



Benemérita universidad autónoma de Puebla

Facultad de ciencias de la electrónica

“Cosechamiento de energía a partir de las vibraciones
de un motor de combustión interna basado en un
transductor piezoeléctrico”

Tesis

Que para obtener el título de:

Licenciatura en Ingeniería en sistemas automotrices

Presenta:

Fernando López García

Asesor de tesis:

Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro



Puebla, Pue., noviembre 2025



Agradecimientos

Me gustaría comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a mi familia y especialmente a mis padres, pues su amor incondicional y su constante apoyo en cada etapa de mi vida me permitió llegar hasta el final de este camino académico.

A mi asesor de tesis, el DR. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro, cuya experiencia y apoyo fue primordial para el desarrollo y realización de este trabajo. Al Ing. Rene Pacheco Luna y a mi compañero Antonio García Diaz por su valioso apoyo en la realización de pruebas dentro del laboratorio.

A la facultad de ciencias de la electrónica por proporcionarme los conocimientos necesarios para forjarme profesionalmente, además de gestar en mí una ambición constante por aprender, innovar y aportar soluciones dentro del campo automotriz.

Finalmente, a mi querida Universidad Autónoma de Puebla, pues me brindo la oportunidad de crecer de manera académica y profesional, pero sobre todo como persona.



Resumen

El presente trabajo describe la implementación de un sistema de cosechamiento de energía eléctrica en un motor de combustión interna, para el aprovechamiento de las vibraciones del motor, así como los movimientos del mismo vehículo, para convertir dichos movimientos en energía eléctrica. Esto mediante la utilización del transductor piezoeléctrico (S118-J1SS-1808YB) colocado en configuración de viga en voladizo, montado en una parte del motor que le permita vibrar libremente.

Como primer paso se realizaron mediciones experimentales de las vibraciones en el motor del vehículo de pruebas Beetle con un acelerómetro MPU6050, con el objetivo de tener presente el comportamiento en un régimen de ralentí y cuando se encuentra en movimiento. Posteriormente una vez seleccionado el dispositivo piezoeléctrico gracias a su accesibilidad y características, se utilizó el software de Solid Works para predecir y analizar su comportamiento dinámico cuando se le agrega peso, así como su frecuencia natural y sus modos de vibración.

Adicionalmente se realizaron pruebas experimentales con un sistema vibratorio para identificar la mejor configuración que permita una mayor generación de energía eléctrica. Además, gracias a los resultados de la prueba anterior, se desarrolló una estructura pendular colocada en el extremo libre del transductor que le permitiría obtener una mayor flexión y contribuir al efecto piezoeléctrico. Para un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica generada por el transductor, se implementó un circuito rectificador de onda completa, encargado de convertir la señal alterna producida por el transductor en corriente continua.

Finalmente, se instaló el sistema de cosechamiento de energía eléctrica en el motor del automóvil de pruebas, donde se realizaron pruebas y mediciones tanto en ralentí como cuando el vehículo se encuentra en movimiento, esto con el objetivo de confirmar el funcionamiento del sistema y validar su implementación en entornos automotrices y servir como base para futuros proyectos e investigaciones.



Abstract

This project describes the implementation of an electrical energy harvesting system in an internal combustion engine. This system harnesses engine vibrations and vehicle motion to convert them into electrical energy. This is achieved by using a piezoelectric transducer (S118-J1SS-1808YB) placed in a cantilever beam configuration, mounted on a part of the engine that allows it to vibrate freely.

As a first step, experimental vibration measurements were made on the engine of the Beetle test vehicle using an MPU6050 accelerometer, with the aim of taking into account its behavior at idle speed and while in motion. Once the piezoelectric device was selected due to its accessibility and features, Solid Works software was used to predict and analyze its dynamic behavior when weight is added, as well as its natural frequency and vibration modes.

Additionally, experimental tests were conducted with a vibratory system to identify the best configuration for maximum electrical energy generation. Furthermore, thanks to the results of the previous test, a pendulum structure was developed, placed at the free end of the transducer, which would allow it to achieve greater deflection and contribute to the piezoelectric effect. To better utilize the electrical energy generated by the transducer, a full-wave rectifier circuit was implemented, responsible for converting the alternating current signal produced by the transducer into direct current.

Finally, the electrical energy harvesting system was installed in the engine of the test vehicle, where tests and measurements were performed both at idle and while the vehicle was moving. This was done to confirm the system's operation and validate its implementation in automotive environments, serving as a basis for future projects and research.



Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen	3
Abstract.....	4
Lista de tablas.....	7
Lista de Figuras	8
Glosario.....	12
Capítulo 1. Introducción.....	14
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Justificación	16
1.3 objetivo general.....	17
1.4 objetivos específicos	18
1.5 Hipótesis.....	18
Capítulo 2. Piezoelectricidad como fuente de generación de energía eléctrica	19
2.1 Piezoelectricidad.....	20
2.1.1. Principios físicos de la piezoelectricidad	21
2.1.2 Efecto positivo e inverso	22
2.1.3 Constantes piezoeléctricas.....	23
2.1.4 Materiales piezoeléctricos	24
2.2. Configuración del transductor piezoeléctrico	27
2.2.1 Transductor S118-J1SS-1808YB	28
2.2.2 Geometría tipo viga en voladizo	30
2.2.3 Vibración aplicada a una viga en voladizo	32
2.2.4 Masa colocada como péndulo	36
2.3 Circuito rectificador de onda completa.....	37



2.3.1 Principio de funcionamiento	38
2.4 Estado del arte	40
Capítulo 3. Desarrollo del proyecto.....	45
3.1 Mediciones de vibración del motor del auto de pruebas Beetle	46
3.2 simulación de la deformación del transductor piezoeléctrico (S118-J1SS-1808YB).52	
3.2.2 Análisis de frecuencia	59
3.3 Cálculos analíticos de la flexión del transductor piezoeléctrico.....	61
3.4 Pruebas de transductor piezoeléctrico en un sistema vibratorio	65
3.5 Diseño de sistema pendular para el transductor piezoeléctrico	72
3.5.1 Parámetros del péndulo.....	74
3.5.2 Simulación en SolidWorks del transductor piezoeléctrico incorporando el sistema pendular	77
3.6 Incorporación de circuito rectificador de onda completa	79
Capítulo 4 Implementación del sistema de cosechamiento de energía en el motor del auto de pruebas Beetle.	86
4.1 Sistema de cosechamiento de energía eléctrica sometido a pruebas con el vehículo en movimiento.....	89
4.1.1 Prueba del funcionamiento del sistema de cosechamiento de energía eléctrica en otro vehículo	94
4.1.2 Prueba del funcionamiento del sistema de cosechamiento de energía eléctrica utilizando un super capacitor.	96
4.2 Resultados	99
4.3 comparación con el estado del arte.....	104
Capítulo 5. Conclusiones.....	107
Trabajos futuros.....	109
Bibliografía.....	110



Lista de tablas

Tabla 2.1 Parámetros y especificaciones del transductor S118-J1SS-1808YB, recuperado y adaptado de [28].....	29
Tabla 2.2 Valor de frecuencias en el vehículo de pruebas Beetle	42
Tabla 3.1 Frecuencias obtenidas del estudio de frecuencia realizado en SolidWorks con el modelo del transductor piezoeléctrico detallado.....	61
Tabla 3.2 Valores de corriente, voltaje t potencia obtenidos de cada resistor probada	81
Tabla 4.1 Datos recuperados de las pruebas realizadas con el sistema de cosechamiento de energía eléctrica con el vehículo de pruebas Beetle en movimiento	99
Tabla 4.2 Posibles dispositivos que pueden ser alimentados por el sistema de cosechamiento de energía eléctrica, mostrando un valor aproximado del voltaje que necesitan para funcionar correctamente.....	103
Tabla 4.3 Comparación de proyectos del estado del arte	104

Lista de Figuras

Figura 2.1. Esquema del efecto piezoeléctrico en red cristalina sin deformación. Adaptado de [14].	21
Figura 2.2. Esquema del efecto piezoeléctrico en red cristalina con deformación. Adaptado de [14].	22
Figura 2.3 Dimensiones en mm del transductor S118-J1SS-1808YB [JPG] [28].	29
Figura 2.4 Masa colocada en el extremo libre de una viga en voladizo [JPG] recuperado de [30].	30
Figura 2.5 Puente de diodos que rectifica una onda senoidal en una señal positiva adaptado de [42].	39
Figura 3.1 Acelerómetro MPU6050 y dirección de los ejes [47].	46
Figura 3.2 Acelerómetro MPU 6050 colocado en una parte del motor del vehículo de pruebas Beetle.	47
Figura 3.3 Arduino Uno colocado en una parte fija del auto de pruebas Beetle.	47
Figura 3.4 a) Graficas de las pruebas del motor en ralentí	48
Figura 3.4 b) Graficas de las pruebas del motor en ralentí	48
Figura 3.4 c) Graficas de las pruebas del motor en ralentí	48
Figura 3.5 a) Graficas de la prueba al motor cuando se aplican revoluciones.	49
Figura 3.5 b) Graficas de la prueba al motor cuando se aplican revoluciones.	49
Figura 3.5 c) Graficas de la prueba al motor cuando se aplican revoluciones.	49
Figura 3.6 a) Graficas de las vibraciones de las pruebas del automóvil de pruebas en movimiento.	50
Figura 3.6 b) Graficas de las vibraciones de las pruebas del automóvil de pruebas en movimiento	50
Figura 3.6 c) Graficas de las vibraciones de las pruebas del automóvil de pruebas en movimiento	51
Figura 3.7 Capas de los materiales en el diseño del transductor piezoeléctrico en SolidWorks.	53
Figura 3.8 Diseño simple del transductor piezoeléctrico en SolidWorks	54
Figura 3.9 Resultados de las tensiones en el modelo básico Transductor piezoeléctrico en SolidWorks.	54
Figura 3.10 Desplazamiento de la flexión del modelo base del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks.	55



Figura 3.11 Deformaciones unitarias del modelo base del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks.....	56
Figura 3.12 Transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YB diseñado y ensamblado en SolidWorks.....	57
Figura 3.13 Resultados de las tensiones del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks ..	57
Figura 3.14 Desplazamiento de la flexión del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks ..	58
Figura 3.15 Deformaciones unitarias del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks	58
Figura 3.16 Primer modo de vibración del transductor piezoeléctrico simulado en SolidWorks sin peso adicional (frecuencia natural = 65.47 Hz)	60
Figura 3.17 Primer modo de vibración del transductor piezoeléctrico simulado en SolidWorks con 5 g en el extremo libre (frecuencia natural = 66.26 Hz)	60
Figura 3.18 Bocina utilizada para las pruebas de vibración	66
Figura 3.19 Fotografía tomada del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM montado en la bocina para la realización de las pruebas de vibración	66
Figura 3.20 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del osciloscopio en la prueba del transductor sin peso.	67
Figura 3.21 Fotografía tomada del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con peso en el extremo voladizo, montado en la bocina para la realización de las pruebas de vibración.....	68
Figura 3.22 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del osciloscopio en la prueba del transductor con peso.	68
Figura 3.23 Fotografía de la adición del resorte debajo del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM	69
Figura 3.24 Fotografía del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con peso en el extremo voladizo, montado en la bocina para la realización de las pruebas de vibración.	69
Figura 3.25 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con un resorte implementado y peso en el extremo voladizo del sensor	70
Figura 3.26 Fotografía del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con peso agregado tipo péndulo.....	71
Figura 3.27 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con peso tipo péndulo	71
Figura 3.28 Diseño de la estructura pendular diseñada en SolidWorks	72
Figura3.29 Piezas de la estructura péndula ya fabricadas	74



Figura 3.30 Colocación del sistema pendular al transductor piezoeléctrico	76
Figura 3.31 Deflexión mostrada por el transductor piezoeléctrico cuando se le fue colocado el sistema pendular.....	77
Figura 3.32 Transductor piezoeléctrico junto con la estructura pendular en SolidWorks...	78
Figura 3.33 Primer modo de vibración del transductor piezoeléctrico junto con la estructura pendular en SolidWorks	78
Figura 3.34 Circuito rectificador de onda completa realizado en TinkerCad	80
Figura 3.35 Circuito rectificador de onda completa realizado en Multisim.....	81
Figura 3.36 Señales de entrada y de salida del circuito rectificador de onda completa con una resistencia de 10 Ω	82
Figura 3.37 Señales de entrada y de salida del circuito rectificador de onda completa con una resistencia de 20K Ω	82
Figura 3.38 Grafica de la relación entre potencia y valor de resistencia	83
Figura 3.39 Conexión ilustrativa del transductor piezoeléctrico al puente de diodos.....	84
Figura 3.40Circuito rectificador de onda completa realizado en protoboard conectado al transductor piezoeléctrico.	84
Figura 4.1 Esquema de la implementación del sistema en el motor del auto de pruebas Beetle.....	86
Figura 4.2 Fotografía de la colocación del transductor piezoeléctrico con el sistema pendular acoplado a su extremo libre, en una parte del motor del vehículo de pruebas Beetle.....	87
Figura 4.3 Fotografía de la instalación del circuito rectificador de onda completa en el motor del vehículo de pruebas Beetle.	87
Figura 4.4 Fotografía del osciloscopio utilizado para las pruebas en el vehículo de pruebas Beetle.....	88
Figura 4.5 Señal de entrada y de salida del sistema de cosechamiento de energía eléctrica cuando el motor de encuentra en ralentí	89
Figura 4.6 Recorrido realizado dentro de CU	90
Figura 4.7 Señales recuperadas de la prueba de aceleración del automóvil de pruebas Beetle.....	91
Figura 4.8 Grafica del momento en el que el vehículo de pruebas Beetle.	91
Figura 4.9 Señal del vehículo de pruebas Beetle cuando se dio un giro pronunciado a la derecha.....	92



Figura 4.10 Señal registrada de las pruebas con el vehículo de pruebas Beetle cuando se expuso a movimientos bruscos	93
Figura 4.11 Voltaje de la batería recargable AA antes de conectarse al sistema de cosecha de energía eléctrica.	94
Figura 4.12 Instalación del sistema de cosechamiento de energía eléctrica con una batería para verificar su funcionalidad	95
Figura 4.13 Tiempo en que se realizó la prueba	95
Figura 4.14 Voltaje final de la batería una vez que se colocó en el sistema de cosecha de energía eléctrica	96
Figura 4.15 Voltaje inicial del super capacitor	97
Figura 4.16 sistema de cosecha de energía eléctrica colocado en el motor del automóvil implementando un super capacitor.	97
Figura 4.17 Voltaje generado y almacenado en el super capacitor gracias al sistema de cosecha de energía eléctrica.	98
Figura 4.18 Consumo de potencia en varias aplicaciones y densidades para varias fuentes de energía, Imagen recuperada de [51].....	102



Glosario

Acelerómetro: Dispositivo que mide la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura.

Corriente alterna: Es un tipo de electricidad donde la dirección del flujo de los electrones cambia periódicamente, creando una onda sinusoidal que oscila entre polaridades positivas y negativas.

Corriente directa: Es un tipo de flujo eléctrico donde los electrones se mueven constantemente en una sola dirección, desde un polo negativo a uno positivo.

Deformación mecánica: Cambio en la forma o el tamaño de un material debido a fuerzas externas o cambios de temperatura.

Diodo: Componente electrónico semiconductor que permite que la corriente eléctrica fluya en una sola dirección, actuando como un interruptor unidireccional.

Hercios: Unidad de medida de la frecuencia, que indica el número de repeticiones de un ciclo o evento en un segundo.

Módulo de Young: Es una propiedad dinámica de los materiales que sirve para medir su rigidez y tenacidad.

Péndulo: Objeto que oscila regularmente al estar suspendido de un punto fijo, como una masa en un hilo o varilla.

Piezolectricidad: Propiedad que tienen ciertos materiales, especialmente cristales, de generar una carga eléctrica cuando se les aplica presión mecánica.

Puente de diodos: Circuito electrónico usado en la conversión de corriente alterna en corriente continua.

Rigidez elástica: Medida de la resistencia de un objeto deformable a ser deformado por una fuerza.

RPM: Revoluciones por minuto, una unidad de medida que indica la velocidad de rotación de un objeto.



Transductor: Dispositivo que convierte una forma de energía en otra, como la presión en una señal eléctrica o las ondas sonoras en una señal eléctrica.

Tensión mecánica: Magnitud que representa la fuerza interna por unidad de área dentro de un cuerpo, generada por cargas externas, y se mide en unidades de presión.

Tensión eléctrica: También conocida como voltaje, es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito.

Vibración natural: Movimiento oscilatorio espontáneo de un cuerpo elástico, que ocurre a una frecuencia específica llamada frecuencia natural, sin estar sujeto a fuerzas externas o amortiguadores.

Viga en voladizo: Elemento estructural que se extiende horizontalmente con un solo apoyo en un extremo, dejando el otro completamente libre, como un balcón o un puente que se proyecta sin soportes debajo.



Capítulo 1. Introducción

En el sector automotriz ha habido una creciente demanda energética y una necesidad de aprovechar los recursos disponibles, lo que ha impulsado la búsqueda de sistemas o tecnologías que permitan la recuperación y reutilización de la energía que se desperdicia en diversos sistemas mecánicos. Uno de los principales problemas es la significativa pérdida de energía en los motores de combustión interna, pues según estudios, entre el 40% y 50% de la potencia generada por el motor de combustión interna se transforma en energía mecánica, un 30 % se pierde debido a la fricción y el resto en forma de calor, lo que la transforma en energía degradada [1] [2]. Las vibraciones mecánicas de igual manera, se podría considerar como una pérdida de energía inevitable, pues dichas vibraciones pueden tener efectos en la alineación de componentes, así como su balanceo, lo que genera un desgaste debido a la fricción de los mismos componentes [3].

Un motor de combustión interna, debido a su naturaleza, tiende a generar vibraciones constantes, sin embargo estas vibraciones pueden representar una oportunidad para ser transformadas en energía eléctrica aprovechable, mediante un dispositivo de recuperación de energía, ahí es donde entran los transductores piezoeléctricos, pues este tipo de dispositivos están conformados por varias secciones de un cristal monocristalino que cuando son sometidos a ciertos esfuerzos mecánicos generan corriente eléctrica, además de que este tipo de dispositivos ayudan a medir presión, aceleración, tensión y fuerza [4] [5]. Para este proyecto de tesis se plantea la utilización de un sensor piezoeléctrico para aprovechar esas vibraciones, abriendo puertas a futuras aplicaciones en el vehículo.

Dicho lo anterior, este trabajo se centra en implementar, analizar y evaluar el desempeño de un transductor piezoeléctrico puesto como viga en voladizo en el motor de un automóvil, para que las vibraciones generadas por este se puedan transformar dichas vibraciones propias del motor en energía eléctrica. Se evaluó de manera cuantitativa el comportamiento del sistema bajo distintas frecuencias y cargas, lo que permitió hacer una hipótesis sobre su viabilidad en el ámbito automotriz. Además, se busca sentar las bases para futuros proyectos, donde la



energía obtenida pueda utilizarse para cargar alguna batería por ejemplo o incluso alimentar componentes de bajo consumo. Así este trabajo no solo puede abordar un reto tecnológico, si no que de igual forma se enfoca en la necesidad de avanzar hacia alternativas energéticas sostenibles en el área automotriz.

1.1 Planteamiento del problema

La problemática que se abarca en este trabajo se enfoca en el aprovechamiento de la energía generada por las vibraciones de un motor de combustión interna, esto debido a todos los movimientos mecánicos de las piezas internas de este. La transformación de esta energía vibratoria en una forma útil no solo podría generar una mejora energética, sino además de contribuir al desarrollo de sistemas más sostenibles.

En la actualidad ha habido un creciente interés en la optimización y sostenibilidad de los diferentes sistemas con los que cuenta un automóvil, la búsqueda de soluciones que nos permitan tener un mejor aprovechamiento de la energía que no se aprovecha del automóvil toma relevancia. Los sensores piezoeléctricos son capaces de generar energía eléctrica a partir de deformaciones mecánicas, que en este caso serían las vibraciones, lo cual esto surge como una opción viable para para capturar estas energías no aprovechadas que, en este caso, el de un motor de combustión interna.

El aprovechamiento de estas energías vibratorias se vuelve un tema a considerar debido a la demanda energética y optimización de los sistemas del automóvil. Las vibraciones que genera un motor de combustión interna ya han sido más que estudiadas y en general no causan problemas a componentes cercanos a estos y debido a esto, se puede colocar un dispositivo para la conversión esta energía vibratoria en energía eléctrica, esto con el objetivo de asentar las bases además de evaluar su viabilidad como una fuente de energía adicional para algún uso complementario del automóvil sin agregar complejidad al sistema ni peso significativo.



1.2 Justificación

La constante búsqueda de alternativas energéticas que sean sostenibles en el sector automotriz ha ganado bastante relevancia. Es sabido que un porcentaje de energía generada por el motor de combustión interna se pierde en forma de calor o fricción, además, un punto a considerar y tomando en cuenta que un motor de combustión interna es un ambiente dinámico, son las vibraciones que, lejos de poder verse como una pérdida de energía, tienen un potencial para que dicha energía pueda ser transformada en energía eléctrica. La creciente demanda de sistemas o dispositivos que sean autoalimentados toma relevancia, pues según un proyecto realizado en el instituto de investigaciones de España, se comenta que la instalación de algún dispositivo o algún sistema adicional puede ser intrusivo, además necesita algún tipo de alimentación, lo cual podría llevar a añadir cableado o recablear todo el sistema ya existente, lo que podría llevar a complicaciones [6].

Tomando en cuenta lo anterior, los transductores piezoeléctricos pueden ser una solución tecnológica a tomar en cuenta, ya que gracias a sus propiedades permiten transformar las excitaciones mecánicas (como lo son las vibraciones de un motor de un auto) en energía eléctrica de manera directa, lo que nos indica que no requieren de fuentes de alimentación externa, además de que dichos sensores son altamente sensibles, compactos y son capaces de operar en condiciones bastante exigentes. Este trabajo propone la implementación y análisis de un transductor piezoeléctrico (S118-J1SS-1808YB) montado como viga en voladizo en el motor de un automóvil, esto surge debido a la geometría del sensor y que esta configuración permitiría inducir deformaciones en el sensor, utilizando el efecto gravitacional, así como las vibraciones del motor. El objetivo no es únicamente demostrar la conversión de las vibraciones en energía eléctrica, si no de igual manera poder analizar de manera experimental el comportamiento que tiene el transductor y poder evaluar su viabilidad. Para ello, se pretende la utilización del software SolidWorks para el análisis de deformación del sensor y el estudio de frecuencia de la pieza, además de realizar pruebas y experimentos en el laboratorio automotriz (EMA7) utilizando una bocina para inducir vibraciones controladas al sensor piezoeléctrico



con distintas masas, así como montando el sensor directamente en el motor del Beetle de pruebas del laboratorio.

Esto no solo podría generar datos confiables, sino que de igual manera ayudaría a tener bases para aplicaciones futuras en otros contextos donde existan vibraciones constantes. Desde el punto de vista ambiental, esto abre la posibilidad de que sensores o diferentes tipos de dispositivos electrónicos de bajo consumo no dependan de una fuente de alimentación externa. En el apartado económico, permitiría tener un sistema compacto, funcional y barato para su implementación sin tener la necesidad de modificar los componentes del vehículo.

Este proyecto no solo servirá como base para futuras investigaciones o trabajos que estudiantes u organizaciones podrían realizar, si no que de igual forma busca la necesidad de tener una solución más practica para el aprovechamiento de las vibraciones de un motor de combustión interna convirtiéndolas en energía eléctrica para que puedan ser aprovechadas. Con la implementación de un sensor piezoeléctrico en el motor de combustión interna, demostraría que las vibraciones que generan los motores de los automóviles, pueden convertirse en oportunidades para el desarrollo de sistemas eficientes, sostenibles y autónomos. Además de contribuir como fuentes secundarias de alimentación.

1.3 objetivo general

Implementar un sistema de cosecha de energía para el aprovechamiento de las vibraciones de un motor de combustión interna de un automóvil mediante la integración y análisis de un sensor piezoeléctrico puesto como viga en voladizo y evaluar su potencial aplicación para la recuperación de energía.



1.4 objetivos específicos

1. Modelar y simular el sensor piezoeléctrico en SolidWorks configurado como viga en voladizo, con el fin de poder analizar su comportamiento en condiciones de flexión y vibración.
2. Realizar cálculos teóricos que permitan analizar los resultados obtenidos en las simulaciones, evaluando la deflexión que tendrá el sensor, la frecuencia natural y el voltaje a generar.
3. Llevar a cabo pruebas experimentales en el laboratorio, mediante la utilización de un sistema de vibración como una fuente de vibración y variando distintas masas de pruebas acopladas al sensor, para determinar su desempeño eléctrico.
4. Diseñar e implementar una estructura mecánica para que el sensor piezoeléctrico se acople a las frecuencias de vibración del motor del auto de pruebas Beetle. Además de incorporar el circuito electrónico de acondicionamiento para determinar los valores de voltaje.
5. Analizar los valores de voltaje y potencia generados por el sistema de cosechamiento de energía propuesto, colocado como viga en voladizo así cuando el vehículo de pruebas se encuentre en movimiento y evaluar la viabilidad del sistema en la recuperación de energía.

1.5 Hipótesis

En este apartado se plantea la hipótesis del trabajo mediante el análisis y montaje de un transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YB para observar la eficiencia en la conversión de energía vibratoria en energía eléctrica. La implementación de un transductor piezoeléctrico configurado como viga en voladizo al cual se expone a las vibraciones de un motor de combustión interna permitiría recuperar un aproximado de medio voltaje en un manejo normal del automóvil, sin necesidad de hacer grandes modificaciones al automóvil, además de asentar las bases para futuros proyectos e investigaciones.



Capítulo 2. Piezoelectricidad como fuente de generación de energía eléctrica

En este capítulo se aborda principalmente en la descripción, importancia y aprovechamiento de la piezoelectricidad como una fuente de generación de energía eléctrica dentro de distintas áreas, sobre todo la automotriz. La piezoelectricidad se centra principalmente en la utilización de materiales específicos como lo es el cuarzo, polímeros, entre otros, que generan cargas eléctricas cuando se someten a tensiones mecánicas, ya sea presión, deformaciones o cuando se hacen vibrar [7].

La piezoelectricidad se ha demostrado como un elemento para el desarrollo de distintos componentes de medición como sensores, actuadores, etc. La piezoelectricidad representa una vía para el diseño de sistemas y soluciones innovadoras para distintos campos. Un punto a considerar es que los automóviles siempre están sometidos a vibraciones, ya sea porque están en contacto con el pavimento, hasta el mismo funcionamiento del motor de combustión interna, además de que la industria automotriz siempre ha buscado la forma de hacer los automóviles más eficientes que los de generaciones anteriores, esto nos lleva a considerar el uso de tecnología piezoeléctrica para aprovechar dichas vibraciones y complementar sistemas de bajo consumo en el auto. A diferencia de otro tipo de tecnología como lo puede ser la solar o eólica, la piezoelectricidad puede aprovechar un recurso permanente del auto, que son las vibraciones.

Tomando en cuenta lo anterior, el uso de un transductor piezoeléctrico es una buena idea, pues en general tienen diseños compactos, no son necesariamente costosos y pueden integrarse fácilmente a otras estructuras sin necesidad de modificar dichas estructuras. Por otro lado, aunque tengan un gran potencial, la energía que pueden generar los materiales piezoeléctricos es muy baja, son pulsos de alto voltaje que solo pueden alimentar un dispositivo de bajo consumo como lo puede ser algún otro sensor o hasta un led [7].



