



Proyecto y Diseño Final

“DISEÑO Y CARACTERIZACION DE UN PROTOTIPO PARA COSECHA DE ENERGIA DE BAJA POTENCIA BASADO EN EL FENOMENO PIEZOELECTRICO”

CARRERA

INGENIERIA ELECTROMECHANICA (PLAN 2015)

FECHA

28 DE DICIEMBRE DE 2023

AUTORA

LUCIA GIMENEZ

DIRECTOR

DR. ING. ROGELIO HECKER

CODIRECTOR

DR. ING. FEDERICO MASCH

Nombre y apellido del Tesista: Lucia Rosana GIMENEZ
Título de la Tesis: Diseño y caracterización de un prototipo para cosecha de energía de baja potencia basado en el fenómeno piezoeléctrico
Grado académico alcanzado: Carrera de Grado
Nombre de la Universidad: Universidad Nacional de La Pampa
Nombre de la Facultad: Facultad de Ingeniería
Lugar: General Pico, La Pampa
Año: 2024
Unidad Académica a la cual pertenece: Facultad de Ingeniería
Fecha de aprobación: 28/12/23
Nombre y apellido del director: Rogelio HECKER
Cátedra del director: Elementos de Materiales
Nombre y apellido del co-director: Federico MASCH
Cátedra del co-director: Electrotecnia General
Nombres, apellidos del Jurado: Soledad MIEZA, Lucas LEGUIZAMON y Walter FRUCCIO. Facultad de Ingeniería.
Filiación institucional del Jurado: Facultad de Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar, por su protección diaria, por darme perseverancia y paciencia para continuar en este gran camino. Por sostenerme en todo momento y levantarme cuando fue necesario.

A mi Mamá por acompañarme desde el primer momento, con un abrazo, con un mate, con noches enteras de compañía al lado de mis apuntes. Por enseñarme a ser constante en cada uno de mis pasos y a luchar por mis sueños.

A todo el equipo de la Facultad de Ingeniería que hicieron posible mis comienzos como estudiante, por todo el apoyo y el acompañamiento incalculable que me brindaron siempre.

Por último, a cada familiar y amigo que fue parte de mi vida en estos años, conocieron mis luchas y siempre confiaron en mí.

RESUMEN

En este trabajo se diseña y construye un prototipo de cosechador de energía experimental que tiene la capacidad de transformar las vibraciones mecánicas en energía eléctrica utilizable. Consiste en un disco piezoeléctrico con una masa puntual adicionada de forma tal de promover deformaciones elásticas cuando el disco es sometido a aceleraciones transversales a su superficie. La construcción del dispositivo permite que las vibraciones mecánicas exciten el desplazamiento transversal del disco y promuevan la aparición de cargas eléctricas en los electrodos. Estas últimas, conforman una corriente que fluye a través de una resistencia de carga, lo que implica una conversión de energía eléctrica en calor. A su vez, se busca describir y predecir el comportamiento dinámico de dicho prototipo, a partir de proponer un modelo matemático y realizar una búsqueda exhaustiva para encontrar los parámetros principales que lo conforman a través de diferentes ensayos experimentales satisfactorios con los resultados esperados.

El modelo predice correctamente el desplazamiento de la frecuencia de resonancia, en respuesta a cambios en la masa y en la resistencia de carga.

El prototipo con una masa de $52,5[g]$ es capaz de entregar una potencia máxima de $5[mW]$ cuando es excitado con una aceleración sinusoidal de $1 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ a $136[Hz]$.

***Palabras Claves:* Cosecha de Energía; Vibraciones Mecánicas, Piezoelectricidad.**

ABSTRACT

In this work, a prototype experimental energy harvester is designed and built which has the ability to transform mechanical vibrations into usable electrical energy. It consists of a piezoelectric disc with a point mass added in a way that promotes elastic deformations when the surface of the disc is subjected to transverse accelerations. The construction of the device allows mechanical vibrations to prompt the transverse displacement of the disc and promote the appearance of electrical charges on the electrodes. The latter make up a current that flows through a load resistance, which implies a conversion of electrical energy into heat. At the same time, it is sought to describe and predict the dynamic behavior of the prototype by proposing a mathematical model and carrying out an exhaustive search to find out the main parameters that make it up through different satisfactory experimental tests with the expected results.

