

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS
ROTATIVAS**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

KEVIN MORALES ALMANZA

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES CUAUTLE

CODIRECTOR DE TESIS

DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

Fecha: Mayo 2021

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una investigación sobre la generación de energía aprovechando las vibraciones generadas por una máquina rotativa con la utilización de dispositivos piezoeléctricos. Estas vibraciones, presentes en máquinas de movimiento rotatorio, no son un fenómeno que se considere positivo, de hecho, generalmente son síntoma de una futura avería, pero, difícilmente son vibraciones que se pueden evitar, es decir, siempre estarán presentes en las máquinas. Siguiendo el enfoque de energías alternativas y partiendo del principio que las máquinas siempre tendrán estas vibraciones, se toman en consideración los dispositivos piezoeléctricos para la parte de la generación de energía en corriente directa. Una serie de pruebas y análisis fueron llevadas a cabo para la interpretación y verificación de la capacidad de generación de energía.

Una tarjeta PCB fue diseñada para utilizarse como interfaz de control en máquinas de mayor tamaño. A su vez, se realizó el diseño de un sistema de captación el cual consiste en una cámara de diseño mecánico específico que puede acoplarse a máquinas con fuertes vibraciones sin dañar los dispositivos piezoeléctricos.

ABSTRACT

In the present work, an investigation was carried out on the energy generation capacity that can be offered by the vibrations generated by a rotating machine with the use of piezoelectric devices. These vibrations, present in rotary motion machines, are not a phenomenon to be considered positive, in fact, they are generally a symptom of a future breakdown, but they are hardly vibrations that can be avoided, that is, they will always be present in the machines. Following the approach of alternative energies and starting from the principle that machines will always have these vibrations, piezoelectric devices are taken into consideration for the part of direct current power generation. A series of tests and analyses were carried out for interpretation and verification of the power generation capability.

A PCB board was designed to be used as a control interface for larger machines. At the same time, a feedback system was designed which consists of a specific mechanical design that can be coupled to machines with strong vibrations without damaging the piezoelectric devices.

1. CAPÍTULO 1. Generalidades

1.1 Introducción

Con el propósito del cuidado de nuestro planeta y de la reducción del impacto ambiental negativo que provoca el consumo de energía, proveniente de fuentes no renovables (petróleo, gas natural, uranio y carbón), se ha hecho más notable en la actualidad la presencia de fuentes de energía renovables tales como la eólica, la solar, la hidráulica, la marítima y la biomasa, cuya investigación y trabajo en ellas se realiza con el afán de que en un futuro sustituyan a las energías no renovables que además de, como lo dice su nombre, no ser renovables, causan daños a nuestro medio ambiente. Partiendo de este hecho, en el presente trabajo se ha optado por hacer la investigación sobre un fenómeno que, si bien no entra en la categoría de fuente de energía renovable o no renovable, se clasifica en otro concepto que es “*Energy Harvesting*” o cosecha de energía, y este fenómeno es la piezoelectricidad. Con la ayuda de la piezoelectricidad es posible obtener provecho de otro fenómeno presente en las maquinas rotativas, la vibración. Combinados ambos fenómenos, se pretende crear un dispositivo cuya función sea la generación y almacenamiento de la energía proporcionada por las vibraciones e implementarlo.

1.2 Problemática

Las nuevas tecnologías y la necesidad de encontrar alternativas menos costosas y más amigables con el ambiente han marcado la pauta para explorar casi todas las formas posibles de generación de energía. En el caso concreto de los dispositivos

electrónicos de bajo consumo de energía, se considera necesario comenzar a descartar el uso de sus fuentes de alimentación habituales como las baterías de níquel-cadmio y las baterías de litio cuyo impacto medioambiental y en la salud, son altamente negativos. Entre las diversas formas de generación de energía que utilizan el método de *energy harvesting*, la piezoeléctrica se considera como la más apropiada para la generación de energía por captación de vibraciones provocadas por algún fenómeno presente en el entorno. Uno de estos fenómenos se encuentra en las maquinas rotativas, especialmente en las de corriente alterna, y este es la vibración que generan al estar en funcionamiento dichas maquinas. Estas vibraciones se presentan de manera común, pero con un correcto método de análisis se puede obtener diversos datos e información en cuanto al funcionamiento de la máquina. Para el propósito de esta investigación, las vibraciones antes mencionadas, representan un método viable de generación de energía.

1.3 Justificación

El proyecto tiene como finalidad contribuir de manera positiva al impacto del medio ambiente mediante la implementación de un dispositivo que funcionará mediante el proceso de "*Energy Harvesting*", es decir, va a englobar la captación y almacenamiento de la energía. Para llegar a esto se va a aprovechar las vibraciones que provocan las maquinas rotativas que son un fenómeno negativo en la industria en general pues dichas vibraciones son síntoma de avería. Estas vibraciones difícilmente dejarán de existir y esto las convierte en un fenómeno altamente explotable y cuyos beneficios pueden equilibrar dichas fallas.

La investigación se divide en tres partes: 1) El diseño y la implementación de un sistema que comprende al generador de la energía, en este caso, el dispositivo piezoeléctrico, y al transmisor de energía cinética necesaria para que el piezoeléctrico cumpla su función, es decir, el transductor de fuerza. 2) El almacenamiento de la energía recibida.

1.4 Hipótesis

Partiendo del hecho que las maquinas rotatorias generan vibraciones, es posible aprovechar la energía mecánica contenida en estas vibraciones para generar energía eléctrica. Por lo que es factible el diseño de un dispositivo que sea capaz de simular las condiciones de operación de un generador de energía del tipo *Energy Harvesting*, mediante el uso de elementos piezoeléctricos.

1.5 Objetivo general

Desarrollar un sistema de obtención de energía eléctrica a partir de vibraciones en máquinas rotativas.

1.6 Objetivos específicos

- Conocer el funcionamiento de los materiales piezoeléctricos.
- Conocer el funcionamiento y construcción de los amortiguadores de aceite.
- Familiarizarse con el uso de tarjetas de desarrollo.
- Aprender a programar en esta tarjeta de desarrollo.
- Estudiar el control de motores de AC a través de la tarjeta de desarrollo.
- Diseñar un mecanismo de *Energy Harvesting* basado en el principio de funcionamiento de los amortiguadores, de manera que se pueda adaptar un actuador piezoeléctrico tipo disco dentro de él.
- Construir la estructura que sujetará al objeto y al motor que lo pondrá en funcionamiento.
- Desarrollar la instrumentación electrónica para la captación de energía a partir de materiales piezoeléctricos.
- Realizar pruebas preliminares de captación de energía

1.7 Metodología

Como inicio de esta investigación se realizó una búsqueda sobre el funcionamiento y composición de los materiales y dispositivos piezoeléctricos existentes. Se eligió el adecuado para los propósitos de esta investigación basado en sus propiedades físicas. Posteriormente, se escogió una maquina rotativa que cumpliera con las necesidades de control de velocidad y fácil operación para comenzar con la colocación de los elementos involucrados.

Para la adquisición de datos se buscó información sobre la captación de señales analógicas y se seleccionó la tarjeta Arduino Uno, ya que representaba la opción más viable debido a que cumple con las funciones necesarias para llevar a cabo la captación de datos, además, de las alternativas evaluadas a esta tarjeta, esta es la que más información en cuanto a su funcionamiento está disponible añadiendo su bajo costo.

Sumado a la parte de captación de datos proporcionada por la tarjeta Arduino, se utilizaron *scripts* hechos en lenguaje Python para la gestión de los datos una vez recabados por la tarjeta.

Con el fin de simular el comportamiento de una máquina rotativa de mayor tamaño, se desarrollarán mediciones utilizando una máquina rotativa electrodoméstica, la cual será la encargada de generar las vibraciones necesarias para el análisis de la cosecha de energía. Posteriormente, se hicieron pruebas con electrodomésticos para saber la ubicación ideal para colocar el dispositivo piezoeléctrico, una vez hechas estas pruebas, la parte inferior del electrodoméstico fue seleccionada para su colocación.

Con el dispositivo colocado en la posición seleccionada, se empezó a recopilar información con la adquisición de datos analógicos a través del puerto serial de una computadora utilizando la tarjeta de desarrollo Arduino Uno. Se establecieron los intervalos de tiempo entre cada toma de muestra y, utilizando los programas hechos en Python, se generaron hojas de cálculo con la información de las muestras recabadas.

Con las hojas de cálculo generadas, se utilizó la herramienta *MATLAB*[®] para someter los datos a un análisis para conocer su respuesta en frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier.

Una vez hecho este análisis, el script de *MATLAB*[®] se utilizó también para generar archivos con los nuevos datos, con el propósito de utilizarlos en otra herramienta de análisis de datos, la cual nos permitió la representación gráfica de estos, pudiendo tener una imagen clara de las diferencias de las respuestas en frecuencia de las pruebas evaluadas.

Paralelamente a estas pruebas, se realizó el diseño de dos dispositivos. El primero es una tarjeta para la interfaz de control entre el usuario y la maquina rotativa, y el segundo es una cámara tipo amortiguador la cual se diseñó con el propósito de captar vibraciones de máquinas rotativas más grandes.

2. CAPÍTULO 2. Estado de la Técnica.

En este capítulo se presentan trabajos previos relacionados con el método *Energy Harvesting* y la manera de gestionar la energía generada, además, se presentan artículos relacionados con el uso de herramientas de software para el análisis y diseño de fenómenos físicos.

2.1 Dispositivos piezoeléctricos para obtención de energía

En el trabajo “Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting [1], se menciona que Los materiales piezoeléctricos (PZT) se pueden usar como mecanismos transductores para transformar energía mecánica en energía eléctrica que puede almacenarse y usarse para alimentar otros dispositivos. Con los recientes avances en sistemas inalámbricos y microelectromecánicos (MEMS) tecnología, los sensores se pueden colocar en lugares exóticos y remotos. Como estos dispositivos son inalámbricos, tienen que tener su propia fuente de alimentación. La fuente de alimentación en la mayoría de los casos es una pila, pero tienen el inconveniente de que las pilas tienen un límite de vida útil.

Así mismo en el trabajo “Energy conversion and management” [2], se especifica que, los materiales piezoeléctricos se pueden usar para convertir la energía mecánica oscilatoria en energía eléctrica. Esta tecnología, junto con los innovadores diseños de acoplamiento mecánico, pueden formar la base para la cosecha de energía a partir del movimiento mecánico. La energía piezoeléctrica se puede cosechar para convertir el movimiento de caminar del cuerpo humano en energía eléctrica. Recientemente se desarrollaron cuatro unidades de “*Heel Strike*” (impacto de talón) de prueba de concepto donde cada unidad es esencialmente un pequeño

generador eléctrico que utiliza elementos piezoeléctricos para convertir movimiento mecánico en energía eléctrica en un dispositivo de forma del talón de una bota.

En “Optimal piezoelectric energy harvesting from wind-induced vibration” [3] se concluye que la recolección de energía del medio ambiente puede ser una opción viable para reemplazar las baterías por electrónica de baja potencia en dispositivos. Para mejorar la capacidad de recolección de energía de una cosechadora usando vibración inducida por el viento, un modelo toma en cuenta el flujo de aire, se transforma la vibración y se obtiene respuesta eléctrica.

El trabajo “Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system” [4] hace la revisión de áreas clave de los sistemas de Energy Harvesting con piezoeléctricos que son la mecánica y la eléctrica considerando las basadas en vibraciones para su estudio de rendimiento y mejoras.

“A COMSOL approach to analysis cantilever displacement for gas sensing” [5], es una publicación donde se muestra el proceso de análisis y modelado y la simulación del uso de sensores de micro vigas voladizas para la medición de gases, el cual busca encontrar el desplazamiento dado con algún gas determinado. Este trabajo resulta relevante para familiarizarse con el funcionamiento del software.

En el trabajo “Parametric study of polyimide – lead zirconate titanate thin film cantilevers for transducer applications “ [6] se muestra la simulación del comportamiento piezoeléctrico en una viga cuyo proceso se realizó usando el software COMSOL Multiphysics Simulation.

La tesis de maestría “Piezoelectric energy harvesting using stochastic resonance in rotating systems” [7] evalúa el uso de Energy Harvesting piezoeléctrico como fuente de energía para alimentar un sensor que estará montado en un flexplate (parte que vincula el motor y la transmisión automática de un automóvil). Este documento es relevante porque aborda el concepto de una fuente de energía tipo built-in en un automóvil.

En “Design and fabrication of piezoelectric coupled mems resonators” [8] se utiliza el software COMSOL Multiphysics Simulation para el desarrollo y simulación de frecuencias de resonancia en vigas acopladas con abrazaderas para la fabricación de resonadores piezoeléctricos, dependiendo de su geometría y su constante de acoplamiento.

“A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications” [9] es un trabajo de revisión donde se aborda la metodología de modelado y la creación de proyectos energy harvesting que se enfocan en vibración. Explica los fundamentos para entender la filosofía detrás de este método de cosecha de energía, explicando la teoría del modelado y los conceptos que se involucran en el método.

2.2 Dispositivos triboeléctricos para obtención de energía

En el artículo “A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing” [10], se propone un dispositivo tipo TENG (triboelectric nanogenerator) que permita la generación de energía eléctrica a partir del viento, utilizando una lámina tipo bandera compuesta por capas de PET (tereftalato de polietileno), carbón, un adhesivo y PTFE (politetrafluoroetileno). Dependiendo de las dimensiones de la “bandera” será la cantidad de energía que pueda producir. Para unas dimensiones de 150 mm x 75 mm y con una velocidad de 7.5 m/s se pueden alcanzar potencias de 36.72 μ W utilizando una resistencia de carga de 5 M Ω . Este dispositivo es capaz de funcionar como sensor, al medir la velocidad y dirección del viento.

“ Origami triboelectric nanogenerator with double-helical structure for environmental energy harvesting” [11] es un trabajo donde los autores aprovechan las propiedades del origami para crear un dispositivo con forma de doble hélice el cual puede generar energía eléctrica mediante la fricción que se produce al doblar y desdoblar la estructura de manera vertical y con ayuda de unos resortes como se muestra en la figura 1. La composición del elemento activo es principalmente PTFE, y con una resistencia de 20 M Ω se puede alcanzar una potencia de 580 μ W.

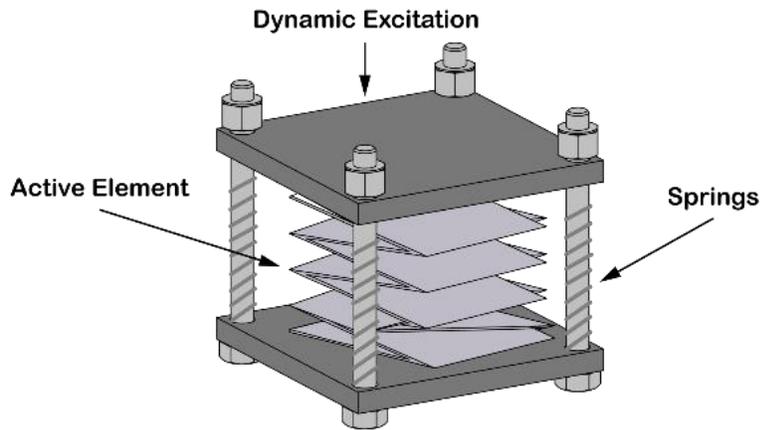


Figura 1 Esquema 3D del generador triboeléctrico en forma de origami.[11]

2.3 Dispositivos termoeléctricos para obtención de energía

En el trabajo “A polymer-based textile thermoelectric generator for wearable energy harvesting” [12] se estudian polímeros conductivos que pueden ser utilizados para fabricar telas que se puedan convertir en ropa y que se sean posibles de usar cómodamente, a la vez que funcionan como dispositivo generador de energía termoeléctrico aprovechando el calor del cuerpo humano. Para demostrar lo anterior, se prepararon hilos hechos de material conductivo bordados en tela de lana de manera matricial para que exista una distribución que pueda acaparar la mayor cantidad posible de calor. Como resultado, el dispositivo pudo generar un pico de energía de $1.2 \mu\text{W}$ con una temperatura de 65°K .

En la investigación “In-built thermo-mechanical cooperative feedback mechanism for self-propelled multimodal locomotion and electricity generation” [13] se muestra que es posible combinar dos fenómenos físicos en un mismo dispositivo para que contribuyan mutuamente en la generación de la energía.

Tal como se muestra en este escrito, es posible aprovechar el calor de una superficie para generar movimiento en un dispositivo construido de PVDF (fluoruro

de polivinilideno) y PDG-CNT (polidopamina modificada – nanotubos de carbono con oxido de grafeno reducido), creando un dispositivo capaz de moverse por sí solo, este dispositivo se muestra en la Figura 2. Este trabajo abre un campo para la investigación de los TEMS (thermo-mecano-electrical systems) ya que demuestra que se puede obtener una retroalimentación mecánica y térmica a temperaturas normales o con el calor del ambiente.

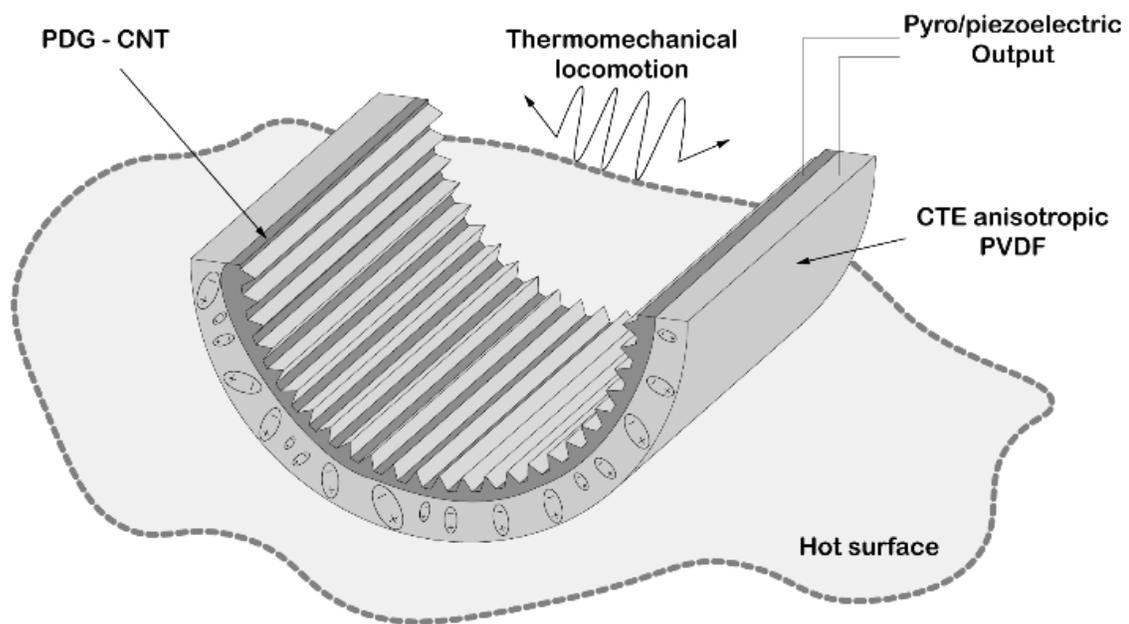


Figura 2 Sistema termo-mecano-eléctrico.[13]

2.14 Mechanical and energy harvesting model for electromagnetic inertial mass dampers.[14]

En este escrito se estudia la forma de aprovechar los amortiguadores llamados EM utilizados en estructuras de construcción destinadas para controlar el impacto de los movimientos sísmicos que afectan estructuras como los edificios para generar energía en unos dispositivos que denominan EIMD (*Electromagnetic Inertial Mass Damper*). La energía generada por estos dispositivos es posible calcularla tomando

como referencia la magnitud del fenómeno sísmico. Un arreglo de resistencias cerámicas con valores entre 0.1Ω y 50Ω fueron evaluados como resistencias de carga con diferentes valores de peso para simular los impactos de las oscilaciones de un sismo en los amortiguadores. Los resultados arrojaron valores de 50.6 W en una condición de cortocircuito y, de 9.2 W utilizando una impedancia de 1.4Ω .

2.15 A goblet-like non-linear electromagnetic generator for planar multi-directional vibration energy harvesting.[15]

Los autores de esta investigación proponen un cosechador de energía electromagnético que colecte vibraciones a través de una bola magnética que se encuentra en un recipiente con forma de copa, el cual tiene un total de seis bobinas distribuidas a su alrededor, de manera que se produzca una generación de energía al moverse la bola magnética y pasar junto a alguna de las bobinas. Dicho dispositivo fue evaluado al colocarse en diferentes partes del cuerpo de un sujeto de prueba, concretamente fue colocado en cinco lugares diferentes: al costado de una mochila que el sujeto llevaba en su espalda, en una rodilla, en un tobillo, en un brazo y en una muñeca. De todas las pruebas realizadas, la mejor fue en la que el dispositivo se colocó en el tobillo del sujeto de pruebas, dando una salida de potencia de 1.4 mW .