2.1 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad se trata de un fenómeno mediante el cual ciertos materiales (como lo son los cristales de cuarzo), cuando son sometidos a tensiones mecánicas ya sean deformaciones, compresiones o incluso cuando se les somete a vibraciones, alcanzan en su masa una polarización eléctrica. Este efecto se manifiesta con la aparición de una diferencia de potencial y cargas eléctricas en la superficie del material, lo que conlleva a un desbalance interno en la distribución de las cargas de la estructura cristalina [8].

El efecto piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por Pierre y Jaques Curie, mediante la experimentación con cristales como la turmalina, el cuarzo, el topacio, la azúcar de caña y la sal de Roche, demostraron que existían cargas eléctricas superficiales que aparecían en los materiales cuando se les sometía a tensiones mecánicas [9]. Esto permitió que se iniciaran estudios más formales de los materiales piezoeléctricos y se abriera el camino a las aplicaciones que estos materiales pueden tener.

Gracias a las propiedades de estos materiales piezoeléctricos, es que se han utilizado para la fabricación de sensores, pues este tipo de dispositivos poseen ventajas a tomar en cuenta, como lo es un rango de medición mayor, recorridos de medición cortos, no se sobrecargan y tienen una gran estabilidad a largo plazo. Sin embargo, la respuesta eléctrica depende de la dirección de la fuerza que se les aplica, pues el efecto piezoeléctrico se produce longitudinalmente (en dirección a la fuerza aplicada) y transversalmente a la fuerza (perpendicular a la fuerza). Esto claro, permite que haya diferentes tipos de maneras en las que se pueden instalar estos sensores piezoeléctricos [10].

Los materiales piezoeléctricos pueden ser naturales o artificiales, además que cada uno de estos materiales tienen sus ventajas y limitaciones, un ejemplo son los cristales naturales, pues poseen un factor de calidad mecánica que es muy alta, lo que significa que tienen bajas pérdidas internas y tienden a ser bastante eficientes para la transmisión de vibraciones en un amplio rango de frecuencias. Sin embargo,

esta clase de materiales son frecuentemente costosos y difíciles de fabricar. Por otro lado, los materiales piezoeléctricos basados en polímeros muestran una mayor flexibilidad y facilidad de fabricación, pero su constante piezoeléctrica se ve limitada [11] [12].

2.1.1. Principios físicos de la piezoelectricidad

Como ya se comentó con anterioridad, la piezoelectricidad se fundamenta con la interacción entre esfuerzos mecánicos aplicados a materiales específicos y la polarización eléctrica que genera dicho material en su estructura interna. Cuando este tipo de materiales son sometidos a esfuerzos mecánicos, esto produce un desplazamiento de cargas en la red cristalina del material (esto se puede observar mejor en la figura 2.1. y figura 2.2.), lo que genera una diferencia de potencial y se puede captar como voltaje a través de los electrodos del dispositivo [13].

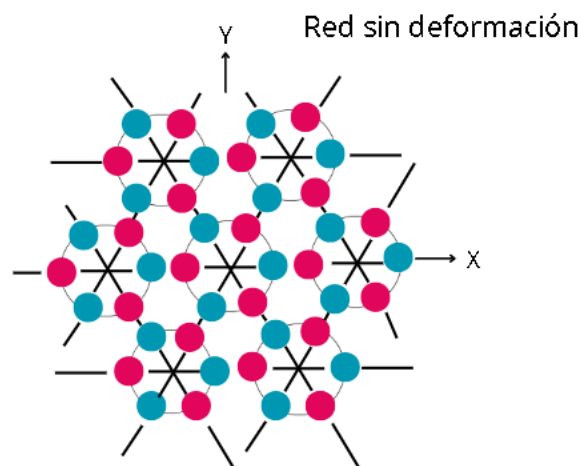


Figura 2.1. Esquema del efecto piezoeléctrico en red cristalina sin deformación. Adaptado de [14].

La figura 2.1. muestra la estructura de un cristal en equilibrio sin ningún tipo de esfuerzo externo, donde los átomos de silicio con carga positiva (círculos rojos) y los átomos de oxígeno con carga negativa (círculos azules) se encuentran simétricamente distribuidas, por lo tanto, las cargas positivas y negativas se

encuentran balanceadas, sus centros coinciden y no está generando ningún tipo de polarización.

Sin embargo, en la figura 2.2. muestra la estructura del cristal cuando se le es aplicada una tensión mecánica en dirección al eje Y, entonces esto genera que la red se deforme haciendo que los átomos se desplacen ligeramente en direcciones opuestas, es así que los centros con carga negativa y positiva ya no coinciden, lo que da como resultado la diferencia de potencial eléctrico en el cristal [14].

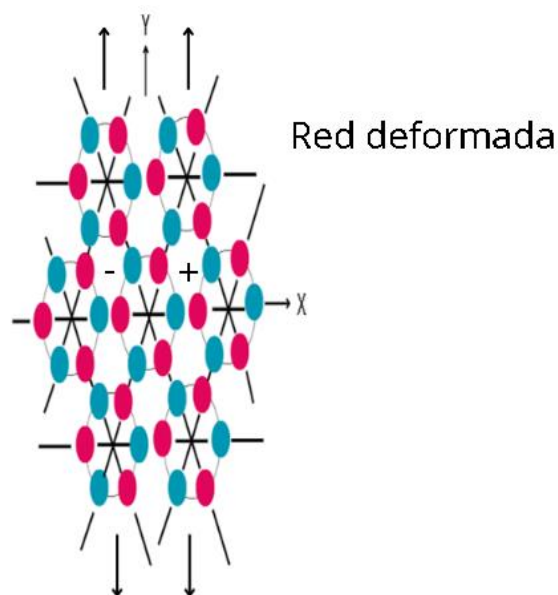


Figura 2.2. Esquema del efecto piezoeléctrico en red cristalina con deformación. Adaptado de [14].

2.1.2 Efecto positivo e inverso

La piezoelectricidad puede manifestarse como dos formas complementarias, el primero se le conoce como efecto piezoeléctrico positivo, que es cuando un esfuerzo mecánico se le es aplicado al material y este produce una diferencia de potencial eléctrico. La segunda forma es el efecto piezoeléctrico inverso, es cuando un campo eléctrico se le es aplicado al material y este se deforma. Ambos efectos



nos demuestran la increíble capacidad que tienen los materiales piezoeléctricos para convertir de manera bidireccional la energía mecánica y la energía eléctrica. Entonces, si se le aplica una vibración de alta frecuencia al material, este generara corrientes eléctricas de la misma frecuencia y si se le aplican señales eléctricas de alta frecuencia al material piezoeléctrico, producirán vibraciones mecánicas de alta frecuencia, como una especie de ondas ultrasónicas. La piezoelectricidad por lo tanto, solo puede presentarse en materiales que ya están polarizados, ya sea de manera natural o artificial, pero sin esto en específico, el material no puede presentar dichas propiedades, además de que la relación entre lo mecánico y lo eléctrico constituyen la base para la creación de dispositivos como sensores, transductores o dispositivos de captación de energía [14] [15].

2.1.3 Constantes piezoeléctricas

Los materiales piezoeléctricos son anisotrópicos, es decir, que hace que las constantes físicas dependan de la dirección en la que se le aplique una fuerza mecánica o eléctrica, así como de las direcciones perpendiculares de estas fuerzas. Las constantes más utilizadas son: la constante de carga piezoeléctrica (d), la constante de voltaje piezoeléctrico (g) y la permitividad (ϵ). Estos factores dependen de la temperatura, pues influye en la señal de salida y de voltaje de salida de un dispositivo piezoeléctrico [16].

2.1.3.1 Constante de carga piezoeléctrica

Esta constante describe básicamente lo sensible que puede ser un material piezoeléctrico de la interacción entre esfuerzos mecánicos y campos eléctricos, cuanta polarización eléctrica se genera cuando se le aplica una tensión mecánica, así como la cantidad de deformación mecánica que tendrá el material cuando aparece un campo eléctrico [16].



Desde un punto de vista matemático, ese fenómeno puede describirse como la relación entre el esfuerzo y la deformación, pues según la Universidad de Barcelona, la tensión mecánica T (fuerza por unidad de superficie) que es la que actúa en el material, se relaciona con la deformación relativa S mediante el coeficiente de rigidez elástica C del material en cuestión [17]. Entonces la fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$T = c * S \quad (1)$$

2.1.3.2 Constante de voltaje piezoeléctrico

Es el campo eléctrico que se genera en el material piezoeléctrico cuando se le aplica una tensión mecánica, es decir, la eficiencia del material para convertir la presión o deformación en voltaje. Esto ayuda a ver la efectividad de este material para aplicaciones en sensores de detección o presión [16].

2.1.3.3 Constante de permitividad

También conocida como constante dieléctrica ϵ , es cuando se aplica un campo eléctrico a un material piezoeléctrico y este se polariza. Dando como resultado que las cargas se alinean en dirección al campo eléctrico que se está aplicando, lo que además permite que el material almacene energía eléctrica en forma de campo eléctrico [18].

2.1.4 Materiales piezoeléctricos

Debido a que los materiales piezoeléctricos poseen características o propiedades especiales, ha llevado a que sean utilizados en diversas áreas de la industria,



además que este tipo de materiales pueden clasificarse en tres grupos principales, los naturales, los cerámicos y los polímeros, donde cada uno de estos cuenta con sus ventajas y sus limitaciones que son los responsables de determinar sus aplicaciones.

2.1.4.1 Materiales naturales

Como su nombre indica, estos materiales piezoeléctricos se encuentran de forma natural, además de ser los primeros en ser descubiertos, este tipo de materiales se caracterizan principalmente por su alta estabilidad y precisión. El cuarzo es uno de los primeros materiales piezoeléctricos que se descubrieron y que sigue siendo utilizado en muchas tecnologías, pues este mineral es capaz de producir una corriente eléctrica cuando es sometido a presiones sobre un extremo de eje polar, lo que ha permitido su uso en instrumentos digitales, aparatos de precisión y relojes de cuarzo, la limitación de este tipo de materiales es que tienden a ser frágiles. Otro material a considerar es el rubidio, este es un metal que puede ionizarse con bastante facilidad lo que permite que se utilicen en sistemas de telecomunicaciones de fibra óptica. La turmalina es otro material a tomar en cuenta, pues este es un mineral de silicato de boro cristalino que presenta propiedades piezoeléctricas, especialmente en una dirección cristalina fija, lo cual la hace útil en aplicaciones ópticas y de detección [19] [20] [21].

A continuación, se muestra una lista de los materiales piezoeléctricos naturales más comunes.

- Turmalina
- Topacio
- Sal Rochelle
- Sacarosa
- Cuarzo



2.1.4.2 Materiales cerámicos

Los cerámicos piezoeléctricos son de los materiales más relevantes debido a su estabilidad, versatilidad y facilidad de fabricación. A diferencia de los piezoeléctricos naturales, estos son obtenidos de manera artificial, lo que permite la modificación de su composición para optimizar sus propiedades. El material cerámico piezoeléctrico son una base para tecnología innovadora que se presenta en elementos activos de ciertos dispositivos como sensores, actuadores, transductores ultrasónicos o dispositivos de acústica marina. Las limitaciones de este tipo de materiales radican en su pobre rendimiento mecánico, esto genera que no puedan deformarse ni tensionarse en gran medida [22].

El zirconato-titanato de plomo (PZT) es un ejemplo de material cerámico además de que es de los más utilizados e importantes en la actualidad, pues este tipo de materiales están basados en óxido metálico, lo que les permite tener una mayor sensibilidad, funcionamiento en altos rangos de temperaturas y facilidad de fabricación, estas características son idóneas para sensores, actuadores y dispositivos de recuperación de energía. Una desventaja que veo de estos materiales es en la fragilidad mismo del material, así como el uso del plomo para su fabricación [23].

El titanio de bario (BaTiO_3) es un material cerámico piezoeléctrico, caracterizado por tener distintas fases cristalinas a diferentes temperaturas, tetragonal, cubica y hexagonal. Estas son las causantes de la ruptura de simetría en su estructura, lo que da origen de sus propiedades piezoeléctricas, además de mantener un buen desempeño en una amplia gama de temperaturas. Gracias a esas características, este material tiene aplicaciones para la fabricación de condensadores cerámicos multicapa (MLCC) que son utilizados en smartphones, computadoras y electrodomésticos, además de ser utilizado para sensores de presión y aceleración. Se puede decir que el titanato de bario es un material clave para la electrónica moderna, comunicaciones y en la automatización industrial [24].



2.1.4.3 Polímeros piezoeléctricos

Los polímeros son un tipo de macromoléculas constituidas por cadenas más simples, estas son llamadas monómeros y están unidas entre si mediante enlaces covalentes, de esta manera existen los polímeros piezoeléctricos, pues ofrecen ventajas como una buena flexibilidad, una facilidad de procesamiento y biocompatibilidad, por otro lado, el principio de Neumann hace referencia a la simetría de un material, se requiere que un material no tenga centro de simetría para que pueda ser piezoeléctrico, entonces para que un polímero pueda ser piezoeléctrico debe ser procesado para eliminar dicha simetría mediante la cristalización o el estiramiento [25] [26]. Los ejemplos de esta clase de materiales son el Poli(difluoruro de vinilideno) (PVDF), el P(VDF-TrFE) y la poliamida-11 (PA-11), estos han sido investigados para la captación de pequeña energía cinética, pero tienden a presentar bajas propiedades piezoeléctricas cuando se encuentran a temperatura ambiente y a altas temperaturas tienden a perder dicha propiedad [27].

2.2. Configuración del transductor piezoeléctrico

Este proyecto se centra principalmente en la utilización de un transductor piezoeléctrico colocado en forma de una viga en voladizo sobre un motor de combustión interna, además mediante la realización de las pruebas con un sistema vibratorio se encontró que la colocación de una masa en el extremo libre del sensor funcionaba como un péndulo, esto gracias a que contribuía al flexionamiento del transductor y, por ende, aumento el voltaje máximo que podía entregar. Por otro lado, debido a que el transductor se encontraba en vibraciones constantes y generaba señales de onda y para su mejor aprovechamiento se optó por la implementación de un circuito rectificador de onda completa, lo que permitiría convertir dichas señales de onda en una señal rectificadas, esto con el objetivo de



analizar su viabilidad para la alimentación de otros dispositivos electrónicos de bajo consumo.

En este apartado entonces se abordará en las configuraciones mencionadas anteriormente y su efecto en el sistema:

2.2.1 Transductor S118-J1SS-1808YB

Se optó por la utilización de este transductor debido a las características que posee, ya que es útil para las pruebas que se desarrollaron con este dispositivo, entre ellas su resistencia a las altas temperaturas, una frecuencia de trabajo apropiada, la capacidad de generar voltaje suficiente y sobre todo por el tamaño compacto para su colocación en el motor del vehículo de pruebas Beetle.

De acuerdo con la información que proporciona el fabricante, este dispositivo está conformado por diferentes capas de materiales, cuenta con poliéster (0.05 mm de espesor), cobre con (0.03 mm de espesor), PZT 5J (0.15 mm de espesor), acero inoxidable 304 (0.15 mm de espesor) y poliimida (0.03 mm de espesor). Cabe destacar que el material PZT 5J corresponde al material piezoeléctrico del dispositivo, las demás capas de materiales dan soporte mecánico, protección y conducción eléctrica [28].

A continuación, se muestra una imagen de la estructura y dimensiones del transductor S118-J1SS-1808YB además de una tabla con sus especificaciones.

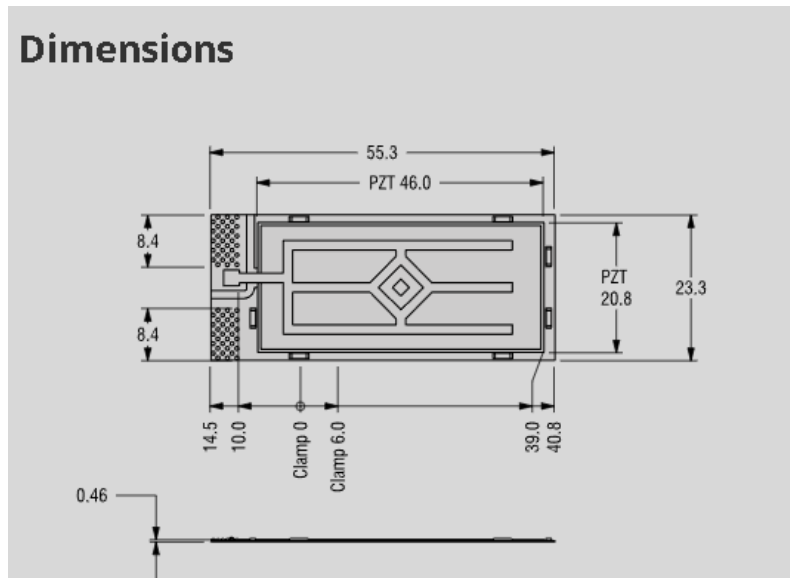


Figura 2.3 Dimensiones en mm del transductor S118-J1SS-1808YB [JPG] [28].

Tabla 2.1 Parámetros y especificaciones del transductor S118-J1SS-1808YB, recuperado y adaptado de [28]

Parámetros	Especificaciones
Rango de temperatura	-60°C a 120 °C
Peso	2.8 gr
Capacitancia	100 nF
Voltaje de accionamiento nominal fuera de resonancia	120 V
Deflexión Libre	0.48 mm
Fuerza bloqueada	0.14 N
Constante de resorte	0.299 N/mm
Amplitud máxima	2 mm
Frecuencia de resonancia	100 Hz
Voltaje máximo de excitación en resonancia	10 V
Frecuencia resonante (frecuencia propia en Hz)	130 Hz
Salida en circuito abierto (+/-)	6 V cada G de aceleración
Carga de resistencia	15700 Ohm
Potencia a potencia nominal	0.7 mW
Rango de G's	8 G's

2.2.2 Geometría tipo viga en voladizo

Debido a las dimensiones y geometría del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YB, es que se implementó como una viga en voladizo, con un extremo del dispositivo fijado en una parte del motor y el otro extremo quedara libre. Esta configuración resulta adecuada debido a que una viga en voladizo puede soportar cargas mediante la combinación de la flexión y corte, siendo la flexión la que más contribuye para este caso, pues al inducirse en el transductor genera una mayor deformación mecánica y para el efecto piezoeléctrico esto es crucial, pues a mayor deformación, se producirá más carga eléctrica. De manera adicional, una viga en voladizo resiste tanto las fuerzas como momentos en todas las direcciones, por la forma que concentra el esfuerzo en el extremo fijo, la viga o en este caso el transductor piezoeléctrico responde rápidamente a las vibraciones generadas por el motor, así maximizando el desempeño del dispositivo en cuestión [29] [30].

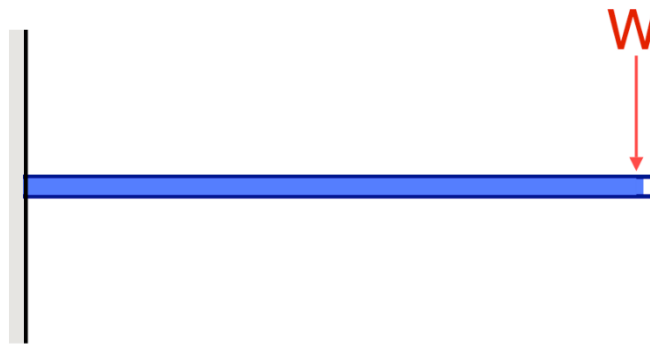


Figura 2.4 Masa colocada en el extremo libre de una viga en voladizo [JPG] recuperado de [30].

Una de las principales ecuaciones que describen el comportamiento de una viga en voladizo es la de la deflexión máxima, la figura 2.4 nos muestra cuando un peso o carga se le es aplicada a dicha viga en su extremo libre, donde “W” es la carga en dicho punto, la deflexión generada depende de la longitud de dicha viga “L”, “E” indica el módulo de Young del material e “I” es el momento de inercia de la viga [30].



La expresión matemática que describe esta situación se expresa de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{WL^3}{3EI} \quad (2)$$

Donde:

δ_{max} es la deflexión máxima en el extremo libre

W es la carga aplicada

L es la longitud de la viga

E es el módulo de Young del material

I es el momento de inercia de la sección transversal.

Esta expresión nos permite comprender que al incrementar tanto la carga como la longitud de la viga, aumentara significativamente la deflexión de la viga. Esto se vuelve un concepto a tomar en cuenta para el caso del transductor, pues dicha deflexión es la que genera la carga eléctrica de salida mediante el efecto piezoeléctrico.

Tomando en cuenta lo anterior, parece importante analizar la flexión que puede experimentar una viga o en este caso el transductor piezoeléctrico, pues como ya se mencionó con anterioridad, si el sensor piezoeléctrico presenta una mayor flexión, este generara más voltaje, sin contar de igual manera las vibraciones a las que se le sometió. En un artículo se expone la teoría de la flexión de una viga en voladizo para el cálculo del desplazamiento del extremo libre de la viga cuando se aplica una fuerza. Lo primero que muestra el autor es cuando la viga tiene pequeñas flexiones, que en este proyecto en específico es lo que se espera [31].

Lo primero que el autor supone para un caso imaginario, es que la longitud de la viga es mayor a su sección transversal, no se toma en cuenta el propio peso de la



viga y la sección transversal no cambia cuando se deforma, bajo estas condiciones se aplica la teoría de Euler-Bernoulli para pequeñas deflexiones. En el caso del transductor piezoeléctrico utilizado se pueden tomar en cuenta estos criterios o suposiciones, pues se trata de dispositivo delgado y ligero, cuyo peso por sí solo no lo deforma cuando se coloca como viga en voladizo. A continuación, se muestran las ecuaciones descritas por el autor [31].

La ecuación de flexión de Euler-Bernoulli es la siguiente:

$$M(x) = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3)$$

Donde:

$M(x)$ es el momento flector en una sección de la viga

E es el módulo de Young del material

I es el momento de inercia de la sección transversal

$\frac{d^2y}{dx^2}$ es el radio de curvatura de la barra deformada

2.2.3 Vibración aplicada a una viga en voladizo

La vibración aplicada a una viga en voladizo hace alusión a la respuesta dinámica de dicha viga cuando se le es aplicada una fuerza, masa o un movimiento externo, lo que puede generarle oscilaciones. Existen algunas terminologías que nos permiten comprender de una mejor manera la naturaleza de la respuesta de una viga en vibraciones. A continuación, se abordan estos conceptos dirigidos a la aplicación en vigas en voladizo



2.2.3.1 Vibración libre

La vibración libre es el movimiento oscilatorio de un sistema después de que fue desplazado de su posición de equilibrio y se libera sin que actúe una fuerza adicional, la ecuación diferencial que gobierna el sistema de vibración libre se muestra a continuación [32] [33].

$$m_{eq}\ddot{X} + k_{eq}X + c_{eq}\dot{X} = 0 \quad (4)$$

Donde:

m_{eq} = Masa equivalente del cuerpo vibrante (kg)

C_{eq} = Constante de amortiguación equivalente del amortiguador (Nsm-2)

k_{eq} = Constante de resorte equivalente del resorte (Nm-1)

2.2.3.2 Vibración forzada

La vibración forzada ocurre cuando se aplica una fuerza externa sobre un cuerpo de manera periódica y esta puede ser una vibración armónica o una onda senoidal. Además, la fuerza que es aplicada aumenta la amplitud de la vibración y de igual manera la frecuencia de dicha fuerza se iguala a la frecuencia natural de oscilación del cuerpo, que en este caso es en una viga en voladizo [32] [34].

La ecuación diferencial de la vibración forzada es la siguiente:

$$m\ddot{X} + kX + c\dot{X} = F(t) \quad (5)$$



Donde $F(t)$ es la fuerza externa aplicada (por ejemplo, una vibración inducida por un motor), este principio es crucial para este proyecto debido a que se busca aprovechar dichas excitaciones externas para maximizar la deflexión del transductor piezoeléctrico y con esto aumentar la energía eléctrica generada.

2.2.3.3 Frecuencia natural (ω_n):

La frecuencia natural es aquella frecuencia a la que un objeto continuará vibrando después de recibir una perturbación inicial, sin la necesidad de perturbaciones continuas. Todos los objetos y sistemas mecánicos poseen una frecuencia natural, incluso pueden poseer muchas frecuencias naturales dependiendo de su masa, tamaño y forma [35].

La frecuencia natural puede ser aumentada o disminuida ajustando la rigidez del sistema, se puede decir entonces que un sistema tendrá una frecuencia natural baja cuando es flexible y oscila en menor cantidad y lentamente, pero un sistema tendrá una frecuencia natural alta cuando es un sistema rígido y oscila rápidamente. La frecuencia natural se puede disminuir cuando se les es agregada una masa, pues la frecuencia natural se verá modificada y por ende la frecuencia de vibración. Un ejemplo de este concepto podría ser un resorte con una masa colgando, cuando se estira y se suelta posteriormente, el sistema empezará a oscilar de una manera natural a una cierta frecuencia [36].

La ecuación de la frecuencia natural está dada por la ecuación que se muestra a continuación, donde K corresponde a la rigidez del sistema y M corresponde a la masa del mismo.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{m_{eq}}} \quad (6)$$



2.2.3.4 Relación de frecuencia (r):

Esta relación de frecuencia se da entre la comparación de la frecuencia de la fuerza que se le aplica al sistema y la frecuencia natural del mismo. Este concepto está definido por la siguiente ecuación.

$$r = \frac{W}{W_n} \quad (7)$$

Donde W es la fuerza que se aplica al sistema o cuerpo y W_n equivale a la frecuencia natural del sistema o cuerpo, cuando r equivale a 1 significa que el sistema o el cuerpo obtiene las máximas amplitudes, es decir que se encuentra en resonancia. Cuando esta relación es mayor a 1, la respuesta del sistema es pequeña, lo que significa que la fuerza de excitación está por debajo de la frecuencia natural, cuando r es menor que 1, el cuerpo oscila con menor amplitud, la fuerza de excitación es mayor a la frecuencia natural [37] [38].

La elección de la geometría tipo viga en voladizo para el transductor piezoeléctrico resulta ideal gracias que resulta fácil su montaje en un motor, además esta configuración permite maximizar las deformaciones mecánicas del dispositivo provocadas por la masa agregada y las vibraciones propias del motor, lo que aumenta la energía eléctrica que genera el transductor, por lo que la eficiencia del efecto piezoeléctrico se ve incrementada. Además, esta configuración permite que el transductor piezoeléctrico responda de manera sensible, además de ajustarse a la frecuencia de vibración del motor lo que permite que sea fundamental para el desempeño de este proyecto.



2.2.4 Masa colocada como péndulo

Debido a las pruebas realizadas con el dispositivo de generación de vibraciones que se explicara en el siguiente capítulo, se optó por la colocación de una masa fija en el extremo libre del transductor piezoeléctrico de forma colgante, o puesta como un péndulo, esta configuración se espera que ayude a la deflexión del transductor, además de amplificar las vibraciones transmitidas al transductor. Un péndulo, es básicamente una masa suspendida de un punto por una cuerda de una cierta longitud, cuando dicha masa se es desplazada de su punto de inicio y después es soltado, este péndulo comenzara a oscilar [39].