The model predicts correctly the resonant frequency shift in answer to changes in mass and load resistance.

The prototype with a mass of $52,5[g]$ is capable of delivering a maximum power of $5[mW]$ when it is prompted by a sinusoidal acceleration of $1 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ at $136[Hz]$.

Keywords: Energy Harvesting, Mechanical Vibrations, Piezoelectricity.

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	8
2. DESARROLLO	10
2.1. MARCO CONCEPTUAL	10
2.1.1. Estado del arte de energy harvesting	10
2.1.2. Historia de los piezoeléctricos	14
2.1.3. Definición de piezoelectricidad	15
2.1.4. Tipos de piezoeléctricos	17
2.1.5. Trabajos relacionados	18
2.2. DISEÑO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL	27
2.2.1. Selección del disco piezoeléctrico	27
2.2.2. Diseño del conjunto ensamblado	27
2.2.3. Proceso de Fabricación	33
2.3. MODELO MATEMATICO PROPUESTO	34
2.3.1. Variables descriptivas del modelo	34
2.4. ESTIMACION DE PARAMETROS	41
2.4.1. Representación en variable de estado	41
2.4.2. Estimación de aceleración real	42
2.4.3. Proposición de algoritmos para la identificación	44
2.5. VALIDACION DEL FENOMENO DE RESONANCIA EN EL PROTOTIPO EXPERIMENTAL	46
2.5.1. Equipamiento utilizado	46
2.5.2. Descripción general de los experimentos	52
2.6. OBTENCION DE PARAMETROS EXPERIMENTALES Y VALIDACION CON EL MODELO PROPUESTO	65
2.6.1. Sintonización final de parámetros	65

2.6.2. Analisis y discucion de resultados.....	67
3. CONCLUSIONES	69
4. BIBLIOGRAFIA	70
5. ANEXOS	73
5.1. Anexo I.....	73
5.1.1. Impresora 3D FDM Createbot 400+.....	73
5.1.2. Generador de funciones	75
5.1.3. Amplificador de 2 canales	76
5.1.4. Acelerómetro	79
5.1.5. Placa adquisidora Labjack u6.....	82
5.2. Anexo II.....	85
5.2.1. Plano de fabricación: Pieza-Union	85
5.2.1. Plano de fabricación: Pieza-Piezoelctrico.....	86
5.2.2. Plano de fabricación: Pieza-Acelerometro	87

1. INTRODUCCION

El estudio de la recolección de energía es un campo de creciente importancia en la actualidad. Los procesos de recolección energética tienen la tarea fundamental de capturar energía proveniente del entorno y convertirla en electricidad u otra forma utilizable de energía. La creciente necesidad de fuentes de energía sostenibles impulsa la investigación en nuevos materiales y el diseño de dispositivos capaces de recolectar energía de manera eficiente.

En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosos estudios en torno a la energía vibracional y los métodos para su captación. El movimiento humano, las olas y las vibraciones presentes en el entorno son fuentes potenciales de energía que pueden generar electricidad o suministrar potencia a dispositivos y sensores autónomos [1], [2], [3].

La energía mecánica está intrínsecamente relacionada con el movimiento y la posición de los objetos. Los dispositivos de recolección de energía mecánica transforman este tipo de energía en otras formas, siendo la eléctrica una de las más destacadas. Entre las fuentes notables de energía mecánica se encuentran las vibraciones. Existen diversos tipos de dispositivos diseñados para obtener energía mecánica a partir de vibraciones. En este contexto, se focalizará la atención en uno de los enfoques más comunes, que emplea materiales piezoeléctricos para generar electricidad.

En este trabajo se diseña y construye un prototipo de cosechador de energía donde el dispositivo conversor es un disco piezoeléctrico con una masa puntual adicionada de forma tal de promover deformaciones elásticas cuando el disco es sometido a aceleraciones transversales a su superficie. La construcción del dispositivo permite que las vibraciones mecánicas exciten el desplazamiento transversal del disco y promuevan la aparición de cargas eléctricas en los electrodos. Estas últimas conforman una corriente que fluye a través de una resistencia de carga, lo que implica una conversión de energía eléctrica en calor. A su vez, se busca describir y predecir el comportamiento dinámico de dicho prototipo, a partir de proponer un modelo matemático y realizar una búsqueda exhaustiva para encontrar los parámetros principales que lo conforman.