2.16 Dripping channel based liquid triboelectric nanogenerators for energy harvesting and sensing.[16]

En esta investigación se propone una forma de cosechar energía a través de las gotas que caen de un embudo similar a las peras de decantación que se utilizan en procesos químicos. El dispositivo que proponen los autores consiste en hacer una transferencia de líquido por goteo de un embudo a un recipiente con paneles compuestos con láminas de PTFE, oro, cobre y un electrodo que puede medir la cantidad de gotas que caen. Al caer las gotas en dicho panel, estas resbalan y aprovechando el fenómeno triboeléctrico, son capaces de generar carga. Las

pruebas realizadas con este dispositivo demostraron que es capaz de generar hasta 484.98 nW de energía con una resistencia de carga de 40.7 MΩ. Este dispositivo puede funcionar como medio de monitoreo en procedimientos químicos que involucran la transferencia de líquido por goteo.

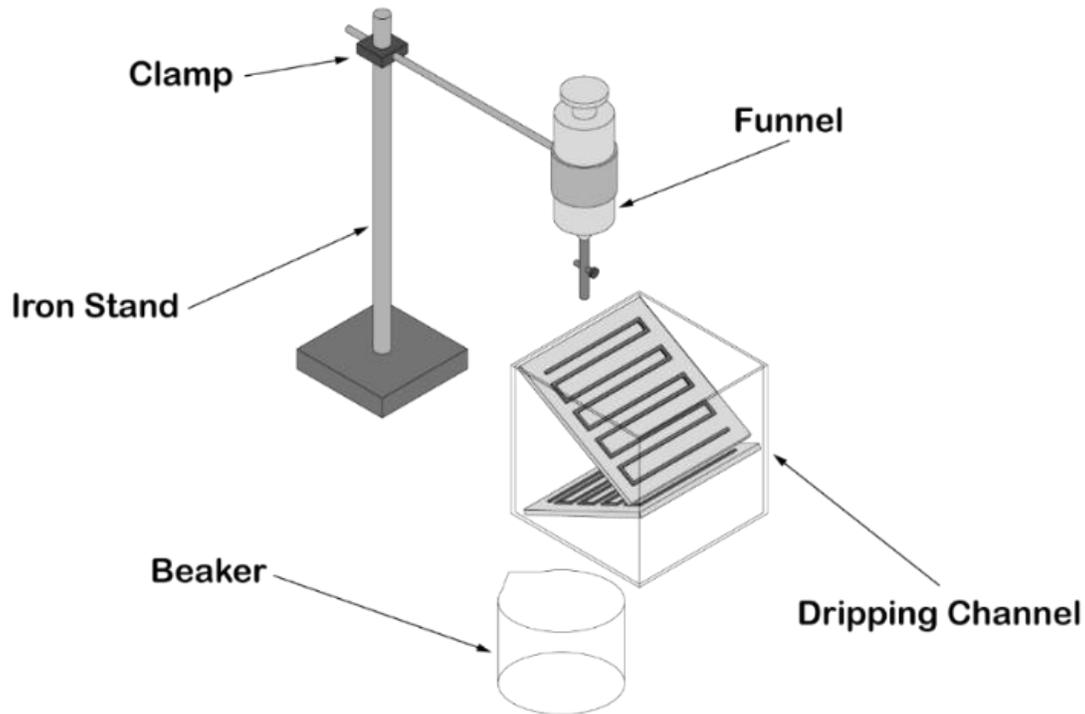


Figura 3 Diseño del sistema del canal de goteo.[16]

2.17 Solar energy harvesting using candle-soot-coated thermoelectric materials.[17]

En este manuscrito se propone un dispositivo para la captación de energía solar a través del fenómeno termoeléctrico, estudiando los efectos que se obtienen al recubrir dicho dispositivo con hollín de la flama de una vela CS (*candle soot*) y sin recubrir el dispositivo. En una parte del experimento, mediante una lente de Fresnel se pone el dispositivo a la exposición de rayos solares y también se hace dicha exposición a los rayos, con un flujo de agua recubriendo el dispositivo para tener una temperatura más baja. De todos los experimentos realizados se encontró que,

al estar el dispositivo recubierto de hollín, generó la máxima cantidad de energía, entregando potencia de hasta 10 mW con una resistencia de carga de 50 Ω .

2.18 Three-dimensional piezoelectric polymer microsystems for vibrational energy harvesting, robotic interfaces and biomedical implants.[18]

En el campo de los transductores piezoeléctricos, en general son dispositivos planos de dos dimensiones. En esta investigación se proponen polímeros piezoeléctricos tridimensionales para su uso en implantes biomédicos e interfaces robóticas. En este estudio se estudiaron alrededor de 20 microestructuras diferentes en 3D, en las que se encontró que tienen la posibilidad de generar valores de voltaje de entre 2 mV a 790 mV, mejorando notablemente las capacidades de generación de los dispositivos piezoeléctricos convencionales. Como parte de las pruebas, una microestructura de este tipo fue implantada en la pierna de un ratón debido a que es un área de la estructura biológica en la cual se presenta la mayor parte del movimiento del cuerpo. Los movimientos del roedor fueron analizados cuando este trotaba o escalaba la estructura en la que se encontraba y se mostró que podían generarse voltajes de hasta 1 mV, lo cual se considera como una forma viable de censado y generación de energía para explorar en otros tipos de implantes biomédicos.

2.19 Direct current fabric triboelectric nanogenerator for biomotion energy harvesting.[19]

La implementación de los nano generadores triboeléctricos en los textiles resulta una forma relativamente novedosa y con buen futuro en el campo de la cosecha de energía. En este artículo se estudia la fabricación de un tejido que, a diferencia de otros, sea cómodo y amigable con la persona que lo use. Dicho tejido se compone de dos clases de hilo, el conductivo y el no conductivo, ambos compuestos de poliamida o nylon-66, con la diferencia que al hilo conductivo se le añade una capa de plata. El funcionamiento de este dispositivo consiste en capturar las cargas generadas producto de la fricción entre la tela y el cuerpo humano, para después

almacenar dicha energía. El dispositivo fue capaz de alcanzar valores de 4500 V a 40 μ A.

2.20 Enhanced pyroelectric and piezoelectric properties of PZT with aligned porosity for energy harvesting applications.[20]

En la presente investigación se estudia algunas de las propiedades del circonato-titanato de plomo (PZT) para usarse en aplicaciones de cosecha de energía. Para este estudio se fabricaron cerámicas de PZT con canales porosos alineados en una base acuosa a través de la fundición por congelación.

Estas cerámicas porosas, resaltaron por sus características piroeléctricas y piezoeléctricas y sus resultados fueron evaluados en diferentes configuraciones como su capacidad de generación de energía en paralelo y de manera perpendicular a la dirección de la congelación, siendo esta la que mejor cantidad de cosecha piezo y piroeléctrica consiguió.

El desarrollo en la creación de este tipo de materiales es ideal para usarse en el método de *energy harvesting* y para aplicaciones que requieren censado de variables.

2.21 A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting.[21]

Un cosechador de energía piezoeléctrico es construido para el aprovechamiento de las vibraciones provocadas por el viento.

Mediante una viga piezoeléctrica de fluoruro de polivinilideno PVDF, se produce electricidad, aprovechando el movimiento que el viento provoca en la viga.

Para el análisis de la energía generada, se obtiene respuestas transitorias de la viga en un punto de presión y se comparan los valores RMS de su salida, con la frecuencia en que es excitada la viga. Este dispositivo es capaz de generar una potencia de 2566.4 μ W con la velocidad del viento a 14 m/s.

2.22 A magnetically coupled bistable piezoelectric harvester for underwater energy harvesting.[22]

En este trabajo se estudia la cosecha de energía piezoeléctrica en el entorno submarino. Para esto se utilizó un transductor piezoeléctrico flexensional que puede generar energía a partir de las vibraciones provocadas por el agua utilizando un acoplamiento magnético.

Esta forma de inducir la flexión del material resulta muy benéfica, pues al no tener contacto físico directo, las propiedades mecánicas del piezoeléctrico no se ven afectadas resultando en un mejor rendimiento del dispositivo cosechador.

Las pruebas correspondientes fueron hechas en un túnel de agua con una velocidad de flujo de 4 m/s y el resultado fue una generación de potencia de 450.5 μW utilizando una resistencia de carga de 390 k Ω .

2.23 Light-Driven Piezo- and Triboelectricity in Organic–Inorganic Metal Trihalide Perovskite toward Mechanical Energy Harvesting and Self-powered Sensor Application.[23]

El dispositivo que se presenta en esta investigación es una monoestructura hecha a base de yoduro de plomo y fluoruro de polivinilideno (MAPbI₃ / PVDF) creada para la cosecha de energía aprovechando la luz.

Dicho sistema puede recolectar energía y funcionar como sensor de señales físicas ya que puede realizar la cosecha y el censado de luz y presión gracias a las propiedades triboeléctricas y piezoeléctricas del MAPbI₃ / PVDF. Dichas características dejaron que el dispositivo se comportara como un fotodetector y a su vez como una especie de manómetro, demostrando una sensibilidad y respuesta rápida a las variables que lo afectan.

2.24 A New Prospect in Road Traffic Energy Harvesting Using Lead-Free Piezoceramics.[24]

El tráfico automovilístico ha sido considerado como una buena fuente cosechadora de energía a partir de los materiales piezoeléctricos. En esta investigación, se construye un sistema que permite el estudio, análisis y prueba de las variables involucradas en el desarrollo de dicha forma de generación de energía. El sistema consiste en un banco de pruebas capaz de simular el tráfico vehicular y la adquisición de señales piezoeléctricas las cuales resultan producto de este tráfico. La puesta en operación de este tipo de sistemas de prueba resulta muy útil para el estudio del efecto piezoeléctrico y su capacidad de cosechar energía para su implementación en la vida real, sin tener que realizar, modificaciones y todo el trabajo de campo que implica la implementación de los dispositivos de recolección en la infraestructura urbana.

2.25 Wearable Core-Shell Piezoelectric Nanofiber Yarns for Body Movement Energy Harvesting.[25]

Un dispositivo portátil destinado para ser usado en electrónica que puede ser usada como prenda de vestir fue fabricado con hilos piezoeléctricos de electrodos externos. Los hilos compuestos de nanofibras flexibles fueron trenzados alrededor de un hilo conductor y se cosieron a un tejido. Según las pruebas realizadas, la flexión de todo el material en conjunto pudo generar tensiones que estuvieron en proporción al área tratada, lo cual permitió la variación de los patrones de tejido para conseguir aun mejores resultados. Además de experimentar con la colocación del tejido en diferentes lugares donde la flexión, presión y otros movimientos propios del cuerpo humano son distintos y pueden influir en la cantidad de energía generada.

2.26 Bidirectional Piezoelectric Energy Harvester.[26]

El dispositivo que se propone en este manuscrito consiste en un cosechador de energía bidireccional el cual pretende captar vibraciones perpendicularmente.

El sistema está compuesto de dos voladizos conectados perpendicularmente con dos masas en sus extremos.

Una de las masas se conecta en un extremo y la otra en la unión de los voladizos. Con las pruebas realizadas, se pudo corroborar que el sistema es capaz de generar una potencia pico de 16.85 μW con una generación estable y con la contribución de ambas direcciones.

2.27 Piezoelectric Energy Harvesting from Suspension Structures with piezoelectric layers.[27]

Este artículo describe un dispositivo que se compone de una ballesta y cuatro pares de capas de material piezoeléctrico.

El funcionamiento consiste en conseguir la mayor deformación posible de las capas piezoeléctricas al accionar la ballesta.

Los resultados demostraron que con una resistencia de carga de 610 $\text{K}\Omega$ se puede alcanzar una potencia de 1.7 mW, generando 0.6 mW por cada capa piezoeléctrica.

El nivel de generación de energía que se obtiene con este dispositivo es capaz de funcionar como una fuente de suministro a utilizando estructuras de suspensión o amortiguadores, similares a los ya utilizados en la recolección de energía a causa de las olas marinas, abriendo un panorama de investigación en lugares donde similares fenómenos físicos permitan la implementación de este tipo de dispositivos de recolección de energía.

2.28 Low Frequency and Broadband Vibration Energy Harvesting Using Base Mounted Piezoelectric Transducers.[28]

El trabajo presenta la experimentación realizada para crear un recolector de energía piezoeléctrico que aproveche las frecuencias de resonancia de una viga en voladizo. A este nuevo dispositivo se le denominó como cosechador piezoeléctrico montado en una base BMP (*base-mounted piezoelectric harvester*). Con este diseño se puede prescindir de las limitaciones que caracterizan este tipo de dispositivos, como lo es el tamaño de la viga voladiza, lo cual quiere decir que el tamaño se puede fabricar de forma libre. Este dispositivo se construyó de material poliuretano con unas medidas de 1.6 mm x 4.9 mm x 20 mm. Los resultados de este dispositivo arrojaron una generación de energía de entre 8.75 μ W a 113 μ W con una resistencia de carga de 30 M Ω .

2.29 Piezoelectric Energy Harvesting from Two-Dimensional Boron Nitride Nanoflakes.[29]

En el presente artículo se describe como se realizó la sinterización de nano hojuelas de nitruro de boro hexagonal (h-BN NFs) de dos dimensiones utilizando un proceso de exfoliación para extraer el sustrato de plástico con el fin de mejorar la capacidad de recolección de energía de las nano hojuelas. Como resultado se observó que una sola nano hojuela fue capaz de generar valores alrededor de 50 mV a 30 pA al ser doblada de forma mecánica. En otra prueba realizada con las nano hojuelas, se utilizó una cubierta de silicio en ellas, destinada para fabricar un cosechador de energía flexible, y tuvo una salida de potencia de 0.3 μ W a un voltaje de 9 V.

2.30 Energy harvesting efficiency of piezoelectric polymer film with graphene and metal electrodes.[30]

En esta investigación se estudió la capacidad de los polímeros piezoeléctricos al someterlos a tensión mediante electrodos flexibles para recolección de energía mediante ondas acústicas. Para la construcción del dispositivo se utilizaron capas de fluoruro de polivinilideno y fluoruro de polivinilideno trifluoretileno (PVDF y PVDF-TrFE, respectivamente). El dispositivo se sometió a vibraciones acústicas de 105 dB y los resultados mostraron que se puede generar un voltaje de 7.04 V.

2.31 Force detection, center of pressure tracking, and energy harvesting from a piezoelectric knee implant.[31]

En el campo de la ortopedia, el reemplazo total de rodilla TKR (*Total Knee Replacement*) se considera como un procedimiento estándar como tratamiento para padecimientos de la rodilla.

En este trabajo se propone la implementación de un dispositivo que sustituya a la rodilla, pero que este equipado con transductores piezoeléctricos que tendrán la función de medir la fuerza que se aplique en la tibia, además, estos transductores tendrán la función de censar el movimiento con respecto a su centro de presión. Sumado a esto, el voltaje que llega a generar los elementos piezoeléctricos se colecta y sirve para la alimentación de la electrónica propia del sistema y que será la que transmita datos y acondicione señales. Los resultados de esta investigación arrojan que se puede generar una potencia de 269.1 μ W con una resistencia de carga de 175 k Ω .

2.32 Biocompatible collagen-nanofibrils: An approach for sustainable energy harvesting and battery-free humidity sensor applications.[32]

La necesidad de buscar alternativas de suministro de energía para los sensores de humedad ha provocado que se investiguen a profundidad las diferentes opciones que ofrezcan fiabilidad y sustentabilidad con el medio ambiente.

En esta investigación se estudia un sensor de humedad piezoeléctrico que está basado en un nanogenerador (PNG) el cual ofrece las características mencionadas con anterioridad.

En un tejido de algodón se utiliza para recubrir un biopolímero de nanofibrillas de colágeno piezoeléctrico que puede funcionar como *energy harvesting* y como dispositivo sensor.

Los resultados mostraron que este colágeno puede generar un voltaje de 45 V a 250 nA y que puede ser útil en aplicaciones no invasivas de dispositivos biomédicos inteligentes.

2.33 Energy Harvesting and Pd(II) Sorption Based on Organic-Inorganic Hybrid Perovskites.[33]

La investigación realizada para este artículo presenta un nuevo tipo de perovskita híbrida orgánico-inorgánico de una sola dimensión y que se asemeja al tiazolidinio (CdBr₃).

Dicho material, presenta buenas propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas, mostrando un voltaje de salida de 2.0 V y que se pueden utilizar en electrónicos de bajo demanda de energía autoalimentados y en *energy harvesting*.

2.34 Enhanced Energy Harvesting Ability of ZnO/PAN Hybrid Piezoelectric Nanogenerators.[34]

En este trabajo se le colocaron nanobarras de óxido de zinc (ZnO NRs) a un polímero piezoeléctrico llamado nanofibra de poliacrilonitrilo (PAN) para formar un nuevo tejido llamado ZnO/PAN con el propósito de generar la mayor cantidad de energía vibratoria y como resultado se logró un incremento en la capacidad de recolección de energía y censado de la presión en comparación con las nanofibras PAN por sí solas alcanzando una potencia de 10.8 mW por metro cuadrado, logrando un incremento en la cantidad de generación en comparación con las fabricadas solo con óxido de zinc.

2.35 In situ-grown organo-lead bromide perovskite-induced electroactive γ -phase in aerogel PVDF films: an efficient photoactive material for piezoelectric energy harvesting and photodetector applications.[35]

Los detectores de luz han sido una herramienta muy útil en diversas aplicaciones que involucran la electrónica moderna.

En esta investigación se fabricó un filme de aerogel que está hecho de nanopartículas de bromuro de plomo de formamidinio (FAPbBr₃) y fluoruro de polivinilideno (PVDF), creando el compuesto FAPbBr₃/PVDF con el propósito de ser utilizado en fotodetectores y en la cosecha de energía. Mediante un novedoso proceso de fabricación, se creó el nanogenerador construido a base de una película de aerogel (FPNG) y en los resultados de generación obtenidos se pudo comprobar que proporcionó 26.2 V, demostrando que el nivel de energía entregado es 5 veces mayor que si se fabricara el compuesto solo de PVDF sin las partículas de bromuro de plomo formamidinio.

2.36 Characterization of a smart transducer for axial force measurements in vibrating environments.[36]

El dispositivo propuesto es un transductor de energía inteligente que realizará tareas de medición de la fuerza axial y recolección de energía. Este dispositivo está diseñado para trabajar en entornos con presencia de vibraciones con amplitudes inferiores a medio milímetro. Además, el dispositivo cuenta con un sistema de sensores que puede ser monitorizado a través de fibra óptica. El sistema propuesto se compone de tres subsistemas, el primero consiste en la recolección de energía, el segundo es el sensor de fuerza axial y el último es la transmisión de datos.

En la parte inicial del sistema hay un convertidor electromagnético, compuesto por un muelle, imanes y una bobina con su carcasa. Las vibraciones mecánicas generarán energía que se rectificará en el sistema de almacenamiento. A través de un LED, el sistema será supervisado por un lector óptico.

2.37 An inertial rotary energy harvester for vibrations at ultra-low frequency with high energy conversion efficiency.[37]

En este artículo se ha diseñado un cosechador de energía de vibración rotacional basado en la inercia y capaz de obtener energía a partir de vibraciones de muy baja frecuencia. El sistema se compone de tres subsistemas que conforman un sistema de accionamiento por torsión, un sistema de embrague de trinquete y un sistema de transducción de bobina magnética. El primer subsistema se encarga de recoger la energía cinética del entorno y convertir el movimiento lineal en rotación de alta velocidad. El segundo subsistema se utiliza para transferir la energía cinética procedente del impacto externo del rotor del dispositivo. El último subsistema se encarga de convertir la energía cinética del rotor en energía eléctrica basándose en el principio de transducción electromagnética. Este dispositivo se aplicó a la suela de unos zapatos para dar energía a los dispositivos vestibles a partir de la captación de energía del movimiento humano. Un sujeto de 85 kg de peso, con el dispositivo en sus zapatos, corrió en una cinta de correr a una velocidad entre 1 y 9 km / h, lo que resultó en un promedio de 85 mW con una resistencia de carga de 85 Ohms.

2.38 Design, modelling, and testing of a vibration energy harvester using a novel half-wave mechanical rectification.[38]

Este artículo trata del diseño y las pruebas de un recolector de energía por vibración que utiliza un rectificador mecánico de media onda, colocado en una mochila. Se propone que es posible obtener energía a través del movimiento vertical de una mochila cuando es utilizada por alguien mientras camina. El diseño consta de un conjunto piñón-cremallera, un embrague unidireccional con un eje, tres conjuntos de rodillos y un generador electromagnético con un reductor planetario. El embrague unidireccional estará situado entre el eje y el piñón, y transmitirá el par en una dirección. El eje se apoya en cojinetes y se conecta al reductor planetario mediante un acoplador.

2.39 A radio frequency and vibration energy harvesting antenna based on piezoelectric material.[39]

Este artículo muestra una antena que puede utilizarse para captar la radiofrecuencia y las vibraciones del entorno para convertirlas en energía. El material principal para la construcción de esta antena es el fluoruro de polivinilideno (PVDF), su construcción se realiza en forma trapezoidal para concentrar la dirección de la radiación, dando como resultado una ganancia en la antena, y debido al alta constante dieléctrica del PVDF, se puede reducir su tamaño considerablemente hasta dimensiones de 50mm x 30mm x 0,2mm. En una placa FR4 hay una lámina de PVDF, por un lado, que cuando se juntan forman una única estructura de placa en voladizo para cosechar la energía de las vibraciones, y por el otro, una lámina de cobre con la figura trapezoidal, a la que se conectará una salida de RF. Para convertir la energía captada de la radiofrecuencia y las vibraciones del entorno, se utilizó un circuito rectificador de doble tensión.