Cuando se coloca un peso colgado en el extremo libre del transductor piezoeléctrico y este peso vibra, empieza a oscilar como un péndulo, pero se espera que el ángulo θ sea pequeño, entonces $\sin \theta \approx \theta$. Esta aproximación puede describir el movimiento de un péndulo con la ecuación que se muestra a continuación [39].

$$\theta = \theta_0 * \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

Un péndulo tiene una frecuencia angular:

$$\omega^2 = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (9)$$

Y el periodo es:

$$P = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (10)$$



Donde:

P es el periodo de oscilación

L es la longitud del péndulo

G es la aceleración de la gravedad

Por otro lado, la universidad de Manchester [40], comenta que la frecuencia de un péndulo simple se describe con la siguiente ecuación, donde f corresponde a la frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (11)$$

Como la masa colgante del transductor piezoeléctrico oscila como un péndulo cuando el motor vibra o cuando el vehículo se encuentra el movimiento, entonces esta ecuación permite calcular la frecuencia a la que oscilará dicha masa, además esa frecuencia al acercarse a la resonancia del transductor piezoeléctrico, será más grande y esto aumentará la deformación y por ende la energía eléctrica generada.

2.3 Circuito rectificador de onda completa.

Un puente de diodos o rectificador de onda completa es un circuito electrónico que se utiliza principalmente para la conversión de una corriente eléctrica alterna en continua. Sabemos que un diodo funciona como un interruptor, cuando el diodo se encuentra en dirección del voltaje conduce, pero si se encuentra en polarizado en inversa este no conducirá, entonces con la configuración como puente de diodos



permitirá el paso de la mitad de la onda positiva, pero no se lo permitirá para la mitad negativa, tomando en cuenta esto, se agregó un rectificador de onda completa después del sensor, de igual manera un capacitor para poder acumular o almacenar los pulsos [41].

2.3.1 Principio de funcionamiento

La principal función de un rectificador es convertir la corriente alterna en corriente continua, pues debido a que la corriente alterna va variando entre ciclos positivos y negativos, es que se busca que la salida se mantenga constante para la alimentación de dispositivos que requieren de una tensión estable. Este circuito utiliza cuatro diodos puestos de manera opuesta para que las variaciones de onda o de polaridad fluyan en una sola dirección, así estos diodos puedan rectificar el voltaje tomando solo el lado positivo de las ondas o el negativo dependiendo de cómo estén puestos los diodos [42] [43].

A continuación, se muestra una imagen del circuito de diodos para una señal de salida positiva.

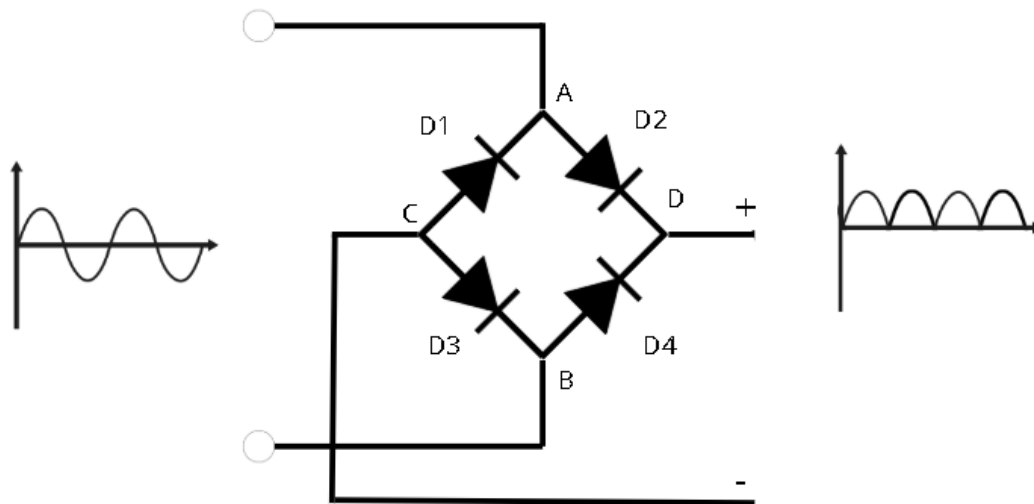


Figura 2.5 Puente de diodos que rectifica una onda senoidal en una señal positiva adaptado de [42].

El funcionamiento de estos diodos se empieza a dar cuando la media onda positiva fluye en el circuito, los diodos 2 y 3 se polarizan directamente y dejan pasar la corriente, en ese momento los diodos 1 y 4 se polarizan de forma inversa, lo que hace que la corriente fluya a través de los diodos polarizados y la señal salga positiva en la terminal **d** y negativa en la terminal **c** del circuito rectificador.

Cuando se encuentra con el medio ciclo negativo, ahora los diodos 1 y 4 son los que se polarizan directamente y los diodos 2 y 3 son los que ya no dejan pasar la corriente. Esto genera que la tensión positiva corra en el ánodo del diodo 4 y la tensión negativa aparece en el cátodo del diodo 1. Sea cual sea la polaridad de la señal de entrada, la polaridad de salida siempre será la misma, entonces si un medio ciclo es negativo este se invertirá y sale como un voltaje positivo [44].

Este dispositivo como ya se expuso es capaz de convertir la corriente alterna en corriente directa, pero no es suficiente para alimentar otros dispositivos, puesto que la señal de salida no es del todo pura, para esto se utiliza un filtro con un capacitor colocándolo en paralelo con una resistencia, lo que hace que el medio ciclo positivo cargue el capacitor y durante el medio ciclo negativo este se descargara. Esto ayuda



principalmente a que la señal de salida no sea tan pulsante y que se asemeje más a una señal de corriente continua [44].

La importancia de este circuito es fundamental en aplicaciones electrónicas, pues puede ser utilizado para la recarga de baterías, como fuentes de alimentación y controladores de motores. La corriente alterna es la principal fuente de alimentación que se suministran a todo tipo de infraestructuras, gracias a que de esta forma se puede transmitir largas distancias, pero a su vez la gran mayoría de dispositivos que utilizamos funcionan con una corriente continua. Lo que nos indica que un puente de rectificador se vuelve crucial para el correcto funcionamiento de dichos dispositivos en las industrias, hogares e incluso en aplicaciones automotrices [42].

Para este proyecto entonces se vuelve crucial la utilización de este circuito debido a que el transductor al estar oscilando de manera constante gracias al motor de combustión interna, generara una corriente eléctrica en forma de onda que vale la pena rectificar para su utilización posterior a algún otro dispositivo de bajo consumo del automóvil.

2.4 Estado del arte

En los últimos años, las industrias han estado consumiendo los recursos naturales a un ritmo insostenible, esto ha llevado a buscar formas innovadoras para la generación y recuperación de energía. El aprovechamiento de energía mecánica ha tomado relevancia en el área de la ingeniería y principalmente en sistemas de generación de energía eléctrica, pues estudios han demostrado que los materiales piezoeléctricos, debido a su capacidad de generar energía eléctrica a partir de excitaciones mecánicas, se vuelven una alternativa viable para la generación de energía de una manera sostenible. En este apartado entonces se abordarán y revisarán proyectos similares a este con el objetivo de verificar la viabilidad del uso de la piezoelectricidad como una fuente de generación de energía.



En un artículo llamado “Japón apuesta por la energía piezoeléctrica para generar electricidad” se habla que dicho país ha empezado a implementar una especie de baldosas piezoeléctricas colocadas en diferentes áreas públicas como lo puede en estaciones de trenes, banquetas o parques [45]. Con el objetivo que con el paso de los transeúntes sobre dichas baldosas genere electricidad. Una limitación de esta tecnología es la baja densidad de potencia que generan, esta energía podría ser útil para dispositivos de bajo consumo, pero no para dispositivos o instalaciones que requieren de más energía.

Los autores Paulius Skeys y Rimvydas Gaidys realizaron un artículo llamado “Análisis dinámico de un recolector de energía de vibración piezoeléctrica en voladizo con polarización eléctrica maximizada gracias a la forma óptima del espesor para la primera frecuencia propia” [46]. En este artículo se centra en mejorar el desempeño de un sistema captador de energía vibratoria, optaron por la colocación de un material piezoeléctrico (Engineering Resin Tough 2000) como una viga en voladizo y este acoplado a un sistema vibratorio. Optimizaron el espesor de la viga para poder mejorar la deformación sin necesidad de aumentar la frecuencia, el voltaje se aumentó un 30% con dicha modificación, lo que nos muestra que incluso la modificación más pequeña a dicha viga piezoeléctrica puede aumentar significativamente la energía eléctrica generada. Este proyecto tuvo como resultados una generación de 1.4 V cuando la viga se sometió a 21.5 HZ, con una potencia de 0.24 mW y 0.3mW cuando el dispositivo no se encontraba en voladizo. El pico de energía cosechada según corresponde a una carga eléctrica de 12,5 k Ω de espesor óptimo y 10,1 k Ω para espesor constante.

En el artículo “Piezoelectric Power Generation in Automotive Tires” [47], se presenta una idea innovadora para extender la autonomía de vehículos eléctricos aprovechando la energía generada por la deformación de los neumáticos. La idea que se presenta es la colocación de sensores o transductores piezoeléctricos en la cara interna del neumático. Mientras el auto se encuentre en movimiento, la goma se deforma y va produciendo una flexión en los transductores que a su vez van generando energía eléctrica y con un circuito rectificador, la señal se transforma en

corriente continua y se almacena en condensadores, lo que permite alimentar sensores y alimentar parcialmente la batería del auto.

Un trabajo que vale la pena mencionar que lleva el nombre “Implementación de un sistema de vibraciones” [48], fue realizado por mis compañeros Guerrero Osorio Carlos Eduardo, Macias Carrillo Jordana, Patrón Bustos Cesar David, Salones Francisco Luis Ángel y por mí, dentro del laboratorio automotriz de ciudad universitaria. Este trabajo consistió en la utilización de un acelerómetro ADXL 335 para medir tres partes diferentes de un automóvil, el motor y el chasis, además de medir los 3 ejes (x, y, z). Por otro lado, se hicieron pruebas en el sistema de audio sometiendo el acelerómetro a distintas frecuencias. (500Hz, 1K Hz, 2.5 K Hz).

A continuación, se muestra una tabla con las vibraciones medidas en Hz de este trabajo.

Tabla 2.2 Valor de frecuencias en el vehículo de pruebas Beetle

Parte del auto	Valor medio voltaje	Valor medio frecuencia	Valor mínimo voltaje	Valor mínimo frecuencia	Valor máximo voltaje	Valor máximo frecuencia
Motor	9.8 mv	110 Hz	6.8 mV	89.8 Hz	12.4 mv	173.6 Hz
Chasis	13.67 mV	516.1 Hz	7.28 mv	-	22.18 mv	-
Sistema de audio (bocinas)	73.33 mv	430 Hz	38.6 mv	21.97 Hz	244.6 mv	1,434 Hz

Estos resultados permiten comprobar que cada parte del vehículo presenta vibraciones distintas, dependiendo de su ubicación y de su funcionamiento, el motor por ejemplo presento frecuencias de entre 90 Hz y 170 Hz, relacionadas con los movimientos naturales de este sistema, lo que a su vez mostro un voltaje generado de aproximadamente 9.8 mV, el chasis mostro un aumento en la frecuencia debido a las vibraciones combinadas de todo el vehículo. Este trabajo ayuda a comprender



de mejor manera las vibraciones que aproximadamente puede tener un vehículo para el desarrollo de esta tesis.

En un artículo que tiene relación con el presente proyecto lleva por nombre “Un recolector de energía multiestable de frecuencia ultrabaja que utiliza un péndulo no lineal y transducción piezoeléctrica para la detección autoalimentada” [49], presenta un desarrollo de un sistema que utiliza un péndulo acoplado a un transductor piezoeléctrico que opere en frecuencia bajas de los movimientos humanos, de aproximadamente entre 0.5 y 5 Hz, que permitiría convertir dichas vibraciones en energía eléctrica. La idea que proponen los autores consiste en una masa pendular en forma de semicírculo, colocando tres imanes, el transductor piezoeléctrico se coloca en frente al péndulo y tendría un imán en la punta del transductor. Cuando el péndulo se mueva gracias a los movimientos de la persona, los imanes reaccionaran y generaran un movimiento en el transductor. Los resultados de este trabajo muestran un valor de 8 μW cuando se sometió el sistema a 2 Hz y 0.5g. Además, si se utiliza un capacitor de 22 μF este sistema podría cargarlo de 2.8 V a 4 V en tan solo 90 segundos.

En otro artículo “A Comprehensive Review of Energy Harvesting From Kinetic Energy at Low Frequency” [50], se analizan distintas tecnologías para poder transformar energía cinética en energía eléctrica, sobre todo en aplicaciones para el área automotriz, la industria médica, industriales e incluso en dispositivos portátiles. Según los autores, estas tecnologías podrían ser utilizadas en puentes, edificios, dispositivos para el monitoreo del clima, para dispositivos portátiles, podrían ser utilizados para pulseras, relojes, audífonos y hasta marcapasos.

En los mecanismos y sistemas presentados por los autores, incluyen dispositivos piezoeléctricos, electromagnéticos y electrostáticos. Un sistema presentado consta principalmente de múltiples voladizos piezoeléctricos que permiten aprovechar las vibraciones del ganado y las transforma en energía eléctrica. Otro sistema de recolección de energía presentado consta de dos vigas fijadas en un rotor giratorio y estas se conectan entre si con dos resortes, la fuerza gravitacional entonces actúa como una fuente de vibración periódica.



Entonces este artículo muestra que los sistemas piezoeléctricos sobresalen gracias a su simplicidad, no requieren de mantenimientos constantes y tienen buen tamaño para su implementación, aunque su potencia es limitada. Estos sistemas según comentan los autores, pueden alimentar sensores inalámbricos y microcontroladores.

Otro trabajo a considerar es el presentado por Shirvanimoghaddam Mahyar et al. Que lleva por nombre “Paving the Path to a Green and Self-Powered Internet of Things” [51], en donde se presentan tecnologías de cosechamiento de energía para poder reducir la dependencia de baterías en distintos dispositivos. La principal recolección de energía que proponen los autores es mediante la piezoelectricidad, pues algunos ejemplos de aplicaciones que se presentan, se lograron potencias de aprox 2mW en sistemas portátiles y voltajes de entre 2 V hasta 10 V.

Con la revisión bibliográfica realizada, se puede decir que la implementación de elementos piezoeléctricos en el área automotriz resulta ser una alternativa tecnológica de gran potencial, pues el automóvil y en específico el motor de combustión interna, constituye a un sistema mecánico con diferentes fuentes de vibración que podrían aprovecharse y transformarla en energía eléctrica. Para este proyecto, se propone la colocación de un transductor piezoeléctrico en el motor de combustión interna del vehículo de pruebas Beetle, con el fin de captar dichas vibraciones y generar una señal eléctrica útil. Esta propuesta se alinea con los proyectos antes mencionados y con lo que se busca realizar en este proyecto, para analizar la viabilidad de la utilización del concepto piezoelectricidad en un automóvil. Por otro lado, este trabajo se alinea dentro de la investigación que busca la conversión de fenómenos mecánicos como la propia naturaleza del automóvil, en una fuente complementaria o secundaria de energía.



Capítulo 3. Desarrollo del proyecto

En este capítulo se presenta el desarrollo del sistema de generación de energía eléctrica mediante un transductor piezoeléctrico, colocado en el motor del auto de pruebas Beetle. El objetivo es analizar, diseñar y validar el correcto funcionamiento del sistema para transformar la energía vibratoria producida por el motor y movimientos del vehículo en energía eléctrica, colocando un transductor piezoeléctrico como viga en voladizo y una masa en forma de péndulo.

Lo primero que se realizó fueron las mediciones de las vibraciones que tiene el motor de pruebas Beetle en diferentes condiciones, como lo es en ralentí, aceleraciones en parado y cuando el automóvil se encuentra en movimiento. Esto permitió identificar las frecuencias que más dominan en el motor y observar el régimen al que trabaja para ver la viabilidad de colocar el transductor piezoeléctrico. Posteriormente se realizaron simulaciones estructurales del transductor piezoeléctrico utilizando SolidWorks, con el objetivo de validar las deformaciones que el dispositivo podría tener, así como la realización de cálculos matemáticos que permiten comparar y hacer una correlación entre los resultados teóricos y los de las simulaciones. De igual manera se realizaron pruebas con un sistema vibratorio que permiten evaluar la mejor configuración para la generación de voltaje y gracias a los resultados obtenidos en las pruebas de vibración, se diseñó una estructura pendular colocado en el extremo libre del transductor piezoeléctrico con el objetivo de mejorar la deformación en el transductor y aprovechar las vibraciones naturales del auto para la generación de energía eléctrica.

Entonces en este capítulo se describe el proceso desde analizar el comportamiento del motor de combustión interna hasta la integración del sistema de generación de energía eléctrica a partir de las vibraciones, combinando el análisis de simulación, experimental y diseño para el correcto funcionamiento del sistema.

3.1 Mediciones de vibración del motor del auto de pruebas Beetle

En esta sección se aborda las mediciones de las vibraciones que tiene un motor de cuatro cilindros, específicamente el vehículo de pruebas que se encuentra en el edificio EMA7 (Beetle), para ello se utilizó de un acelerómetro MPU6050 (Figura 3.1), un Arduino Uno y un osciloscopio digital, esto con el objetivo de adquirir y analizar las señales de vibración.

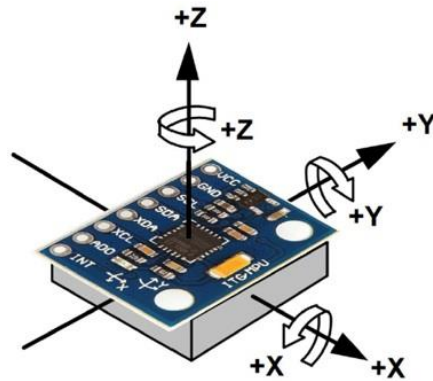


Figura 3.1 Acelerómetro MPU6050 y dirección de los ejes [47].

El acelerómetro se colocó en una parte fija del motor y se conectó al Arduino usando tres canales correspondientes para los ejes X, Y y Z, tal como se muestran en las figuras 3.2 y 3.3 además, con el osciloscopio digital se registraron las señales vibratorias en el dominio de tiempo y se aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT) para el dominio de la frecuencia.



Figura 3.2 Acelerómetro MPU 6050 colocado en una parte del motor del vehículo de pruebas Beetle.

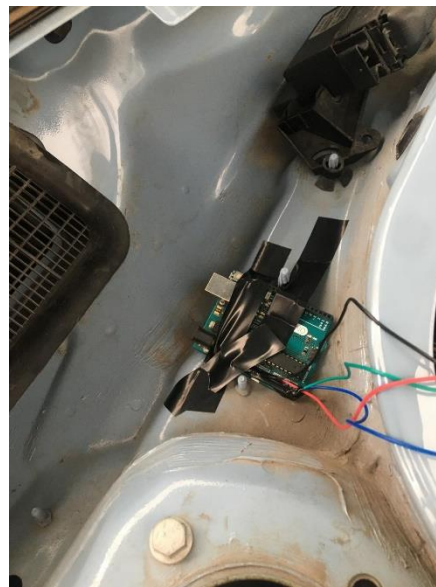


Figura 3.3 Arduino Uno colocado en una parte fija del auto de pruebas Beetle.

La primera prueba realizada (Figuras 3.4 a), b), c)) consistió en dejar el motor del auto en ralentí, es decir el régimen de revoluciones por minuto al que el motor se mantiene funcionando sin necesidad de utilizar el acelerador. Los resultados de las gráficas en el dominio de tiempo (lado izquierdo) mostraron las vibraciones correspondientes al funcionamiento básico del motor, pues para el eje X se observaron variaciones de amplitud de entre 0.5 y 2 V aproximadamente, para el

eje Y se presentó una señal con amplitudes de entre -2 V y 6 V, por último el eje Z se observó que los valores se elevaron hasta 10 V, muy seguramente por la vibración vertical que tiene el motor. Para el análisis de frecuencia (graficas de la derecha), se mostró un pico de aproximadamente 7 a 8 Hz, junto con algunos armónicos en un rango de 11 y 19 Hz.

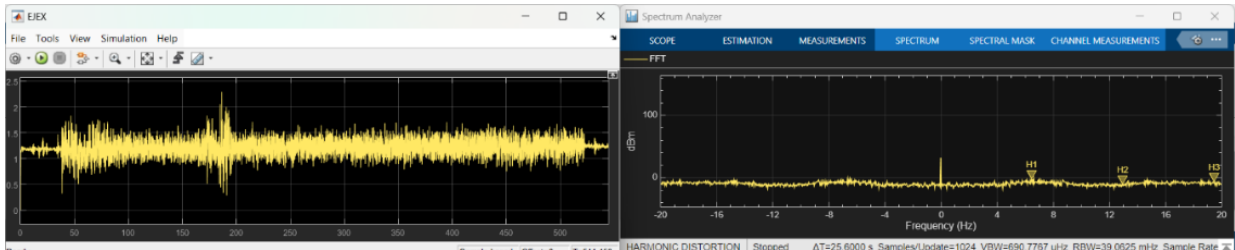


Figura 3.4 a) Graficas de las pruebas del motor en ralentí

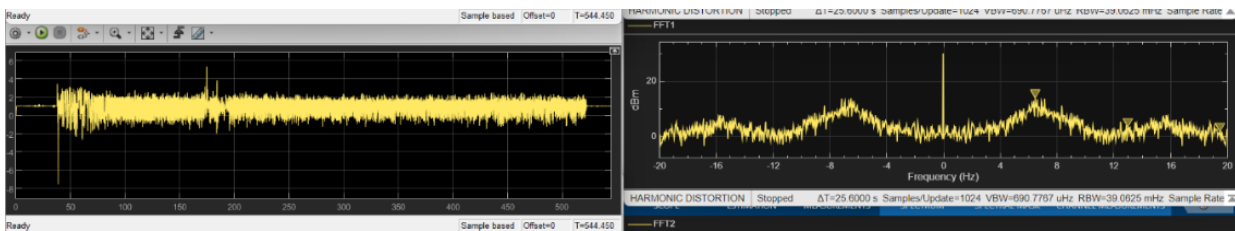


Figura 3.4 b) Graficas de las pruebas del motor en ralentí

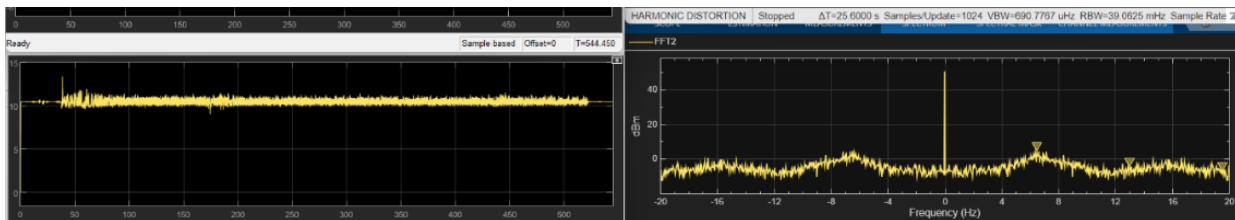


Figura 3.4 c) Graficas de las pruebas del motor en ralentí

La segunda prueba realizada consistió en revolucionar el motor de auto de pruebas a aproximadamente 3000 y 4000 RPM's, con el objetivo de observar la variación de las señales cuando el motor vibra en mayor cantidad, como se muestra en las imágenes 3.5 a), b) y c) En un principio el motor se mantuvo en ralentí, lo que permitió observar un comportamiento relativamente estable de los tres ejes, pero cuando el acelerador fue aplicado, genero un aumento de la amplitud de las señales como se puede ver en las gráficas en el dominio del tiempo. Por el otro lado, las

gráficas en el dominio de la frecuencia, en el eje X se promedió 10.5 Hz cuando se aplicó el acelerador, en el eje Y pues verse que la frecuencia de vibración estuvo muy cerca de cero, pero el eje Z mostró un aumento en la frecuencia de hasta 15 – 16 Hz, lo que corresponde al comportamiento del motor cuando es sometido a esfuerzos mecánicos.

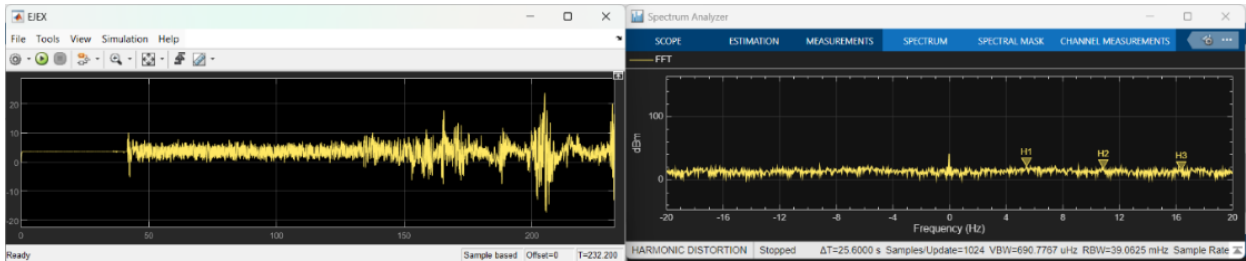


Figura 3.5 a) Graficas de la prueba al motor cuando se aplican revoluciones.

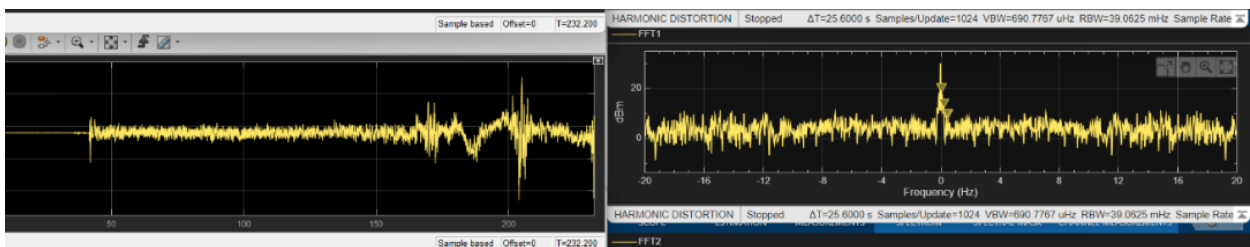


Figura 3.5 b) Graficas de la prueba al motor cuando se aplican revoluciones.

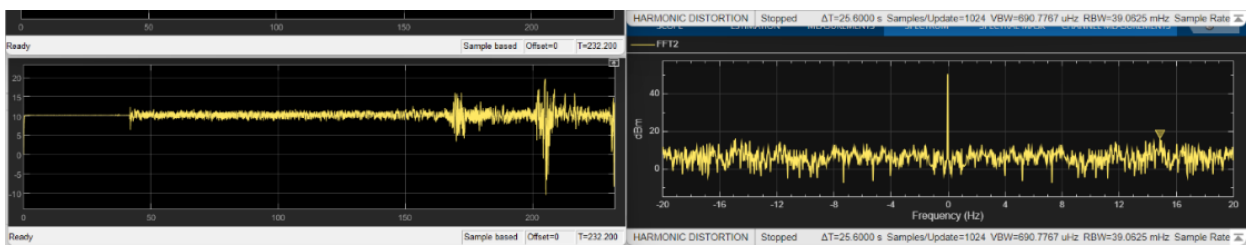


Figura 3.5 c) Graficas de la prueba al motor cuando se aplican revoluciones.

La tercera prueba realizada consistió en medir las vibraciones del motor mientras el automóvil se encontraba en movimiento, el acelerómetro MPU6050 se colocó en otra posición (de manera vertical) y lugar sobre el motor para una mayor seguridad cuando el automóvil se encuentre en movimiento, de igual manera se registraron las vibraciones en los tres ejes. En las figuras 3.6 a), b) y c) se pueden observar las señales obtenidas durante esta prueba, en las gráficas que se encuentran en el lado

izquierdo se puede observar que, a comparación de las pruebas anteriores, las amplitudes presentan variaciones más complejas debido a que las vibraciones no solo vienen del motor, sino que de igual manera de las interacciones del automóvil con en camino. En estas graficas se observa que conforme avanza la prueba, las señales se van incrementando tanto en amplitud como en la densidad de oscilaciones.