El diseño de este cosechador de energía es un paso inicial dentro del Grupo de Mecatrónica Aplicada en lo que concierne al estudio y la caracterización de un cosechador de energía piezoeléctrico. Los resultados de este trabajo conformarán un conjunto de

experiencias que permitan abordar en un futuro cercano sistemas de conversión más complejos como la cosechadores basados en vigas piezoeléctricas.

El informe de este proyecto, está ordenado de la siguiente manera. En el *Capítulo 2.1*, se presenta el desarrollo del marco teórico de los componentes del sistema en estudio. Se realiza la presentación del fenómeno piezoeléctrico y una revisión del estado del arte. Por otro lado, se hace referencia a trabajos relacionados consultados con el objetivo de adquirir información y conocimientos.

En el *Capítulo 2.2*, se presenta el diseño del prototipo experimental. Además, se analiza la selección del disco piezoeléctrico, como se fabricaron cada una de las piezas que conforman el conjunto ensamblado y se da una descripción del proceso de fabricación utilizado.

En el *Capítulo 2.3*, se procede al estudio de un modelo matemático basado en la dinámica mecánica y eléctrica del sistema electromecánico. Este modelo permite obtener las funciones de transferencia del sistema.

En el *Capítulo 2.4*, se presentan los conceptos teóricos para la estimación de los parámetros del modelo, la importancia de la representación en variable de estado, la estimación de la aceleración real y la proposición del algoritmo de búsqueda exhaustiva para la identificación de los mismos.

En el *Capítulo 2.5*, se realiza una validación del fenómeno de resonancia en el prototipo experimental. Se describen en detalle los experimentos llevados a cabo, incluyendo el montaje experimental, la adquisición de datos y el análisis de los resultados obtenidos.

Posteriormente, en el *Capítulo 2.6*, combinando el modelo experimental con el modelo teórico, se determinan los parámetros experimentales y variables que mejor se ajustan a los resultados obtenidos. De esta manera, se logra un análisis completo y exhaustivo que integra tanto los aspectos prácticos experimentales como los fundamentos teóricos, permitiendo obtener una comprensión más profunda del sistema y sus características.

Finalmente, en el *Capítulo 3*, se destacan los logros obtenidos y la relevancia general de la investigación. Se invita a la reflexión sobre la importancia de la cosecha de energía utilizando dispositivos piezoeléctricos y se resalta su potencial para contribuir a soluciones energéticas sostenibles.

2. DESARROLLO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se realiza una breve introducción a los recolectores de energía en general, abordando el campo de la generación de energía a partir de fuentes ambientales, destacando las ventajas y los desafíos de este enfoque.

En particular, se profundiza en la generación de energía mediante materiales piezoeléctricos, se explican los principios de funcionamiento de los dispositivos piezoeléctricos y se examina cómo se pueden aprovechar para recolectar energía mecánica, como vibraciones o deformaciones.

Por otro lado, se revisan estudios e investigaciones relevantes en el campo de la generación de energía piezoeléctrica, resaltando los avances y los desafíos existentes. Se presentan ejemplos de aplicaciones prácticas de los recolectores de energía piezoeléctricos en diversos campos, como la electrónica portátil, la monitorización de estructuras y la industria.

En resumen, este capítulo proporciona una visión general del fenómeno piezoeléctrico y la generación de energía utilizando materiales piezoeléctricos. Sirve como base teórica para comprender los fundamentos y las aplicaciones, sentando las bases para la investigación y el desarrollo en este campo.

2.1.1. ESTADO DEL ARTE DE ENERGY HARVESTING

La cosecha de energía, conocida como "energy harvesting", se refiere a la captación de pequeñas cantidades de energía de una o varias fuentes presentes en nuestro entorno, con el propósito de acumularla o almacenarla para un uso posterior [4]. Cuando se hace referencia a sistemas de "energy harvesting" o recolección de energía, se hace alusión a sistemas diseñados para recuperar, reutilizar y aprovechar los diversos tipos de energía presentes en el entorno, que a menudo se desaprovechan. Estos sistemas tienen la función de transformar distintas formas de energía, como la solar [5] [6], térmica, eólica, sonora, vibraciones, entre otras, en energía eléctrica para su aprovechamiento.