2.40 A miniaturized endocardial electromagnetic energy harvester for leadless cardiac pacemakers.[40]

En esta investigación se propone la utilización de las vibraciones que genera el corazón al latir para cosechar energía y funcionar como fuente suministradora de alimentación a los dispositivos marcapasos.

Este trabajo se realizó con la finalidad de darle solución al problema de fiabilidad que tienen este tipo de dispositivos en cuestión de las baterías que utilizan, ya que al estar reemplazándolas constantemente cada que finaliza su ciclo de vida útil, se convierte en un potencial riesgo para el paciente. El dispositivo utilizado es un generador electromagnético que va a aprovechar el desequilibrio de masas en el corazón para aprovechar las oscilaciones. Mediante un modelo matemático se calculó la energía que se puede llegar a generar y se realizaron pruebas in vivo e in vitro, dando resultados satisfactorios.

2.41 Experimental investigation of non-linear multi-stable electromagnetic-induction energy harvesting mechanism by magnetic levitation oscillation.[41]

Los estudios que se describen en este artículo muestran la acción de un sistema de captación multi estable de energía por inducción electromagnética MEH en cual se puede cosechar energía a través de las oscilaciones de levitación magnética.

Este dispositivo puede ser utilizado para crear potencial de fuerza e incrementar la corriente de salida en cosechadores de energía de este tipo. Lo cuales a su vez sirven para tener una amplia respuesta en frecuencia en comparación con los dispositivos lineales de generación electromagnética.

2.42 Pixelated Metasurface for Dual-Band and Multi-Polarization Electromagnetic Energy Harvesting.[42]

Esta investigación se diseñó una celda unitaria basada en la pixelización de su superficie mediante la aplicación de un logaritmo binario para optimizarla con la meta de incrementar la recolección de 2.45 GHz hasta 6 GHz.

Después de diseñar la celda unitaria, se construye un dispositivo cosechador electromagnético de doble banda que se compone de un grupo de celdas pixeladas, el cual es, en términos simples, un resonador de doble banda cargado con un par de resistencias que varían la impedancia de entrada del circuito mezclador de potencia para ser usado a la par de un sistema recolector completo.

2.43 Investigation on the Human Body as A Monopole Antenna for Energy Harvesting.[43]

Una técnica de recolección de energía es analizada en este artículo, la cual consiste en aprovechar de manera inalámbrica la energía presente en el ambiente mediante el cuerpo humano el cual funcionará como una antena de un polo capaz de captar energía presente en frecuencias entre 20 y 120 MHz.

Los resultados mostraron que, a partir de mediciones realizadas en un ambiente electromagnético, la antena es capaz de recibir -51dBm de potencia en una frecuencia de 57.72 MHz y -48.67dBm en valores entre 20 MHz y 120 MHz.

Las aplicaciones de este tipo de dispositivos pueden contribuir a la mejora de dispositivos de captación de energía como son los sensores autónomos y autosuficientes.

2.44 Performance of An Electromagnetic Energy Harvester with Linear and Nonlinear Springs under Real Vibrations.[44]

En este estudio se analizaron las propiedades de los cosechadores de energía electromecánica con muelles lineales, contra las de los no lineales con el propósito de comparar su capacidad de generación de energía.

En los resultados obtenidos, se concluyó que los cosechadores lineales son superiores a los no lineales con respecto al nivel de potencia generada sin importar el nivel de estimulación que se aplicara en cada caso, manifestándose cambios significativos en los no lineales solamente cuando había un nivel de aceleración muy alto.

2.45 A Piezo-Electromagnetic Coupling Multi-Directional Vibration Energy Harvester Based on Frequency Up-Conversion Technique.[45]

En esta investigación se presenta un cosechador de energía vibratoria a base de un acoplamiento piezoeléctrico y electromagnético.

El dispositivo se compone de cuatro vigas voladizas configuradas con ambas técnicas, la piezoeléctrica y la electromagnética, las cuales tienen la estructura estándar de una viga para aplicaciones de cosecha de energía, que se componen de un imán permanente en su extremo.

En la base de las vigas se disponen las bobinas que recolectaran la energía electromagnéticamente. Este tipo de configuraciones son capaces de recolectar energía a partir del movimiento del cuerpo humano.

2.46 Combining Photosynthesis and Photovoltaics: A Hybrid Energy-Harvesting System Using Optical Antennas.[46]

En esta investigación se analiza el uso de un sistema híbrido que combina el efecto fotovoltaico y la fotosíntesis como medios para cosechar energía.

El sistema consiste en una célula que permite el paso de una parte del espectro de luz solar, RGB dejando pasar la luz verde y desprecia las demás para el propósito de activar el efecto fotovoltaico.

Para llevar a cabo la fotosíntesis se utiliza el espectro azul y el rojo. Este dispositivo puede ser utilizado en jardines o invernaderos y cosechar energía desde ahí.

2.47 An Ultra-Low-Friction Triboelectric–Electromagnetic Hybrid Nanogenerator for Rotation Energy Harvesting and Self-Powered Wind Speed Sensor.[47]

Un nanogenerador triboeléctrico TENG híbrido con un generador electromagnético EMG se presenta en esta investigación.

El dispositivo opera rotativamente para generar cosecha mediante el EMG a la vez que se genera fricción entre dos materiales triboeléctricos. Los resultados obtenidos muestran que la unidad TENG puede generar una potencia de 438.9 mW/kg y su contraparte electromagnética 181 mW/kg. Con lo que se concluye que el dispositivo es capaz de alimentar un sensor de humedad y ser utilizado como sensor de velocidad en aplicaciones eólicas.

2.48 Micro electrostatic energy harvester with both broad bandwidth and high normalized power density.[48]

Se fabricó un cosechador de energía que aprovecha las vibraciones electrostáticas que se compone de dos partes fabricadas de obleas de silicio, una placa superior que se puede mover y una inferior estática.

Los resultados de la aplicación de este dispositivo al exponerlo en aire a baja presión mostraron una generación de potencia máxima de $4.95 \mu\text{W}$. Al aplicarse vibraciones en rangos de 160 Hz se consiguió una potencia de $2.2 \mu\text{W}$ lo cual permite la utilización de este tipo de dispositivos como fuente de alimentación en aplicaciones de sensores inalámbricos.

2.49 Utilization of a magnetic field-driven microscopic motion for piezoelectric energy harvesting.[49]

En esta investigación se fabricaron nanofibras piezoeléctricas de polivinilideno-fluoruro-trifluoroetileno (PVDF-TrFE) que se combinan con nanopartículas de Fe_3O_4 con una cubierta de SiO_2 con el fin de presentar una alternativa a los generadores piezoeléctricos convencionales cuyos usos se aplican a conversión de energía mecánica a eléctrica de manera directa.

Las pruebas realizadas mostraron una generación de 30 mV lo cual demuestra la capacidad de este tipo de materiales para su uso en aplicaciones de cosecha de energía sin la necesidad de que el medio para producirlas sea una fuente mecánica.

2.50 A Miniature Magnetic-Force-Based Three-Axis AC Magnetic Sensor with Piezoelectric/Vibrational Energy-Harvesting Functions.[50]

El dispositivo que se presenta, producto de esta investigación se trata de un sensor de detección magnética miniaturizado, capaz de captar energía proveniente del ambiente, el cual emplea tres métodos de *energy harvesting* para sus funciones de recolección de energía: la magnética, mecánica y piezoeléctrica.

La energía generada por la combinación de las configuraciones dispuestas en este dispositivo alcanza valores de 0.333 μW y 0.051 μW con 439 mV y 138 mV respectivamente.

Las aplicaciones de este dispositivo se pueden aprovechar de manera eficiente como un sensor en la industria y como generador de energía.

2.51 A Hybridized Triboelectric-Electromagnetic Water Wave Energy Harvester Based on a Magnetic Sphere.[51]

El dispositivo presentado en esta investigación se trata de un cosechador de energía que combina las propiedades de los nanogeneradores triboeléctricos TENG y los cosechadores de energía electromagnética EMG que aprovecha el movimiento producido por las olas del mar, o *water wave energy harvester* (WWEH).

El diseño consiste en una esfera magnética que se desplaza de manera libre cuando las olas del mar la mueven, en una superficie solida que impulsa un objeto solido provocando fricción. La fricción será cosechada por el TENG, y para el EMG, se dispone de dos bobinas que impulsaran el fenómeno de inducción electromagnética cuando la esfera pase a raves de ellas.

2.52 Design and Analysis of a Magnetically Coupled Multi-Frequency Hybrid Energy Harvester.[52]

En esta investigación se diseñó un dispositivo generador de energía a partir de cosechadores de energía híbridos multifrecuencia o MHEHS para capturar vibraciones de dos frecuencias discretas, utilizando un acoplamiento electromecánico para el análisis de fuerza y la interpretación de la energía generada.

En los resultados obtenidos por la puesta en operación de este MHEH, se pudieron registrar valores de potencia de 4.76 mW y 2.96 mW a 32.8 Hz y 23.6 Hz respectivamente. Pudiendo verificar que la calidad de generación de energía de este mecanismo híbrido se incrementa con respecto al ancho de banda de su funcionamiento.

2.53 Highly conductive, ultra-flexible and continuously processable PEDOT:PSS fibers with high thermoelectric properties for wearable energy harvesting.[53]

En esta investigación, se fabricaron fibras de polietilendioxitiofeno : poliestirenosulfonato (PEDOT:PSS) de una sola dimensión con el fin de incrementar configuraciones propias de la fibra hecha con PEDOT quinoide.

En aplicaciones termoeléctricas, los polímeros conductores se han analizado con determinado detalle, siendo seleccionadas por su baja conductividad térmica, su flexibilidad y su costo accesible. En los hilos que fueron fabricados, se utilizó un proceso de hilado en húmedo, al que le siguió una fase de recubrimiento con ácido sulfúrico. Los resultados demostraron que las fibras fabricadas pudieron entregar una potencia de 147.8 μ W a temperatura ambiente.

2.54 3D extruded composite thermoelectric threads for flexible energy harvesting.[54]

Las aplicaciones de los generadores termoeléctricos flexibles representan una alternativa novedosa a los generadores convencionales.

Como parte de esta investigación, se fabricaron hilos termoeléctricos a base de tintas compuestas de microgramos de Bi_2Te_3 dentro de un polímero no conductor, capaces de ser impresos en impresoras 3D.

La conductividad termoeléctrica de estos hilos resultó en un aumento de siete veces su magnitud después de ser sometidos a una compresión lateral en consecuencia de una reducción en el volumen de los huecos de los microgranos termoeléctricos.

2.55 Flexible Organic Thermoelectric Materials and Devices for Wearable Green Energy Harvesting.[55]

La tecnología que abarca los dispositivos electrónicos vestibles abre un panorama que permite la experimentación de alternativas que contribuyan a la mejora de estos dispositivos y a la eficiencia en sus procesos de fabricación.

Entre las ventajas que representan los materiales termoeléctricos aplicados en los dispositivos vestibles, se pueden mencionar su muy reducido impacto ambiental, su flexibilidad mecánica y su peso.

Las propiedades termoeléctricas y las variables que las afectan son presentadas en este manuscrito, además, se mencionan dispositivos que emplean este tipo de materiales, con el fin de presentar un texto introductorio a lectores que inician investigaciones en este campo.

2.56 Prospects of Autonomous Volcanic Monitoring Stations: Experimental Investigation on Thermoelectric Generation from Fumaroles.[56]

En este artículo se describe la instalación en el volcán Taide situado en las Islas Canarias de España, de un dispositivo generador termoeléctrico que se compone de dos módulos de bismuto-telurio y tubos de calor que funcionan como intercambiadores de calor.

La finalidad de este dispositivo es aprovechar las propiedades de la generación eléctrica mediante la termoelectricidad en las fumarolas provocadas por la actividad volcánica de dicha región cuyos gases alcanzan temperaturas de entre 70 °C y 100 °C. El dispositivo pudo generar una potencia eléctrica entre 0.32 W y 0.33 W por cada módulo colocado a una temperatura de 69 °C a 86 °C.

2.57 Development of a Small Thermoelectric Generators Prototype for Energy Harvesting from Low Temperature Waste Heat at Industrial Plant.[57]

La investigación realizada pretende analizar el rendimiento de un dispositivo de recolección de energía mediante un generador termoeléctrico que se instaló en un entorno industrial.

El dispositivo se dispuso en un área donde corre agua para uso industrial a una temperatura por debajo de 90°C y fue utilizada agua corriente a una temperatura de 15 °C para funcionar como medio disipador de calor. Mediante pruebas realizadas se comprobó que la energía que fue producida por el dispositivo es mayor a la que se necesita para bombear agua desde la fuente de agua caliente, hasta el lugar donde se encuentra el dispositivo generador cuya distancia es no mayor a 50 metros.

2.58 Recent advancements in solid–liquid triboelectric nanogenerators for energy harvesting and self-powered applications.[58]

Los nanogeneradores triboeléctricos TENG son considerados como una opción cuando se estudia la posibilidad de generación de energía eléctrica aprovechando la captación de energía líquida. Este proceso de captación se lleva a cabo a través de la electrificación mediante el contacto entre un líquido y un sólido, debido a la carga presente en el componente líquido que recoge este último en su paso por el medio ambiente.

A este tipo de sistemas se les llama *solid-liquid triboelectric nanogenerators* (S-L TENGs) y en esta investigación también se analizó la actividad iónica y la polaridad de los elementos.

2.59 Fish Gelatin Based Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Biomechanical Energy and Self-Powered Sensing of Human Physiological Signals.[59]

En este artículo se presentan los resultados de una investigación que analiza la generación de energía en un nanogenerador triboeléctrico que se compone de gelatina de pescado o *fish gelatin triboelectric nanogenerator* (FG-TENG).

El dispositivo se compone de una capa de gelatina de pescado y otra de politetrafluoroetileno combinado con poliestilsiloxano (PTFE-PDMS). Las pruebas demostraron que se puede generar una potencia de 45.8 μW por centímetro cuadrado y 130 V a 0.35 μA resultando superior en comparación a dispositivos TENG combinados con otro tipo de materiales.

2.60 Waterproof Fabric-Based Multifunctional Triboelectric Nanogenerator for Universally Harvesting Energy from Raindrops, Wind, and Human Motions and as Self-Powered Sensors.[60]

En esta investigación se presenta un nanogenerador triboeléctrico TENG que es impermeable y se basa en un tejido. El nombre de este dispositivo es *waterproof and fabric-based multifunctional triboelectric nanogenerator* (WPF-MTENG) y es capaz de producir energía a partir de movimientos corporales e impactos provocados por fenómenos del ambiente como el viento y la lluvia.

El dispositivo consiste en un teclado autoalimentado en una prenda vestible que se basa en un WPF-MTENG que funciona para controlar un reproductor musical. Aparatos de este tipo representan un enfoque nuevo en las tecnologías de electrónica vestible.

2.61 Integrating a Silicon Solar Cell with a Triboelectric Nanogenerator via a Mutual Electrode for Harvesting Energy from Sunlight and Raindrops.[61]

Se construyó un dispositivo generador triboeléctrico que puede captar energía a través de las gotas de lluvia y de la luz solar mediante la integración de células solares de silicio heteronjuntadas con un nanogenerador triboeléctrico compuesto por un film de polietilendioxitiofeno y poliestirenosulfonato PEDOT:PSS, a través de un electrodo que comparten ambas partes.

Este dispositivo resulta eficiente al operar en condiciones climáticas diversas, los resultados en las pruebas realizadas mostraron una capacidad de generación de 2.14 V a 33.0 nA, resultando en un dispositivo que sea alternativa de los paneles solares convencionales cuya desventaja es una ineficiencia de rendimiento en climas lluviosos.

2.62 A Highly Porous Nonwoven Thermoplastic Polyurethane/Polypropylene-Based Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting by Human Walking.[62]

En esta investigación fue creado una plantilla para zapatos fabricada de poliuretano termoplástico (TPU) con propileno altamente poroso (PP) para ser utilizada como nanogenerador triboeléctrico (TENG). La plantilla se compone de capas compuestas de nanofibras triboeléctricas de TPU y se electrohiló sobre el propileno.

Los resultados demostraron que la capacidad del dispositivo triboeléctrico basado en TPU con el PP tejido mejoraba con respecto a los que no tienen tejido el propileno, alcanzando voltajes de valores entre 110.18 y 6.06 V a una corriente de 7.28 y 0.67 μA respectivamente.

2.63 Triboelectric Energy Harvesting Response of Different Polymer-Based Materials.[63]

La búsqueda de alternativas para suministrar energía de electrónicos que consumen baja potencia ha favorecido al estudio de los nanogeneradores triboeléctricos.

En este manuscrito se describe la potencia que ofrecen distintos materiales polímeros y compuestos de polímeros aplicados en sistemas triboeléctricos. Los materiales empleados fueron poliamida (PA66), mica, estireno/etileno-butadieno/estireno (SEBS), fluoruro de polivinilideno (PVDF), kapton, poliuretano (PU) y polipropileno (PP). Los resultados demostraron que se puede alcanzar una potencia de 0.2 y 5.9 mW.

2.64 *A Shared-Electrode and Nested-Tube Structure Triboelectric Nanogenerator for Motion Energy Harvesting.*[64]

El tipo de cosecha de energía utilizando nanogeneradores triboeléctricos se consideran los más idóneos para la recolección mediante los movimientos del cuerpo humano.

El dispositivo que se presenta en esta investigación se compone de un *triboelectric nanogenerator* (TENG) con tubos anidados y electrodos compartidos (SNTN) en el cual, se hace uso de plástico de silicon flexible para emplearse como material de fricción negativo y como material de fricción positivo, fue usado un tejido de poliéster que trabaja como medio conductor y que esta recubierto por níquel.

El sistema se divide en unidad triboeléctrica exterior e interior. En la interior se encuentran los tubos interior y central huecos, y en la unidad exterior se encuentran un tubo exterior hueco que y el tubo central que es compartido por ambas unidades. Estos tubos funcionan como electrodos y contribuyen a la recolección de la carga. Este sistema fue capaz de generar una salida de 180 V.

2.65 *Walking energy harvesting and self-powered tracking system based on triboelectric nanogenerators.*[65]

En esta investigación se estudia el aprovechamiento de la energía que provocan los transeúntes al pasar sobre una vía la cual tiene un arreglo especial para funcionar como una cosechadora de energía. El dispositivo consta de un nanogenerador triboeléctrico TENG flexible, que está hecho de electrodos que recogerán la energía que provoquen los humanos al caminar sobre él. Los resultados demostraron que un arreglo de este tipo, colocado en un área de concurrencia de peatones, puede generar voltajes de valores de 84 V. Además, el sistema puede funcionar como un sensor que pueda hacer el conteo de los transeúntes y su localización en la superficie sobre la que se estuvieran desplazando.

2.66 Wearable triboelectric nanogenerators for biomechanical energy Harvesting.[66]

La electrónica empleada en artículos para vestir se ha convertido en una tendencia con un amplio campo de estudio y oportunidad de desarrollo. En este manuscrito se evalúa una manera de poder suministrar la energía necesaria para que dichos sistemas puedan funcionar. Los movimientos propios del cuerpo humano representan una fuente de generación de energía y un dispositivo TENG (Triboelectric Nanogenerator) es la opción más viable para aprovechar dichos movimientos y convertirlos en energía eléctrica dada su capacidad de convertir esa energía de baja frecuencia en una fuente que suministre energía de forma sostenible.

2.67 Investigation of Position Sensing and Energy Harvesting of a Flexible Triboelectric Touch Pad.[67]

En esta investigación se presenta un panel táctil flexible que puede detectar la posición de un objeto al hacer contacto con la superficie de este panel y que es capaz de generar energía a partir de la inducción electrostática y del fenómeno triboeléctrico. El dispositivo está compuesto por una delgada capa de material de politetrafluoroetileno PTFE y una cantidad variada de electrodos de aluminio. Este método analógico permite la función de localización de objetos utilizando cuatro electrodos, a diferencia de los métodos convencionales de fabricación que involucran múltiples píxeles. La cantidad de energía generada es considerablemente buena ya que alcanza niveles de 10 mW y un voltaje en circuito abierto de 420 V a una corriente de 0.25 μ A por centímetro cuadrado. Este dispositivo es viable para usarlo en aparatos de uso sanitario, robótica, laptops y electrónicos de menor tamaño.

2.68 Continuous and Scalable Manufacture of Hybridized Nano-Micro Triboelectric Yarns for Energy Harvesting and Signal Sensing.[68]

Este artículo presenta una forma diferente de fabricar textiles que sean capaces de recolectar energía a través del movimiento del cuerpo humano y funcionar como nanogeneradores triboeléctricos TENGs. El dispositivo propuesto consta de la fabricación de hilos triboeléctricos ultraligeros con un único electrodo SETY con fibras helicoidales de nano micronúcleos. El resultado de la fabricación de esta clase de telas fue que se pudo generar 40.8 V a 0.705 μ A. Además, los hilos de este tipo de material son compatibles con las técnicas convencionales de fabricación textil y pueden funcionar como sensores para monitorear pequeños insectos.