Por el lado de las gráficas en el dominio de la frecuencia (Graficas del lado derecho), se detectaron diferentes frecuencias:

- Eje X se mostraron las cinco frecuencias más predominantes, entre 2.1 Hz, 4.2 Hz, 6.4 Hz, 8.5 Hz y 10.7 Hz,
- Eje Y debido al cambio de posición del acelerómetro, fue la gráfica que presento frecuencias más elevadas, de entre 5.11Hz, 10.1Hz y 15 Hz.
- Eje Z: se mantuvo un comportamiento muy bajo, con frecuencias muy cercanas a cero.

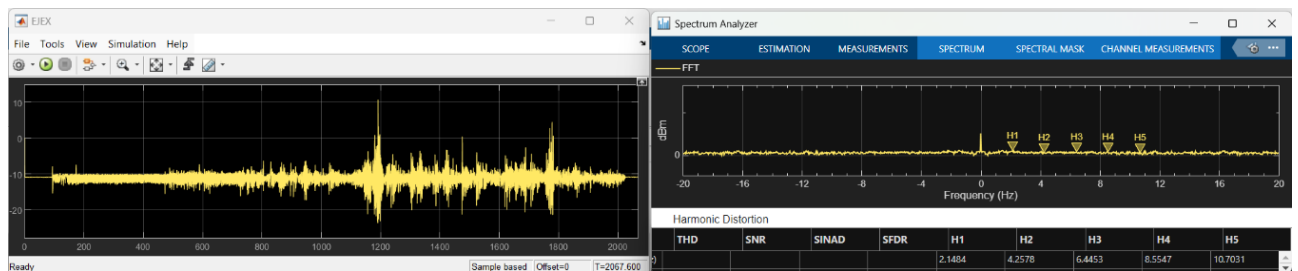


Figura 3.6 a) Graficas de las vibraciones de las pruebas del automóvil de pruebas en movimiento.

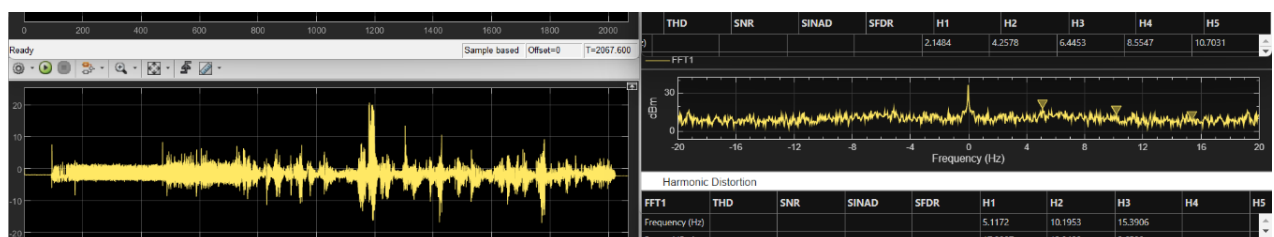


Figura 3.6 b) Graficas de las vibraciones de las pruebas del automóvil de pruebas en movimiento

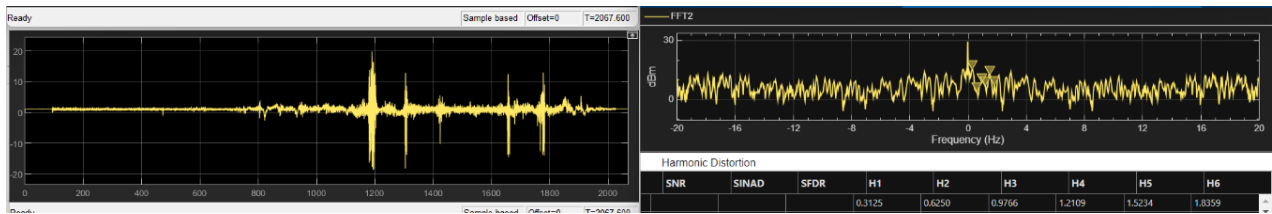


Figura 3.6 c) Graficas de las vibraciones de las pruebas del automóvil de pruebas en movimiento

Estas pruebas realizadas permiten observar el comportamiento del motor hablando de vibraciones en diferentes condiciones, como lo es en ralentí, aceleración en parado y cuando el automóvil se encuentra en movimiento. Esto comprobó que las frecuencias dominantes radican entre 8 Hz y 12 Hz, que aumentan cuando el motor es revolucionado, además las gráficas mostraron componentes adicionales en las señales debido a las diferentes formas en las que el auto y el motor vibra debido al rodamiento del automóvil. Esta información tiene relevancia para el diseño del ya que permite predecir el comportamiento del transductor piezoeléctrico, además de poder definir la ubicación óptima para el mismo.



3.2 simulación de la deformación del transductor piezoeléctrico (S118-J1SS-1808YB)

Para este apartado, como primer punto fue necesario conocer las propiedades mecánicas de los materiales de los que está compuesto el transductor utilizado, de esta manera se podrá realizar una simulación de lo más precisa de la deformación en SolidWorks. Los materiales de este dispositivo constan de poliéster, cobre, pzt5j, acero inoxidable y poliimida, así como con sus espesores específicos. A partir de esta información, se definieron las propiedades mecánicas de cada material que se colocara en el programa de SolidWorks. A continuación, se mostrarán las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales.

- Poliester

En el sitio web “ensingerplastics” se comenta que la densidad es de 1390 kg/m^3 , tiene un módulo de elasticidad de 2 GPa, un coeficiente de poisson de 0.38 [52].

- Cobre

La densidad de este material es de 8900 kg/m^3 , además tiene un módulo de elasticidad de 110 GPa, un coeficiente de poisson de 0.37 y una resistencia de tracción de 15 kg/mm^2 [53] [54] [55].

- PZT5J

El fabricante del transductor nos da los datos de este material piezoeléctrico, dicho material tiene una densidad de 7800 kg/m^3 , tiene un módulo de elasticidad de 60 GPa [56].

- Acero inoxidable

En el sitio web “mecanizado CNC” se comenta que la densidad de este material es de $7,7 \text{ g/cm}^3$, tiene un módulo de elasticidad de 193 GPa [57], por otra parte, el coeficiente de poisson del acero inoxidable es de 0.28 y el límite elástico es de 215 MPA [54] [58].

- Poliimida

La densidad de este material es de 1430 kg/m^3 , un módulo de Young o de elasticidad es de 2.5 GPa , tiene un coeficiente de poisson de 0.34 y un límite de tracción de 100 MPA . [59] [60] [61].

Con la información recabada acerca de las características de los materiales de los que está compuesto el transductor se desarrollaron dos modelos en SolidWorks, uno detallado que está compuesto por las cinco capas del dispositivo y medidas más exactas, y otro más simplificado. Esto con el objetivo de comparar y validar los resultados obtenidos de la deformación y la frecuencia natural del sistema.

Para el primer modelo (figura 3.7), se realizaron los cinco materiales que corresponden al transductor con sus respectivos espesores, según los datos proporcionados por el fabricante, el poliéster tiene un espesor de 0.05 mm , el cobre de 0.03 mm , el material piezoeléctrico PZT5J de 0.15 mm , el acero inoxidable de 0.15 mm y la poliimida de 0.03 mm [62].

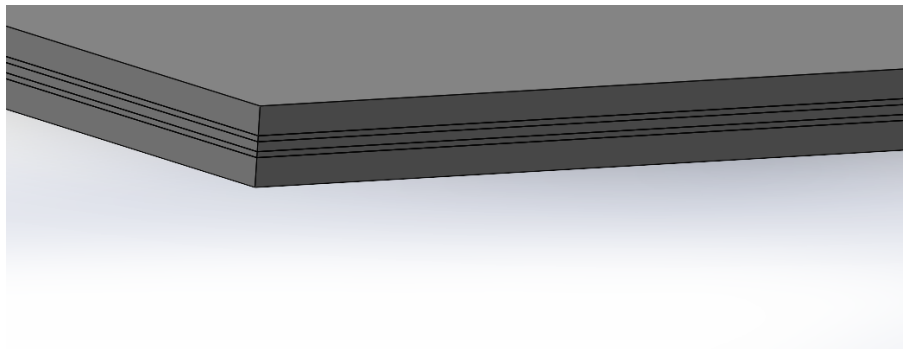


Figura 3.7 Capas de los materiales en el diseño del transductor piezoeléctrico en SolidWorks

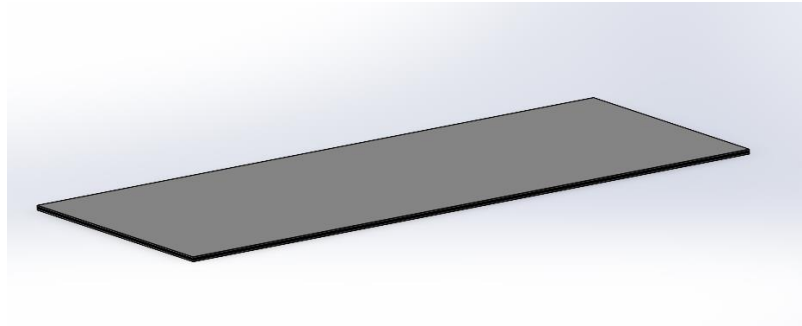


Figura 3.8 Diseño simple del transductor piezoeléctrico en SolidWorks

Una vez hecho el ensamble en el programa, debido a que el transductor se pretende utilizar como una viga en voladizo para la recuperación de energía mediante las vibraciones del motor de un automóvil, es que se fijó uno de los extremos de la pieza, simulando su montaje en el motor y se aplicó un peso en el extremo libre equivalente al de un imán circular de 5 gramos que, para la correcta simulación, el valor se convirtió en fuerza, aproximadamente 0.0491 Newtons. A continuación, se mostrará la imagen (Figura 3.9) de la simulación realizada y con sus resultados.

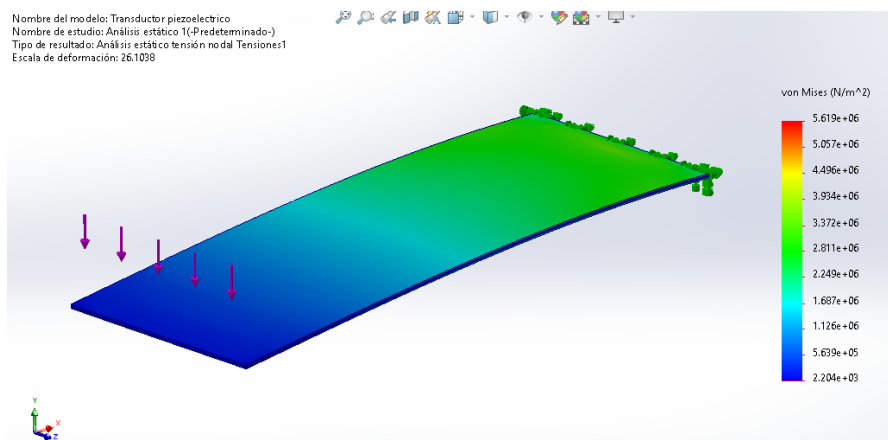


Figura 3.9 Resultados de las tensiones en el modelo básico Transductor piezoeléctrico en SolidWorks

En la figura 3.9 se muestran los resultados de la distribución de tensiones en el dispositivo, donde el valor máximo registrado fue de entre $2.811e + 06$ N/m² y $3.372e + 06$ N/m². Este estudio es útil ya que nos permite predecir el punto de fallo de la pieza o material bajo alguna carga, en este caso, los valores más altos nos

indica una mayor tensión, por lo que se puede concluir que la parte con mayor tensión se encuentra cerca de la parte que está sujeta, como es típico en configuraciones de viga en voladizo.

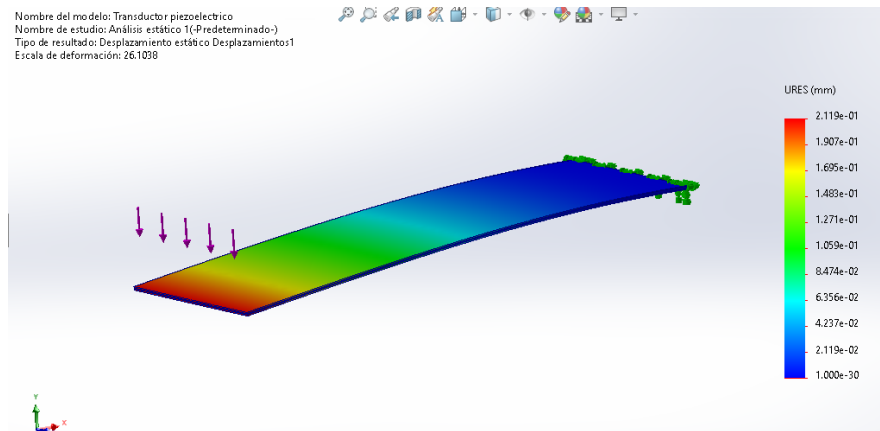


Figura 3.10 Desplazamiento de la flexión del modelo base del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks

En cuanto al desplazamiento, en la figura 3.10 se puede observar la deformación de la estructura, el extremo libre presenta un desplazamiento máximo de aproximadamente 0.1907 mm – 0.2119 mm esto debido al peso colocado. Por otro lado, la parte central del transductor tiene un desplazamiento de aproximadamente entre 0.0635 mm y 0.0847 mm lo cual nos indica que, en condiciones reales, el dispositivo puede presentar una flexión lo suficiente para inducir el efecto piezoeléctrico sin alcanzar un nivel crítico de deformación que comprometa la estructura.

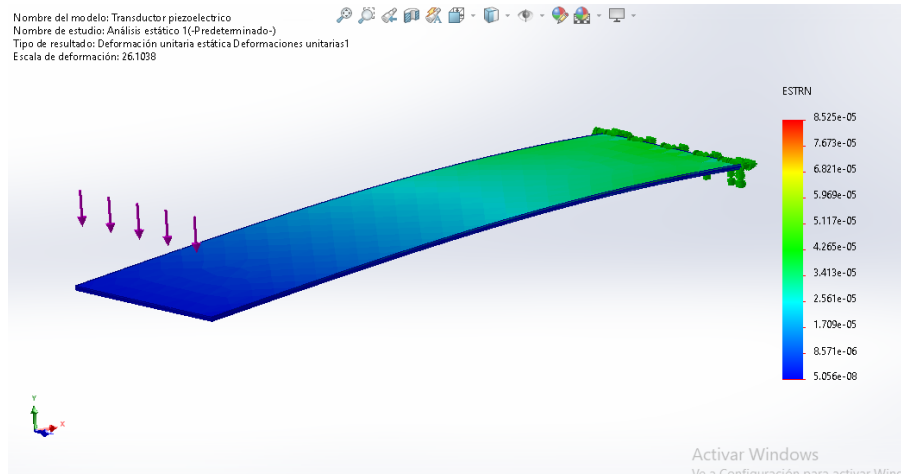


Figura 3.11 Deformaciones unitarias del modelo base del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks

Finalmente se realizó un análisis de deformaciones unitarias (Figura 3.11), un artículo hecho por la universidad de Guanajuato se describe la deformación unitaria como un cambio en la longitud por unidad de longitud debido a una carga en el material [63]. Esto se relaciona entonces con el esfuerzo que se genera sobre el material cuando se divide la carga generada debido a la deformación entre el área transversal del material o, en otras palabras, muestra una relación entre el alargamiento o la compresión del material y en la simulación, el sensor presentó deformaciones moderadas, lo que nos sugiere que la estructura tiene una buena relación entre flexibilidad y resistencia.

Para el segundo caso se realizó un modelo más preciso del transductor piezoeléctrico, de igual manera conformado por los 5 materiales, pero cada uno con sus medidas y espesores correspondientes como indica el fabricante. En la figura 3.12 se muestra el modelo desarrollado en SolidWorks.

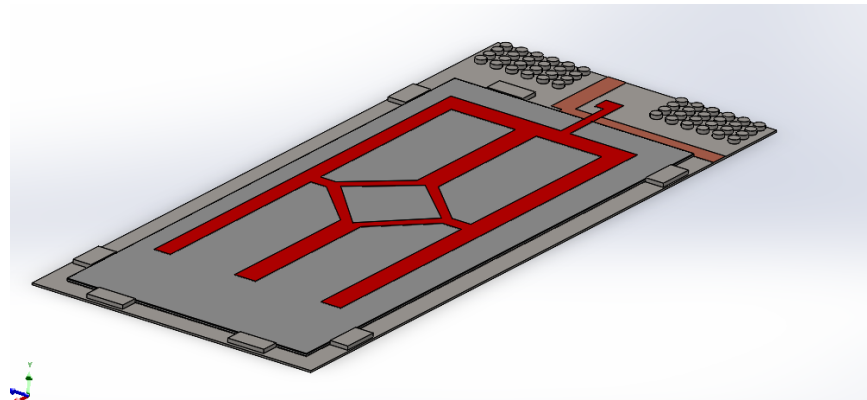


Figura 3.12 Transductor piezoeléctrico S118-J15S-1808YB diseñado y ensamblado en SolidWorks

Al igual que el diseño simplificado, se realizó un estudio estático para determinar los valores de tensión, desplazamiento y las deformaciones unitarias, esto permite hacer una comparación del comportamiento del modelo anterior y verificar que los datos son consistentes y realistas.

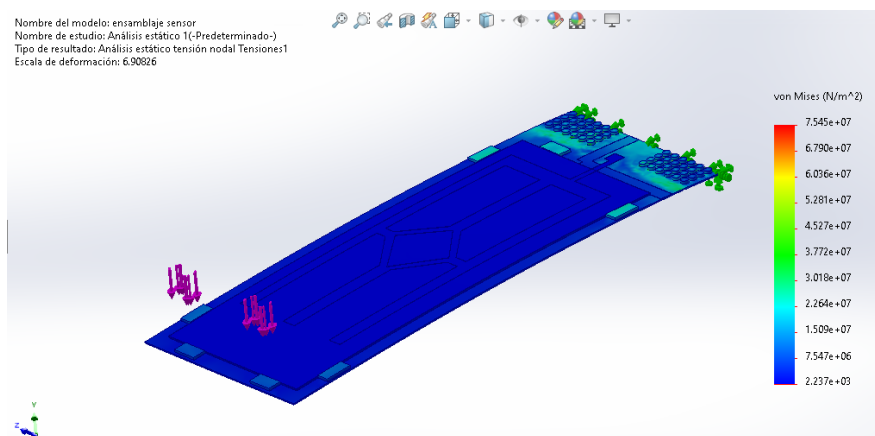


Figura 3.13 Resultados de las tensiones del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks

En la figura 3.13 se puede apreciar la distribución de tensiones que tiene la estructura y al igual que el primer modelo realizado, la zona que presenta una mayor esfuerzo o tensión es en la parte fija del dispositivo, alcanzando un valor aproximado de $3.018e + 07$ (N/m²). Los resultados de los dos modelos son bastante parecidos y nos indican que la zona de la sujeción concentra las mayores tensiones mecánicas, que es lo que se espera de una viga en voladizo.

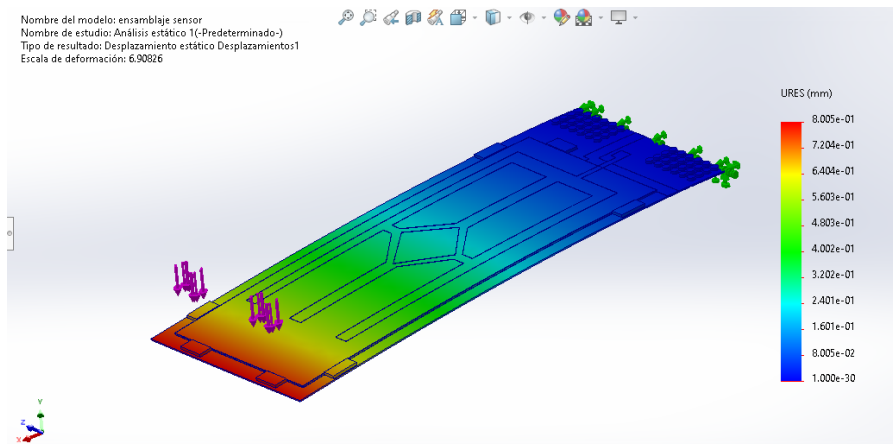


Figura 3.14 Desplazamiento de la flexión del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks

En la figura 3.14 se observa que el extremo libre del transductor tiene un desplazamiento máximo de aproximadamente 0.8005 mm, la parte central del transductor muestra desplazamientos entre 0.2401 mm y 0.3202 mm. Lo cual nos indica que estos valores son ligeramente mayores a los que se obtuvieron del modelo anterior, esto muestra que los materiales, propiedades y medidas influyen en la rigidez del dispositivo.

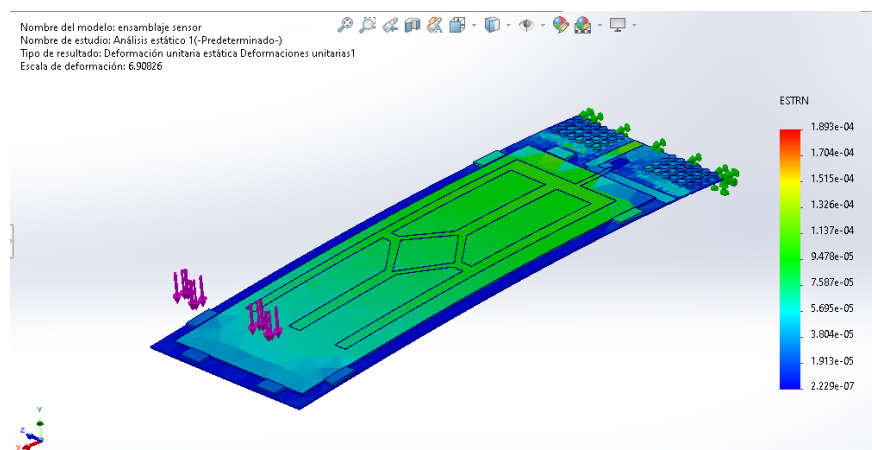


Figura 3.15 Deformaciones unitarias del Transductor piezoeléctrico en SolidWorks



Con respecto al estudio de las deformaciones unitarias (Figura 3.15), se muestra que dichas deformaciones se concentran principalmente en la zona donde se encuentra el material piezoeléctrico a contrario del modelo simplificado, pues estas se concentraban más en la parte que está sujeta. En los dos casos se mostró que la estructura tiene un comportamiento flexible y resistente cuando se le es aplicada una carga, esto es favorable para el desempeño de la parte piezoeléctrica.

Los dos modelos desarrollados permitieron mostrar el cambio de respuesta que se obtienen al añadir más detalle a una estructura, además de poder recolectar datos de manera más rápida. El modelo simplificado del transductor piezoeléctrico entonces funciona como una herramienta inicial para obtener datos más generales en un menor tiempo y sin necesidad de tantos recursos computacionales, por otro lado, el diseño más detallado es más realista y preciso, lo que permite observar el comportamiento mecánico del dispositivo. La relación entre los resultados de ambos modelos valida la configuración de la colocación del transductor para la generación de energía eléctrica gracias al efecto piezoeléctrico.

3.2.2 Análisis de frecuencia

Este apartado es importante debido a que se desea conocer el comportamiento dinámico del transductor piezoeléctrico frente a distintas frecuencias de vibración, lo cual permite identificar las frecuencias naturales del sistema y sus modos de vibración. La importancia también radica en evitar las resonancias estructurales, el autor Samir Jaber comenta que cuando una estructura o sistema es expuesto a una frecuencia cercana a su frecuencia natural, genera oscilaciones dañinas para la estructura [64].

Para este análisis, se realizó un estudio de frecuencia en SolidWorks mostrando los modos de vibración que tendría el transductor piezoeléctrico, para ello se consideraron dos escenarios, uno sin peso adicional en su extremo libre y otro con el peso agregado en simulaciones anteriores (0.0491 N). Las figuras 3.16 y 3.17 muestran los resultados del primer modo de vibración para los dos casos realizados,

donde se puede observar las deformaciones donde existe un mayor desplazamiento en el dispositivo piezoeléctrico.

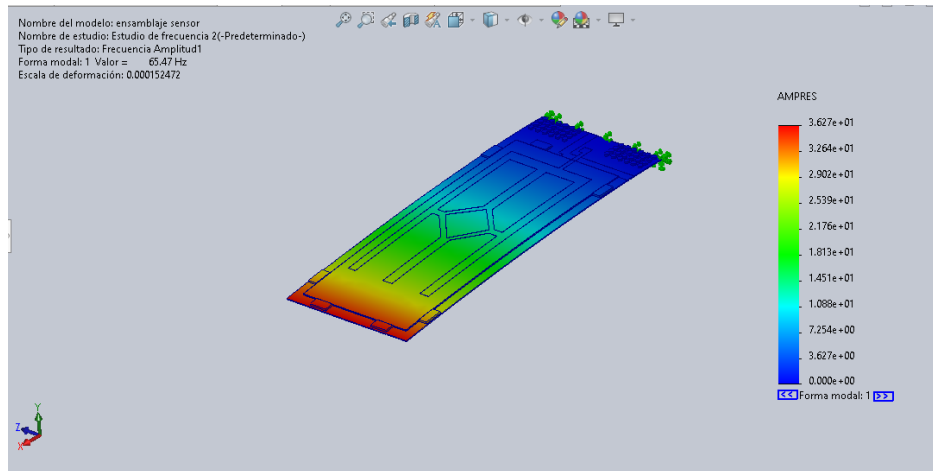


Figura 3.16 Primer modo de vibración del transductor piezoeléctrico simulado en SolidWorks sin peso adicional (frecuencia natural = 65.47 Hz)

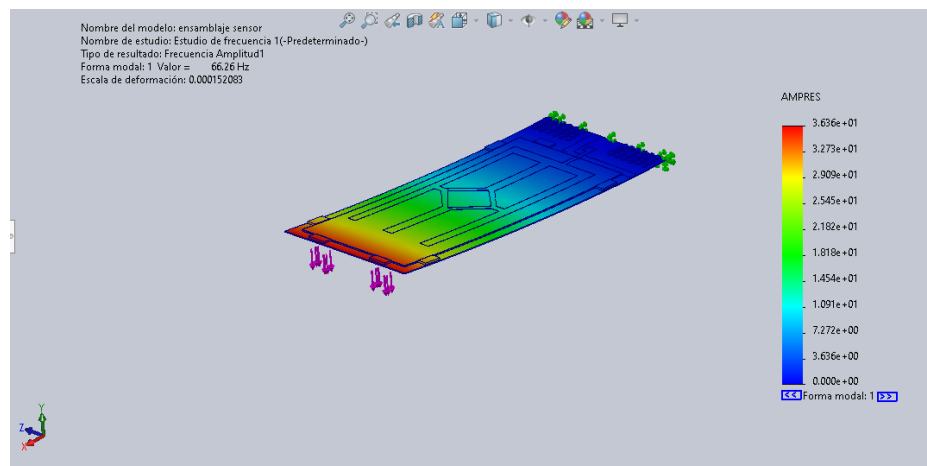


Figura 3.17 Primer modo de vibración del transductor piezoeléctrico simulado en SolidWorks con 5 g en el extremo libre (frecuencia natural = 66.26 Hz)

A continuación, se muestra una tabla de las frecuencias obtenidas en SolidWorks mediante el análisis de frecuencia que nos otorga el programa.