La creciente adopción de dispositivos inalámbricos ha resaltado la importancia del "energy harvesting" como una alternativa a las baterías convencionales, dado que representa una fuente de energía limpia y renovable. Dispositivos inalámbricos,

tecnologías MEMS, sensores para monitoreo de la salud, aplicaciones médicas y sensores para la monitorización de la presión de las ruedas en vehículos, son ejemplos de aplicaciones que pueden aprovechar diversas tecnologías de "energy harvesting" [7].

Los avances tecnológicos de las últimas décadas en dispositivos electrónicos han propiciado una disminución en su tamaño y consumo de potencia. Estos desarrollos han permitido que los dispositivos electrónicos sean cada vez más portátiles [8], lo que a su vez ha impulsado la necesidad de una mayor autonomía, ya que se utilizan continuamente a lo largo del día (reproductores de música, sensores, teléfonos móviles, etc.). Esta demanda ha incentivado la investigación en tecnologías de "energy harvesting", en busca de formas de aumentar la autonomía sin depender únicamente de baterías convencionales.

Por otro lado, el "energy harvesting" se destaca como una opción amigable con el medio ambiente, dado que representa una fuente de energía limpia y renovable. Con el aumento en la demanda de dispositivos electrónicos portátiles, también crece la cantidad de desperdicios electrónicos, especialmente baterías obsoletas. El uso de sistemas de "energy harvesting" como generadores de electricidad en lugar de baterías convencionales, o como parte de sistemas híbridos para recargar baterías y prolongar su vida útil, podría contribuir a reducir el impacto ambiental [9] [10].

Es posible clasificar las distintas formas de energía susceptibles de ser aprovechadas mediante el "energy harvesting", junto con sus respectivos transductores, tal como se muestra en la *Figura 1*. De particular interés en este trabajo es la energía proveniente de las vibraciones, que es ampliamente accesible en estructuras civiles, máquinas y el cuerpo humano. Para la conversión de la energía de las vibraciones en energía eléctrica, existen tres sistemas fundamentales, ilustrados en la *Figura 1*: transductores electromagnéticos (bobina magnética) [11], transductores electrostáticos (capacitores) [12], transductores piezoeléctricos [13] [14] [15].

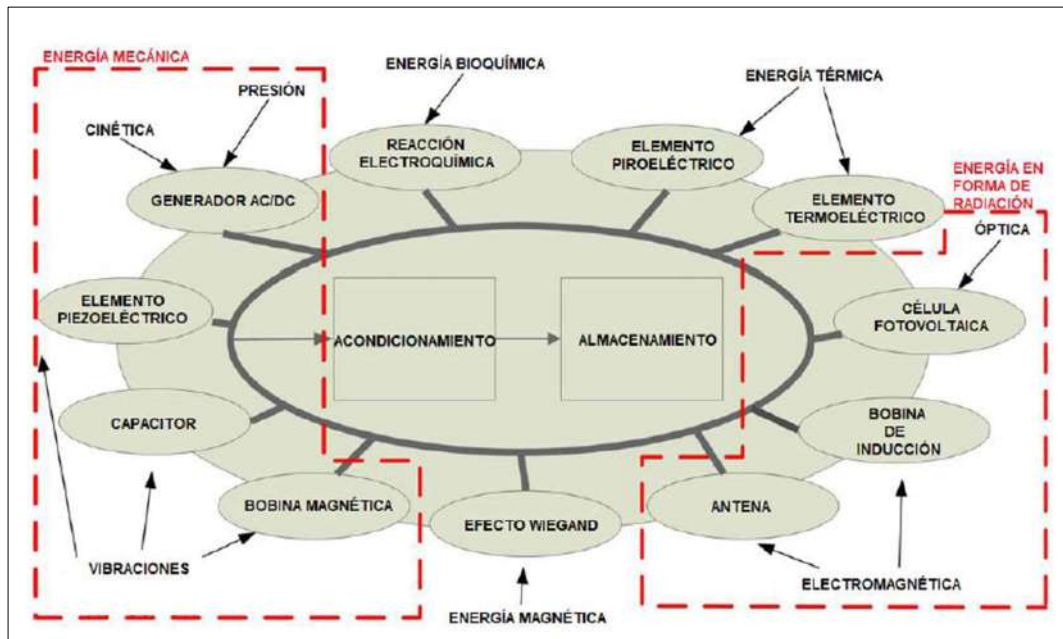


Figura 1: "Fuentes de Energía y sus respectivos transductores. Adaptada de [16]"