2.69 Environmental Energy Harvesting Adapting to Different Weather Conditions and Self-Powered Vapor Sensor Based on Humidity-Responsive Triboelectric Nanogenerators.[69]

Los dispositivos nanogeneradores triboeléctricos que son capaces de interactuar con el medio ambiente representan una novedad y un prometedor desarrollo en el campo de los sensores que se autoalimentan y que funcionan como recolectores de energía. En este trabajo se presenta un dispositivo capaz de generar energía aprovechando el vapor y la humedad del medio. Se compone de un material que actúa por la acción del vapor de un ionómero de ácido perfluorosulfónico PFSA (*perfluorosulfonic acid ionomer*). Gracias a su facilidad de doblarse en distintas direcciones, este dispositivo puede coleccionar energía de las gotas de lluvia y del viento. A una velocidad de 25 m/s se puede conseguir una potencia de 1.6 W y 230 mW se pueden obtener cuando el dispositivo se encuentra bajo el clima lluvioso.

2.70 An Eco-friendly Porous Nanocomposite Fabric-Based Triboelectric Nanogenerator for Efficient Energy Harvesting and Motion Sensing.[70]

En este artículo se estudia un tejido triboeléctrico que sirve como nanogenerador ecológico, amigable con el medio ambiente y creado a partir de biomateriales. El dispositivo que se presenta fue diseñado como un tejido nanocompuesto poroso PNF (Porous Nanocomposite Fabric) el cual puede generar una buena cantidad de carga y que puede ser usado como nanogenerador triboeléctrico vestible. La investigación demostró que dicho dispositivo puede generar una cantidad considerable de energía, siendo capaz de iluminar matrices de LEDs y funcionar como fuentes suministradoras de energía para relojes de pulsera. También este dispositivo puede funcionar como un sensor ecológico que monitoree diversas actividades humanas, gracias a que puede ser llevado puesto como parte de la vestimenta.

2.71 A triboelectric nanogenerator based on cosmetic fixing powder for mechanical energy Harvesting.[71]

Lo descrito en esta investigación muestra la utilidad de las nanopartículas presentes en el polvo de uso cosmético, o mejor conocido como polvo maquillador para la creación de un nanogenerador triboeléctrico. Este nuevo dispositivo recibe el nombre de *cosmetic fixing powder - triboelectric nanogenerator* (CFP -TENG) y se utiliza una estructura tipo paleta, para la cosecha de energía mecánica utilizando el movimiento de una bicicleta.

La acción del dispositivo asemeja a la operación de uno tipo piezoeléctrico, pues la acción generadora se realiza al poner presión en las partículas del polvo. los resultados mostraron una generación de potencia máxima de 570.96 μW por centímetro cuadrado, con un valor de voltaje de 1141 V a 521 μA al hacerse la prueba en circuito abierto.

3. CAPÍTULO 3. Marco Teórico

3.1 Generación de electricidad

Esta es etapa inicial en la cadena o ciclo de suministro eléctrico (Figura 4) y consiste en la transformación de cualquier otra forma de energía (solar, eólica, nuclear, etc.) en energía eléctrica. Esto se lleva a cabo gracias a un generador eléctrico, que, entre otras cosas, se trata de un motor de corriente alterna funcionando de manera inversa.

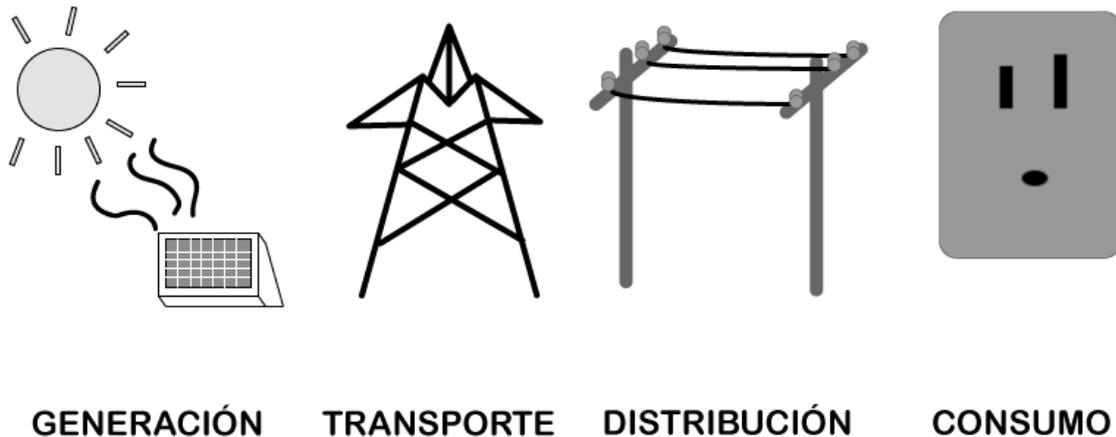


Figura 4 Ciclo del suministro de energía eléctrica.

3.2 Generación de electricidad a partir del aprovechamiento de las vibraciones

La vibración como fuente de energía es un concepto que viene acompañado del método *Energy Harvesting*, en el cual se propone la viabilidad del uso de ondas de baja frecuencia (vibraciones) en conjunto con un sistema de captación y almacenamiento.

3.3 Piezoelectricidad

Se le llama piezoelectricidad a la propiedad que tienen ciertos minerales que se encuentran en reposo (Figura 5a), que al ser sometidos a una deformación mecánica en consecuencia se genera una diferencia de potencial (Figura 5b). Este fenómeno también puede ocurrir a la inversa, es decir, si los minerales son sometidos a un campo eléctrico sufrirán deformación a este último efecto se le conoce como efecto piezoeléctrico inverso [72].

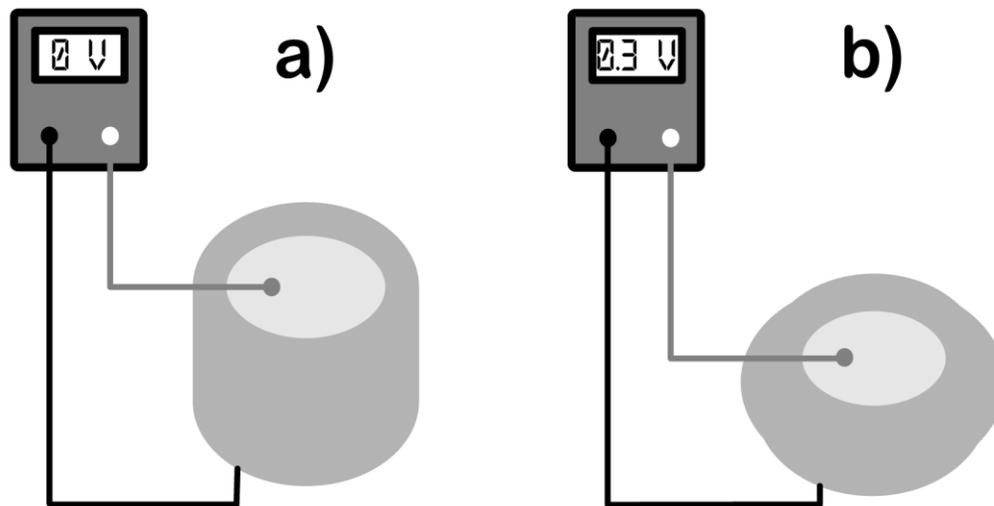


Figura 5 Representación ilustrativa de la deformación de un elemento piezoeléctrico.

a) En reposo b) Deformado

El cuarzo, el titanato de bario y la sal de Rochelle son algunos minerales que tienen propiedades piezoeléctricas. Para que estos minerales puedan ser utilizados, se cortan los cristales en laminas y estos se utilizan como transductores. Los cristales son usados como referentes de la frecuencia cuando la frecuencia de resonancia mecánica de los mismos es estable. Al vibrar, los cristales generan una tensión proporcional a la amplitud de la vibración y de la frecuencia de la vibración.

El fenómeno piezoeléctrico se define como la carga eléctrica generada debido a la tensión mecánica de ciertos materiales; la carga eléctrica se genera por el reordenamiento de los dipolos eléctricos del material, resultante de la tensión mecánica [73]; la Fig. 6 muestra un esquema de la generación de carga eléctrica en condiciones de tensión y compresión.

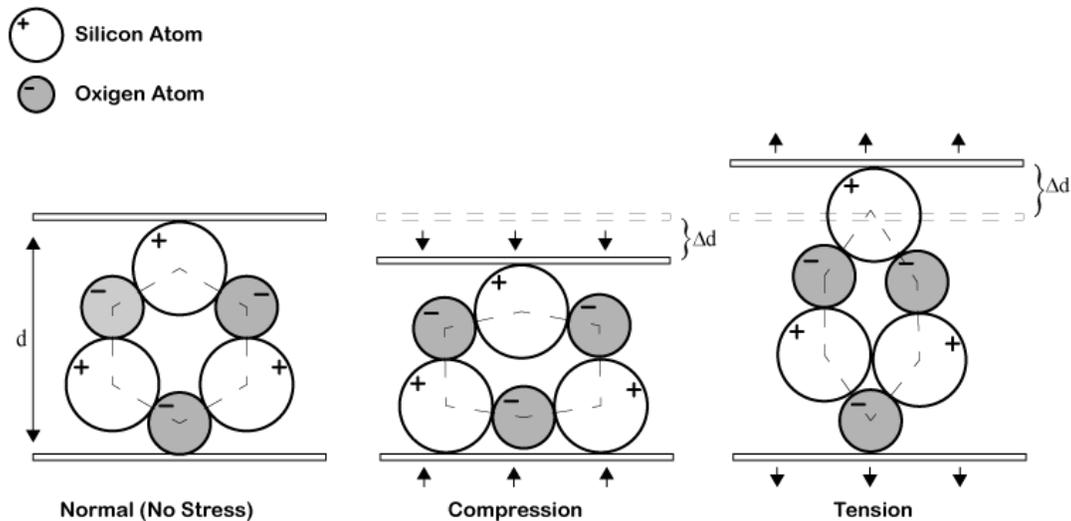


Figura 6 Representación esquemática de la carga eléctrica del material como resultado de una tensión mecánica [74].

Se conocen varios materiales que presentan propiedades piezoeléctricas; una clasificación general de los materiales piezoeléctricos los divide en cristalinos, cerámicos y polímeros, cada grupo con sus propias ventajas e inconvenientes.

La relación entre la generación de carga eléctrica y los estímulos mecánicos se denomina constante de carga piezoeléctrica (d) y "representa la carga de polarización generada por unidad de esfuerzo mecánico [75]". Dado que el efecto piezoeléctrico es el resultado de los dipolos eléctricos de la molécula, la constante de carga piezoeléctrica depende de la dirección de la carga eléctrica producida por el piezoeléctrico y de la dirección de la tensión/deformación mecánica aplicada [76][77]; esas dos direcciones deben indicarse en la constante de carga piezoeléctrica, como se muestra en la siguiente expresión:

$$S_i = S_{ij}^E T_j + d_{ki} E_k$$

En la que los índices i, j, k hacen referencia a un sistema coordinado de tres ejes, S y T , son los tensores de deformación y tensión[77].

3.4 Tipos de Materiales piezoeléctricos

Existen dos clases de materiales piezoeléctricos. Estas dos clases se pueden ser los piezoeléctricos naturales y los sintéticos. En los naturales se pueden encontrar los huesos secos, el colágeno, cristales de la caña de azúcar, el cuarzo y la seda. En la otra categoría, entre otros materiales, se encuentra el cristal cerámico, que es objeto de estudio de esta investigación.

3.4.1 Monocristales

El más conocido de este tipo de cristales es el sulfato de triglicina (TGS) donde su uso más común se puede encontrar en la espectroscopia infrarroja o detectores infrarrojos, en los cuales tiene como ventaja el poder operar a temperatura ambiente y tener una amplia respuesta espectral, como desventaja, este material tiende a caer cerca de la temperatura de Curie, provocando que, al pertenecer este material al grupo ferromagnético, pierda sus propiedades paramagnéticas. Su coeficiente de piroelectricidad puede aumentarse si sustituyen los protones de la fórmula del sulfato de triglicina, convirtiéndose en otro tipo de monocristal llamado *deuterium triglycine sulphate* (DTGS).

3.4.2 Polímeros

Se les llama también polímeros electroactivos y son conocidos como “materiales inteligentes”. Los polímeros son elementos que responden ante la deformación de su material y el tamaño de este. El más conocido es el PVDF (poli fluoruro de vinilideno). En comparación con los piezoeléctricos cerámicos como el titanato zirconato de plomo (PZT), los polímeros tienen la constante de presión

piezoeléctrica (g_{31}) más grande, lo cual quiere decir que son mejores. En su morfología, los polímeros cuentan con un momento dipolar formado por las moléculas propias del polímero. Cuando estos momentos dipolares se encuentran acomodados se convierten en la opción más viable para la generación de energía. En contraste, la necesidad de acomodar estos momentos es difícil, lo cual a su vez los hace costosos. Por otro lado, al ser materiales poliméricos, su temperatura de operación es menor cuando se compara con la temperatura de operación de las cerámicas piezoeléctricas, por lo cual las aplicaciones en las que se pueden usar los polímeros están limitadas por su temperatura de operación.

3.4.3 Cerámicos

Estos materiales son del grupo de los ferroeléctricos y su estructura es policristalina, tienen en su forma más elemental la estructura perovskita. En la actualidad, la mayoría de los materiales cerámicos que se fabrican están hechos con titanato zirconato de plomo (PZT), sin embargo, estos materiales están siendo sustituidos por compuestos cuyas composiciones químicas eviten el uso de plomo debido a los problemas medioambientales y de salud que el uso de plomo puede generar. Entre sus bondades se pueden destacar su bajo costo, su disponibilidad en grandes superficies, su alta temperatura de Curie (temperatura en la cual un cuerpo ferromagnético pierde sus propiedades y se vuelve un material paramagnético), además de su buena estabilidad química y física. En estos materiales es posible modificar otras propiedades como su constante dieléctrica, y su forma geométrica.

3.5 Energy Harvesting

Este concepto hace referencia a los tipos de energía que se pueden obtener de casi cualquier fenómeno físico presente en la naturaleza, tales como la luz, la temperatura, la fuerza mecánica, la fricción, la vibración, etc. El término “harvesting” es utilizado debido a que la energía recolectada proviene de fenómenos físicos en los cuales la energía se considera desperdiciada. Los rangos de generación de potencia en *energy harvesting* normalmente son de μW , nW y mW , las cuales son escalas en las que su uso representa una opción viable como reemplazo de fuentes de alimentación convencionales en aparatos electrónicos de bajo consumo como

los sensores autónomos, sensores vestibles, transductores y en ciertos dispositivos de la electrónica en general.[78]

Existen diversas aplicaciones para obtener energía empleando el método de *energy harvesting*, entre ellas se pueden mencionar la triboeléctrica, la termoeléctrica y la piezoeléctrica, que es la que atañe a esta investigación.

En el caso de la generación termoeléctrica, esta se da al tener un material aislado eléctricamente en el cual sus extremos son sometidos a diferentes temperaturas las cuales tendrán una diferencia de voltaje. [79]

Para la generación triboeléctrica, esta se lleva a cabo al tener dos materiales teniendo contacto entre sí o friccionando; al ocurrir la fricción, una generación de carga se manifiesta en la superficie de los materiales [80], como ejemplo de esto, se puede mencionar a la estática generada por el frotamiento de un material plástico y tela sintética.

Para el caso de la generación piezoeléctrica esta es producida por la deformación de un dispositivo que contenga cristales con propiedades piezoeléctricas. Como respuesta de esta deformación, se manifiesta una generación de carga en dicho dispositivo. Para efectos de esta investigación se utilizarán dos tipos de sensores piezoeléctricos los cuales serán identificados como A y B (Figura 7), el sensor A, tiene 35 mm de diámetro y puede generar picos de hasta 7.0 V; el sensor B, tiene 20 mm de diámetro y es capaz de generar picos máximos de voltaje de alrededor de 4.0 V. Estos sensores se eligieron debido a su accesibilidad de adquisición, a su baja complejidad de operación y principalmente a que son piezoeléctricos cerámicos, cuyas características son las adecuadas para llevar a cabo la investigación.

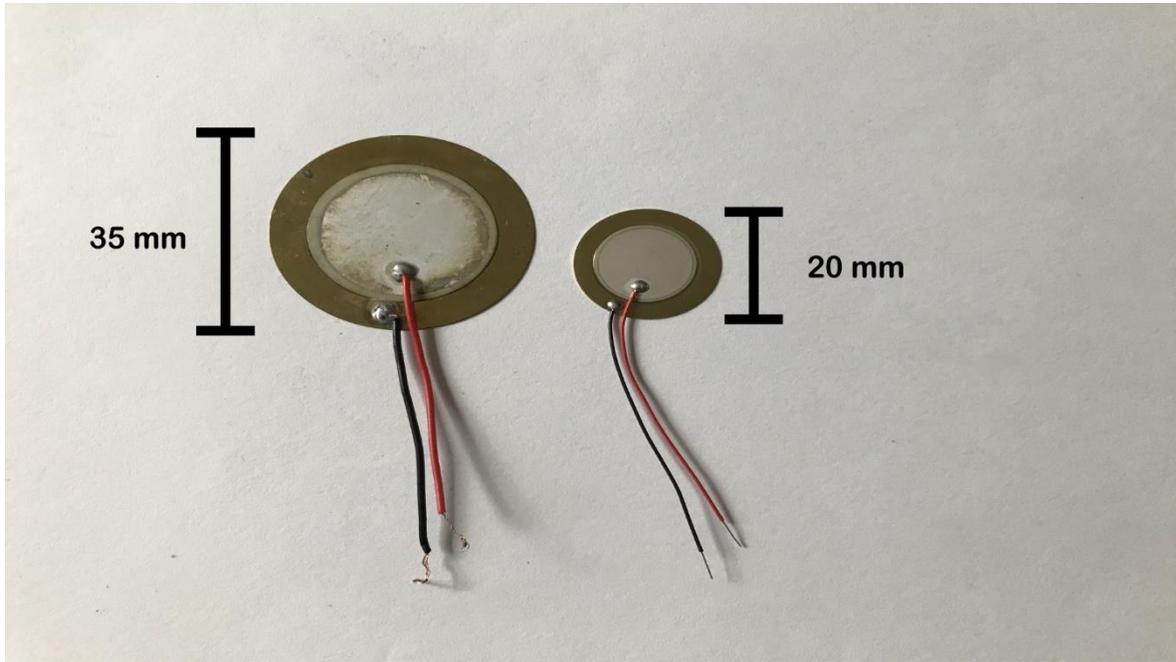


Figura 7 Sensores piezoeléctricos. De izquierda a derecha sensor A y sensor B.

El modelo base de un circuito generador de energía consta del dispositivo piezoeléctrico, un capacitor, una resistencia y un diodo (Figura 8).

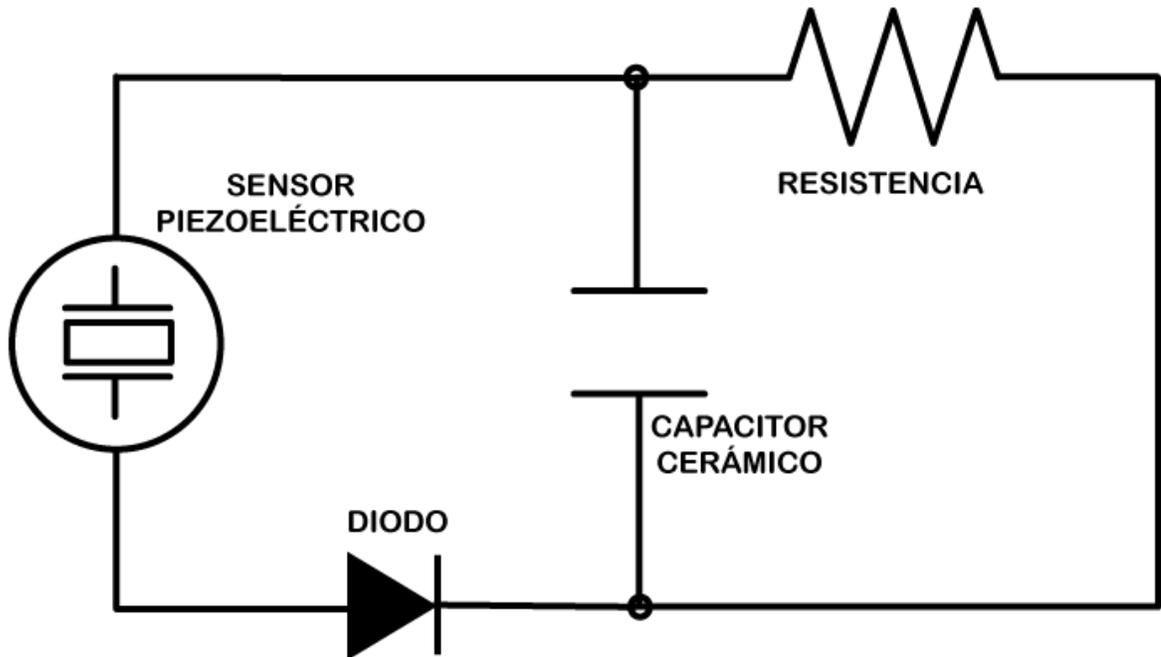


Figura 8 Circuito básico generador de energía con piezoeléctrico.