Tabla 3.1 Frecuencias obtenidas del estudio de frecuencia realizado en SolidWorks con el modelo del transductor piezoeléctrico detallado

Análisis de frecuencia	Con peso (5 gramos)	Sin Peso
Amplitud 1	66.26 Hz	65.47 Hz
Amplitud 2	374.21 Hz	375.95 Hz
Amplitud 3	502.14 Hz	499.54 Hz
Amplitud 4	2,917.3 Hz	2751.4 Hz

Los resultados muestran que la incorporación del peso en el extremo libre del transductor modifica muy poco las frecuencias naturales de la estructura en los dos primeros modos de vibración, y empiezan a variar más en las dos últimas amplitudes (3 y 4). El primer modo de vibración es el más relevante para este proyecto debido a que se mantiene entorno a los 66 Hz, lo que indica que el peso agregado no altera la dinámica del transductor. Los otros módulos son bastante más superiores a las frecuencias medidas del motor de un automóvil, por lo cual pueden despreciarse.

Se puede concluir entonces que este análisis de frecuencia realizada en SolidWorks permitió confirmar que el transductor piezoeléctrico tiene un comportamiento más estable dentro del rango de operación del motor, así mostrando una deformación ligera pero esencial para la generación de energía eléctrica gracias al efecto piezoeléctrico.

3.3 Cálculos analíticos de la flexión del transductor piezoeléctrico

Como primer paso, se determinará la flexión que podría existir en el extremo libre del transductor piezoeléctrico cuando se le aplica una carga, esto con el objetivo de comparar los resultados con los obtenidos en las simulaciones.

La ecuación para este punto es la siguiente:

$$\delta = \frac{WL^3}{3EI} \quad (2)$$



Debido a que el traductor está compuesto de diferentes materiales con sus respectivos espesores (poliéster, cobre, PZT-5J, acero inoxidable 304 y poliimida), fue necesario calcular el módulo de Young equivalente para representar un comportamiento más general del transductor, para ello se utilizó un promedio ponderado.

$$E_{eq} = \frac{(2 \text{ GPA} * 0.05 \text{ mm}) + (110 \text{ GPA} * 0.03 \text{ mm}) + (60 \text{ GPA} * 0.15 \text{ mm}) + (193 \text{ GPA} * 0.15 \text{ mm}) + (2.5 \text{ GPA} * 0.03 \text{ mm})}{0.46 \text{ mm}}$$

$$= \frac{41.425 \text{ GPA} * \text{ mm}}{0.46 \text{ mm}} = 90.05 \text{ GPA}$$

Para el cálculo de I (momento de inercia) se utilizó la siguiente fórmula para una sección transversal [65].

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (12)$$

$$I = \frac{0.0233 \text{ m} * 0.00046 \text{ m}^3}{12} = \frac{2.268 * 10^{-12}}{12}$$

$$I = 1.889 * 10^{-13} \text{ m}^4$$

Entonces ya conociendo estos datos, se pueden sustituir en la fórmula de la deflexión en el extremo libre de la viga.

$$\delta = \frac{(0.0491 \text{ N})(0.0553 \text{ m})^3}{3(9.005 * 10^{10})(1.889 * 10^{-13})}$$

$$\delta = \frac{8.30342 * 10^{-6}}{0.051031335}$$



$$\delta = 1.627 * 10^{-4}m$$

$$\delta = 0.1627 \text{ mm}$$

El resultado obtenido para la deflexión en el extremo libre del transductor piezoeléctrico es de aproximadamente 0.1627 mm, bastante similar al obtenido en las simulaciones realizadas en el modelo simplificado en SolidWorks, aproximadamente 0.19 mm -0.21 mm. Por otro lado, el modelo detallado mostro una deflexión de aproximadamente 0.8005 mm, el cual es un valor superior debido a que es un diseño más aproximado al del transductor real.

- **Frecuencia natural**

Además de la flexión calculada en el extremo libre del transductor piezoeléctrico, es importante conocer la frecuencia natural del sistema con y sin peso para saber si puede entrar en resonancia cuando se someta a las vibraciones del automóvil, lo que afectaría directamente al transductor.

La ecuación de la frecuencia natural para un sistema es la siguiente:

$$W_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{m_{eq}}} \quad (6)$$

Para encontrar la rigidez equivalente se utiliza la siguiente ecuación [66].

$$K_{eq} = \frac{W}{\delta} \quad (13)$$

$$K_{eq} = \frac{0.0491 \text{ N}}{0.0001627 \text{ m}}$$

$$k_{eq} = 301.78 \text{ N/m}$$



Sustituyendo el resultado anterior en la fórmula de la frecuencia natural, además de tomar la masa únicamente del transductor que es de 2.8 g, la formula queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \omega_{eq} &= \sqrt{\frac{301.78 \text{ N/m}}{0.0028 \text{ Kg}}} \\
 \omega_{eq} &= 328.29 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\
 \omega_{eq} &= \frac{328.29 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2\pi} \\
 &= 52.25 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Ahora, tomando en cuenta el peso que se añadirá en el extremo libre del transductor que será de aproximadamente 5g. el resultado es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 \omega_{eq} &= \sqrt{\frac{301.78 \text{ N/m}}{0.0078 \text{ Kg}}} \\
 \omega_{eq} &= 196.69 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\
 \omega_{eq} &= \frac{196.69 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2\pi} \\
 &= 31.30 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Esto significa que el peso añadido disminuye notablemente la frecuencia natural del sistema a aproximadamente 31.30 Hz, pero el sistema se encuentra dentro del rango de trabajo aproximado del motor de combustión interna medido con anterioridad.

- **Relación de frecuencia**

Para conocer si el sistema puede entrar en resonancia con las frecuencias del motor, se utiliza la relación de frecuencia definida como:

$$r = \frac{W}{W_n} \quad (7)$$

Tomando una frecuencia de 10 Hz como fuente de vibración externa, entonces:

$$r = \frac{10 \text{ Hz}}{31.30 \text{ Hz}} = 0.319$$

El valor de $r < 1$ indica que el sistema no se encuentre en resonancia, lo que indica que las amplitudes del transductor piezoeléctrico se mantienen dentro de un rango seguro. Por otro lado, este resultado muestra que el dispositivo no está aprovechando su máxima amplitud, ya que el valor está lejos de 1 , lo cual se puede predecir que el voltaje que puede generar el transductor podría ser bajo en la práctica.

3.4 Pruebas de transductor piezoeléctrico en un sistema vibratorio

En este apartado se explicarán las pruebas a las que fue sometido el transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con diferentes “configuraciones”, como el agregar un peso al dispositivo o dejándolo libre, esto con el objetivo de poder verificar con cuál de estas se puede generar un mayor voltaje. Para la realización de estas pruebas se utilizó una bocina, conectada a un teléfono celular que pueda mandar una frecuencia específica a dicha bocina, esto permite simular las vibraciones de un motor de combustión interna. Según lo medido en el laboratorio, un motor vibra a una frecuencia de 8 Hz en ralentí, por lo tanto, se aplicaron 8 Hz a la bocina de pruebas. A continuación, se adjunta una fotografía (figura 3.18) de la bocina utilizada para las pruebas.



Figura 3.18 Bocina utilizada para las pruebas de vibración

Encima de la bocina se colocó una base en donde se situó el transductor piezoeléctrico, este se colocó en configuración de viga en voladizo, pues esto en teoría, permite que el sensor haga una mayor deflexión y genere un mayor voltaje. A continuación, se muestra la fotografía del sensor ya montado en la base y bocina (figura 3.19).



Figura 3.19 Fotografía tomada del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM montado en la bocina para la realización de las pruebas de vibración

Ya colocado el transductor, como se muestra en la figura 3.19, se conectó a un osciloscopio para poder observar las señales de salida, así como el voltaje máximo que puede generar el dispositivo piezoeléctrico. Los resultados mostraron que la frecuencia se disparó a 80.73 Hz aproximadamente, la posibilidad de que haya ocurrido eso es debido a que la base con seguridad no estaba bien colocada en la bocina, lo que generó que la base vibrara de más y por ende el transductor detectara dichas vibraciones. Pero el voltaje máximo que mostro el osciloscopio fue de 3.52 V, lo cual nos muestra que el dispositivo piezoeléctrico si funciona de manera adecuada, además que la onda sinusoidal no es perfecta ya que tiene picos y cierto ruido, pero esto puede ser realista pues los motores en ralentí no vibran de manera perfectamente uniforme y el sensor piezoeléctrico compuesto por varias capas también puede amplificar ciertas frecuencias más que otras. A continuación, se muestra una fotografía (figura3.20) de los resultados obtenidos con el osciloscopio.

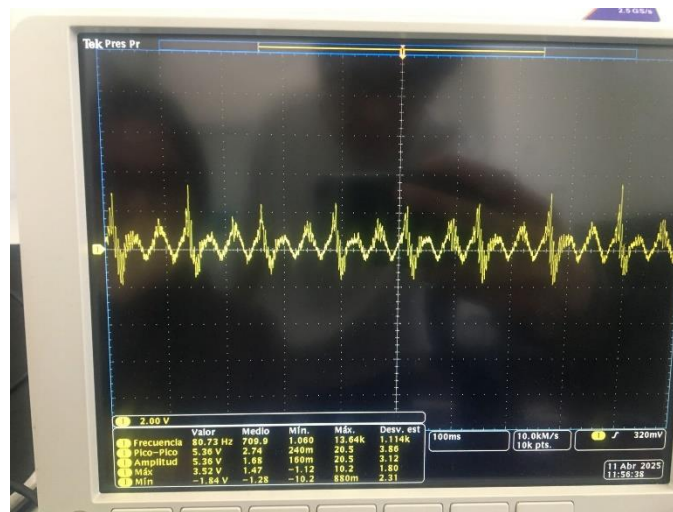


Figura 3.20 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del osciloscopio en la prueba del transductor sin peso.

La siguiente prueba que se realizó fue agregándole peso en el extremo voladizo del transductor, además de fijar la base a la bocina, esto con motivo de poder observar la variación de los resultados. El peso que se agregó fue una moneda con un peso de 5 gr, esto con el objetivo que el transductor tenga una mayor flexión y por consecuencia generara un mayor voltaje. Esto se puede comprobar con los

resultados mostrados por el osciloscopio, pues la frecuencia se estabilizó y el voltaje máximo aumento a 6.2 V. Con esto se puede comprobar que el peso ayuda al aumento del voltaje. A continuación, se muestran dos fotografías de lo anterior mencionado (figura 3.21 y 3.22).

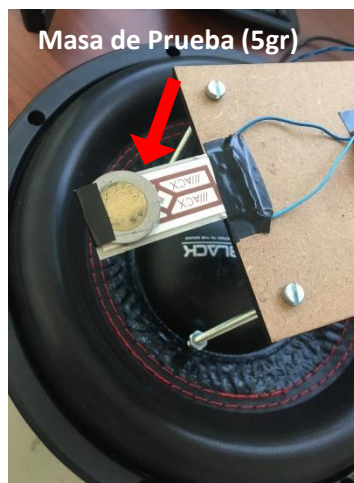


Figura 3.21 Fotografía tomada del transductor piezoeléctrico S118-J15S-1808YBM con peso en el extremo voladizo, montado en la bocina para la realización de las pruebas de vibración

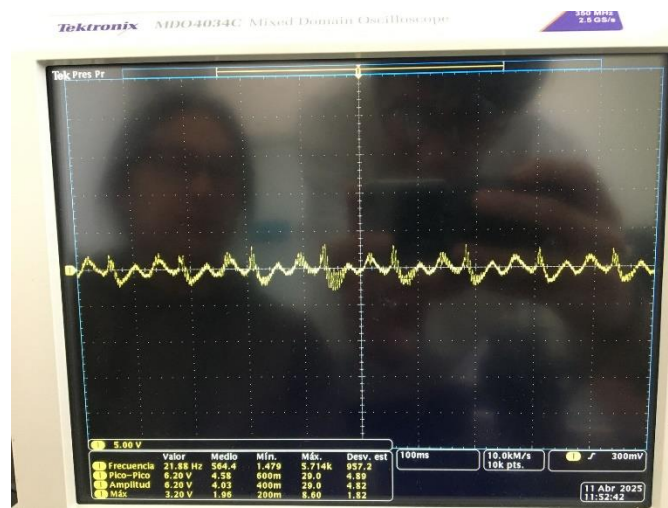


Figura 3.22 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del osciloscopio en la prueba del transductor con peso.

Para la siguiente prueba, se quitó la base de madera donde se había colocado el transductor y en su lugar se colocó un resorte debajo del sensor piezoeléctrico, la

idea de esta “configuración” era que el resorte ayudaría a que el dispositivo vibrara más y por ende que generara mayor voltaje. A continuación, se muestran las fotografías del resorte implementado (figura 3.23 y 3.24).

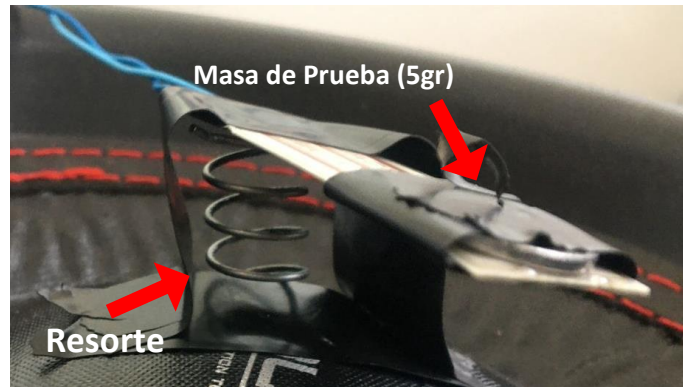


Figura 3.23 Fotografía de la adición del resorte debajo del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM

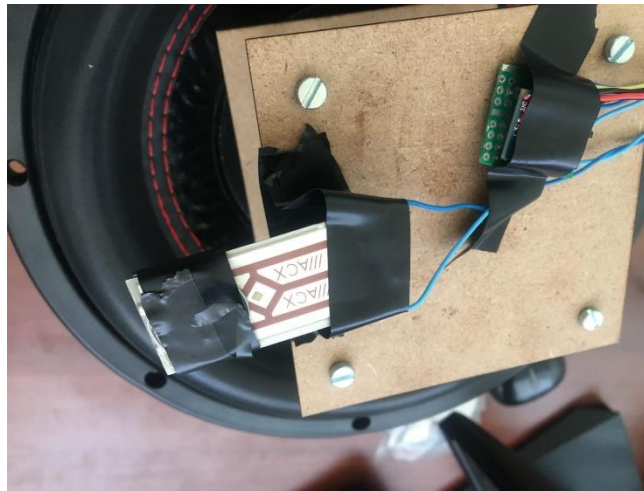


Figura 3.24 Fotografía del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con peso en el extremo voladizo, montado en la bocina para la realización de las pruebas de vibración

En esta prueba se muestra que el sensor vibra específicamente a 8.303 Hz, muy cercano a la frecuencia que la bocina estaba realizando, pero para añadir a esto, el voltaje máximo disminuyó a 4.32 V, aproximadamente 1.88V menos que la prueba anterior, por lo cual se puede decir que la adición del resorte al sistema no ayudo a aumentar la flexión del sensor y por ende existe una menor cantidad de voltaje. A

continuación, se muestra la fotografía tomada de los resultados de esta prueba en el osciloscopio (figura 3.25).



Figura 3.25 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del transductor piezoeléctrico S118-J15S-1808YBM con un resorte implementado y peso en el extremo voladizo del sensor

Con esto surgió una pregunta, ¿se puede obtener más voltaje?, pues la segunda prueba hecha mostro que el sensor daba un voltaje máximo de 6.2 V, pero ¿Acaso no puede haber alguna otra “configuración”? con esto se realizó la cuarta prueba basada en el artículo [49] recolectado en el apartado del Estado del arte, en donde el sensor igual tenía el peso de 5gr, pero en vez de que este sobre el sensor, se añadió como un péndulo. Los resultados fueron más prometedores, pues el voltaje máximo aumento a 8.2 V y a una frecuencia de 12.01 Hz, esto sugiere que el peso como péndulo genera una mayor deflexión del sensor, pues este peso vibra por así decirlo, a una frecuencia aparte, pues el hecho de que el peso no esté encima si no como un colgante o péndulo, tiene una libertad de movimiento lo cual favorece la dinámica del sistema. A continuación, se muestran las fotografías del sensor con el peso tipo péndulo y los resultados del osciloscopio (figura 3.26 y 3.27).

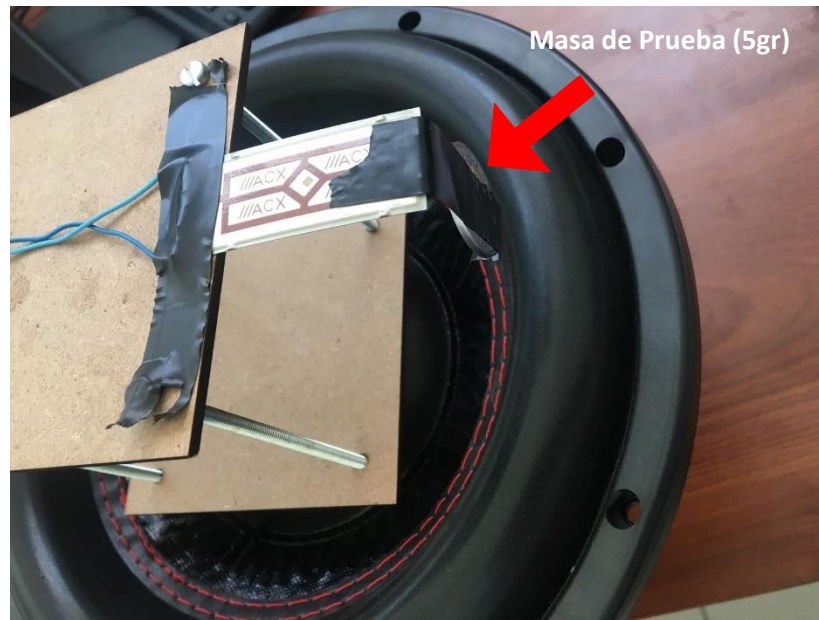


Figura 3.26 Fotografía del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con peso agregado tipo péndulo.

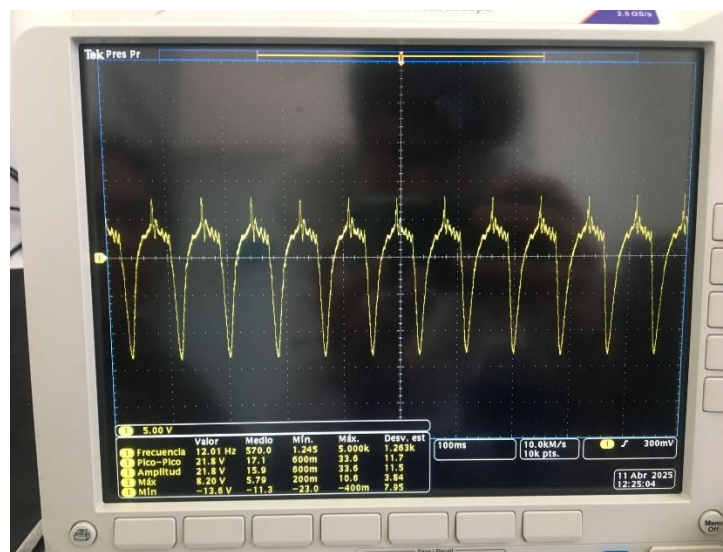


Figura 3.27 Fotografía tomada de los resultados obtenidos del transductor piezoeléctrico S118-J1SS-1808YBM con peso tipo péndulo

Como conclusión a partir de estas pruebas realizadas con diferentes configuraciones puestas al transductor piezoeléctrico utilizado, se comprobó que la manera en la que una carga se aplica a un sistema puede afectar y tiene un impacto directo, en este caso con la generación de un aumento o disminución de la generación de voltaje. Si bien el añadir un peso fijo en el extremo del dispositivo ya

mostraba un aumento considerable del voltaje generando aproximadamente 6.2 V, la configuración con el peso suspendido del extremo voladizo alcanzo un voltaje máximo de 8.2 V. Esto se le puede atribuir a que el peso colgante añade un movimiento adicional al sistema, por ende, provoca una mayor deflexión del transductor y el diseño que incorpore este principio podría optimizar entonces la captación de energía.

3.5 Diseño de sistema pendular para el transductor piezoeléctrico

Con base a las pruebas experimentales realizadas con el sistema vibratorio, se decidió implementar una estructura pendular que se colocó en el extremo libre del traductor piezoeléctrico, con el objetivo de incrementar la deformación en el transductor, así como mejorar la generación de energía eléctrica.

Esta estructura fue diseñada en SolidWorks, pues se componen de 4 piezas principales y que se acopla a las medidas del transductor, consta de una pieza que funciona como una masa suspendida, una pequeña pieza que funciona como el punto de soporte de la masa, además de dos piezas que abrazan el extremo libre del dispositivo. A continuación, se muestra el diseño que se propuso (Figura 3.28).

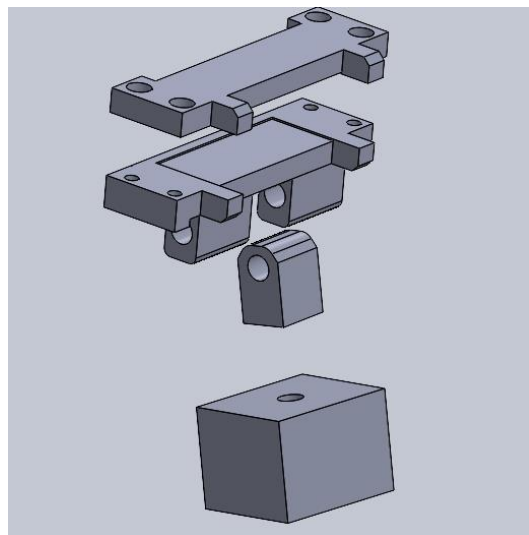


Figura 3.28 Diseño de la estructura pendular diseñada en SolidWorks



La idea de esta estructura surge debido a que el transductor al estar sometido a vibraciones constantes, pueden inducir movimientos oscilatorios en el péndulo con ayuda de dichas vibraciones y el peso de la estructura diseñada, además de inducir en la flexión del transductor.

La frecuencia de un péndulo está dada por la siguiente ecuación.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (11)$$

Para un funcionamiento más eficiente, se necesita que la frecuencia del péndulo se encuentre muy cercana al movimiento del automóvil, para que pueda maximizar el movimiento del péndulo. Esto permite que el sistema pendular reaccione incluso a vibraciones moderadas, además, la idea es que el movimiento del mismo auto cuando acelere, frene y de giros influyan en el movimiento del peso colgante.

Una ventaja de este sistema o estructura es que no requiere de componentes electrónicos adicionales, pues al ser un sistema dinámico pasivo, puede reaccionar a diferentes vibraciones, por otro lado, este sistema permite realizar ajustes de masa y longitud para optimizar el rendimiento sin necesidad de rediseños.

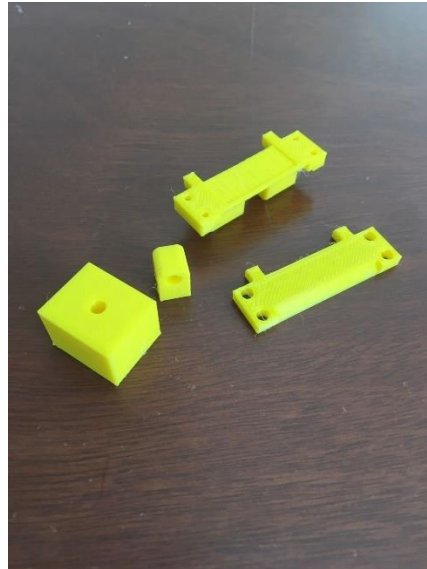


Figura 3.29 Piezas de la estructura péndula ya fabricadas

3.5.1 Parámetros del péndulo

Para el diseño de la estructura pendular fue necesario definir las características geométricas para que el péndulo pueda interactuar de manera eficiente ante las vibraciones generadas por el vehículo. Los parámetros que se tomaron en cuenta para el diseño de la estructura o pieza fueron la longitud del péndulo, el peso total de toda la pieza y su punto de acoplamiento en el transductor piezoeléctrico.

Como ya se mencionó con anterioridad, la estructura fue modelada en SolidWorks, una vez que las piezas se desarrollaron, se fabricaron mediante la impresión 3D, hechas de un material plástico de color amarillo. Entonces el peso total de todas las cuatro piezas, alcanzo 6 Gramos, valor cercano al realizado en las simulaciones de flexión del transductor piezoeléctrico.

El otro parámetro a considerar es la longitud que tendrá el péndulo, ya que permite determinar la frecuencia natural de sistema pendular, lo que, en teoría ayuda a la flexión del transductor. La fórmula de la frecuencia del péndulo nos muestra que la longitud del péndulo es inversamente proporcional a la frecuencia del mismo, es decir, si el péndulo es largo, entonces presenta una frecuencia más, mientras que uno corto presenta una frecuencia más alta. En este proyecto se pretende que el



péndulo se mueva con los movimientos del automóvil (aceleraciones, frenadas, giros, etc.), generalmente este tipo de movimientos tienden a ser de frecuencias bajas, por esta razón se decidió utilizar una longitud mayor para el péndulo, pero no demasiado para que de igual manera se vea afectado por las frecuencias del motor del automóvil. Además, si se busca que el péndulo entre en resonancia con las frecuencias del motor (7 Hz – 15 Hz), según la formula, se requeriría de un péndulo muy corto, lo cual para llevarlo a términos prácticos se dificulta.

Tomando en cuenta lo anterior, se planteó una longitud de 8 cm del péndulo que da como resultado una frecuencia de 1.762 HZ, A continuación, se muestran los cálculos para lo anteriormente dicho.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (11)$$

Despejando L:

$$L = \frac{g}{4\pi^2 f^2}$$

$$L = \frac{9.8}{4\pi^2 8 \text{ hz}^2} = 3.878 \text{ mm}$$

Debido a que es una longitud baja, se decidió que el péndulo aprovechar las bajas frecuencias de los movimientos del auto, cuando existen aceleraciones, frenadas y vueltas.

$$L = \frac{9.8}{4\pi^2 1.75 \text{ hz}^2} = 8.1 \text{ cm}$$

Este resultado demuestra que una longitud mayor necesita frecuencias bajas para su funcionamiento, lo cual es adecuado para el aprovechamiento de los movimientos naturales del automóvil mientras esta en movimiento, si por ejemplo

se requeriría que la frecuencia natural del sistema pendular fuera de 8 a 15 Hz, se necesitaría una longitud de péndulo de aproximadamente 0.387 cm, lo cual es muy poco práctico para la estructura diseñada.

Una vez fabricada la pieza diseñada en SolidWorks, se procedió a montarla físicamente en el extremo libre del transductor piezoeléctrico como se muestra en la figura 3.30. Este diseño se acopla perfectamente a las medidas del transductor y además permite que el péndulo pueda moverse libremente.