Dentro de las diversas formas de convertir la energía de las vibraciones mecánicas en energía eléctrica, los sistemas piezoeléctricos se destacan como uno de los métodos más efectivos y prácticos [17]. Las ventajas principales de utilizar materiales y sistemas piezoeléctricos en la recolección de energía (en comparación con los transductores electromagnéticos y electrostáticos) incluyen una mayor densidad de potencia y una aplicación más sencilla [18].

Los recolectores de energía basados en piezoeléctricos, son dispositivos diseñados para capturar y convertir energía mecánica en energía eléctrica [19]. Estos materiales poseen la propiedad de generar una carga eléctrica cuando se someten a tensiones mecánicas, como vibraciones, deformaciones o presiones. El funcionamiento de un recolector de energía piezoeléctrico se basa en la utilización de uno o varios materiales piezoeléctricos que están estratégicamente ubicados en el dispositivo para aprovechar las vibraciones o fuerzas mecánicas a las que está expuesto. Cuando el material piezoeléctrico se somete a estas fuerzas, se produce una deformación que genera una diferencia de potencial eléctrico, generando así una corriente eléctrica. La corriente eléctrica generada por el material piezoeléctrico se puede utilizar para alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia o puede ser almacenada en una batería para su uso posterior. Los recolectores de energía piezoeléctricos son especialmente eficientes en la captura de energía proveniente

de vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud, como las generadas por maquinarias, vehículos o incluso movimientos humanos.

La cosecha de energía utilizando piezoeléctricos ofrece varias ventajas, pero también presenta desafíos. A continuación, se enumeran algunas de las ventajas y desafíos asociados a esta tecnología:

Ventajas:

- Fuente de energía renovable: Los materiales piezoeléctricos pueden convertir la energía mecánica en electricidad de manera eficiente, lo que permite aprovechar fuentes de energía renovable, como vibraciones ambientales o movimientos humanos.
- Baja potencia y mantenimiento mínimo: Los sistemas de recolección de energía piezoeléctrica suelen tener un consumo de energía muy bajo y no requieren mantenimiento frecuente, lo que los hace ideales para aplicaciones autónomas y de larga duración.
- Tamaño compacto y flexibilidad: Los dispositivos piezoeléctricos pueden ser miniaturizados, lo que los hace adecuados para integrarse en dispositivos electrónicos portátiles o en espacios reducidos. Además, su flexibilidad permite su aplicación en superficies curvas o flexibles.
- Autonomía energética: Al aprovechar la energía ambiental disponible, los recolectores de energía piezoeléctricos pueden alimentar dispositivos de forma autónoma, eliminando la necesidad de baterías o cables de alimentación externos y prolongando la vida útil de los dispositivos.
- Amplia gama de aplicaciones: La cosecha de energía piezoeléctrica se utiliza en diversas aplicaciones, como sensores inalámbricos, dispositivos médicos implantables, monitoreo estructural, electrónica portátil y más. Esto proporciona oportunidades para la generación de energía autónoma en diferentes campos.

Desventajas:

- Eficiencia limitada: Aunque los materiales piezoeléctricos tienen la capacidad de convertir energía mecánica en eléctrica, la eficiencia de conversión es limitada y puede verse afectada por varios factores, como la frecuencia de excitación y la carga eléctrica.