3.6 Cámara tipo amortiguador

Esta parte del sistema es necesaria para una generación de energía eficiente, ya que, debido a la naturaleza frágil del elemento cerámico contenido en el sensor piezoeléctrico que será usado, se necesita un medio el cual mantenga estas propiedades físicas lo más intacta posible, y esta cámara tipo amortiguador presenta una solución a este propósito. Esta parte del sistema se compone de una cámara, un pistón y aceite hidráulico (Figura 9). Este último servirá como el medio para transferir a fuerza del impacto del motor, evitando el contacto directo, teniendo como resultado un casi nulo desgaste en el piezoeléctrico.

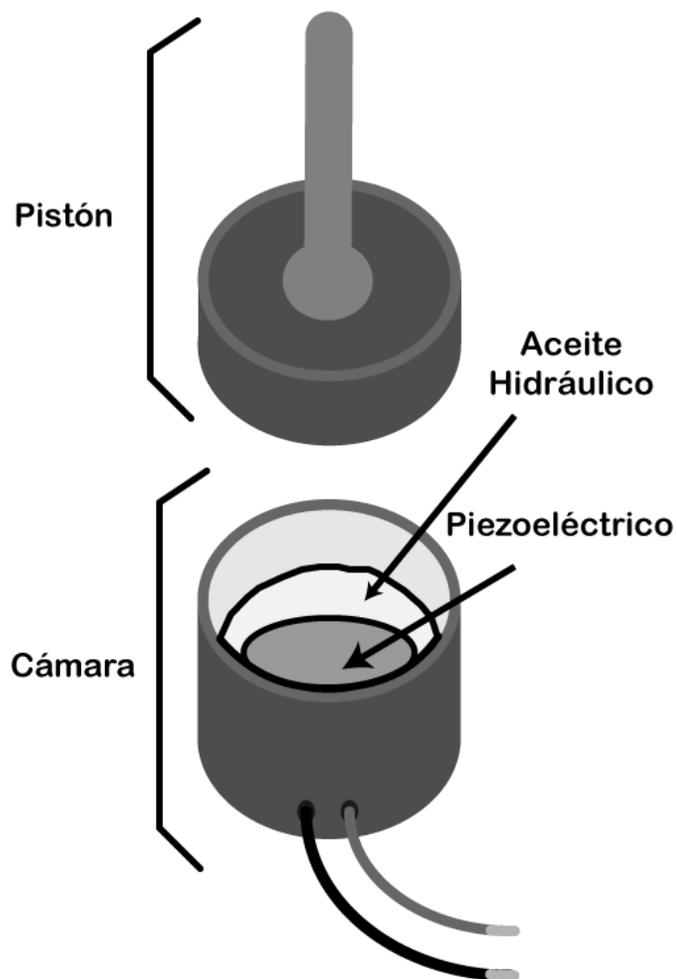


Figura 9 Propuesta de cámara de transferencia de impacto.

3.7 Dispositivo rotativo generador de vibraciones

Un electrodoméstico con motor universal de corriente alterna a 127v/60Hz (Fig. 10) fue elegido para funcionar como dispositivo generador de vibraciones. En este dispositivo es posible modificar la velocidad de rotación del motor en tres niveles de intensidad diferentes.



Figura 10 Motor eléctrico universal de 127v/60Hz

3.8 Control de Velocidad

El control de la velocidad es una parte del sistema que va a influir en la calidad en la energía generada a partir del sensor piezoeléctrico pues con este control, es posible generar las vibraciones mecánicas en frecuencias controladas, permitiéndonos elegir la o las que mejor nos convengan. Este control lo proporciona eficazmente el electrodoméstico seleccionado.

3.9 Microcontrolador *Atmega 328P* en placa de desarrollo “Arduino Uno”

Este dispositivo es una tarjeta de desarrollo de la marca *Arduino* (Figura 11) que sirve para hacer diversos proyectos que involucran el procesamiento y control de señales analógicas y digitales. Esta tarjeta se eligió debido a su fácil adquisición y a sus capacidades en el manejo de datos provenientes de una señal analógica a través de su puerto serial, la cual es una característica importante y necesaria para el propósito de esta investigación.

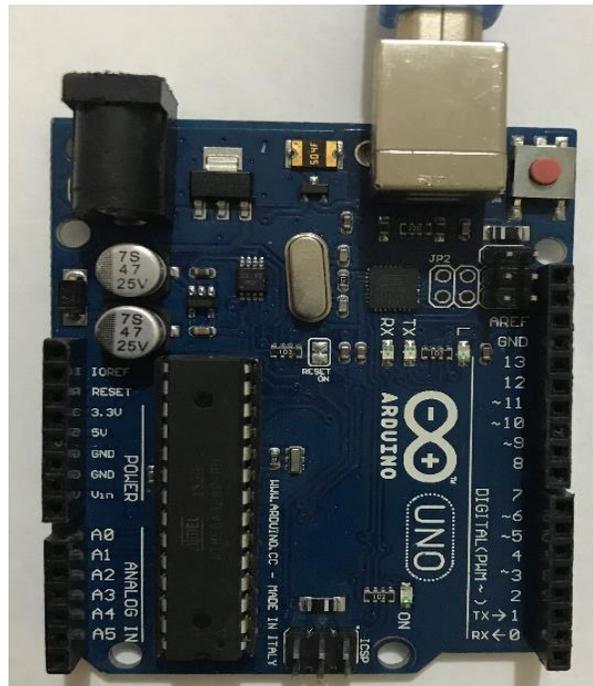


Figura 11 Arduino uno

3.10 Transformada de Fourier

Las series de Fourier se definen como una representación de una función periódica por medio de series de senos y cosenos tal como se muestra en la siguiente expresión[81]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sen(nx)$$

En donde los coeficientes a_0 , a_n , b_n , están relacionados con la función periódica que representan $f(x)$ mediante las integrales definidas:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \operatorname{sen}(nx) dx$$

Dado el comportamiento de armónico de las funciones senoidales, los coeficientes a_n y b_n representan la magnitud del contenido frecuencial de la función periódica representada por la serie de Fourier. Dado el análisis anterior es posible afirmar que: La transformada de Fourier es una transformación de una señal que se encuentra en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, permitiéndonos fragmentar esta señal en todas las frecuencias que la componen.

Dado la definición de las series de Fourier, es posible afirmar que esta herramienta nos proporciona una forma de describir un fenómeno que involucre señales periódicas o cuasi - periódicas por medio de sus componentes frecuenciales, o dicho de otra forma es posible obtener las componentes de frecuencia de una señal por medio de esta herramienta.

4. CAPÍTULO 4. Circuito Interfaz de Control

El propósito de este circuito es el de controlar la velocidad del motor que estará generando las vibraciones necesarias para que el piezoeléctrico genere energía, de manera que, al poder controlar la variación de esta velocidad, sea posible modificar la frecuencia de vibraciones en el piezoeléctrico, buscando con esto vibraciones constantes, para que el piezoeléctrico trabaje en un régimen cercano a su frecuencia de resonancia y con ello aprovechar al máximo su capacidad de generar energía.

4.1 Microcontrolador y Circuito

Para la elaboración del circuito, se utilizó el microcontrolador Atmega32u4 en su versión AU de encapsulado TQFP44 de la marca *Microchip Technology* (Figura 12), el cual se seleccionó debido a la capacidad de ejecución de instrucciones a velocidad de 16 MHz con ayuda de un oscilador externo, además de tener una capacidad de aprovechamiento de energía óptima, gracias a que puede funcionar con un voltaje de alimentación en el rango de 2.7V hasta 5.5V [82] y, tiene la característica de funcionar como dispositivo de interfaz *Universal Serial Bus* (USB) sin necesidad de añadir una configuración adicional para este propósito.

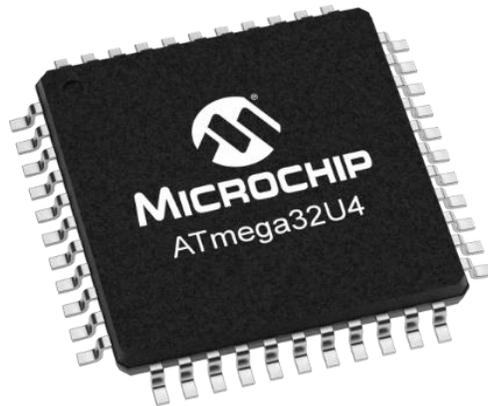


Figura 12 Microcontrolador Atmega32u4 en encapsulado TQFP44.



Figura 13 Interruptor mecánico.

El circuito consta de la parte del microcontrolador, conectado a 4 interruptores mecánicos tipo *push-button* (Figura 13), que tienen como propósito el control de encendido, apagado, aceleración y disminución de velocidad. Tiene un *encoder* giratorio de una cuadratura de 20 pasos por revolución (Figura 14). Para la conectividad con cualquier computadora, cuenta con un puerto hembra Micro USB A-B 2.0 (Figura 15).



Figura 14 Encoder giratorio.

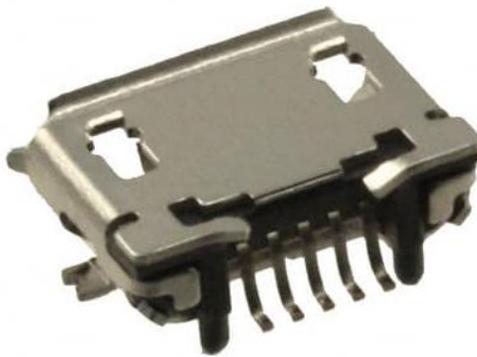


Figura 15 Conector hembra micro USB 2.0.

La conexión de los interruptores se coloca en disposición matricial con respecto a los pines ADC del microcontrolador en vez de que a cada interruptor se le asigne un pin ADC, esto con propósitos de aprovechamiento de los puertos, para de esta forma, en el caso de que se requiriera colocar más interruptores, la cantidad de pines en el microcontrolador sería una limitante. Además, se le colocaron diodos de propósito general en uno de los dos pines de cada interruptor para evitar una falsa o errónea lectura de los interruptores presionados, en caso de que se presionen por error más de uno al mismo tiempo. Para que el microcontrolador sea capaz de identificar la matriz, cada fila y cada columna, esta conectada a un pin ADC. De manera que si se presiona el interruptor uno (SW1), la fila uno (Row1) y la columna uno (Col1), establecerán contacto. En consecuencia, para el interruptor dos (SW2) la lectura se establecerá al presionarlo, y que la fila dos (Row2) y la columna uno (Col1) entren en contacto, de igual manera para los dos interruptores restantes (Figura 16).

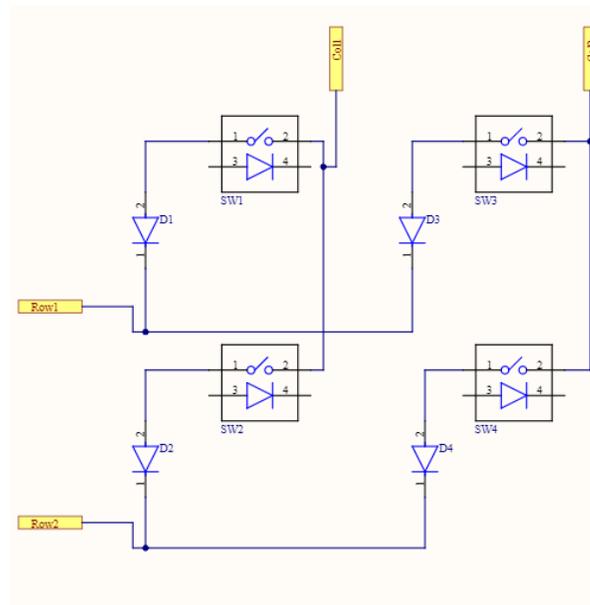


Figura 16 Disposición matricial de los interruptores.

Como se puede ver en la Figura 17, la fila uno (Row1) y dos (Row2), y la columna uno (Col1) y dos (Col2), están conectados a los pines 41, 32, 39 y 40, respectivamente.

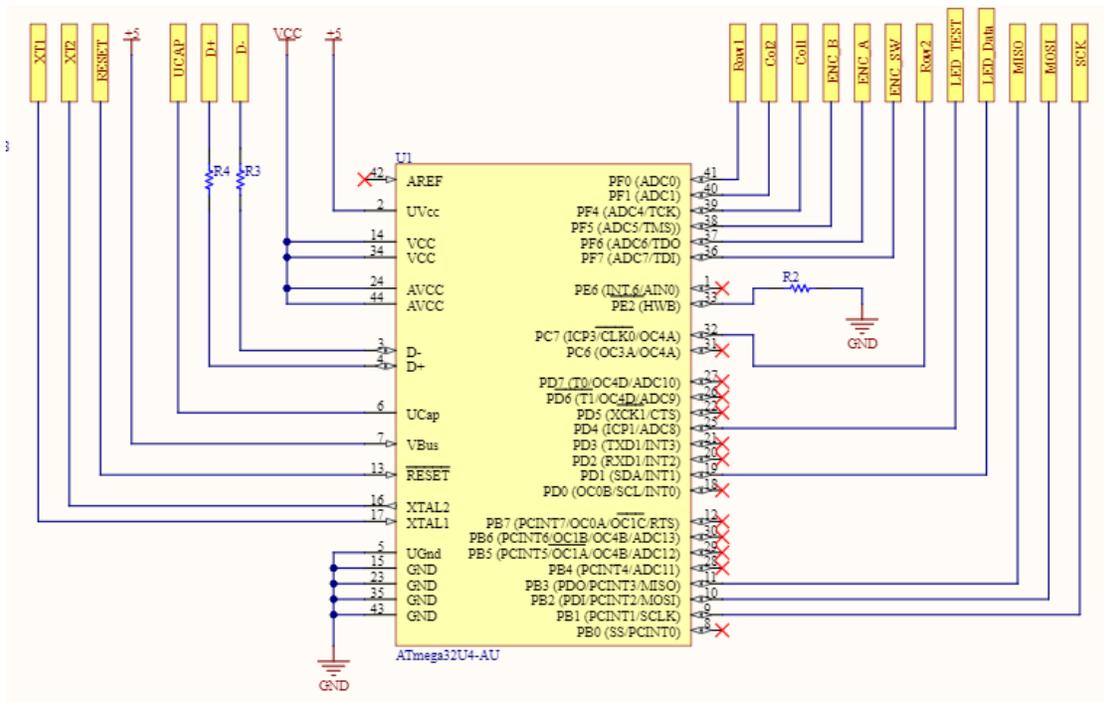


Figura 17 Diagrama del microcontrolador con etiquetas de conexión.

El *encoder* posee un interruptor adicional tipo *push-button* que está integrado a su parte giratoria, el cual puede ser asignado para alguna otra instrucción que se requiera. Sus conexiones de datos se encuentran en los pines 37 y 38 (Figura 17).

La conexión de su interruptor (Figura 18), se encuentra en el pin 36 (Figura 17).

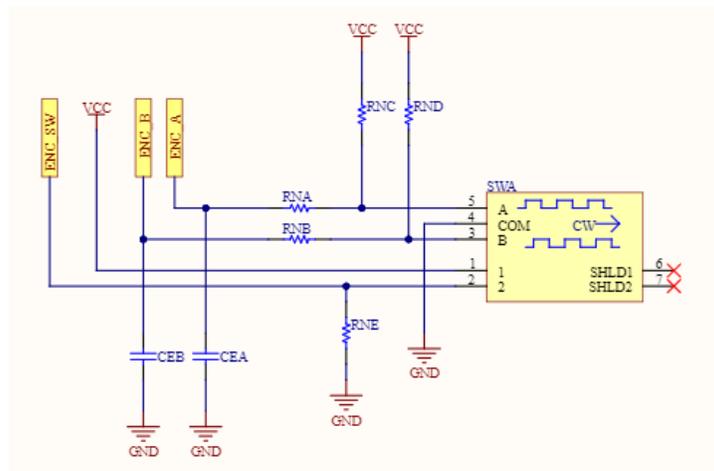


Figura 18 Diagrama de conexión del encoder.

4.2 Bootloading del microcontrolador

Cuando el microcontrolador de alguna tarjeta como la Arduino y la interfaz de control se daña o como en nuestro caso, ese utiliza un microcontrolador completamente nuevo obtenido directamente del fabricante, se tiene la necesidad de cargar el *bootloader*, que es la carga de los archivos necesarios para que el microcontrolador pueda ser manipulado desde una computadora, en los pines dedicados para ese propósito, utilizando un dispositivo extra, dedicado espacialmente para ese propósito (Figura 19). En la tarjeta Arduino UNO, esos pines se encuentran señalados con color rojo en la Figura 20.



Figura 19 “Atmega AVR ISP Programmer”. Dispositivo encargado del bootloading de microcontroladores de la familia AVR de la marca Atmega.

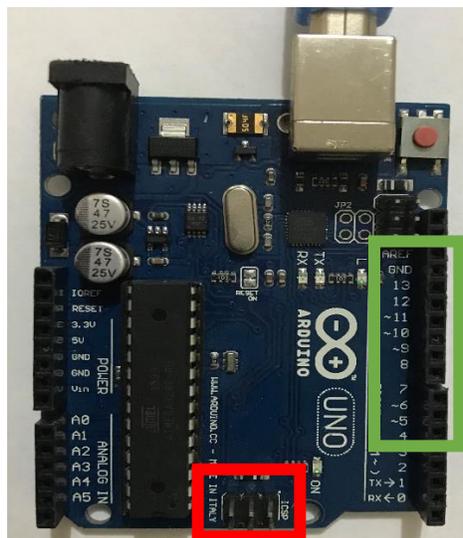


Figura 20 Tarjeta Arduino UNO con señalización en los pines destinados al bootloading del microcontrolador.

En el caso de la tarjeta que se diseñó, para hacer utilizable el dispositivo, se requirió de un proceso distinto para cargar el *bootloader*, ya que no se contaba con el dispositivo de la Figura 19. Este proceso alternativo se contempló desde el diseño del circuito, razón por la cual se añadieron los pines de conexión SCK, MOSI, MISO y RESET (Figura 21), necesarios para tal propósito.

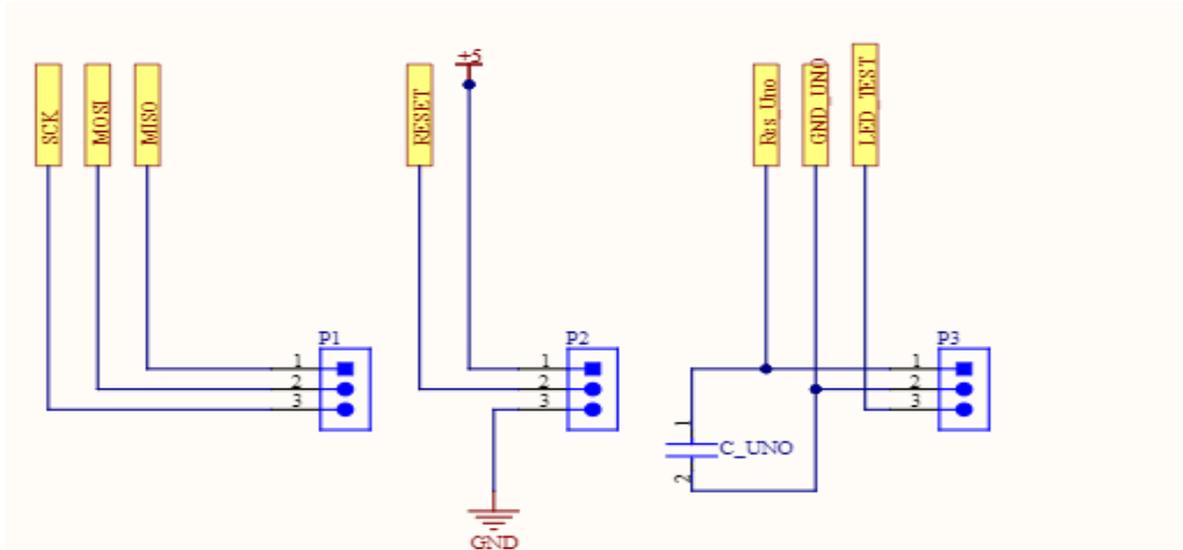


Figura 21 Pines de conexión en la tarjeta diseñada.

Para lograr la conectividad, se utilizaron los pines 13, 12, 11 y 10 de una tarjeta Arduino UNO (Figura 20) señalados en la imagen con color verde, conectados con los pines 9, 11, 10 y 13 del microcontrolador de la tarjeta diseñada (Figura 22) señalado con más claridad en la Tabla 3.2.1

El proceso para cargarle el bootloader al microcontrolador consistió en copiar el firmware “ArduinoISP” que se encuentra disponible en la interfaz de Arduino como un script en su apartado de archivos de ejemplo, a través de las conexiones MISO, MOSI y RESET (Figura 20).