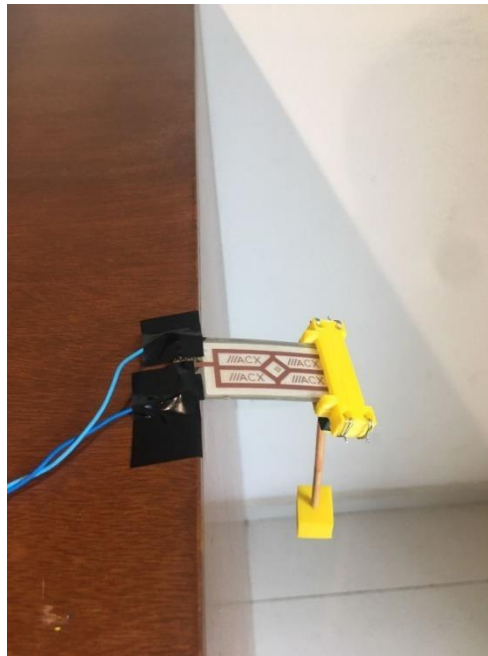


Figura 3.30 Colocación del sistema pendular al transductor piezoeléctrico

Por otro lado, en la figura 3.31 se muestra una fotografía del desplazamiento que tiene el extremo libre del transductor una vez que la estructura fue colocada. Muestra un desplazamiento de aproximadamente 1 cm, un poco mayor al desplazamiento simulado, lo cual a su vez confirma que dicha estructura es capaz de inducir la flexión del dispositivo y por ende se traduce a una mayor generación de energía eléctrica mediante el efecto piezoeléctrico del mismo.



Figura 3.31 Deflexión mostrada por el transductor piezoeléctrico cuando se le fue colocado el sistema pendular

3.5.2 Simulación en SolidWorks del transductor piezoeléctrico incorporando el sistema pendular

Para tener una mejor predicción del comportamiento del transductor piezoeléctrico incorporando el sistema pendular, así como conocer las frecuencias naturales a las que podría vibrar, se decidió utilizar el modelo ya realizado del transductor en SolidWorks y colocarle sus sistema pendular como ya se mostró en las fotografías anteriores, para realizar un estudio de frecuencias que permita observar las variaciones de las frecuencias que podría tener la estructura con respecto al estudio de frecuencias realizado solo para el transductor. A continuación, se muestra la figura 3.32 mostrando la estructura pendular con el transductor piezoeléctrico, así como la captura del primer modo de vibración realizado en SolidWorks (Figura 3.33).

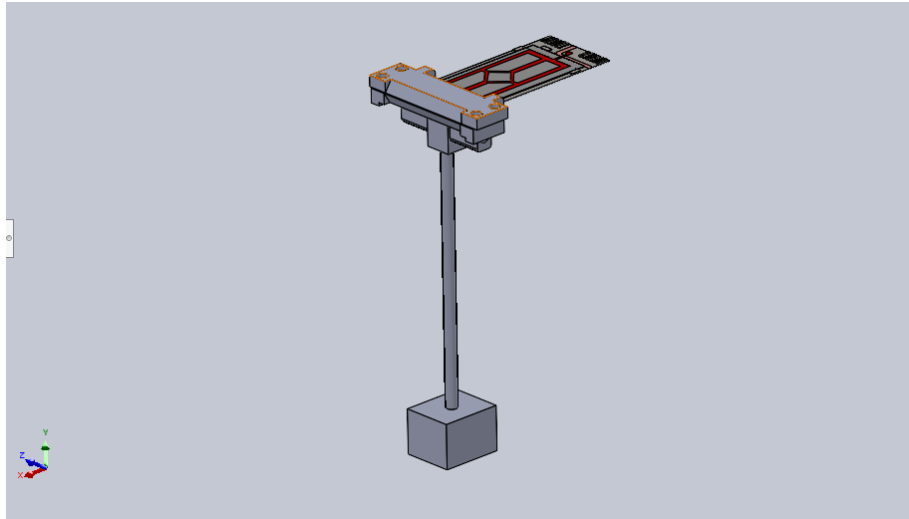


Figura 3.32 Transductor piezoeléctrico junto con la estructura pendular en SolidWorks

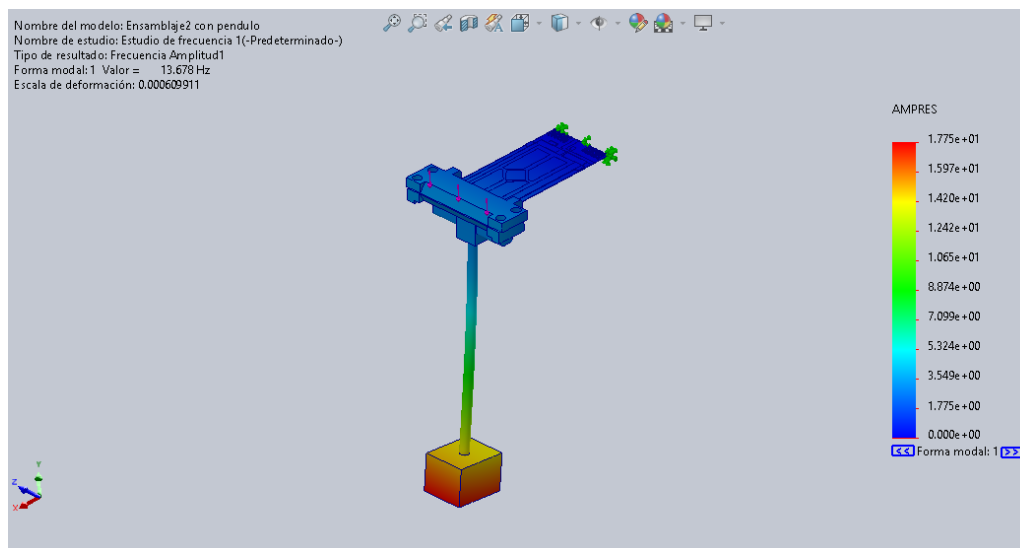


Figura 3.33 Primer modo de vibración del transductor piezoeléctrico junto con la estructura pendular en SolidWorks

Los resultados obtenidos de los cinco modos de vibración de la estructura corresponden a 13.68 Hz, 17.40 Hz, 45.09 Hz, 123.41 Hz y 244.96 Hz. Estos valores de frecuencias se redujeron significativamente con respecto al estudio de frecuencia realizado al transductor sin péndulo, pues el primer modo de vibración de dicho estudio se encontraba en aproximadamente 65 Hz.

Esto podría deberse que la estructura pendular modifica la rigidez del transductor además de agregar cierto soporte y peso en el extremo libre del dispositivo, lo que podría provocar que la frecuencia natural se vea disminuida. Este comportamiento



es beneficioso para este trabajo debido a que coincide con el rango de frecuencias que genera el motor de combustión interna (entre 8 Hz y 15 Hz en promedio), lo que permitiría que el transductor tenga más flexión y por ende el efecto piezoeléctrico se vea beneficiado.

Esta simulación confirma que la incorporación del sistema pendular adapta la respuesta vibracional del transductor, teniendo una mayor cercanía con los rangos de vibración del motor, lo que podría ser de gran ayuda para la generación de energía eléctrica debido a que el sistema se volvería más sensible a las vibraciones de baja frecuencia.

3.6 Incorporación de circuito rectificador de onda completa

Debido a que el transductor piezoeléctrico, al estar sometido a vibraciones constantes, la señal de salida que manda el dispositivo corresponde a una corriente alterna, lo cual es necesario implementar un circuito que rectifique dichas señales y que pueda ser aprovechada como una corriente continua.

Para poder realizar esto último, se utilizó un circuito rectificador de onda completa el cual consta de cuatro diodos conectados de tal forma que solo deja pasar las mitades de onda positivas, un capacitor (33 uF) que suaviza la salida rectificado actuando como un filtro y un resistor para la carga a la que se entregara la energía.

Como primer punto se realizó una simulación en TinkerCad, para validar que el principio de funcionamiento del circuito. A continuación, se muestra la simulación (Figura 3.32) para corroborar que el circuito funciona de manera correcta.

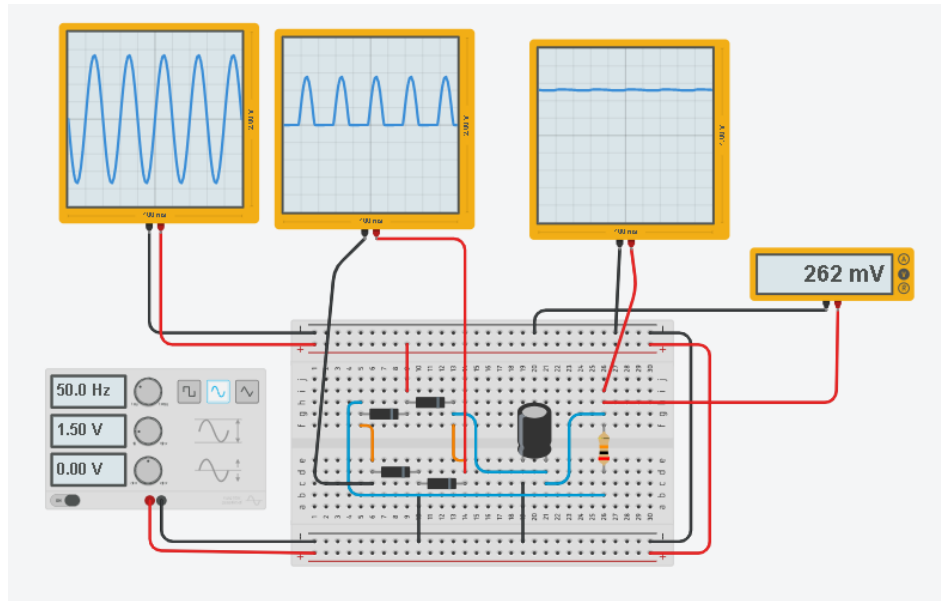


Figura 3.34 Circuito rectificador de onda completa realizado en Tinkercad

En la figura 3.34 se observan tres osciloscopios mostrando la señal de entrada, cuando pasa por el puente de diodos y la señal de salida cuando es filtrada. Se aplicaron 50 Hz con 1.5 V de entrada y de salida muestra un promedio de 262 mV, esto debido a la caída de tensión que producen los diodos del puente rectificador. Esta simulación permitió confirmar que el circuito funciona de manera correcta y que entrega una señal continua que puede ser aprovechada.

Posteriormente se realizó una simulación en Multisim con el objetivo de analizar la potencia entregada y determinar el valor óptimo de la resistencia para maximizar dicha potencia. Para esto se hizo la medición de la corriente y el voltaje en el nodo entre el capacitor y la resistencia, utilizando la expresión:

$$P = i * v \quad (12)$$

Para esto, se realizaron pruebas cambiando la resistencia en $1\ \Omega$, $10\ \Omega$, $100\ \Omega$, $1\text{K}\ \Omega$ y $20\text{k}\ \Omega$, con el propósito de observar el comportamiento y con cual la potencia entregada es óptima. A continuación, se muestra el circuito realizado en Multisim (Figura 3.35), aplicando de igual manera $1.5\ \text{V}$ a $50\ \text{Hz}$, además de utilizar diodos $1\text{N}4149$. Además, se muestra la tabla 3.1 donde se muestran los resultados de corriente, voltaje y potencia que se obtuvieron de cada resistor.

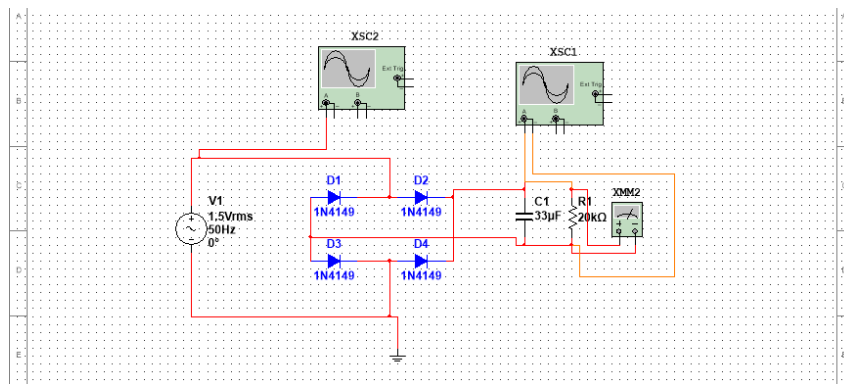


Figura 3.35 Circuito rectificador de onda completa realizado en Multisim

Tabla 3.2 Valores de corriente, voltaje y potencia obtenidos de cada resistor probada

RL	Corriente (i)	Voltaje (V)	Potencia (W)
$1\ \Omega$	0.004803 A	0.008167 V	$3.9226 \times 10^{-5}\ \text{W}$
$10\ \Omega$	0.024496 A	0.055803 V	$1.36695 \times 10^{-4}\ \text{W}$
$100\ \Omega$	0.038753 A	0.18952 V	$7,3945 \times 10^{-3}\ \text{W}$
$1\text{k}\ \Omega$	0.043422 A	0.33476 V	0.01454 W
$20\text{k}\ \Omega$	0.044526 A	0.410107 V	0.0183 W

Los resultados muestran que la potencia entregada se incrementa cuando se coloca una resistencia de más alto valor, alcanzado aproximadamente $0.017\ \text{W}$ cuando la resistencia tiene un valor de $20\text{k}\ \Omega$. Esto es debido a que la corriente se mantiene constante, pero el voltaje de salida va incrementando a medida que incrementa el

valor de la resistencia, lo que provoca que la potencia vaya aumentando de igual manera (como se puede ver en la tabla 3.1).

Por otro lado, cuando se coloca una resistencia baja ($10\ \Omega$), el osciloscopio del simulador muestra que la señal se rectifica correctamente, pero los rizados siguen siendo un poco pronunciados, como se muestra en la figura 3.36. Pero cuando se le coloca la resistencia de más valor ($20K\ \Omega$), la señal rectificada se muestra una forma más suave (Figura 3.37), debido a que en capacitor puede mantener mejor la carga en cada semiciclo, lo que es útil si se quisiera alimentar un componente de bajo consumo.

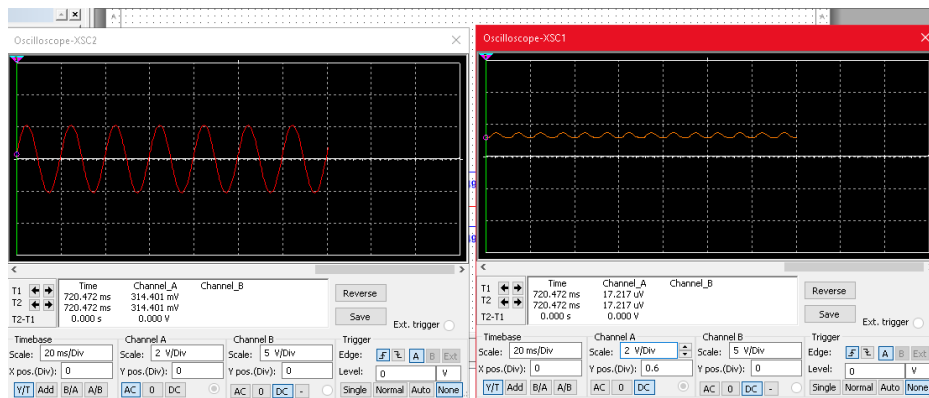


Figura 3.36 Señales de entrada y de salida del circuito rectificador de onda completa con una resistencia de $10\ \Omega$

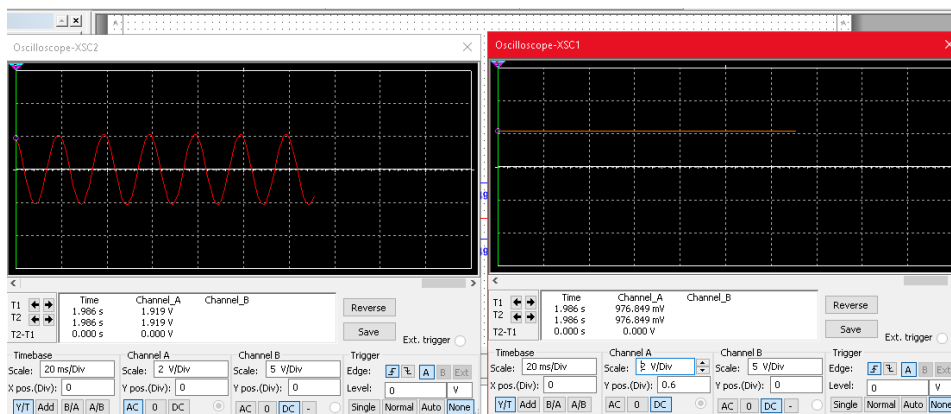


Figura 3.37 Señales de entrada y de salida del circuito rectificador de onda completa con una resistencia de $20K\ \Omega$

A continuación, se muestra la gráfica (Figura 3.38) obtenida de los resultados de potencia de la tabla 3.1, donde se observa que efectivamente cuando se aumenta el valor de la resistencia, la potencia lo hace de igual forma.

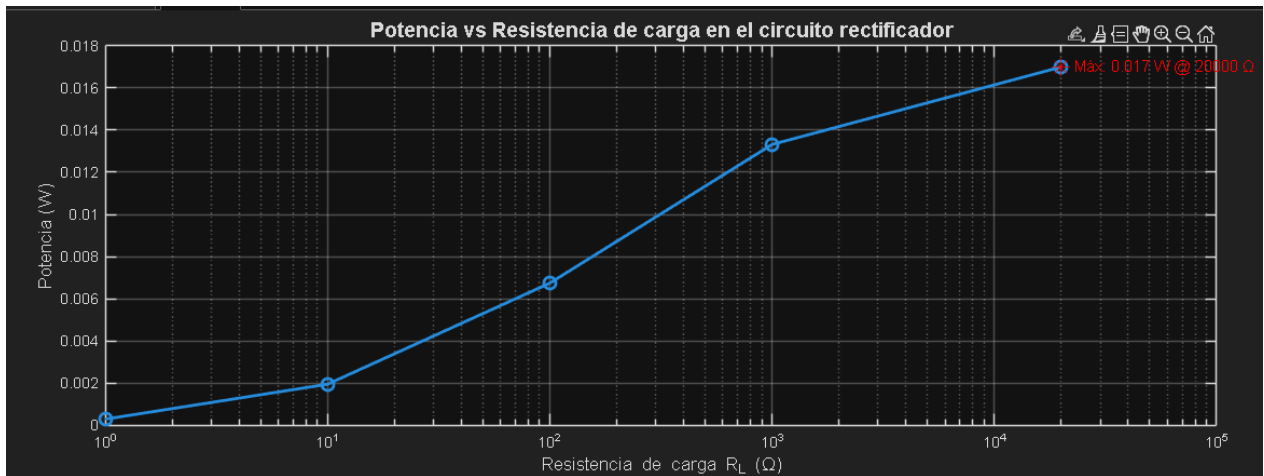


Figura 3.38 Gráfica de la relación entre potencia y valor de resistencia

Tomando en cuenta los datos obtenidos por las simulaciones, se procedió a realizar el circuito de manera física utilizando un protoboard, para esto se utilizaron diodos tipo 1N4148, un capacitor de 33 μ F y una resistencia de 20k Ohms, el cual se determinó anteriormente. El transductor piezoeléctrico se conectó en los nodos de entrada A y B del puente de diodos como se muestra en la figura 3.39. De igual manera se muestra una fotografía (figura 3.40) del montaje del circuito físico y el transductor piezoeléctrico conectado al circuito rectificador de onda completa.



Figura 3.39 Conexión ilustrativa del transductor piezoeléctrico al puente de diodos

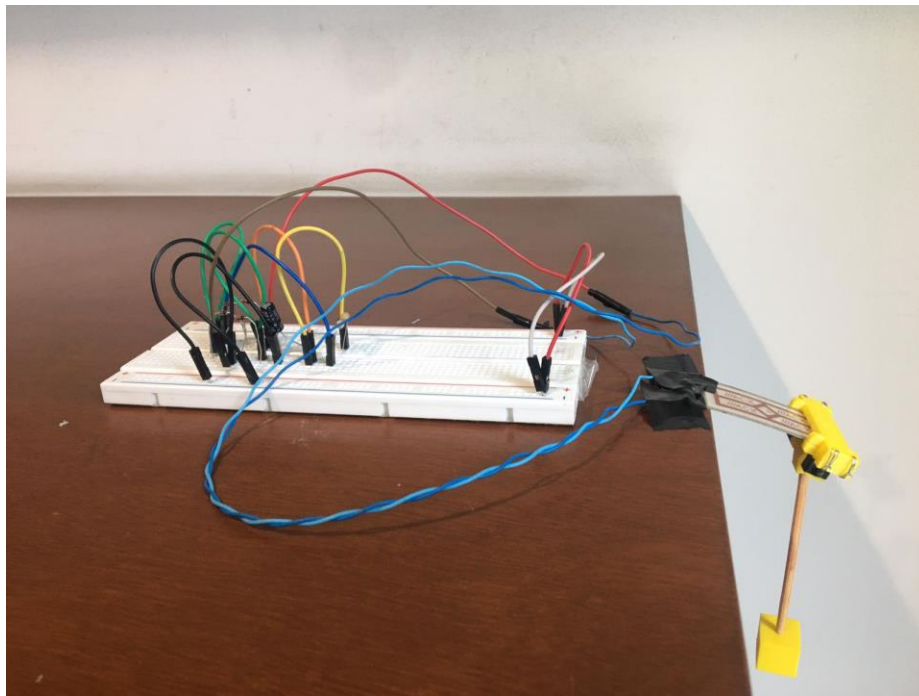


Figura 3.40 Circuito rectificador de onda completa realizado en protoboard conectado al transductor piezoeléctrico.

La implementación de este circuito rectificador en teoría permitiría adaptar la señal de salida que mande el transductor piezoeléctrico cuando se le sea sometido a las vibraciones del motor, así como a los movimientos naturales del automóvil cuando se encuentre en movimiento. Los resultados obtenidos de la simulación demuestran



que la elección de los componentes del circuito influye en el aprovechamiento de la energía piezoeléctrica y sienta las bases para futuras aplicaciones para la utilización de energía generada.

Capítulo 4 Implementación del sistema de cosechamiento de energía en el motor del auto de pruebas Beetle.

Para este capítulo se presenta la implementación del sistema completo de cosechamiento de energía eléctrica, el cual consta del transductor piezoeléctrico, conectado a el circuito rectificador de onda completa y este a su vez a un osciloscopio para registrar las señales de salida, como se muestra en la imagen 4.1. El sistema fue instalado en el motor del vehículo de pruebas Beetle del laboratorio automotriz, para la colocación del transductor piezoeléctrico se seleccionó una zona del motor en el cual pueda ser montado como viga en voladizo, asegurando además que el péndulo acoplado en su extremo libre pueda oscilar libremente con las vibraciones del motor, así como con los movimientos del mismo automóvil.

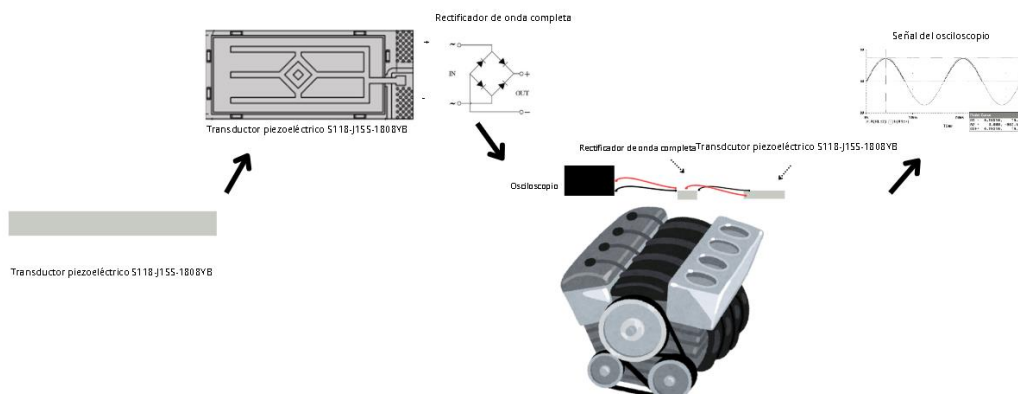


Figura 4.1 Esquema de la implementación del sistema en el motor del auto de pruebas Beetle

Una vez colocado el transductor piezoeléctrico, se procedió a conectarlo al circuito rectificador de onda completa, dicho circuito fue instalado en el motor del auto de pruebas, asegurando su instalación para evitar imprevistos. Posteriormente se conectó el osciloscopio al circuito, el canal 1 se utilizó para medir la señal de entrada del transductor y el canal dos la señal de salida rectificada, esto permitió observar el comportamiento del sistema en tiempo real y analizar la energía que se está recuperando. A continuación, se muestran las fotografías de la instalación del sistema en el auto de pruebas Beetle (Figura 4.2, 4.3 Y 4.4).



Figura 4.2 Fotografía de la colocación del transductor piezoeléctrico con el sistema pendular acoplado a su extremo libre, en una parte del motor del vehículo de pruebas Beetle

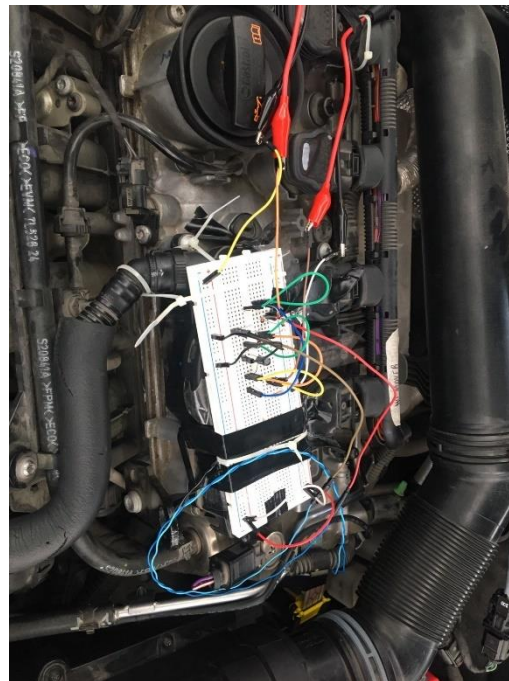


Figura 4.3 Fotografía de la instalación del circuito rectificador de onda completa en el motor del vehículo de pruebas Beetle.



Figura 4.4 Fotografía del osciloscopio utilizado para las pruebas en el vehículo de pruebas Beetle.

Una vez que el sistema fue instalado, se procedió a realizar la primera medición cuando el motor se encuentra en ralentí, los resultados se muestran en la figura 4.5, donde se observa que la frecuencia recibía por el transductor era de 9.091 Hz, generando un voltaje máximo de 309 mV, pero en la salida (canal 2), cuando la señal se rectificaba, se presentó un voltaje Pico a Pico de 10.9 mV y un voltaje máximo de 2.74 mV.

Esto demuestra que el sistema funciona correctamente, ya que rectifica la señal de entrada del transductor piezoeléctrico y muestra que el comportamiento del circuito corresponde al realizado en las simulaciones. Por otro lado, el valor reducido del voltaje máximo en la salida puede deberse a la baja amplitud de la señal del transductor piezoeléctrico y la caída de tensión que tienen los diodos. El hecho de que el voltaje máximo de salida sea más pequeño, no significa que el sistema funcione de mala manera, si no que en general los materiales piezoeléctricos tienden a dar bajas potencias. Estos datos son de gran utilidad ya que permitirán

hacer una comparación de las mediciones cuando el vehículo se encuentre en movimiento.

