veracruz (México). *e-cadernos CES*.

- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Chua, K., Hor, Y. F., & Lim, H. C. (2016). Raindrop Kinetic Energy Piezoelectric Harvesters and Relevant Interface Circuits: Review, Issues and Outlook. *Sensors & Transducers*, 1-15.
- Adnan, M., & Swingler, J. (2015). Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts. *Elsevier*.
- Balka, K. (2011). *Open Source Product Development The Meaning and Relevance of Openness*. Hamburg: Gabler Verlag.
- Bienes, R., Ruiz, M., Arévalo, D., Sastre, B., & Marqués. (2011). Distribución del tamaño de gota de una lluvia natural y su energía cinética.
- Bossink, B. (2017). Demonstrating Sustainable Energy; A review based model of sustainable energy demonstration projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1349-1362.
- Fu, H., Chen, G., & Bai, N. (2018). Electrode Coverage Optimization for Piezoelectric Energy Harvesting from Tip Excitation. *Sensors*, 804.
- Hassan, K. (2011). Application of rainfall intensity-kinetic energy relationship for soil loss prediction. *Mesopotamia J. of Agri*.
- IPCC. (2018). *Calentamiento global de 1,5 °C*. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Magaña, V. (17 de Agosto de 2011). *Urbanización y cambio climático regional: el caso del Valle de México*. Obtenido de CONAGUA: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/URBANIZACI%C3%93N%20Y%20CAMBIO%20CLIM%C3%81TICO%20REGIONAL.pdf>
- Mecafenix, I. (3 de Julio de 2018). *Ingeniería Mecafenix, la enciclopedia de la ingeniería*. Obtenido de Ingeniería Mecafenix: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensores/sensor-piezoelectrico/>
- Morarka, A., Ghaisas, S., & Date, A. (2016). Design of a High sensitivity fluid energy harvester. *1st International Conference on Energy and Power, ICEP2016*. Melbourne: Elsevier.
- Morgana, P., Yudoko, G., Akbar, A., & Dowaki, K. (2013). Community empowerment through appropriate technology: sustaining the sustainable development. *The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security SUSTAIN 2012*. Tokyo: Elsevier.
- Rosmin, N., Jauhari, A., Mustaamal, H., Husind, F., & Hassane, M. Y. (2014). Experimental study for the single-stage and double-stage two-bladed Savonius micro-sized turbine for rain water harvesting (RWH) system. *2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*. Malaysia: Elsevier.
- Schleiss, M. (2012). *Variability of the Rain Drop Size Distribution: Stochastic Simulation and Application to Telecommunication Microwave*. Suisse.
- SENER. (2018). *Balance Nacional de Energía 2018*. Ciudad de México: Dirección General de Planeación e Información Energéticas.
- Tang, Q., Wang, X., Peizhi, & He, B. (2016). A Solar Cell That Is Triggered by Sun and Rain. *Angewandte Chemie*, 5243-5246.
- UN. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Reino Unido: Oxford University Press.
- Viola, F., Romano, P., Miceli, R., & Acciari, G. (2013). *Harvesting rainfall energy by means of piezoelectric transducer*. Palermo: Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici Università degli Studi di Palermo.
- Weather-mx, & CONAGUA. (27 de Septiembre de 2020). *Weather-mx*. Obtenido de <https://www.weather-mx.com/es/mexico/ciudad-de-mexico-clima>
- Wong, C.-H., Dahari, Z., Manaf, A., & Miskam, M. A. (2014). Harvesting Raindrop Energy with Piezoelectrics: a Review. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*.
- Zyga, L. (2008). Rain Power: Harvesting Energy from the Sky. *phys.org*.