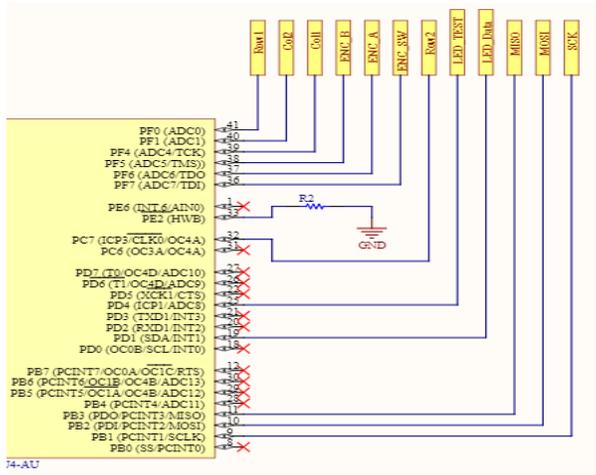


Figura 22 Pines de conexión en el microcontrolador de la tarjeta diseñada.

Tabla 4.2.1 Disposición de conexiones entre la tarjeta Arduino UNO y la tarjeta diseñada.

Arduino UNO	Microcontrolador
13	9 (SCK)
12	11 (MISO)
11	10 (MOSI)
10	13 (RESET)

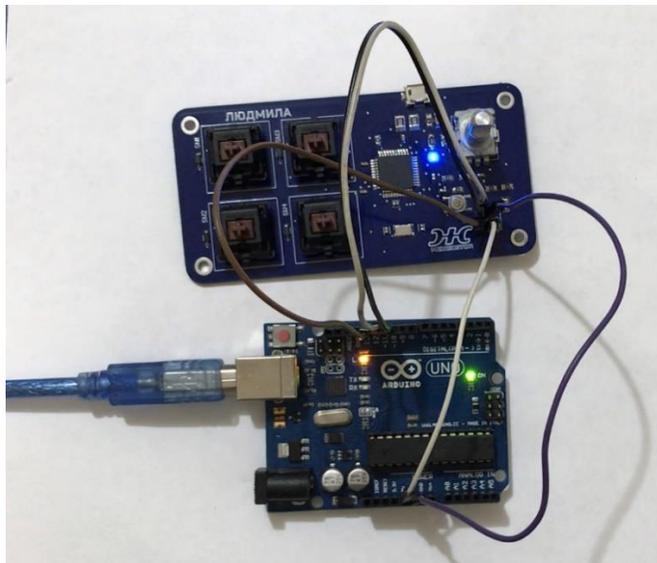


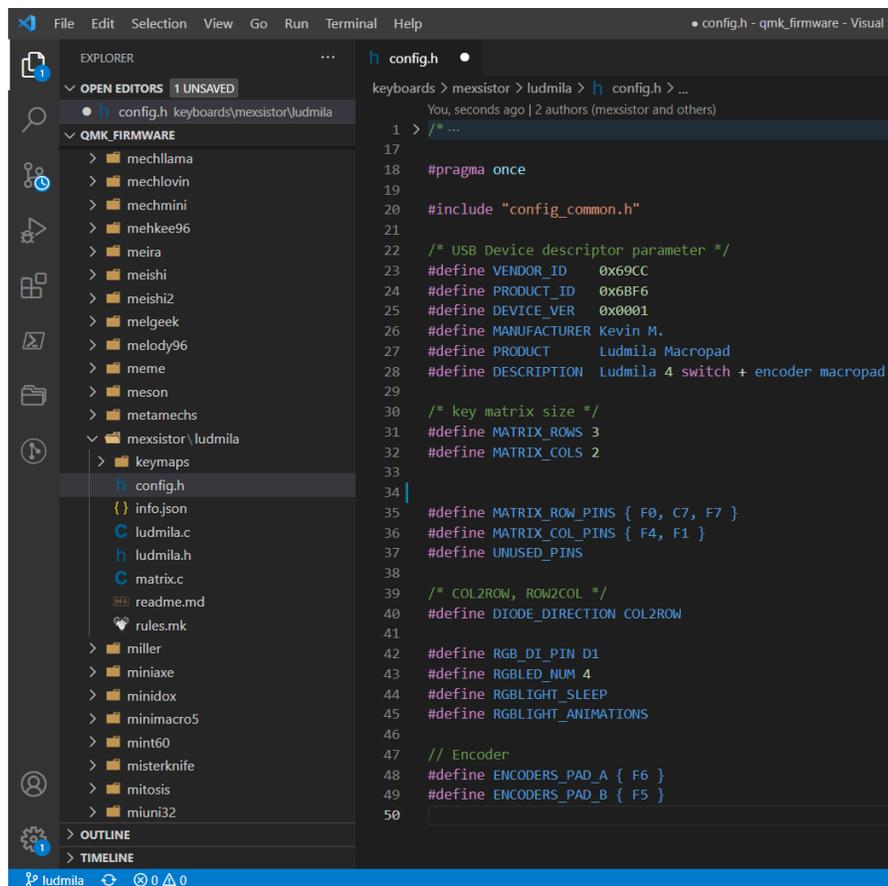
Figura 23 Conexión entre Arduino y la tarjeta diseñada para la carga del bootloader.

4.3 Programación del microcontrolador.

Para hacer que al dispositivo se le pudieran asignar comandos a los botones y al *encoder*, se requirió de hacer un mapeo de las conexiones de la tarjeta, las cuales se programaron en lenguaje C (Figura 24).

Para facilitar al usuario la asignación de comandos, se subió el programa en C a la plataforma de scripts del software QMK (Figura 25) el cual es una plataforma de código libre que ofrece soporte y depuración de código para dispositivos HID (*Human Interface Devices*), especialmente teclados.

El código paso por un mes de revisión y corrección de errores para que pudiera ser aceptado y añadido al árbol de códigos (Figura 26).



```
1 > /* ...
17
18 #pragma once
19
20 #include "config_common.h"
21
22 /* USB Device descriptor parameter */
23 #define VENDOR_ID 0x69CC
24 #define PRODUCT_ID 0x6BF6
25 #define DEVICE_VER 0x0001
26 #define MANUFACTURER Kevin M.
27 #define PRODUCT Ludmila Macropad
28 #define DESCRIPTION Ludmila 4 switch + encoder macropad
29
30 /* key matrix size */
31 #define MATRIX_ROWS 3
32 #define MATRIX_COLS 2
33
34
35 #define MATRIX_ROW_PINS { F0, C7, F7 }
36 #define MATRIX_COL_PINS { F4, F1 }
37 #define UNUSED_PINS
38
39 /* COL2ROW, ROW2COL */
40 #define DIODE_DIRECTION COL2ROW
41
42 #define RGB_DI_PIN D1
43 #define RGBLED_NUM 4
44 #define RGBLIGHT_SLEEP
45 #define RGBLIGHT_ANIMATIONS
46
47 // Encoder
48 #define ENCODERS_PAD_A { F6 }
49 #define ENCODERS_PAD_B { F5 }
50
```

Figura 24 Código para la asignación de comandos a los interruptores de la tarjeta diseñada.

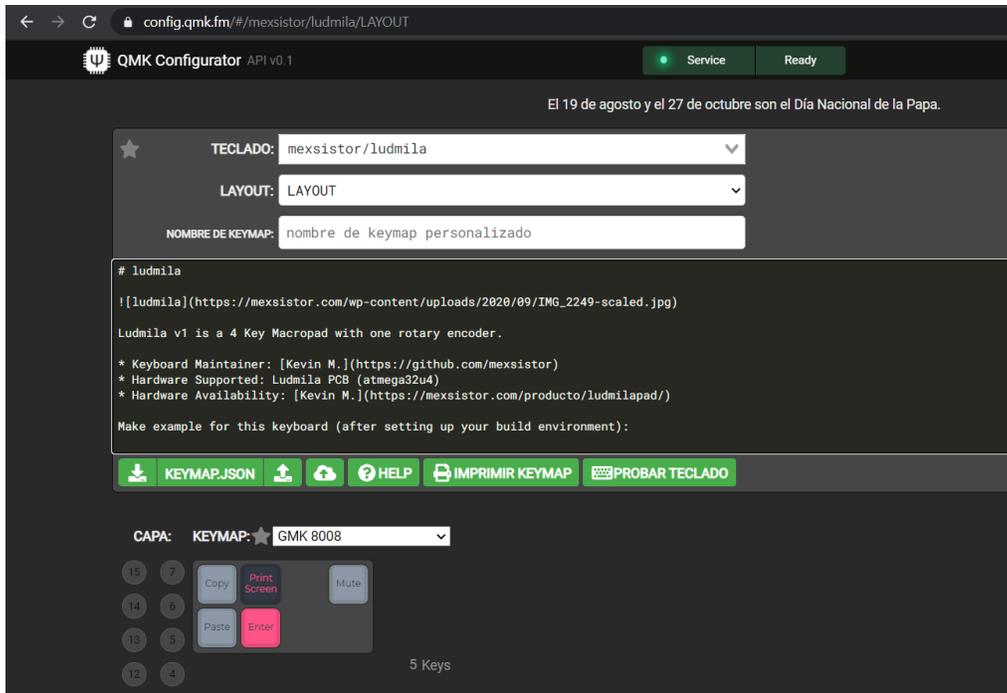


Figura 25 Plataforma QMK.

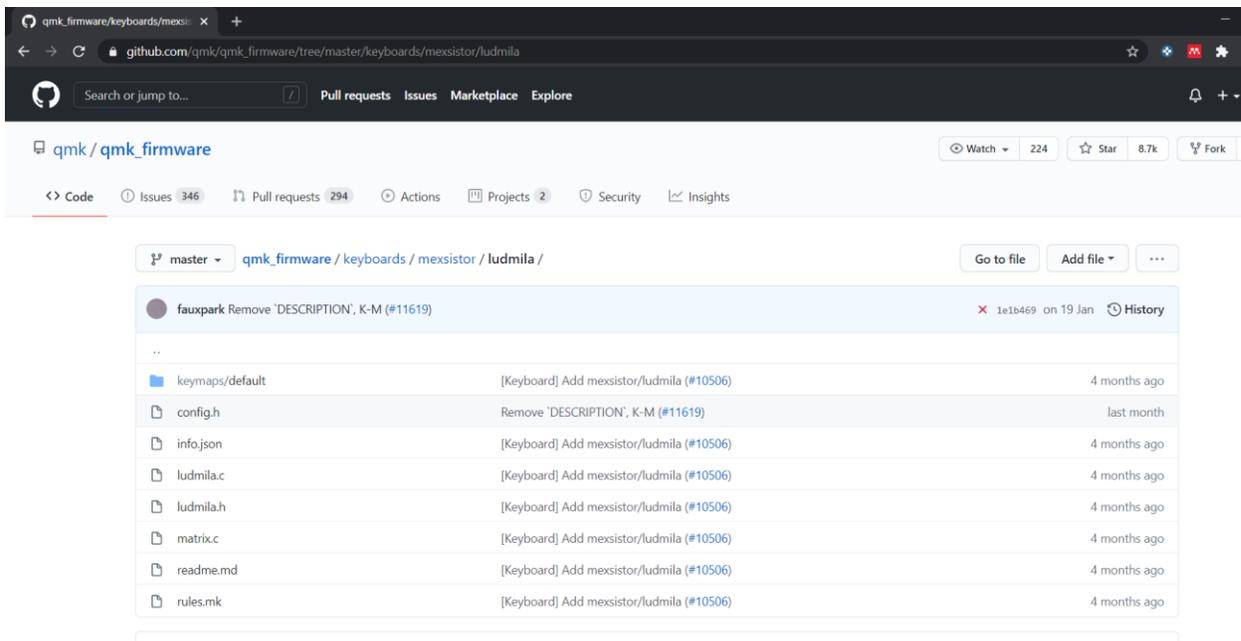


Figura 26 Plataforma de revisión y depuración de código de QMK, en la página web de GitHub.

4.4 Análisis de la Transformada de Fourier en *MATLAB*[®]

A partir de lo anterior, es posible realizar un análisis más exacto utilizando la herramienta *MATLAB*[®], a través de la cual se puede crear un script el cual permita obtener la gráfica de la Transformada Rápida de Fourier (FTT), a partir del muestreo obtenido de la señal analógica que generó el sensor piezoeléctrico, datos que, en primera instancia, fueron registrados en una hoja de cálculo.

Con los datos del muestreo almacenados en la hoja de cálculo, se indicó una instrucción en el script para importar ese archivo al análisis en *MATLAB*[®]

Como primer paso, se establece la frecuencia de muestreo (F_s) y un periodo de muestreo (T) en el script; esta frecuencia fue instaurada a su vez en el programa ejecutable de la tarjeta Arduino. Después, se establece el tiempo como un vector, utilizando los periodos de tiempo en los que se tomó cada muestra, registrados en la segunda columna de la hoja de cálculo.

Con los datos anteriores se procedió a colocar las instrucciones para el graficado o ploteo de la señal original utilizando los comandos de *MATLAB*[®] destinados para ello (Fig. 27).

```
16 %%
17 %OPEN THE FILE WITH PIEZO DATA
18 - [name,path]=uigetfile('*.txt','OPEN EXCEL FILE WITH PIEZO RAW DATA');cd(path);
19 - data=importdata(name,'\t',2) ;%THE HEADER IS AT THE SECOND LINE
20 - ndata=length(data.data(:,1)); % LENGTH OF SIGNAL
21 - Fs=100; %SAMPLING FREQUENCY
22 - T=0.01; %SAMPLING PERIOD
23 - t=(0:ndata-1)*T; %TIME VECTOR
24 %%
25 - figure(1)
26 - subplot(2,1,1)
27 - plot (t,data.data(:,2)) % PLOT THE PIEZO SIGNAL
28 - title('PIEZO RAW SIGNAL')
29 - xlabel('t (seconds)')
30 - ylabel('mv')
31
```

Figura 27 Parte inicial del script para el análisis de señales.

Para el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) se utilizaron las funciones que ofrece *MATLAB*[®] (Fig. 28) [83] en la cual ofrece los siguientes métodos de resolución para una sintaxis del tipo $Y = \text{fft}(X,n)$:

- Esta sintaxis devuelve la DFT del punto n. Si no se especifica ningún valor, Y tiene el mismo tamaño que X.
- Si X es un vector y la longitud de X es menor que n, entonces X se rellena con ceros finales hasta la longitud de n.
- Si X es un vector y la longitud de X es mayor que n, entonces X se trunca hasta la longitud de n.
- Si X es una matriz, cada columna se trata como en el caso vectorial.
- Si X es un array multidimensional, la primera dimensión del array cuyo tamaño no sea igual a 1 se trata como en el caso vectorial.

```
32 - Y=fft(data.data(:,2)); %CALCULATING FFT
33 - P2 = abs(Y/ndata); %NORMALIZING FFT DATA VALUES
34 - P1 = P2(1:ndata/2+1); %GETING ONLY THE HALF PART OF THE FFT
35 - P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
36 - f = Fs*(0:(ndata/2))/ndata; %FREQUENCY VECTORS
37 - subplot(2,1,2)
38 - plot(f,P1)
39 - title('Single-Sided Amplitude Spectrum of X(t)')
40 - xlabel('f (Hz)')
41 - ylabel('|voltage(f)|')
42 - %%
```

Figura 28 Parte del script para la ejecución del análisis de la FTT.

5. CAPÍTULO 5. Pruebas preliminares.

Como prueba preliminar del circuito de generación de energía, se dispuso de un cilindro con aceite y el piezoeléctrico en su interior, para que fueran presionados simulando una cavidad sellada herméticamente. Este circuito de pruebas se muestra en la Figura 29. Para hacer la compresión del aceite dentro del cilindro para generar el voltaje que será interpretado por el Arduino para la adquisición de datos,

se hizo mediante un movimiento de tornillo en el cual al girar provocaba un movimiento en el pistón, este bajaba y comprimía el aceite, esta prueba se hizo de esta forma porque ambas piezas, (el pistón y el cilindro), tienen una cuerda porque juntas formaban una pieza unida de manera roscable (Figura 30).

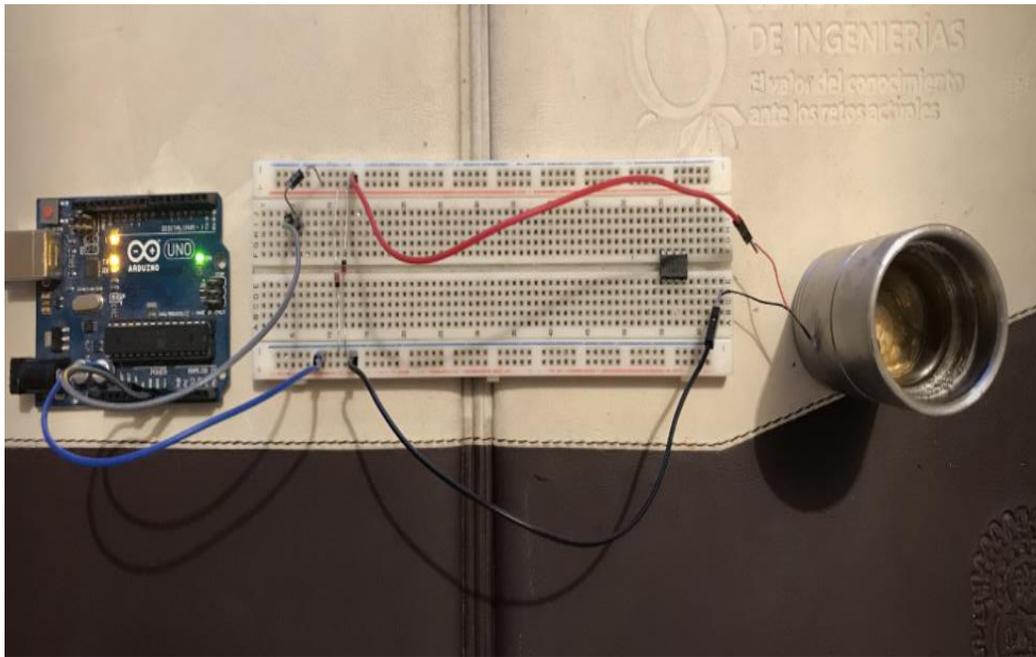


Figura 29 Circuito de pruebas para la generación de energía y adquisición de datos.



Figura 30 Cilindro de pruebas tipo pistón sellado herméticamente.

Teniendo ya la parte mecánica lista, se procedió a armar una configuración de protección del Arduino, para ponerlo como acople entre el cilindro y el Arduino. Este circuito se compone de dos diodos Zener de 4.7 volts en configuración antiparalelo, como se muestra en la imagen 25 y un diodo de uso común que estará conectado al pin analógico del Arduino de mi elección y el otro pin a tierra (Figura 31).

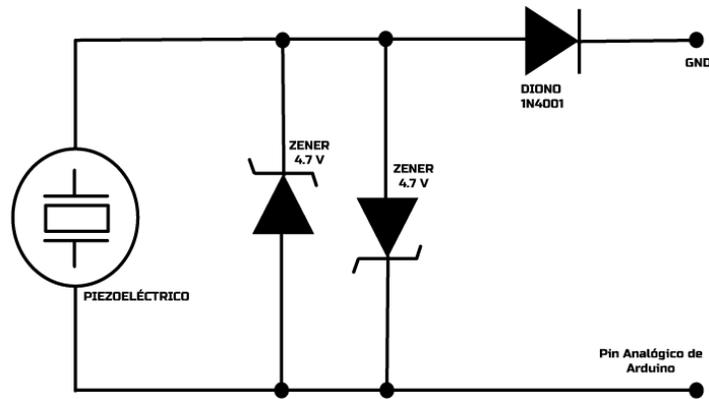


Figura 31 Configuración antiparalelo de diodos zener, para la protección de la tarjeta Arduino.

Para realizar un registro de la adquisición de datos de la energía generada por el piezoeléctrico, se hizo mediante un programa de Arduino que recibe la señal, la cual se puede leer en un rango de 0 a 5 volts al interpretar los 1024 bits que lee el pin analógico (Figura 32).

```
piezo2 §
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int valorPiezo = analogRead(A0);
  //Convierto la lectura del piezo 0 - 1023 a voltaje 0 - 5v haciendo la división
  float voltaje = valorPiezo * (5.0 / 1023.0);
  //muestro la lectura en el serial
  Serial.println(voltaje);
  delay(10);
}
```

Figura 32 Script para la interpretación de datos de la tarjeta Arduino.

Ya con el programa de Arduino funcionando correctamente al poder leer datos del piezoeléctrico en el puerto serial. Se procedió a hacer un programa en *Python* (Figura 33). El cual permite leer los datos en el puerto serial de *Visual Studio Code* o *Pycharm* o cualquier IDE (*integrated development enviroment*) que sea compatible con *Python*, en vez del puerto serial del IDE de Arduino (C++), permitiendo generar una recopilación de datos en el tiempo que yo desee, que a su vez se guardará en una hoja de cálculo.

```

datosSerial.py > ...
1  from serialExcel import SerialToExcel
2
3  serialToExcel = SerialToExcel("COM3",9600)
4
5  columnas = ["Cantidad de muestras", "Voltaje (mV)"]
6
7  serialToExcel.setColumns(["Cantidad de Muestras", "Voltaje(mV)"])
8  serialToExcel.setRecordsNumber(500)
9  serialToExcel.readPort()
10
11  serialToExcel.writeFile("archivo1.xls")

```

```

OUTPUT  DEBUG CONSOLE  PROBLEMS  TERMINAL
09/08/2020, 01:10:57 b'0.57\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.56\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.55\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.51\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.00\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.53\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.57\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.58\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.57\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.55\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.51\r\n'
09/08/2020, 01:10:57 b'0.12\r\n'

```

Figura 33 Script en Python para el registro y presentación de los datos obtenidos.