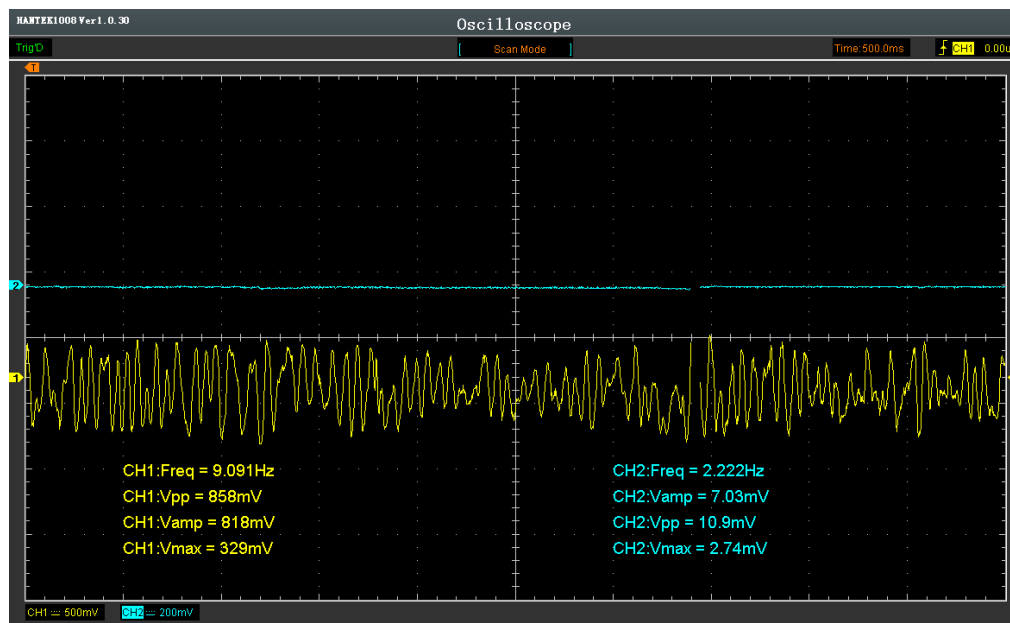


Figura 4.5 Señal de entrada y de salida del sistema de cosechamiento de energía eléctrica cuando el motor de encuentra en ralentí

4.1 Sistema de cosechamiento de energía eléctrica sometido a pruebas con el vehículo en movimiento

Una vez que se verificó que el sistema funciona de manera correcta en condiciones estáticas, se procedió a realizar las pruebas con el vehículo en movimiento, para esto se condujo el automóvil de pruebas Beetle por CU, durante el recorrido se fueron registrando las señales tanto de entrada como de salida del sistema de cosechamiento de energía eléctrica (en el siguiente link se muestra el video de la prueba realizada).

<https://www.youtube.com/watch?v=KV7rf0cZ4C4&list=LL&index=2&t=14s>



Figura 4.6 Recorrido realizado dentro de CU

A lo largo de la prueba se pudo observar que, durante aceleraciones y movimientos bruscos del automóvil, la señal tanto de entrada como de salida, aumentaba significativamente, aproximadamente 350 mV en la señal de entrada, mientras que en el de salida llegó a aproximadamente 5 mV. Estos aumentos se deben a que, en condiciones más dinámicas, se debe a que no solo actúan las vibraciones del motor en el transductor, si no como se propuso con anterioridad, también las aceleraciones transversales, longitudinales e incluso verticales que son producidas a los movimientos que tiene un automóvil cuando se encuentra en movimiento.

A continuación, se muestran las capturas obtenidas de las señales más relevantes, junto con una descripción breve de lo que ocasionó ese aumento en las señales.

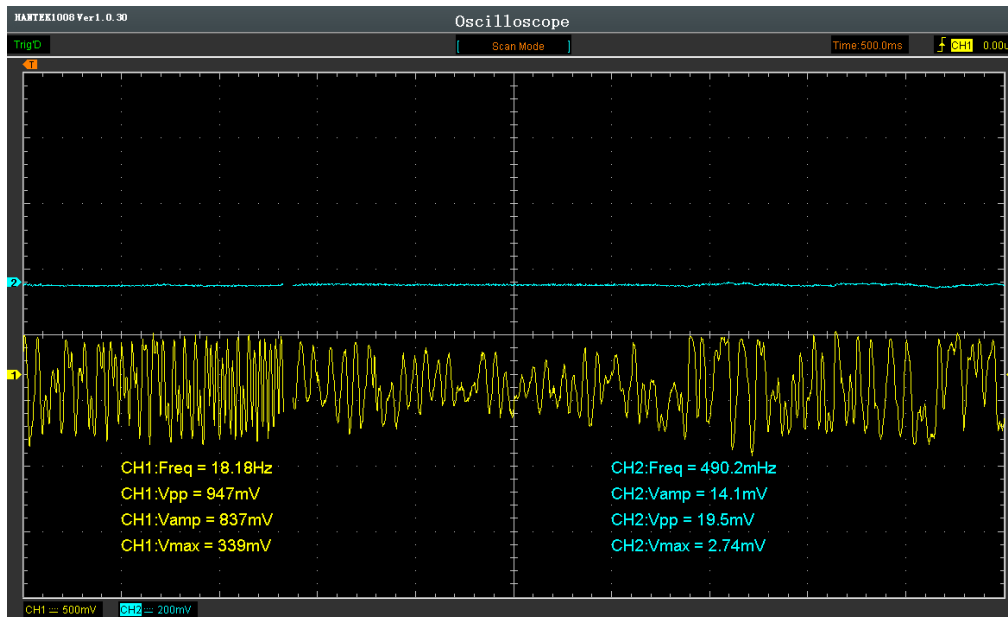


Figura 4.7 Señales recuperadas de la prueba de aceleración del automóvil de pruebas Beetle

La figura 4.7 corresponde a la señal de aceleración del vehículo (se siguieron todas las medidas de seguridad), se puede observar un aumento significativo en la frecuencia (18.18 Hz) y en el voltaje máximo tanto de entrada como de salida, aproximadamente 339 mV y 2.74 mV respectivamente.

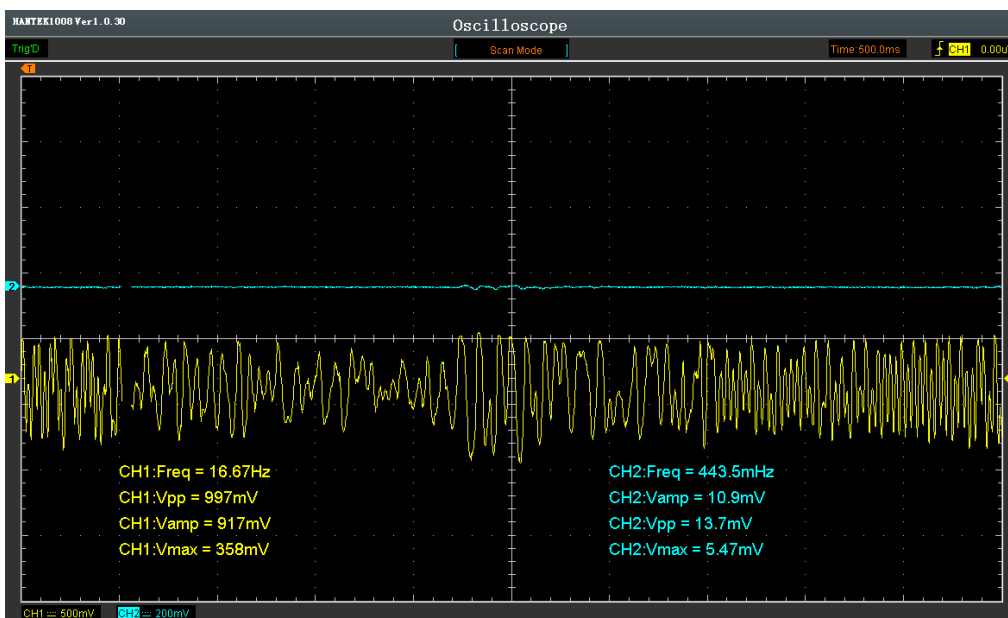


Figura 4.8 Grafica del momento en el que el vehículo de pruebas Beetle.

La figura 4.8 corresponde al momento en el que el automóvil paso sobre un tobe a baja velocidad. Mostrando una frecuencia de 16.6 Hz, y un voltaje máximo de 358 mV en la entrada y 5.47 mV en la salida.

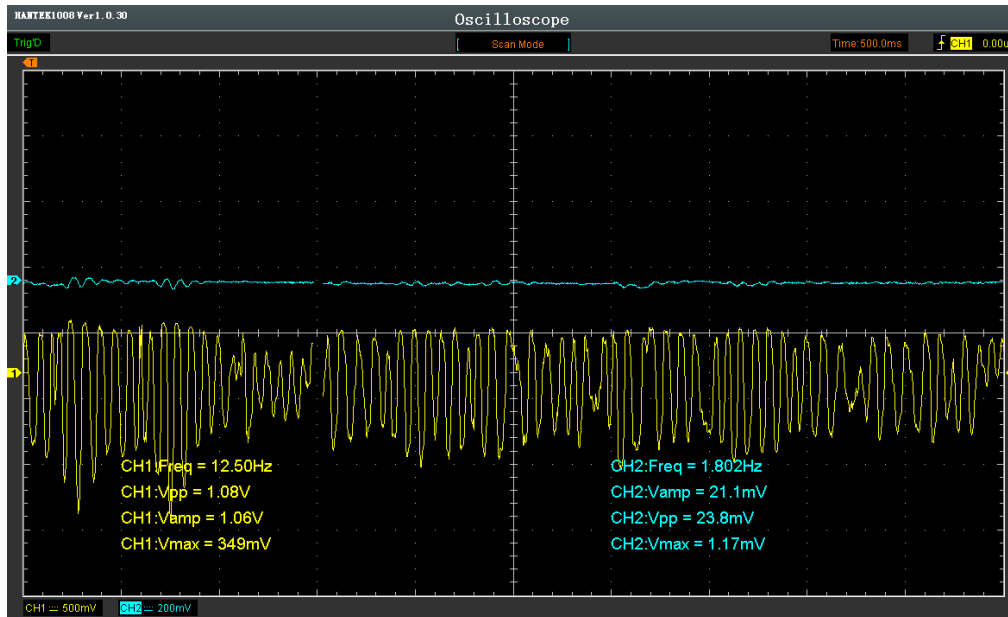


Figura 4.9 Señal del vehículo de pruebas Beetle cuando se dio un giro pronunciado a la derecha

La señal de la figura 4.9 corresponde al momento en el que el auto tomo una curva a la derecha, y debido a que el transductor tiene el sistema pendular y se colocó de manera perpendicular al auto, se observó una alta sensibilidad con este tipo de movimiento. La frecuencia fue de 12.5 Hz, con un voltaje máximo de 349 mV, cuando la señal se rectificó, mostro un voltaje máximo de 1.17 mV.

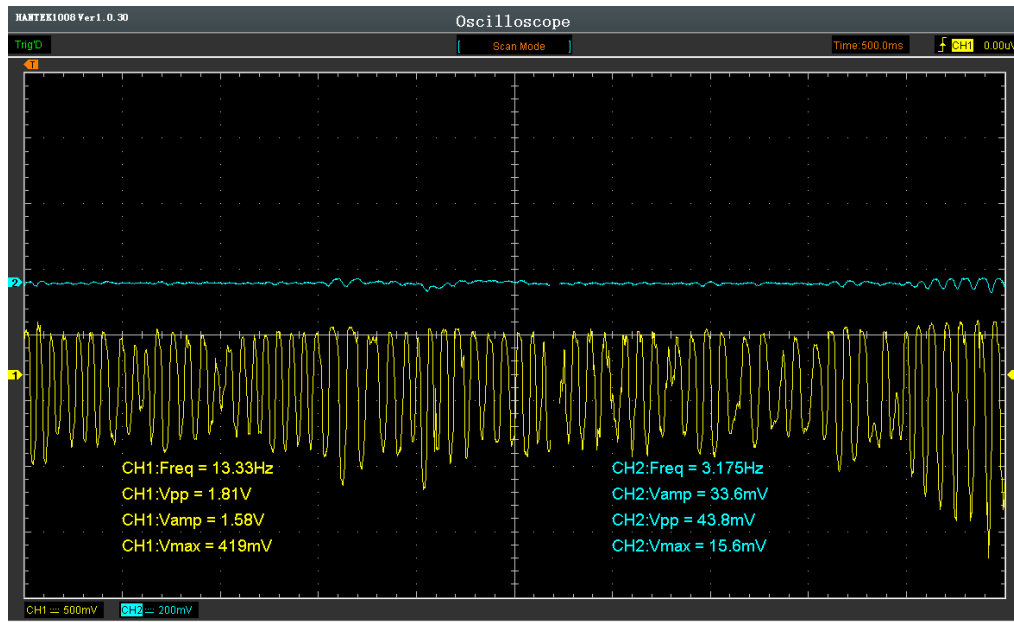


Figura 4.10 Señal registrada de las pruebas con el vehículo de pruebas Beetle cuando se expuso a movimientos bruscos

La figura 4.10 corresponde a las señales registradas cuando el auto tuvo un movimiento brusco vertical debido a irregularidades en el camino. Mostrando un aumento en el voltaje máximo de entrada y de salida, aproximadamente 419 mV y 15,6 mV respectivamente.

Estas pruebas demostraron el correcto funcionamiento del sistema de cosechamiento de energía para la transformación de energía vibratoria generada por el motor y los movimientos del automóvil en energía eléctrica, las señales generadas por el transductor piezoeléctrico se rectificaron de manera correcta por el circuito con el puente de diodos.

4.1.1 Prueba del funcionamiento del sistema de cosechamiento de energía eléctrica en otro vehículo

Para demostrar la viabilidad del sistema realizado para la generación y almacenamiento de energía eléctrica, se decidió realizar una prueba adicional en un segundo automóvil, un Jetta 2010 de cuatro cilindros, para verificar si el sistema puede operar correctamente en otro motor de características similares.

Debido a que el sistema de cosecha de energía eléctrica busca ser un sistema secundario dentro del automóvil, se evaluó la capacidad del sistema de generar energía eléctrica con ayuda de una batería recargable AA, con un multímetro para observar el voltaje antes y después de la prueba. La figura 4.11 se muestra el voltaje de dicha batería antes de conectarlo al sistema, el voltaje fue de 1.23 V.



Figura 4.11 Voltaje de la batería recargable AA antes de conectarse al sistema de cosecha de energía eléctrica.

Una vez medido el voltaje, se procedió a conectar la batería después del circuito rectificador, donde el polo positivo de la batería se conectó en la salida del circuito, y el polo negativo a tierra. Posteriormente se instaló todo el sistema sobre el motor del auto y se realizó el mismo recorrido que pruebas anteriores. A continuación, se muestra la figura 4.12 que corresponde al sistema instalado y la figura 3.13 que corresponde al tiempo de la prueba.

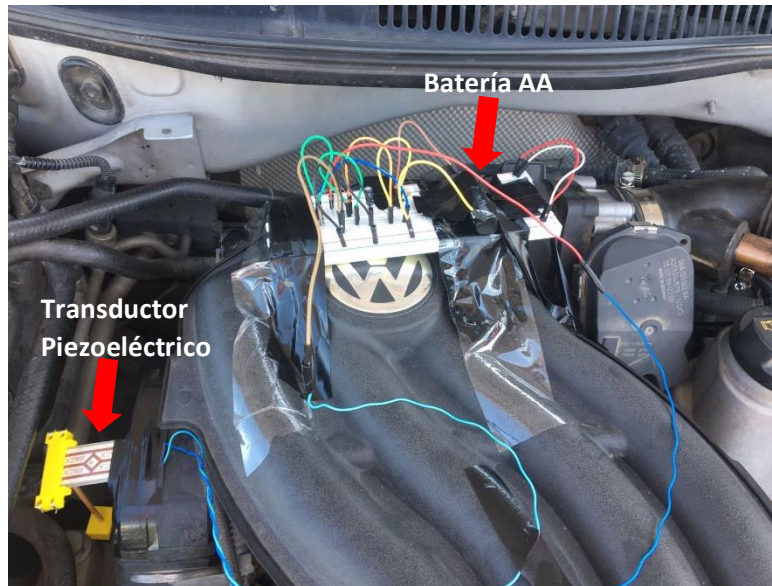


Figura 4.12 Instalación del sistema de cosechamiento de energía eléctrica con una batería para verificar su funcionalidad



Figura 4.13 Tiempo en que se realizó la prueba

Al finalizar la prueba, se retiró la batería del sistema y se midió de nuevo el voltaje de la batería, el sistema recargó 0.05 V a la batería recargable en un lapso de 28 minutos, lo que nos indica que el sistema efectivamente transfiere energía para cargar la batería, aunque en una cantidad escasa, si la conducción fuera más extensa de tiempo, se podría tener una carga mayor y esa energía recolectada podría administrarse a otro componente del auto. A continuación, se muestra la figura 4.14 correspondiente al voltaje recuperado.

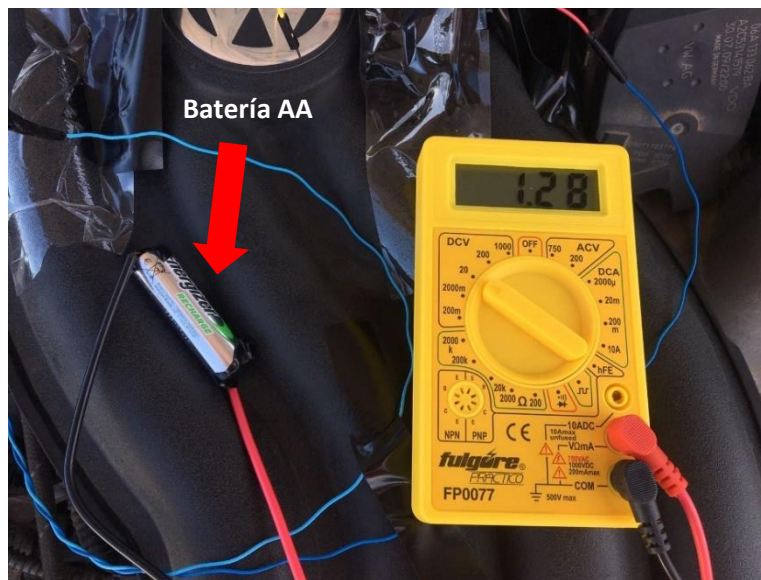


Figura 4.14 Voltaje final de la batería una vez que se colocó en el sistema de cosecha de energía eléctrica

4.1.2 Prueba del funcionamiento del sistema de cosechamiento de energía eléctrica utilizando un super capacitor.

Debido a que los resultados obtenidos no fueron tan comprometedores, se decidió cambiar el capacitor de $33 \mu\text{F}$ por un super capacitor de 22F a 2.3 V, lo que permite evaluar su capacidad de almacenamiento y su velocidad de recarga en las mismas condiciones. En teoría, el super capacitor puede almacenar más energía eléctrica a un voltaje más bajo y mantenerla por más tiempo, lo que permitiría su aprovechamiento para la alimentación de dispositivos de baja potencia. Antes de realizar la prueba, se midió la carga inicial del super capacitor, dicho valor era de 0.76 V como se muestra en la figura 4.15.



Figura 4.15 Voltaje inicial del super capacitor

La prueba se realizó nuevamente con el mismo vehículo Jetta, dejando el sistema instalado en el mismo lugar del motor (figura 4.16), se realizó el mismo recorrido dentro de Ciudad Universitaria con una duración de tiempo de 29 minutos y 36 segundos, muy cercano a la prueba realizada con la batería recargable.

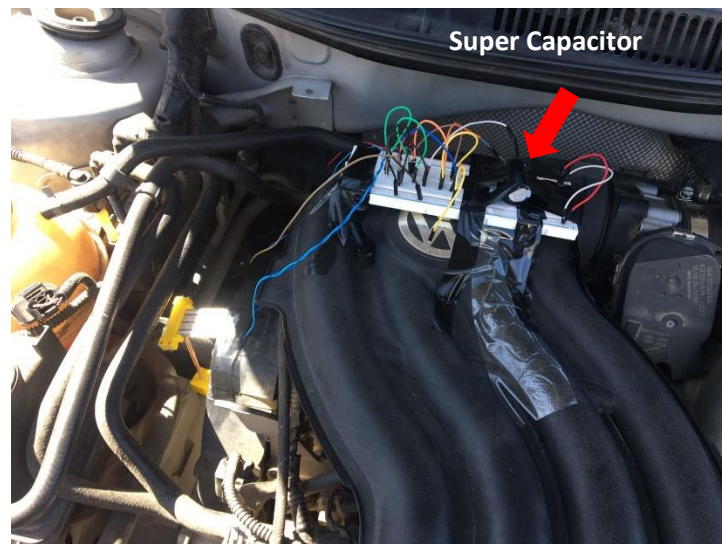


Figura 4.16 sistema de cosecha de energía eléctrica colocado en el motor del automóvil implementando un super capacitor.

Una vez terminada la prueba, se desconectó el super capacitor del sistema y se midió el voltaje final que se almacenó, el multímetro mostro un resultado de 1.25 V (figura 4.17). Lo que demuestra que existe un incremento de 0.49 V en aproximadamente 30 minutos de funcionamiento, lo que nos indica que el sistema pudo cargar el super capacitor, además de mostrar una mayor capacidad de almacenamiento y mayor velocidad de carga a comparación con la batería recargable AA.



Figura 4.17 Voltaje generado y almacenado en el super capacitor gracias al sistema de cosecha de energía eléctrica.

Esta prueba nos confirma el correcto funcionamiento del sistema además de demostrar que el uso de un super capacitor es una alternativa más eficiente para almacenar la energía generada por el transductor piezoeléctrico. Aunque el voltaje alcanzado sigue siendo relativamente bajo, tienen un potencial para su uso en componentes de bajo consumo dentro del automóvil.

4.2 Resultados

Para complementar de mejor manera los resultados obtenidos por el osciloscopio en el vehículo de pruebas Beetle y de forma que no sea muy extensa, se muestra a continuación la tabla 4.1 con los valores registrados correspondientes de dicha prueba.

Tabla 4.1 Datos recuperados de las pruebas realizadas con el sistema de cosechamiento de energía eléctrica con el vehículo de pruebas Beetle en movimiento

Hz	Vpp entrada (mV)	Vmax entrada (mV)	Vpp salida (mV)	Vmax salida (mV)
9.091	858	329	10.9	2.74
33.33	817	348	39.1	9.77
40	867	369	39.1	0
22.22	938	379	58.6	-9.77
16.67	875	348	39.1	-9.72
11.76	907	358	40	-19.5
10	917	329	49.8	19.5
28.57	947	349	9.77	2.74
16.67	997	358	13.7	5.57
9.091	858	329	10.9	2.74
18.18	947	339	19.5	2.74
22.22	997	349	9.77	-2.74
15.38	329	329	11.3	-1.17
16.67	707	269	10.2	-5.47
9.524	1180	379	23.4	3.91
13.33	927	349	9.38	3.91
18.18	1140	379	19.5	0
20	878	329	10.2	-3.91
14.29	1100	369	12.5	1.17
13.33	1220	379	23.8	11.3
12.5	1080	349	23.8	1.17
12.5	967	349	25.4	2.74
25	1380	369	25.4	9.77
33.33	1060	358	15.2	1.17
13.33	1810	419	43.8	15.6
14.29	937	349	10.9	7.03
9.524	1010	358	9.77	21.1
16.67	907	339	12.5	5.47
14.29	937	358	10.9	9.77



12.5	1230	389	25	8.21
15.38	1100	399	18	15.6
100	1010	379	12.5	11.3
16.67	978	369	11.7	15.6
13.33	947	349	13.7	8.21
22.22	627	219	12.9	28.1
Promedio =				
19.7154286 Hz	982.457 mV	351.9428571 mV	20.914 mV	4.99 mV

Con los datos recopilados entonces se puede decir que la frecuencia promedio que tiene un automóvil en un manejo normal este entorno a los 19 y 20 Hz, pues esto es gracias a las vibraciones del motor y a los movimientos del auto. Los voltajes pico a pico de la entrada son casi 1 V, lo cual corresponde a la pequeña energía que en general los materiales piezoeléctricos pueden generar. Cuando la energía eléctrica pasa por el circuito rectificador de onda completa, se puede ver que la señal se reduce bastante, promediando un aproximado de 5 mV de voltaje máximo, el bajo voltaje puede deberse a que existe una caída de tensión en los diodos utilizados (1N4148), así como la impedancia que existe en el capacitor.

Existen algunos datos con valores negativos, pero esto no representa un error, pues la señales si se rectifican, pero el voltaje tiene cruces negativos cuando la amplitud es pequeña y como se mencionó con anterioridad, por la caída de tensión en los diodos. De igual manera existen valores bastante buenos, pues debido a algunos movimientos que tuvo el automóvil llego a generar 22.22 Hz con un voltaje máximo de 627 mV y 28.1 mV de salida, aunque esta frecuencia no fue la más alta, esta señal mostro una generación de potencia que puede ser útil.

Entonces se demuestra con esta prueba que el sistema funciona de manera correcta, rectifica la señal en todos los momentos de la prueba y aunque los voltajes de salida sean pequeños, corresponde al comportamiento esperado gracias a las simulaciones realizadas. Por otro lado, se observó que las señales de salida aumentan considerablemente cuando el vehículo se expone a un comportamiento



más dinámico, como lo es pasar topes, curvas, aceleraciones y posiblemente en frenadas fuertes, así demostrando que el transductor piezoeléctrico con el sistema pendular responde bien a este tipo de vibraciones y movimientos.

Por otro lado, la implementación de la batería recargable al sistema ayudo a tener una perspectiva más realista de la energía que se puede generar y almacenar para su posterior uso, además, el uso de otro vehículo con características de motor muy similares confirma el funcionamiento del sistema de cosecha de energía eléctrica en automóviles comunes. La energía recolectada en la batería fue de aproximadamente 0.05 V, en un tiempo aproximado de media hora de manejo, lo que nos indica que, a mayor tiempo de conducción, mayor será la carga generada. En una hora de manejo en teoría se generaría un 0.1 V y esta energía generada seguiría siendo bastante baja para la alimentación de un componente de bajo consumo.

Debido a lo anterior, se optó por el cambio del capacitor de 33 μ F colocado originalmente en el circuito, por un super capacitor de 22 F, este componente ayudo a tener una generación de energía eléctrica mayor, de aproximadamente 0.5 V en un manejo de media hora, lo que en teoría esta cantidad de energía cosechada ya podría ser aprovechada de mejor manera. En el artículo revisado en el estado del arte [51], nos proporciona una imagen (Figura 4.18) en donde se nos muestran las potencias de consumo de distintos dispositivos y sistemas, tomando en cuenta la potencia generada en este proyecto (18 mW), el sistema podría en teoría alimentar un sistema Bluetooth LE y un sistema Zigbee.

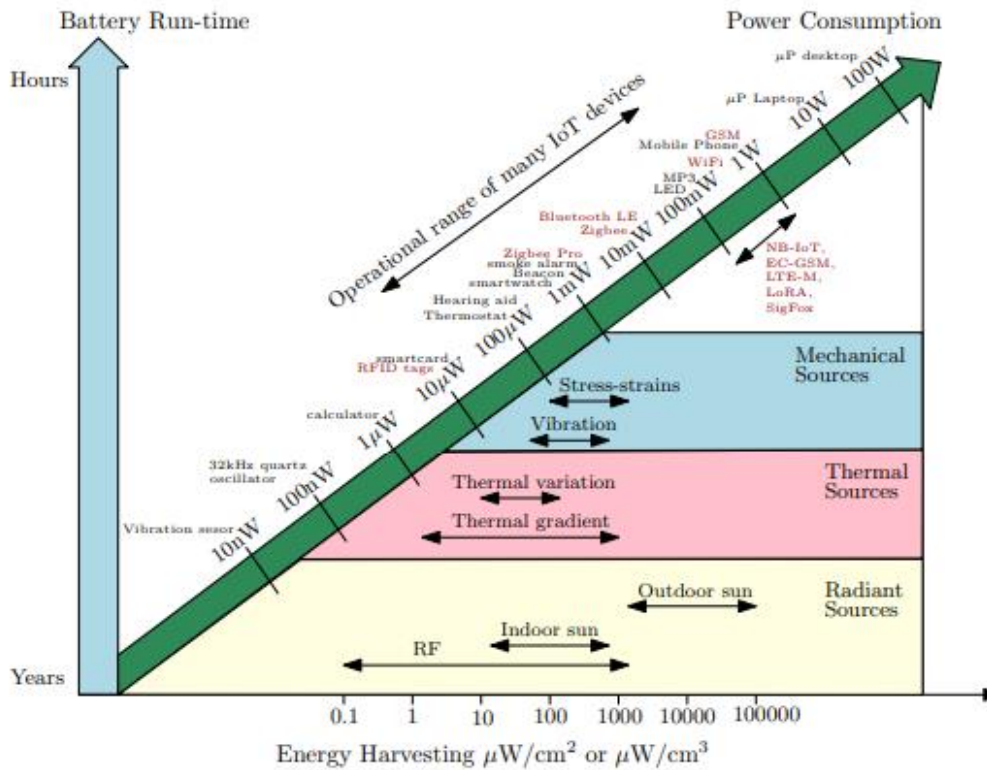


Figura 4.18 Consumo de potencia en varias aplicaciones y densidades para varias fuentes de energía, Imagen recuperada de [51].