- Variabilidad de la fuente de energía: La disponibilidad y la amplitud de la fuente de energía mecánica pueden variar significativamente en diferentes entornos y aplicaciones. Esto puede dificultar la generación de una cantidad constante de energía y limitar la aplicabilidad en algunas situaciones.
- Diseño y optimización: El diseño y la optimización de los sistemas de recolección de energía piezoeléctrica pueden ser complejos. Es necesario considerar aspectos como la resonancia, la impedancia, la geometría y la elección de materiales para maximizar la eficiencia y la generación de energía.
- Integración y compatibilidad: La integración de los dispositivos piezoeléctricos en sistemas electrónicos existentes puede plantear desafíos en términos de compatibilidad de voltaje, administración de energía y sincronización con otros componentes.

2.1.2. HISTORIA DE LOS PIEZOELÉCTRICOS

El efecto piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por Jaques y Pierre Curie. Durante su experimento, observaron que ciertos cristales, como la turmalina, el cuarzo, el topacio y la sal de Rochelle, se polarizaban eléctricamente cuando se les aplicaba tensión mecánica. Este descubrimiento estableció la conexión entre el fenómeno piezoeléctrico y la estructura cristalina de los materiales.

Inicialmente, los hermanos Curie solo identificaron el efecto piezoeléctrico directo, donde se generaba electricidad al aplicar tensión mecánica. Sin embargo, fue Gabriel Lippmann quien, en 1881, dedujo matemáticamente la existencia del efecto piezoeléctrico inverso, donde los cristales se deforman al aplicarles un campo eléctrico. Jaques y Pierre Curie confirmaron este efecto y continuaron investigando las propiedades electro-elasto-mecánicas de los cristales piezoeléctricos.

Durante los siguientes años, la comunidad científica europea trabajó en el desarrollo de las bases de las aplicaciones piezoeléctricas. Se identificaron cristales piezoeléctricos basados en estructuras cristalinas asimétricas, se estudiaron los efectos directo e inverso de la piezoelectricidad, y se utilizó la termodinámica para comprender las complejas relaciones entre las variables.

En las siguientes décadas, se definieron 20 cristales naturales con efectos piezoeléctricos y se establecieron 18 coeficientes piezoeléctricos macroscópicos. En 1910, el físico

alemán Woldemar Voight publicó un trabajo que se convirtió en una referencia estándar en el campo.

Sin embargo, las aplicaciones prácticas de los materiales piezoeléctricos no se desarrollaron ampliamente hasta la Primera Guerra Mundial. Durante este período, el físico francés Paul Langevin diseñó un detector de submarinos ultrasónico basado en el efecto piezoeléctrico. Este dispositivo utilizaba una red de cristales de cuarzo para emitir y detectar ondas de alta frecuencia bajo el agua.

En los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, se empezaron a desarrollar muchas aplicaciones piezoeléctricas, como micrófonos, acelerómetros y filtros de señal. Sin embargo, la limitada disponibilidad de materiales, principalmente cuarzo, restringía el rendimiento de los dispositivos.

Durante la Segunda Guerra Mundial, se realizaron investigaciones en varios países que condujeron al descubrimiento de materiales cerámicos con constantes dieléctricas mucho mayores que las de los cristales convencionales. Esto abrió nuevas posibilidades para el desarrollo de dispositivos piezoeléctricos.

En las décadas siguientes, se lograron avances significativos en la fabricación de materiales piezoeléctricos, como los piezocerámicos basados en titanato de bario (BaTiO_3) y titanato de zirconato de plomo (PZT). Estos materiales se doparon con impurezas metálicas para obtener las propiedades deseadas.

Hoy en día, se siguen realizando investigaciones y desarrollos en el campo de la generación de energía piezoeléctrica. Las aplicaciones prácticas de los materiales piezoeléctricos abarcan una amplia gama de áreas, desde micrófonos y sensores ultrasónicos hasta dispositivos de generación de energía en entornos industriales y sistemas de recolección de energía ambiental. El mercado de la tecnología piezoeléctrica muestra un crecimiento continuo y prometedor.

2.1.3. DEFINICIÓN DE PIEZOELECTRICIDAD

La palabra piezoelectricidad, proviene del griego y significa electricidad bajo presión (la palabra piezo significa presionar en griego). El nombre de efecto piezoeléctrico fue

propuesto por Hankel en 1881 para nombrar el descubrimiento de los hermanos Curie el año anterior [20].

La piezoelectricidad o efecto piezoeléctrico es la propiedad que presentan ciertos cristales al ser sometidos a presión o tensión mecánica, éste es el denominado efecto piezoeléctrico directo.