En la recopilación de datos que se muestra en la Figura 34, se hicieron 500 lecturas en 5 segundos con un *tiempo entre cada lectura* de 10 milisegundos. El tiempo y la cantidad de lecturas son a elección y se pueden modificar de acuerdo a las necesidades. En una hoja de Excel, en la primera columna, es posible ver la fecha y la hora exacta de la lectura de los datos con lo cual se puede comprobar que, en este caso, las lecturas fueron las solicitadas en el *script*, y el tiempo entre las lecturas es muy preciso.

Gráfico 9			
A	B	C	D
Datos del Puerto Serial			
Fecha y Hora		Cantidad de l Voltaje (mV)	
09/07/2020, 23:56:59		1	0.41
09/07/2020, 23:56:59		2	0.43
09/07/2020, 23:56:59		3	0.46
09/07/2020, 23:56:59		4	0.47
09/07/2020, 23:56:59		5	0.49
09/07/2020, 23:56:59		6	0.47
09/07/2020, 23:56:59		7	0.48
09/07/2020, 23:56:59		8	0.5
09/07/2020, 23:56:59		9	0.51
09/07/2020, 23:56:59		10	0.52
09/07/2020, 23:56:59		11	0.51
09/07/2020, 23:56:59		12	0.47
09/07/2020, 23:56:59		13	0.47
09/07/2020, 23:56:59		14	0.42
09/07/2020, 23:56:59		15	0.44
09/07/2020, 23:56:59		16	0.43
09/07/2020, 23:56:59		17	0.3926
09/07/2020, 23:56:59		18	0.33
09/07/2020, 23:56:59		19	0.32
09/07/2020, 23:56:59		20	0.4
09/07/2020, 23:56:59		21	0.48
09/07/2020, 23:56:59		22	0.41
09/07/2020, 23:56:59		23	0.43
09/07/2020, 23:56:59		24	0.46
09/07/2020, 23:56:59		25	0.47
09/07/2020, 23:56:59		26	0.49
09/07/2020, 23:56:59		27	0.47
09/07/2020, 23:56:59		28	0.48
09/07/2020, 23:56:59		29	0.5
09/07/2020, 23:56:59		30	0.51
09/07/2020, 23:56:59		31	0.52
09/07/2020, 23:56:59		32	0.51
09/07/2020, 23:56:59		33	0.47
09/07/2020, 23:56:59		34	0.47
09/07/2020, 23:56:59		35	0.42
09/07/2020, 23:56:59		36	0.44

Figura 34 Datos obtenidos, registrados en una hoja de cálculo.

Con estos datos, fue posible representar los mismos en un gráfico de dispersión (Figura 35) en el cual, resulta más fácil identificar los datos obtenidos, en este caso, el voltaje generado, representado por los picos de la gráfica. Los valles hacen referencia a la nula generación de voltaje, presente al dejar de presionar el piezoeléctrico.

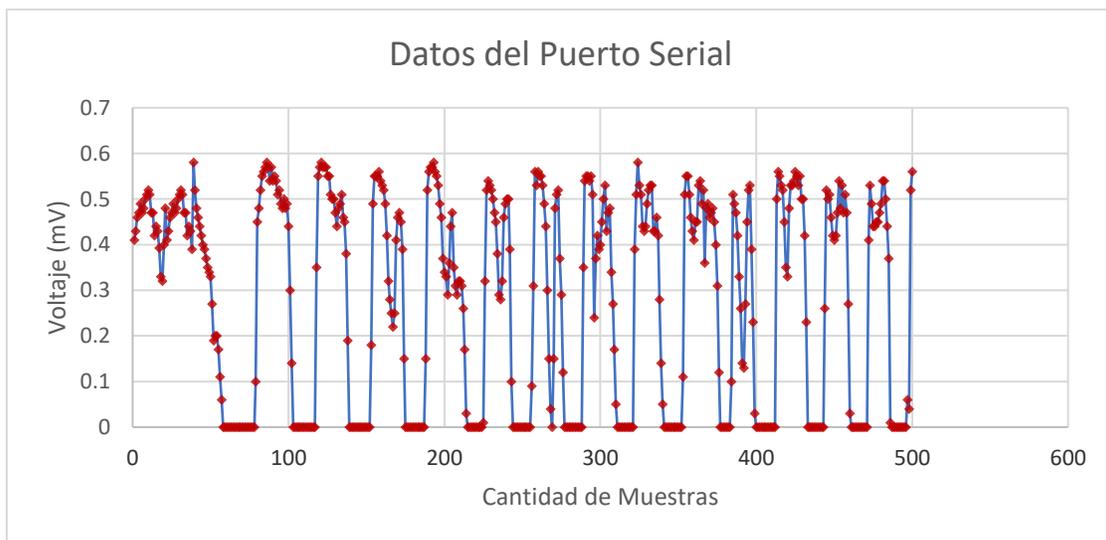


Figura 35 Gráfico de dispersión con los datos obtenidos del circuito de prueba.

6. CAPÍTULO 6. Análisis de energía generada.

Las mediciones se realizaron con los dos piezoeléctricos de diferentes dimensiones los cuales se colocaron mecánicamente en la parte inferior y lateral de un primer modelo de electrodoméstico utilizado como dispositivo rotativo generador de vibración. Este primer modelo disponía de tres niveles de velocidad de rotación las cuales se clasificaron en: baja, media y alta.

En la figura 36 se puede apreciar la respuesta en frecuencia de sistema de generación de energía, cuando este último es colocado en la parte lateral del dispositivo rotativo generador de vibraciones. En esta misma figura se muestra la forma en la que varía la frecuencia de vibración principal cuando se incrementa la velocidad del dispositivo rotativo.

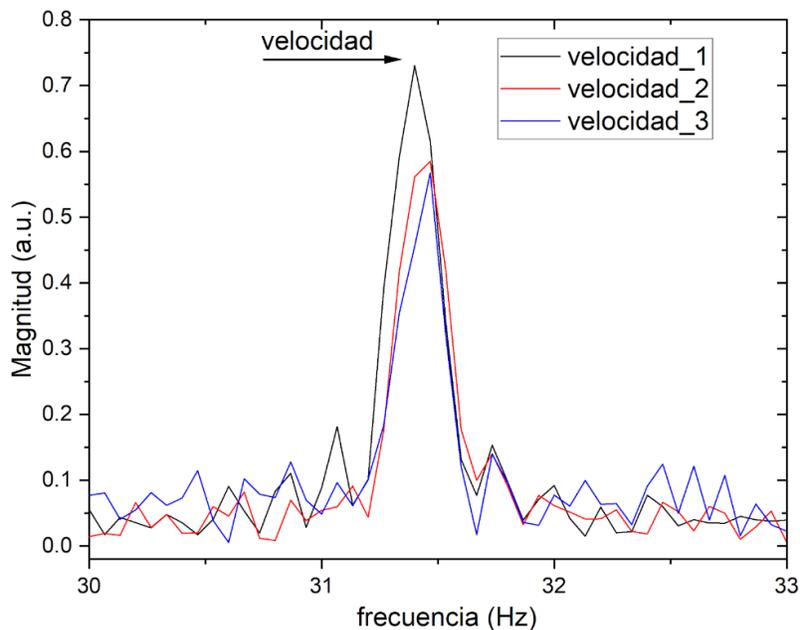


Figura 36 Respuesta del sistema en frecuencia con el piezoeléctrico colocado en posición lateral.

En la figura 37 se puede apreciar la respuesta en frecuencia de sistema de generación de energía, cuando este último es colocado en la parte inferior del dispositivo rotativo generador de vibraciones, esto es cuando el sistema de generación de energía soporta el peso del dispositivo rotatorio. En esta misma figura se muestra la forma en la que varía la frecuencia de vibración principal cuando se incrementa la velocidad del dispositivo rotativo.

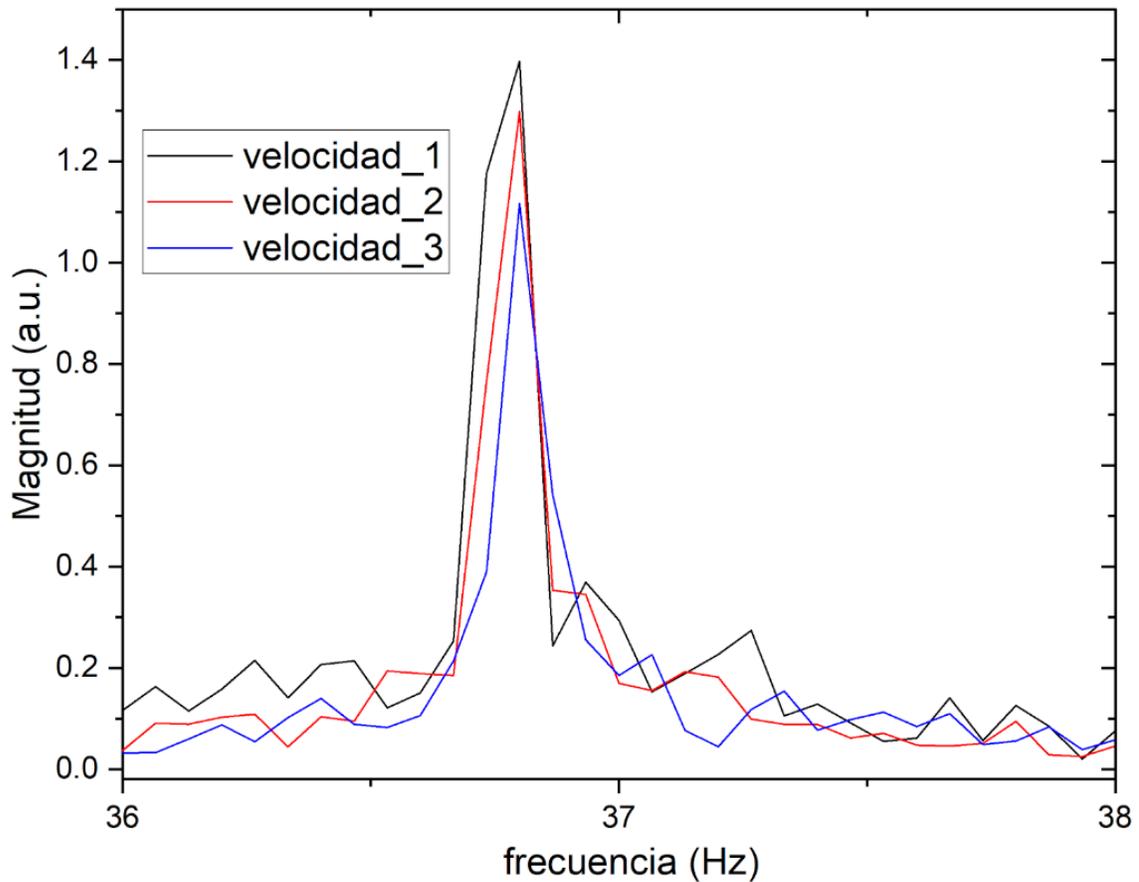


Figura 37 Respuesta del sistema en frecuencia con el piezoeléctrico colocado en posición inferior.

Como parte del proceso de análisis, se realizaron modificaciones técnicas en las partes que involucraron la captura de datos. La más importante de estas modificaciones fue en el código de Arduino, en el cual se hizo el cambio de la función “*delay*”, la cual nos permitió hacer una captura de datos en intervalos expresados en milisegundos, por la de “*delayMicroseconds*” como se muestra en la figura 38, estableciendo un valor de 100 microsegundos = 0.1 milisegundos entre cada toma de lectura.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. At the top, there is a menu bar with 'Archivo', 'Editar', 'Programa', 'Herramientas', and 'Ayuda'. Below the menu bar is a toolbar with icons for a checkmark, a refresh symbol, a grid, an upload arrow, and a download arrow. The main window displays a C++ script for an Arduino board. The script starts with 'Piezo_Lectura \$' in a text box. The code includes a setup function that initializes the serial port at 115200 baud. The loop function reads an analog value from pin A0, converts it to a voltage (0-5V), and prints it to the serial monitor. A delay of 100 microseconds is used between readings. The code is as follows:

```
void setup() {  
  
  Serial.begin(115200);  
}  
int i = 1;  
void loop() {  
  int valorPiezo = analogRead(A0);  
  //Convierto la lectura del piezo 0 - 1023 a voltaje 0 - 5v haciendo la divis:  
  float voltaje = valorPiezo * (5.0 / 1023.0);  
  //muestro la lectura en el serial  
  Serial.print(i);  
  Serial.print(",");  
  Serial.println(voltaje);  
  
  i = i + 1;  
  delayMicroseconds(100);  
}
```

Figura 38 Script de la captura de datos modificado.

Hecho el cambio en el script y siendo este cargado a la tarjeta, se procedió a la toma de muestras nuevamente con la mínima y máxima velocidad del motor.

Un total de 3000 muestras de cada velocidad con el *delay* antes mencionado fueron establecidas. En las hojas de cálculo de cada análisis, se indica en la primera columna la hora exacta en que se hicieron las pruebas y el tiempo que tomaron. Esa primera columna se distribuye de la siguiente forma:

Hora:Minuto:Segundo.Microsegundo

Posteriormente, se realizó el análisis de la Transformada Rápida de Fourier, parte del proceso que involucra el software *MATLAB*[®], lo cual nos permitió obtener los datos necesarios para hacer un análisis visual de los resultados.

Con los resultados obtenidos de este nuevo análisis se pueden apreciar notables cambios en el análisis de frecuencia, estas diferencias se pueden apreciar fácilmente en las gráficas de las figuras 39, 40, 41 y 42.

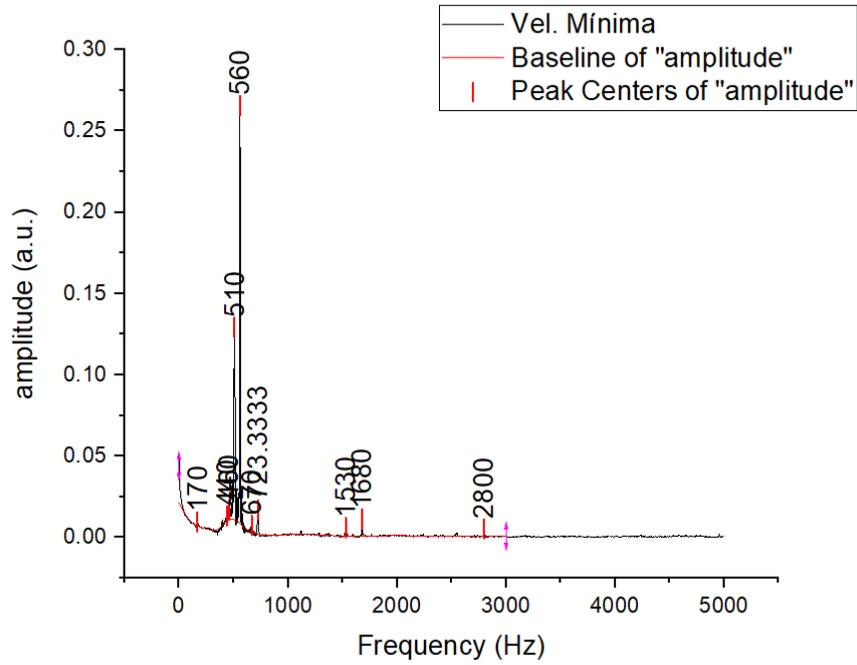


Figura 39 Gráfica de los picos en la amplitud de la muestra realizada a velocidad mínima.

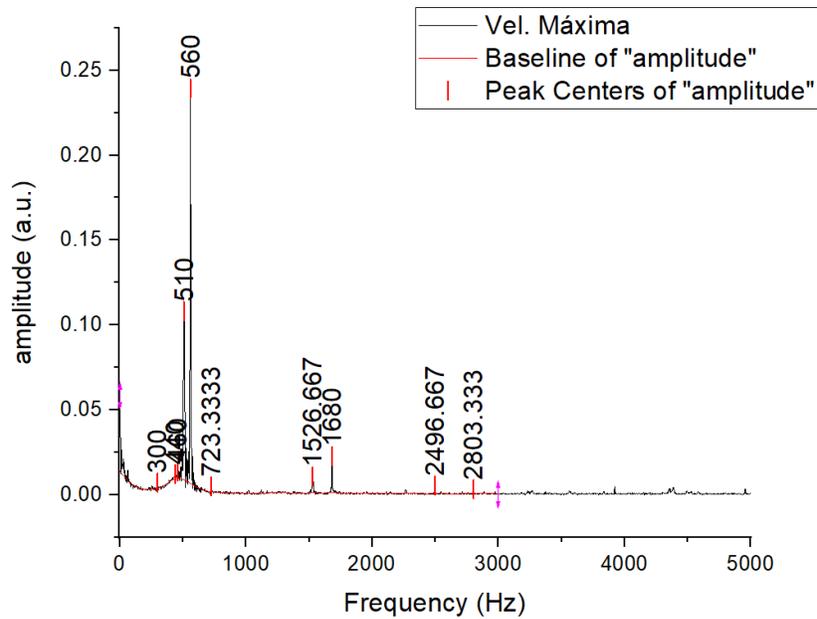


Figura 40 Gráfica de las frecuencias de vibración del sistema generador de energía cuando la máquina rotatoria gira a velocidad máxima.

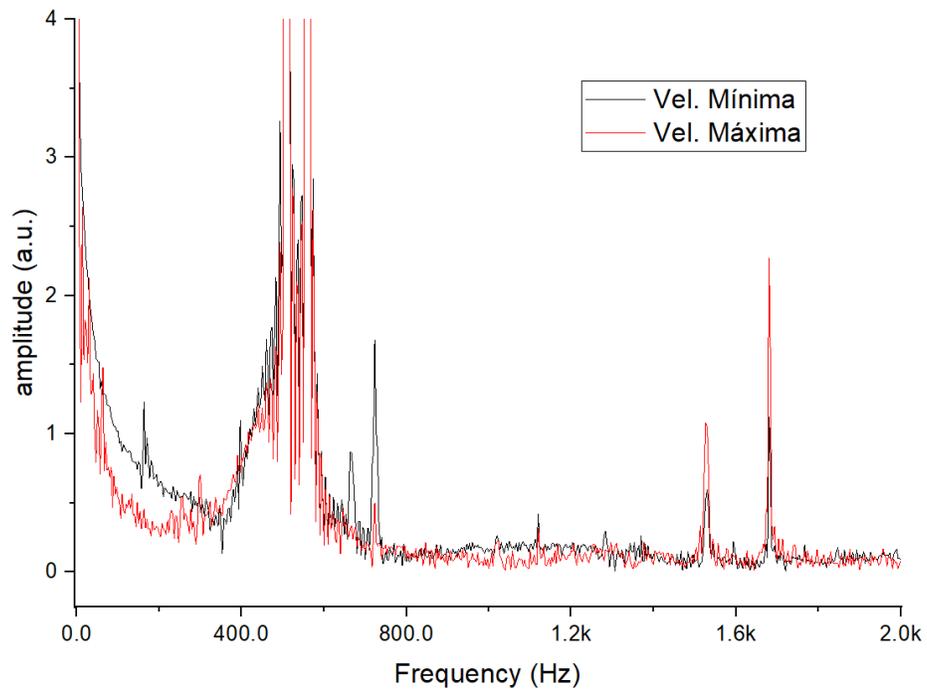


Figura 41 Frecuencias obtenidas de ambas velocidades con todas las muestras.

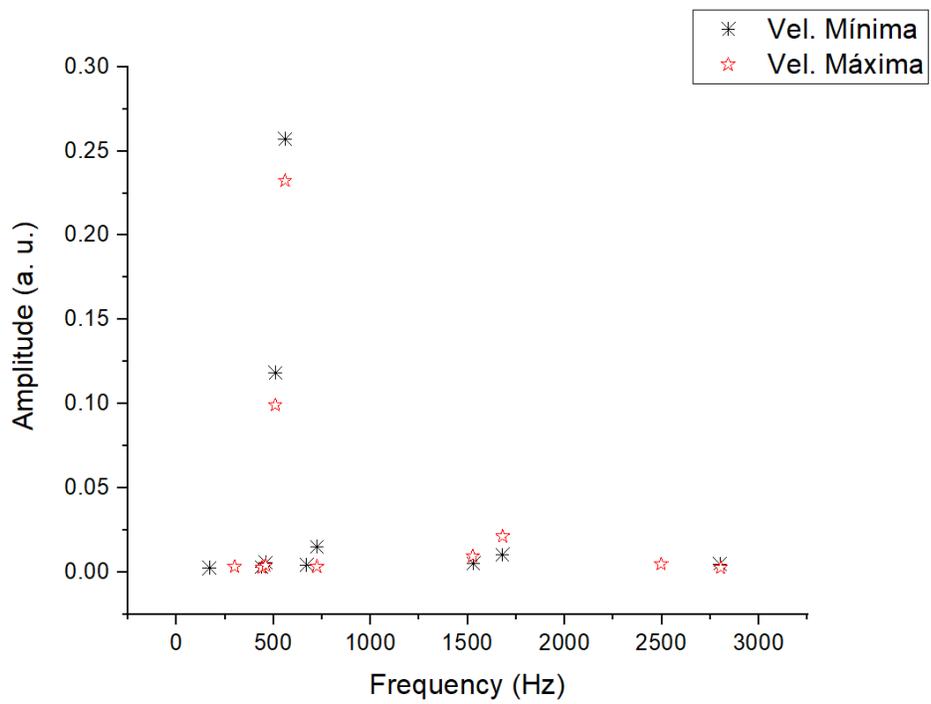


Figura 42 Picos de amplitud de ambas velocidades con el excedente de muestras removido.