Complementando lo anterior, debido al voltaje obtenido en la prueba con el super capacitor, alcanzando un voltaje final de 1.25 V, un componente del auto que puede ser alimentado con un voltaje bajo, según el sitio web Loctite Teroson [67], el sensor MAP que sirve para medir la presión del aire que entra al motor utiliza un voltaje de entre 1 a 3.5 V. A continuación, se muestra una tabla de los componentes que podrían ser alimentados con el sistema de cosecha de energía eléctrica a partir de las vibraciones del motor de un automóvil.

Tabla 4.2 Posibles dispositivos que pueden ser alimentados por el sistema de cosechamiento de energía eléctrica, mostrando un valor aproximado del voltaje que necesitan para funcionar correctamente

Dispositivo	Voltaje	Aplicación
Sensor de temperatura LM35	4 – 30 V	Medir la temperatura del motor
Sensor MAP	1 – 3.5 V	Medir la presión de aire que entra al motor
Sensor de posición del cigüeñal	5 – 12 V	Indica la posición del cigüeñal en el auto
Luces Led	1.5 – 3.5 V	Iluminar el interior del automóvil
Sensor TPS	5 V	Indica la posición del acelerador
Sensor ultrasónico de reversa	5 v	Indica la distancia con otros objetos
Módulos de comunicación CANBus	3.3 – 5 V	Comunicar distintos dispositivos del auto entre sí.

La información de esta tabla fue recabada de hojas de datos de los fabricantes y literatura técnica. Referencias [67] ,[68], [69], [70], [71], [72], [73].

Debido a que el sistema pudo cargar casi medio voltio a el super capacitor en un manejo de media hora, se puede decir entonces que en un manejo diario ese voltaje podría aumentar, lo cual podría sin problema alimentar cualquiera de los componentes antes mencionados en la tabla 4.2.

4.3 comparación con el estado del arte

A continuación, se muestra una tabla con los proyectos descritos en el apartado del estado del arte en donde se utilizaron dispositivos piezoeléctricos para la generación de energía eléctrica, así como sus potencias.

Tabla 4.3 Comparación de proyectos del estado del arte

Trabajo	Sistema	Frecuencia de trabajo	Voltaje/Potencia generado
Análisis dinámico de un recolector de energía de vibración piezoeléctrica en voladizo con polarización eléctrica maximizada gracias a la forma óptima del espesor para la primera frecuencia propia	Viga piezoeléctrica en voladizo, se optimizó su espesor	21.5 Hz	1.4 V / 0.24 – 0.3 mW
Piezoelectric Power Generation in Automotive Tires	Transductores piezoeléctricos en neumáticos	No especificado	No especificado
Implementación de un sistema de vibraciones	Medición de vibraciones en motor, chasis y sistema de audio	90 -170 Hz	6.8 mv – 12.4 mV
Un recolector de energía multiestable de frecuencia ultrabaja que utiliza un péndulo no lineal y transducción piezoeléctrica para la detección autoalimentada	Transductor colgante que reaccione con un péndulo	0.5 – 5 Hz	8 μ W
Paving the Path to a Green and Self-Powered Internet of Things	Aplicaciones IoT piezoeléctricas	No especificado	2 – 10 V / 2mW
Presente Trabajo	Transductor piezoeléctrico con sistema pendular	8 – 30 Hz	1.25 V / 18 mW



Los resultados obtenidos en este trabajo muestran relación con los trabajos presentados en el apartado del estado del arte, debido a las bajas potencias generadas en general en sistemas dinámicos. En el trabajo [46] los autores demostraron que la modificación del espesor del dispositivo piezoeléctrico incrementa el voltaje en aproximadamente 30%, alcanzando potencias de entre 0.24 mW y 0.3 mW, y por ende aumenta el voltaje a 1.4 V exponiendo al dispositivo a una frecuencia de 21.5 Hz que, en comparación con el sistema propuesto en este trabajo, la implementación de la estructura pendular en el transductor piezoeléctrico genera una potencia promedio de 17 mW, además ayuda a acoplar las frecuencias del motor del auto con las del transductor, lo que se traduce a generar más energía eléctrica.

Por otro lado, en el artículo [49] existe una similitud con este trabajo debido a que en dicho artículo se expone un transductor piezoeléctrico que reaccione con un elemento pendular para generar más energía eléctrica, ese trabajo reportó una potencia máxima de 8 μ W a 2Hz, diseñado para operar en bajas frecuencias a comparación del sistema de cosecha de energía eléctrica de este proyecto pensado para frecuencias de entre 10 y 30 Hz, lo que demuestra que aunque el efecto piezoeléctrico puede funcionar con bajas frecuencias, el diseño propuesto en este trabajo resulta más eficiente para las vibraciones mecánicas del automóvil.

De igual manera, en el artículo “A Comprehensive Review of Energy Harvesting From Kinetic Energy at Low Frequency” [50] se menciona que los dispositivos piezoeléctricos sobresalen de otros dispositivos gracias a su simplicidad, tamaño compacto y que no requieren de mantenimiento constante, pero generan bajas potencias y limitadas para la alimentación de sensores inalámbricos o incluso microcontroladores. Los resultados de este proyecto muestran que el uso de un super capacitor incorporado al circuito, puede generar un voltaje de 1.25 V en un manejo de media hora aproximadamente lo que indica que, en un manejo diario, ese voltaje podría ser mayor y por ende alimentar un sensor del automóvil como lo puede ser el sensor MAP.



Por último, en la referencia [51], se menciona que algunos sistemas piezoeléctricos pueden llegar a generar voltajes de entre 2 y 10 V, con potencias de aproximadamente 2 mW, valores un poco cercanos a los obtenidos en este trabajo, pero la capacidad del sistema de cargar una batería AA y un super capacitor demuestra la viabilidad del sistema en el automóvil.



Capítulo 5. Conclusiones

En este proyecto de desarrollo e investigación se implementó un sistema de cosechamiento de energía eléctrica mediante el uso de un transductor piezoeléctrico con un sistema pendular, acoplado en su extremo libre, además de colocarlo en configuración como viga en voladizo en el motor de combustión interna. Este transductor a su vez se integró a un circuito de rectificación de onda completa el cual permite convertir la señal de corriente alterna que genera por las vibraciones y movimientos del automóvil en corriente directa, con el objetivo de evaluar su viabilidad para la generación de energía aprovechable.

Este sistema propuesto demuestra ser un sistema poco complejo, ni invasivo para la generación de energía eléctrica, pues la instalación de este sistema en el motor del automóvil de pruebas Beetle del laboratorio, permitió comprobar que su integración es viable en un entorno real del área automotriz. Las pruebas realizadas en condiciones de ralentí y durante la conducción mostraron que el transductor piezoeléctrico fue capaz de captar las vibraciones generadas por las vibraciones del motor, así como por los movimientos longitudinales, transversales y verticales del vehículo.

Durante las pruebas se registraron más de 30 mediciones cuyos valores promedios fueron los siguientes.

- Frecuencia de entrada: 19.7 Hz
- Voltaje máximo de entrada: 352mV
- Voltaje máximo de salida de 4.99mV
- Potencia generada de 18mW con una resistencia de 20k Ohms.

A partir de estos resultados, se observa que las señales de salida se rectificaron exitosamente, alcanzando un promedio de 5 mV, que representa un 1.4 % de la señal máxima de entrada, valor bastante reducido para la alimentación de dispositivos electrónicos de bajo consumo, pero a su vez valor que se encuentra dentro del rango esperado para sistemas piezoeléctricos, además de una potencia de 18 mW. Esto se debió principalmente a la caída de tensión en los diodos y la



baja potencia de salida, pero las señales obtenidas validan el objetivo de transformar la energía vibratoria y movimientos en energía eléctrica de forma correcta.

El sistema pendular de 8 cm por otra parte demostró que su implementación en el transductor piezoeléctrico ayudo al aumento de la flexión del mismo, así como su sensibilidad ante las vibraciones de baja frecuencia producidas por los movimientos del vehículo. Esto coincide con lo reportado en el estado del arte donde los autores de los proyectos investigados indican que la implementación de un sistema mecánico ayuda a la mejora del desempeño de los sensores y transductores piezoeléctricos cuando son sometidos a condiciones reales de vibraciones.

Los resultados obtenidos de igual manera concuerdan con lo reportado en la literatura revisada en el estado del arte, pues los trabajos realizados señalan que un solo transductor entrega potencia bajas y dependen de otros sistemas adicionales para poder aumentar su generación de energía eléctrica. Como ya se mencionó con anterioridad, este proyecto buscó sentar las bases experimentales para futuros proyectos mucho más optimizados, como lo puede ser el uso de múltiples transductores colocados en paralelo, por ejemplo, circuitos de rectificación más eficientes e incluso sistemas para el almacenamiento y regulación de la energía eléctrica generada para alimentar dispositivos de bajo consumo.

Además, el cambio del capacitor por un super capacitor, debido a la rápida carga del mismo mostro, demuestra que cumple con el objetivo de ser un sistema secundario dentro del automóvil y que dicha energía eléctrica generada y almacenada puede ser útil para la alimentación de otros sistemas y/o componentes dentro del automóvil.

En conclusión, se demostró la viabilidad practica de un sistema piezoeléctrico en un motor de combustión interna para la cosecha de energía eléctrica a partir de las vibraciones del automóvil. Aunque la energía eléctrica generada al final no es excesiva, este trabajo demuestra que el funcionamiento del sistema fue el esperado y abre las puertas al desarrollo de proyectos más sofisticados orientados principalmente a aplicaciones reales en el sector automotriz.



Trabajos futuros

Este proyecto de tesis se presenta como una base experimental y conceptual para futuros proyectos que se enfoquen en la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de vibraciones, utilizando transductores piezoeléctricos en entornos automotrices, ingeniería e industrias de producción. Un proyecto podría componerse de mejorar y optimizar el diseño del sistema pues, aunque los resultados mostraron un funcionamiento satisfactorio, presento perdidas de energía debido a la caída de tensión en los diodos. Por otra parte, debido a que la industria automotriz se encuentra encaminada a la electrificación, el cual ya no será necesario el uso de motores de combustión interna en algún punto, este sistema se podría implementar en la suspensión y amortiguadores del vehículo, pues estos presentan vibraciones constantes debido a que los caminos y asfaltos tienden a ser regulares, especialmente en nuestro país, además de poder ser una ayuda para la carga de la batería del automóvil eléctrico.

Para este proyecto podría incorporarse un sistema de almacenamiento de la energía eléctrica generada, con varios capacitores conectados en serie o incluso una batería de carga rápida que permitan el acumulamiento de dicha energía y utilizarla para la alimentación de sistemas mucha más grandes y complejos del automóvil. Así mismo, el sistema de cosechamiento de energía eléctrica puede extenderse más allá del área automotriz, aplicándolo en maquinaria industrial, turbinas, ventiladores industriales y en estructuras mecánicas que vibren constantemente. Esto de igual forma para la alimentación de se sensores y otros componentes sin necesidad de fuentes de alimentación externas y así favoreciendo a la autonomía energética.

Bibliografía

- [1] N. Brunetière, «The conversation,» 5 abril 2023. [En línea]. Available: [https://theconversation.com/como-los-coches-desperdician-dos-tercios-de-su-combustible-203351#:~:text=Las%20p%C3%A9rdidas%20de%20energ%C3%ADa%20m%C3%A1s,accionamiento%20\(aproximadamente%20el%2010%20%25\)..](https://theconversation.com/como-los-coches-desperdician-dos-tercios-de-su-combustible-203351#:~:text=Las%20p%C3%A9rdidas%20de%20energ%C3%ADa%20m%C3%A1s,accionamiento%20(aproximadamente%20el%2010%20%25)..) [Último acceso: 10 agosto 2025].
- [2] F. Molina, «Fuerza y energía,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-de-guayaquil/matematicas-nivelacion/unidad-1-fuerza-y-energia-dinamica-msc-franklin-molina/134068691>. [Último acceso: 10 agosto 2025].
- [3] A. Vedan, «Tractian,» 28 abril 2025. [En línea]. Available: <https://tractian.com/es/blog/que-son-las-vibraciones-mecanicas>. [Último acceso: 10 agosto 2025].
- [4] K. Thomas, «HBK,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.hbm.com/es/6810/guia-de-seleccion-de-sensores-piezoelctricos/>. [Último acceso: 10 agosto 2025].
- [5] GSL Industrias , «GSL industrias,» 19 enero 2022. [En línea]. Available: <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/sensor-piezoelctrico?srsId=AfmBOophHu1J2fHpITHnSql-I5NI0-oMUMBnAhpXi61KLkyAkWVQsYtO>. [Último acceso: 10 agosto 2025].
- [6] Instituto de investigaciones en España, «CeDInt,» 30 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.cedint.upm.es/es/proyecto/sistema-autoalimentado>. [Último acceso: 15 Agosto 2025].
- [7] ENERGY FLOORS, «ENERGY FLOORS,» 25 enero 2025. [En línea]. Available: <https://energy-floors.com/piezoelctric-energy-promise-and-limitations/>. [Último acceso: 2 septiembre 2025].
- [8] GSL industrias, «GSL Industrias,» 27 01 2022. [En línea]. Available: https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/materiales-piezoelctricos?srsId=AfmBOoLds19XI623-IJmGCB_vvm5_m1kQpJn0k9xdIP-5yPQ5LyrIQ2.
- [9] Piezo Education, «Piezo.com,» 2025. [En línea]. Available: <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelctricity?srsId=AfmBOoqLB-AzzqqcMff7gCJdQdLpv3fkJmNr410udBUBCPbNcdg8pDO>.



- [10] KISTLER, «KISTLER,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.kistler.com/INT/es/efecto-piezoelectrico/C00000136>.
- [11] Revista de Materiomática, «ScienceDirect,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/piezoelectric-material>.
- [12] ATPC, «ATCP Engenharia Fisica,» 2025. [En línea]. Available: https://www.atcp-ndt.com/es/soporte/faq_trz/459-que-es-el-factor-de-calidad-mecanico-qm-y-para-que-sirve.html#:~:text=Qm%20es%20un%20par%3%A1metro%20proporcional,Qm%2C%20mejor%20ser%3%A1%20el%20dispositivo..
- [13] Metra Mess- und Frequenztechnik, «MMF,» 2025. [En línea]. Available: <https://mmf.de/en/piezoelectric-principle/>.
- [14] PZT, «PZT,» 2025. [En línea]. Available: [https://www.piezoelements.com/info/the-principle-and-application-of-piezoelectric-60181271.html#:~:text=The%20principle%20of%20the%20piezoelectric,called%20the%20inverse%20piezoelectric%20effect\)..](https://www.piezoelements.com/info/the-principle-and-application-of-piezoelectric-60181271.html#:~:text=The%20principle%20of%20the%20piezoelectric,called%20the%20inverse%20piezoelectric%20effect)..)
- [15] F. G. Melero, «Innovación y Experiencias,» 28 marzo 2010. [En línea]. Available: https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csicsif/revista/pdf/Numero_28/FRANCISCO_GUTIERREZ_1.pdf.
- [16] American Piezo, «APC INternational, Ltd.,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants/>. [Último acceso: 10 septiembre 2025].
- [17] Universitat de Barcelona, «Universitat de Barcelona,» 2025. [En línea]. Available: http://www.ub.edu/gilafa/web_dielec/005/principal5.html.
- [18] A. Oppermann, «bultin,» 30 abril 2025. [En línea]. Available: <https://bultin.com/hardware/dielectric-constant#:~:text=La%20constante%20diel%3%A9ctrica%20mide%20la,ser%3%A1%20su%20capacidad%20de%20almacenamiento..> [Último acceso: 10 septiembre 2025].
- [19] regmurcia Integra, «regmurcia.com,» 2021. [En línea]. Available: https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-26901-DETALLE_REPORTAJESABUELO.
- [20] Quimica.ES, «QUIMICA.ES,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Rubidio.html>.
- [21] Q. B. Li y F. , «Springer Nature Link,» 2016. [En línea]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48210-1_10.



- [22] M. Alguero, «Electroactive Oxides for Smart Devices,» ICMM, CSIC, 2025. [En línea]. Available: <https://wp.icmm.csic.es/eosmad/lineas-de-investigacion/ceramicas-piezoelectricas/>. [Último acceso: 7 septiembre 2025].
- [23] AmericanPiezo, «APC,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/pzt/>.
- [24] SAMATERIALS, «STANDFORD ADVANCED MATERIALS,» 24 julio 2025. [En línea]. Available: <https://www.samaterials.es/content/a-closer-look-at-stressed-piezo-crystals.html>. [Último acceso: 7 septiembre 2025].
- [25] Concepto, «Concepto.de,» 2025. [En línea]. Available: <https://concepto.de/polimeros/>.
- [26] M. Smith y S. Kar-Narayan, «International Materials Reviews,» 2021. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1915935>.
- [27] Y. W. X. Z. C. Z. X. J. W. W. T. L. Junzhu Tao, «Polyacrylonitrile as high-performance piezoelectric materials,» *Nano energy*, Vols. %1 de %2118, Part B, nº <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285523008248>, 2023.
- [28] Piezo.com, «Piezo.com,» 2025. [En línea]. Available: <https://piezo.com/collections/piezoelectric-sensors/products/piezoelectric-bending-transducer-s118-j1ss-1808yb>. [Último acceso: 10 septiembre 2025].
- [29] L. Nuñez, «INESA TECH,» 31 10 2023. [En línea]. Available: <https://www.inesa-tech.com/blog/viga-en-voladizo-que-es/#:~:text=Las%20vigas%20en%20voladizo%20soportan,resiste%20a%20fuerzas%20de%20cizallamiento..>
- [30] SkyCiv, «SkyCiv,» 24 11 2023. [En línea]. Available: <https://skyciv.com/es/docs/tutorials/beam-tutorials/cantilever-beam/#:~:text=Una%20viga%20en%20voladizo%20es,%2C%20cubiertas%2C%20y%20otros%20voladizos..>
- [31] A. F. García, «Física con ordenador,» 12 2010. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>.
- [32] B. Shafqat, «Slideshare,» 12 02 2019. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/slideshow/vibration-analysis-and-modelling-of-cantilever-beam/131472322>.
- [33] A. Arosemena, «Academia UTP,» 2025. [En línea]. Available: https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/72/clase_2_vibracion_libre_de_un_sistema_de_un_grado_de_libertad.pdf.



- [34] A. Vedan, «Tractian,» 28 abril 2025. [En línea]. Available: <https://tractian.com/es/blog/que-son-las-vibraciones-mecanicas>. [Último acceso: 12 septiembre 2025].
- [35] T. Erbesd, «ERBESSD INSTRUMENTS,» 2024. [En línea]. Available: https://www.erbessd-instruments.com/es/articulos/resonancia-y-frecuencia-natural/?srsltid=AfmBOoqaB4gldHcDcKv_J41tMxoHE0vrJgA0HDL4wpMzjww9wckZxdqD.
- [36] T. Erbesd, «Erbesed instrument,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.erbessd-instruments.com/es/articles/resonancia-y-frecuencia-natural/#:~:text=Puedes%20aumentar%20la%20frecuencia%20natural,frecuente%2C%20pero%20es%20igualmente%20eficaz..> [Último acceso: 12 septiembre 2025].
- [37] I. Tomasov Silva y C. G. Rodriguez, «A model to estimate a natural frequency based on the vibrational response of a system excited by a high acceleration sine sweep,» *Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, nº 1, pp. 54-61, 2018.
- [38] Predictiva 21, «Predictiva 21,» 21 agosto 2019. [En línea]. Available: <https://predictiva21.com/influencia-parametros-pasivos-vibracion>. [Último acceso: 10 septiembre 2025].
- [39] A. F. Garcia, «Física con ordenador,» diciembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/trabajo/pendulo/pendulo.htm>. [Último acceso: 11 septiembre 2015].
- [40] B. -. U. o. Manchester, «Tutor Chase,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.tutorchase.com/answers/a-level/maths/how-is-the-frequency-of-a-simple-pendulum-calculated>. [Último acceso: 12 septiembre 2025].
- [41] H. H. T. Ortega, «HETPRO,» 2023. [En línea]. Available: https://hetpro-store.com/TUTORIALES/rectificador-de-onda-completa/?srsltid=AfmBOoomSyZdvwBl7ozFdWYm_FD0Zfm7hxCM48LVAreLXAliqUYcMpv3.
- [42] LGESEMI, «LGE,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.lgesemi.com/blog/industry-news-7/how-does-a-bridge-rectifier-diode-circuit-work-269>. [Último acceso: 12 septiembre 2025].
- [43] Ingeniería Mecafenix, «Ingeniería Mecafenix,» 26 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/electronica/componentes/puente-de-diodos/>. [Último acceso: 12 septiembre 2025].
- [44] DERF ELECTRONICS CORPORATION, «DERF,» 2025. [En línea]. Available: <https://derf.com/how-a-bridge-rectifier-works-step-by-step>.



- tutorial/?srsltid=AfmBOopMpeKwtRVNf87DmPE2dClJq2HR0KU_PZyaPcNODZN3T6AAewaU. [Último acceso: 12 septiembre 2025].
- [45] S. Mazzucchelli, «ReporteAsia,» 12 noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://reporteasia.com/region/japon/2024/11/12/japon-energia-piezo-electrica-generar-electricidad/>. [Último acceso: 20 septiembre 2025].
- [46] P. Skerys y R. Gaidys, «A Dynamic Analysis of a Cantilever Piezoelectric Vibration Energy Harvester with Maximized Electric Polarization Due to the Optimal Shape of the Thickness for First Eigen Frequency,» 4 julio 2025. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7525>. [Último acceso: 20 septiembre 2025].
- [47] L. Calderone, «altenergymag.com,» 26 diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.altenergymag.com/article/2017/12/piezoelectric-power-generation-in-automotive-tires/27642/>. [Último acceso: 20 septiembre 2025].
- [48] C. E. Guerrero Osorio , F. López García , J. Macias Carrillo , C. D. Patrón Bustos y L. Á. Salones Francisco, «Implementación de un sistema de medición de vibraciones,» Benemerita Universidad Autonoma de Puebla , Puebla, 2024.
- [49] H. Fu, S. Hu, J. Jiang, J. Rao y S. Theodossiades, «A multi-stable ultra-low frequency energy harvester using a nonlinear pendulum and piezoelectric transduction for self-powered sensing,» *Mechanical System and Signal Processing* , vol. I, nº 1, p. 18, 2023.
- [50] A. Luo, Q. Tan, W. Xu, J. Huang , S. Gu, X. Guo, C. Lee, K. Fan y F. Wang, «A Comprehensive Review of Energy Harvesting From Kinetic,» *Advanced Material Technologies* , vol. 1, p. 32, 2015.
- [51] M. Shirvanimoghaddam, K. Shirvanimoghaddam, M. Mahdi Abolhasan, M. Farhang, V. Zahiri Barsari, H. Liu , M. Dohler y M. Naebe, «Paving the path to a green and self-powered internet of things,» *ResearchGate* , vol. I, p. 25, 2017.
- [52] Ensinger , «ensingerplastics,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.ensingerplastics.com/es-br/semielaborados/plastico/tecapet-white>.
- [53] Quimica.es, «Quimica.es,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Cobre.html>.
- [54] sonelastic, «sonelastic,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.sonelastic.com/es/fundamentos/tablas-propiedades-materiales/metales-no-ferrosos.html>.
- [55] ingemecánica, «Ingemecánica,» 2025. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutoriales/propiedades-del-cobre.html>. [Último acceso: 23 septiembre 2025].



- [56] Piezo.com/support, «support.piezo,» 2024. [En línea]. Available: <https://support.piezo.com/article/62-material-properties>.
- [57] Mecanizado CNC, «grumeber,» 29 abril 2021. [En línea]. Available: <https://grumeber.com/acero-inoxidable-aisi-304/>.
- [58] Temples Industriales Alcalá, «Temples Industriales Alcalá,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.templesindustrialescalca.es/limite-elastico-de-los-aceros/#:~:text=El%20l%C3%ADmite%20el%C3%A1stico%20del%20acero,que%20vayan%20a%20ser%20expuestas..> [Último acceso: 23 septiembre 2025].
- [59] mit.edu, «mit.edu,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.mit.edu/>.
- [60] Mariano, «Tecnología de los plásticos,» 14 noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/poliiimida.html>.
- [61] Daken Chemical, «Daken Chemical,» 1 octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.dakenchem.com/es/la-introduccion-de-la-poliiimida-y-el-proceso-de-los-monomeros/#:~:text=%C2%BFcu%C3%A1l%20es%20la%20caracter%C3%ADstica%20de,son%20resistentes%20a%20la%20hidr%C3%B3lisis..> [Último acceso: 23 septiembre 2025].
- [62] Piezo.com, «PIEZO.COM,» 2025. [En línea]. Available: <https://piezo.com/collections/piezoelectric-energy-harvesters/products/piezoelectric-bending-transducer-s118-j1ss-1808yb>.
- [63] Universidad de Guanajuato, «NODO,» 23 febrero 2022. [En línea]. Available: [https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-7-esfuerzos-normales-deformacion-unitaria-ley-de-hooke/#:~:text=La%20deformaci%C3%B3n%20unitaria%20\(%CE%B4\)%20se,el%20%C3%A1rea%20transversal%20del%20material..](https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-7-esfuerzos-normales-deformacion-unitaria-ley-de-hooke/#:~:text=La%20deformaci%C3%B3n%20unitaria%20(%CE%B4)%20se,el%20%C3%A1rea%20transversal%20del%20material..)
- [64] S. Jaber, «SIMSCALE,» 6 mayo 2025. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/blog/structural-resonance-how-to-mitigate-it/>. [Último acceso: 29 septiembre 2025].
- [65] SkyCiv Engineering, «SkyCiv,» 2025. [En línea]. Available: <https://skyciv.com/es/docs/tutorials/section-tutorials/moment-of-inertia-of-a-rectangle/#:~:text=En%20resumen%2C%20la%20f%C3%B3rmula%20para,%E2%81%84%2012%20%E2%80%93%20bd%C2%B3%20%E2%81%84%2012..> [Último acceso: 26 septiembre 2025].
- [66] OCW.tudelft, «OCW.tudelft,» 27 septiembre 2011. [En línea]. Available: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Materiaalkunde_1_slides_chapter5.pdf. [Último acceso: 28 septiembre 2025].



- [67] NAYLAMP Mechatronics, «NAYLAMP Mechatronics,» 2025. [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html. [Último acceso: 19 septiembre 2025].