Desde una perspectiva de su estructura atómica, antes de someter al cristal piezoeléctrico a tensión, los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas coinciden (*Figura 2.a*). Cuando ejercemos cierta tensión, su estructura reticular interna se deforma, desalineando los centros de gravedad de las cargas, generando pequeños dipolos (*Figura 2.b*). Los polos opuestos que están enfrentados se cancelan, y aparece una distribución de cargas en la superficie del material (*Figura. 2.c*). El material queda polarizado, y esta polarización genera un campo eléctrico.

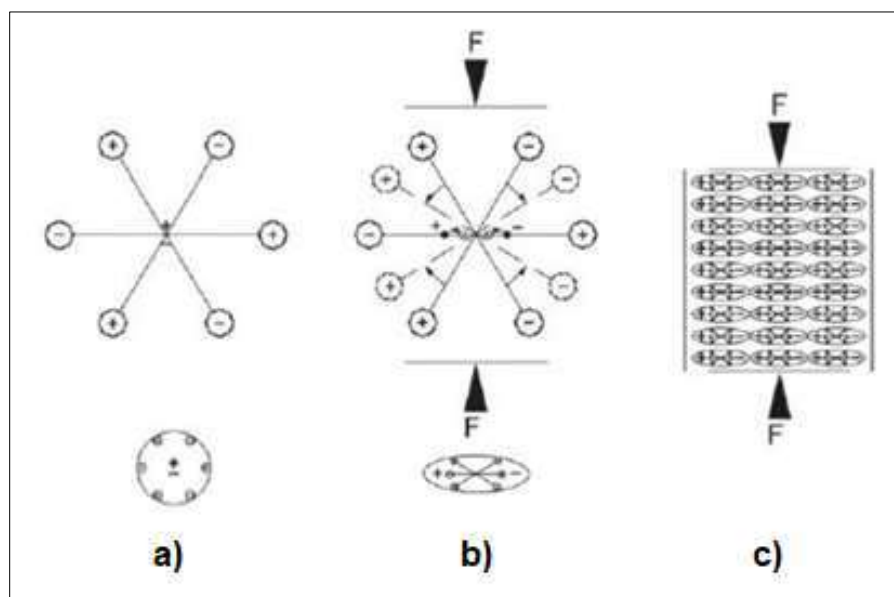


Figura 2: "Modelo Molecular Simple [20]: a) Antes de someter al cristal piezoeléctrico a tensión, b) Cuando se somete al cristal a una cierta tensión, c) Material polarizado"

La compresión o tensión mecánica en un elemento cerámico piezoeléctrico polarizado cambia el momento dipolar, creando un voltaje. La compresión a lo largo de la dirección de polarización, o la tensión perpendicular a la dirección de polarización, genera un voltaje de la misma polaridad que el voltaje polarizado (*Figura 3.b1*). La tensión a lo largo de la dirección de polarización, o la compresión perpendicular a la dirección de polarización, genera un voltaje con polaridad opuesta al voltaje polarizado (*Figura 3.b2*).

Estas acciones son acciones generadoras y motoras de un elemento piezoeléctrico donde la energía mecánica, de compresión o tensión, se convierte en energía eléctrica.

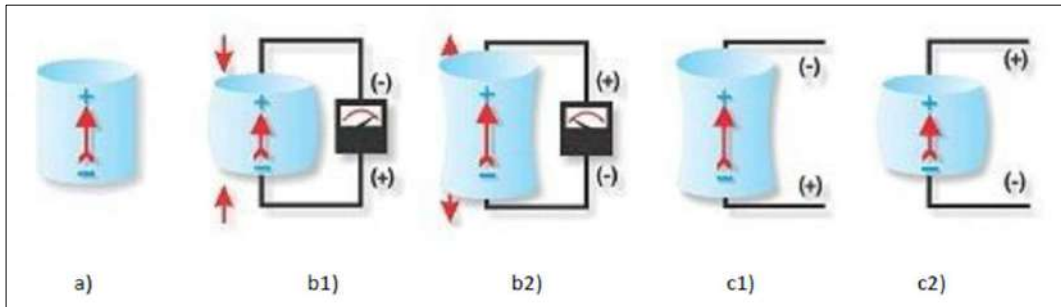


Figura 3: "a) Disco después de la polarización, b1) Disco comprimido: El voltaje generado tiene la misma polaridad que el voltaje de polarización, b2) Disco estirado: El voltaje generado tiene polaridad opuesta a la del voltaje de polarización, c1) El voltaje aplicado tiene la misma polaridad que el voltaje de polarización: el disco se alarga, c2) El voltaje aplicado tiene polaridad opuesta a la del voltaje de polarización: el disco se acorta. [19]"