7. CAPÍTULO 7. Conclusiones.

Como consecuencia de todas las pruebas realizadas, se ha determinado que la generación de energía aprovechando el fenómeno vibratorio que ofrece una maquina rotatoria en funcionamiento es capaz de entregar energía que puede ser utilizable en equipos electrónicos de baja potencia, dispositivos que podrían servir para el propio manejo y control de dichas maquinas, con el fin de crear un ciclo autosustentable que dependa cada vez menos de las fuentes de alimentación convencionales como rectificadores y baterías. A su vez, se concluyó que la energía generada por un dispositivo piezoeléctrico se encuentra en función de las vibraciones generadas y que esta energía se mantiene constante si la cantidad de vibraciones y la frecuencia de estas son constantes.

8. CAPITULO 8. Trabajo futuro.

8.1 Implementación del circuito interfaz de control.

Se propone la implementación de la interfaz de control diseñada en esta investigación, la cual sería de utilidad al momento de la interacción del usuario con el dispositivo a controlar, en el caso particular de este proyecto de tesis fue importante diseñar una herramienta de control la cual permitiera que el usuario no tenga la necesidad de modificar los parámetros de velocidad y frecuencia del motor directamente desde el código de programación del microcontrolador y sea más rápida la manipulación del motor.

8.2 Análisis de la generación de energía con la cámara tipo amortiguador.

Es conveniente utilizar la cámara tipo amortiguador que se diseñó como parte de esta investigación en el fin de realizar pruebas de generación de energía con

motores de mayor capacidad ya que este dispositivo se diseñó para tener acople con máquinas de mayor tamaño.

REFERENCIAS

- [1] H. A. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, "Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting," *Strain*, vol. 40, no. 2, pp. 49–58, 2004, doi: 10.1111/j.1475-1305.2004.00120.x.
- [2] C. A. Howells, "Piezoelectric energy harvesting," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 7, pp. 1847–1850, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2009.02.020.
- [3] J. Zhang, C. Shu, and Z. Fang, "Optimal piezoelectric energy harvesting from wind-induced vibration," *Ferroelectrics*, vol. 506, no. 1, pp. 10–23, 2017, doi: 10.1080/00150193.2017.1281684.
- [4] M. R. Sarker, S. Julai, M. F. M. Sabri, S. M. Said, M. M. Islam, and M. Tahir, "Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 300, p. 111634, 2019, doi: 10.1016/j.sna.2019.111634.
- [5] S. Akshya and A. V. Juliet, "A COMSOL approach to analysis cantilever displacement for gas sensing," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2222, no. April, 2020, doi: 10.1063/5.0003925.
- [6] A. Arevalo and I. G. Foulds, "Parametric Study of Polyimide – Lead Zirconate Titanate Thin Film Cantilevers for Transducer Applications," pp. 1–5, 2013.
- [7] G. Forsberg, "Piezoelectric energy harvesting using stochastic resonance in rotating systems," 2019.
- [8] N. Korobova, V. Vodopyanov, and S. Timoshenkov, "Design and fabrication of piezoelectric MEMS," *Int. Conf. Micro- Nano-Electronics 2012*, vol. 8700, p. 87000R, 2013, doi: 10.1117/12.2016968.
- [9] C. Wei and X. Jing, "A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. November 2016, pp. 1–18, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.073.
- [10] Y. Wang *et al.*, "A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric

- nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing," *Nano Energy*, vol. 78, no. August, p. 105279, 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105279.
- [11] Y. Wang *et al.*, "Origami triboelectric nanogenerator with double-helical structure for environmental energy harvesting," *Energy*, vol. 212, p. 118462, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118462.
- [12] A. Lund, Y. Tian, S. Darabi, and C. Müller, "A polymer-based textile thermoelectric generator for wearable energy harvesting," *J. Power Sources*, vol. 480, no. August, p. 228836, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228836.
- [13] X. Q. Wang *et al.*, "In-built thermo-mechanical cooperative feedback mechanism for self-propelled multimodal locomotion and electricity generation," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06011-9.
- [14] H. Zhu, Y. Li, W. Shen, and S. Zhu, "Mechanical and energy-harvesting model for electromagnetic inertial mass dampers," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 120, pp. 203–220, 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.10.023.
- [15] Y. Gu, W. Liu, C. Zhao, and P. Wang, "A goblet-like non-linear electromagnetic generator for planar multi-directional vibration energy harvesting," *Appl. Energy*, vol. 266, no. January, p. 114846, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114846>.
- [16] W. Zhong, L. Xu, F. Zhan, H. Wang, F. Wang, and Z. L. Wang, "Dripping Channel Based Liquid Triboelectric Nanogenerators for Energy Harvesting and Sensing," *ACS Nano*, vol. 14, no. 8, pp. 10510–10517, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c04413.
- [17] D. Yadav, P. Azad, and R. Vaish, "Solar Energy Harvesting using Candle-Soot-Coated Thermoelectric Materials," *Glob. Challenges*, vol. 4, no. 8, p. 1900080, 2020, doi: 10.1002/gch2.201900080.
- [18] M. Han *et al.*, "Three-dimensional piezoelectric polymer microsystems for vibrational energy harvesting, robotic interfaces and biomedical implants," *Nat. Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 26–35, 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0189-77>.
- [19] C. Chen *et al.*, "Direct Current Fabric Triboelectric Nanogenerator for Biomotion Energy Harvesting," *ACS Nano*, vol. 14, no. 4, pp. 4585–4594, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c00138.

- [20] Y. Zhang *et al.*, “Enhanced pyroelectric and piezoelectric properties of PZT with aligned porosity for energy harvesting applications,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 14, pp. 6569–6580, 2017, doi: 10.1039/c7ta00967d.
- [21] J. Zhang, Z. Fang, C. Shu, J. Zhang, Q. Zhang, and C. Li, “A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 262, pp. 123–129, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.SNA.2017.05.027.
- [22] H. X. Zou *et al.*, “A magnetically coupled bistable piezoelectric harvester for underwater energy harvesting,” *Energy*, vol. 217, p. 119429, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119429.
- [23] S. Ippili, V. Jella, S. Eom, S. Hong, and S. G. Yoon, “Light-Driven Piezo-and Triboelectricity in Organic-Inorganic Metal Trihalide Perovskite toward Mechanical Energy Harvesting and Self-powered Sensor Application,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 45, pp. 50472–50483, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c15009.
- [24] U. L. Piezoceramics, A. M. Gonz, and J. De Frutos, “A New Prospect in Road Traffic Energy Harvesting.”
- [25] S. H. Ji, Y. S. Cho, and J. S. Yun, “Wearable core-shell piezoelectric nanofiber yarns for body movement energy harvesting,” *Nanomaterials*, vol. 9, no. 4, pp. 1–9, 2019, doi: 10.3390/nano9040555.
- [26] A. Čeponis, D. Mažeika, and A. Kilikevičius, “Bidirectional piezoelectric energy harvester,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 18, 2019, doi: 10.3390/s19183845.
- [27] M. Wang *et al.*, “Piezoelectric energy harvesting from suspension structures with piezoelectric layers,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 13, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/s20133755.
- [28] R. Koven, M. Mills, R. Gale, and B. Aksak, “Low-Frequency and Broadband Vibration Energy Harvesting Using Base-Mounted Piezoelectric Transducers,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 64, no. 11, pp. 1735–1743, 2017, doi: 10.1109/TUFFC.2017.2739745.
- [29] G. J. Lee, M. K. Lee, J. J. Park, D. Y. Hyeon, C. K. Jeong, and K. Il Park, “Piezoelectric Energy Harvesting from Two-Dimensional Boron Nitride Nanoflakes,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 41, pp. 37920–37926, 2019, doi: 10.1021/acsami.9b12187.

- [30] S. Park, Y. Kim, H. Jung, J. Y. Park, N. Lee, and Y. Seo, "Energy harvesting efficiency of piezoelectric polymer film with graphene and metal electrodes," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-17791-3.
- [31] M. Safaei, R. M. Meneghini, and S. R. Anton, "Force detection, center of pressure tracking, and energy harvesting from a piezoelectric knee implant," *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 11, p. 114007, Nov. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aad755.
- [32] V. Vivekananthan, N. R. Alluri, Y. Purusothaman, A. Chandrasekhar, S. Selvarajan, and S.-J. Kim, "Biocompatible Collagen Nanofibrils: An Approach for Sustainable Energy Harvesting and Battery-Free Humidity Sensor Applications," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 22, pp. 18650–18656, Jun. 2018, doi: 10.1021/acsami.8b02915.
- [33] L. He, Y. Liu, P. Shi, H. Cai, D. Fu, and Q. Ye, "Energy Harvesting and Pd(II) Sorption Based on Organic-Inorganic Hybrid Perovskites," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 48, pp. 53799–53806, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c16180.
- [34] Y. Sun *et al.*, "Enhanced Energy Harvesting Ability of ZnO/PAN Hybrid Piezoelectric Nanogenerators," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 49, pp. 54936–54945, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c14490.
- [35] S. K. Si *et al.*, "In situ -grown organo-lead bromide perovskite-induced electroactive γ -phase in aerogel PVDF films: an efficient photoactive material for piezoelectric energy harvesting and photodetector applications," *Nanoscale*, vol. 12, no. 13, pp. 7214–7230, 2020, doi: 10.1039/D0NR00090F.
- [36] S. Naifar, C. Trigona, S. Bradai, S. Baglio, and O. Kanoun, "Characterization of a smart transducer for axial force measurements in vibrating environments," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 166, p. 108157, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108157.
- [37] A. Luo *et al.*, "An inertial rotary energy harvester for vibrations at ultra-low frequency with high energy conversion efficiency," *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115762, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115762.
- [38] J. Mi, Q. Li, M. Liu, X. Li, and L. Zuo, "Design, modelling, and testing of a vibration energy harvester using a novel half-wave mechanical rectification," *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115726, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115726.

- [39] X. Bai, W. yang Han, L. jun Xu, J. wei Zhang, and Y. xu Li, "A radio frequency and vibration energy harvesting antenna based on piezoelectric material," *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 30, no. 8, p. e22251, Aug. 2020, doi: 10.1002/mmce.22251.
- [40] N. Franzina *et al.*, "A miniaturized endocardial electromagnetic energy harvester for leadless cardiac pacemakers," *PLoS One*, vol. 15, no. 9 September, pp. 1–19, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0239667.
- [41] M. Gao, Y. Wang, Y. Wang, and P. Wang, "Experimental investigation of non-linear multi-stable electromagnetic-induction energy harvesting mechanism by magnetic levitation oscillation," *Appl. Energy*, vol. 220, no. November 2017, pp. 856–875, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.170.
- [42] B. Ghaderi, V. Nayyeri, M. Soleimani, and O. M. Ramahi, "Pixelated Metasurface for Dual-Band and Multi-Polarization Electromagnetic Energy Harvesting," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-31661-6.
- [43] J. Mao and Z. Zhang, "Investigation on the Human Body as A Monopole Antenna for Energy Harvesting," *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, vol. 2020-July, pp. 4169–4174, 2020, doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9176287.
- [44] T. N. Phan, S. Bader, and B. Oelmann, "Performance of an electromagnetic energy harvester with linear and nonlinear springs under real vibrations," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 19, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/s20195456.
- [45] G. Shi *et al.*, "A piezo-electromagnetic coupling multi-directional vibration energy harvester based on frequency up-conversion technique," *Micromachines*, vol. 11, no. 1, 2020, doi: 10.3390/mi11010080.
- [46] A. Tamang *et al.*, "Combining Photosynthesis and Photovoltaics: A Hybrid Energy-Harvesting System Using Optical Antennas," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 36, pp. 40261–40268, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c09007.
- [47] P. Wang *et al.*, "An Ultra-Low-Friction Triboelectric-Electromagnetic Hybrid Nanogenerator for Rotation Energy Harvesting and Self-Powered Wind Speed Sensor," *ACS Nano*, vol. 12, no. 9, pp. 9433–9440, 2018, doi: 10.1021/acsnano.8b04654.
- [48] Y. Zhang, T. Wang, A. Luo, Y. Hu, X. Li, and F. Wang, "Micro electrostatic energy harvester

with both broad bandwidth and high normalized power density," *Appl. Energy*, vol. 212, no. September 2017, pp. 362–371, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.053.

- [49] S. Kim *et al.*, "Utilization of a magnetic field-driven microscopic motion for piezoelectric energy harvesting," *Nanoscale*, vol. 11, no. 43, pp. 20527–20533, 2019, doi: 10.1039/c9nr04722k.
- [50] C. F. Hung, P. C. Yeh, and T. K. Chung, "A miniature magnetic-force-based three-axis ac magnetic sensor with piezoelectric/vibrational energy-harvesting functions," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 2, 2017, doi: 10.3390/s17020308.
- [51] Z. Wu, H. Guo, W. Ding, Y. C. Wang, L. Zhang, and Z. L. Wang, "A Hybridized Triboelectric-Electromagnetic Water Wave Energy Harvester Based on a Magnetic Sphere," *ACS Nano*, 2019, doi: 10.1021/acsnano.8b09088.
- [52] Z. Xu *et al.*, "Design and analysis of a magnetically coupled multi-frequency hybrid energy harvester," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 14, 2019, doi: 10.3390/s19143203.
- [53] N. Wen *et al.*, "Highly conductive, ultra-flexible and continuously processable PEDOT:PSS fibers with high thermoelectric properties for wearable energy harvesting," *Nano Energy*, vol. 78, no. August, p. 105361, 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105361.
- [54] J. Peng *et al.*, "3D extruded composite thermoelectric threads for flexible energy harvesting," *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1038/s41467-019-13461-2.
- [55] Y. Zhang and S. J. Park, "Flexible organic thermoelectric materials and devices for wearable green energy harvesting," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 5, 2019, doi: 10.3390/polym11050909.
- [56] L. Catalan *et al.*, "Prospects of autonomous volcanic monitoring stations: Experimental investigation on thermoelectric generation from fumaroles," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 12, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/s20123547.
- [57] U. Chiarotti *et al.*, "Development of a small thermoelectric generators prototype for energy harvesting from low temperature waste heat at industrial plant," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 17, no. 3, pp. 1586–1591, 2017, doi: 10.1166/jnn.2017.13723.
- [58] S. Chatterjee *et al.*, "Recent advancements in solid-liquid triboelectric nanogenerators for

- energy harvesting and self-powered applications,” *Nanoscale*, vol. 12, no. 34, pp. 17663–17697, 2020, doi: 10.1039/d0nr04326e.
- [59] Y. Han *et al.*, “Fish Gelatin Based Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Biomechanical Energy and Self-Powered Sensing of Human Physiological Signals,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 14, pp. 16442–16450, 2020, doi: 10.1021/acscami.0c01061.
- [60] Y. C. Lai, Y. C. Hsiao, H. M. Wu, and Z. L. Wang, “Waterproof Fabric-Based Multifunctional Triboelectric Nanogenerator for Universally Harvesting Energy from Raindrops, Wind, and Human Motions and as Self-Powered Sensors,” *Adv. Sci.*, vol. 6, no. 5, 2019, doi: 10.1002/advs.201801883.
- [61] Y. Liu *et al.*, “Integrating a Silicon Solar Cell with a Triboelectric Nanogenerator via a Mutual Electrode for Harvesting Energy from Sunlight and Raindrops,” *ACS Nano*, vol. 12, no. 3, pp. 2893–2899, 2018, doi: 10.1021/acsnano.8b00416.
- [62] H. J. Oh *et al.*, “A highly porous nonwoven thermoplastic polyurethane/polypropylene-based triboelectric nanogenerator for energy harvesting by human walking,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 5, pp. 1–11, 2020, doi: 10.3390/POLYM12051044.
- [63] T. Rodrigues-marinho, N. Castro, V. Correia, P. Costa, and S. Lanceros-méndez, “Triboelectric energy harvesting response of different polymer-based materials,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 21, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/ma13214980.
- [64] Z. Tian, G. Shao, Q. Zhang, Y. Geng, and X. Chen, “A shared-electrode and nested-tube structure triboelectric nanogenerator for motion energy harvesting,” *Micromachines*, vol. 10, no. 10, pp. 30–32, 2019, doi: 10.3390/mi10100656.
- [65] M. Yao, G. Xie, Q. Gong, and Y. Su, “Walking energy harvesting and self-powered tracking system based on triboelectric nanogenerators,” *Beilstein J. Nanotechnol.*, vol. 11, pp. 1590–1595, 2020, doi: 10.3762/bjnano.11.141.
- [66] Y. Zou, V. Raveendran, and J. Chen, “Wearable triboelectric nanogenerators for biomechanical energy harvesting,” *Nano Energy*, vol. 77, no. June, p. 105303, 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105303.
- [67] T. Chen *et al.*, “Investigation of position sensing and energy harvesting of a flexible triboelectric touch pad,” *Nanomaterials*, vol. 8, no. 8, pp. 1–15, 2018, doi:

10.3390/nano8080613.

- [68] L. Ma *et al.*, “Continuous and Scalable Manufacture of Hybridized Nano-Micro Triboelectric Yarns for Energy Harvesting and Signal Sensing,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 4, pp. 4716–4726, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c00524.
- [69] Z. Ren *et al.*, “Environmental Energy Harvesting Adapting to Different Weather Conditions and Self-Powered Vapor Sensor Based on Humidity-Responsive Triboelectric Nanogenerators,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, pp. 6143–6153, 2019, doi: 10.1021/acсами.8b21477.
- [70] Z. Bai *et al.*, “An Eco-friendly Porous Nanocomposite Fabric-Based Triboelectric Nanogenerator for Efficient Energy Harvesting and Motion Sensing,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 38, pp. 42880–42890, 2020, doi: 10.1021/acсами.0c12709.
- [71] K. Xia *et al.*, “A triboelectric nanogenerator based on cosmetic fixing powder for mechanical energy harvesting,” *Microsystems Nanoeng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1038/s41378-019-0066-1.
- [72] N. Mutis, G. Maria, and C. Valencia, “Generación de energía eléctrica mediante el efecto piezoeléctrico,” 2015.
- [73] Bernard Jaffe, “Piezoelectric Ceramics 1st Edition,” 1971. <https://www.elsevier.com/books/piezoelectric-ceramics/jaffe/978-0-12-379550-2> (accessed Apr. 22, 2021).
- [74] R. R. Ruiz, A. F. Cuautle, and E. S. Gómes, “Development of lead-free (Bi_{1/2}Na_{1/2})BaTiO₃ piezoelectric ceramics for clinical applications in ultrasound,” in *2007 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2007*, 2007, pp. 75–78, doi: 10.1109/ICEEE.2007.4344977.
- [75] “Handbook of Technical Textiles,” *Handbook of Technical Textiles*, 2000. <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-technical-textiles/horrocks/978-1-78242-465-9> (accessed Apr. 22, 2021).
- [76] “Electroceramics: Materials, Properties, Applications, 2nd Edition | Wiley.” <https://www.wiley.com/en-us/Electroceramics%3A+Materials%2C+Properties%2C+Applications%2C+2nd+Edition-p->

9780471497486 (accessed Apr. 22, 2021).

- [77] K. Uchino, *Ferroelectric devices, second edition*. CRC Press, 2009.
- [78] N. Soin, *Magnetic Nanoparticles-Piezoelectric Polymer Nanocomposites for Energy Harvesting*. Elsevier Inc., 2018.
- [79] H. J. Goldsmid, "Transport Processes in Metals and Semiconductors," in *Thermoelectric Refrigeration*, Springer US, 1964, pp. 12–41.
- [80] G. Zhu *et al.*, "Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 4960–4965, Sep. 2012, doi: 10.1021/nl302560k.
- [81] G. B. Weber, Hans J.; Arfken, *Essential Mathematical Methods for Physicists.*, vol. 3, no. 2. 2003.
- [82] Atmel, "ATmega16U4/ATmega32U4 Datasheet," p. 438, 2016, [Online]. Available: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf.
- [83] Mathworks, "Transformada rápida de Fourier - MATLAB fft - MathWorks América Latina." <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html> (accessed Apr. 22, 2021).