Los valores de la tensión de compresión y el voltaje (o intensidad de campo) generados al aplicar tensión a un elemento cerámico piezoeléctrico son linealmente proporcionales hasta una tensión específica del material. Lo mismo es cierto para el voltaje aplicado y la tensión generada.

A su vez, el efecto piezoeléctrico inverso, como su nombre indica es el efecto recíproco al directo. Al aplicar un campo eléctrico al cristal piezoeléctrico este se deforma de manera proporcional a la intensidad del mismo, quedando polarizado (*Figura 3.a*). Si se aplica un voltaje de la misma polaridad que el voltaje de polarización a un elemento cerámico, en la dirección del voltaje de polarización, el elemento se alargará y su diámetro se hará más pequeño (*Figura 3.c1*). Si se aplica un voltaje de polaridad opuesta al voltaje de polarización, el elemento se volverá más corto y más ancho (*Figura 3.c2*).

Si se aplica un voltaje alterno, el elemento se alargará y acortará cíclicamente, a la frecuencia del voltaje aplicado. Esta es la acción del motor: la energía eléctrica se convierte en energía mecánica.

2.1.4. TIPOS DE PIEZOELÉCTRICOS

Los materiales piezoeléctricos pueden ser de origen sintético o natural, como el cuarzo o la sal de La Rochelle. El descubrimiento de la piezoelectricidad se atribuye a Pierre Seignette, un farmacéutico que lo logró en 1672, mientras que los Curie posteriormente utilizaron estos materiales para demostrar sus propiedades. En la actualidad, los

materiales sintéticos encuentran una amplia gama de aplicaciones debido a sus ventajas en términos de propiedades y versatilidad.

Los materiales piezoeléctricos sintéticos se pueden agrupar en tres categorías según su estructura interna:

Monocristales: Estos materiales ya están polarizados durante su fabricación, lo que elimina la necesidad de tratamientos de post-polarización. Su proceso de fabricación resulta conveniente y eficiente.

Polímeros: Los materiales poliméricos requieren un tratamiento posterior de polarización. Primero se someten al estiramiento para romper su estructura interna y luego se polarizan para alinear los dipolos.

Cerámicas: Las cerámicas son ampliamente utilizadas y están compuestas por cristales ferroeléctricos dispuestos de manera aleatoria, lo que crea una estructura con polarización nula. La polarización se lleva a cabo para establecer un momento dipolar permanente.

El proceso de polarización se logra mediante la aplicación de un campo eléctrico elevado, manteniendo la temperatura ligeramente inferior a la temperatura de Curie, en la que los materiales ferroeléctricos pierden sus propiedades piezoeléctricas. Asimismo, existe un proceso contrario llamado despolarización, que ocurre al aplicar un campo eléctrico en sentido contrario al de la polarización, especialmente bajo presiones excesivas o al exceder la temperatura de Curie.

2.1.5. TRABAJOS RELACIONADOS

En este capítulo, es fundamental resaltar que los trabajos que presentaremos a continuación han contribuido positivamente al proyecto de diseño en sí. Tuvimos en cuenta las medidas de los discos, valores de frecuencia de resonancia y resistencias de carga como puntos de referencia claves. Si bien estas investigaciones también enfatizan la recolección de energía y las formas de almacenarla en baterías, sus hallazgos y resultados servirán como una valiosa base para futuros trabajos en este campo.

Actualmente, se está realizando una intensa búsqueda de fuentes de energía renovable y sostenible, y se están llevando a cabo numerosas investigaciones con el propósito de desarrollar sistemas que puedan satisfacer esta demanda. Entre las áreas de estudio más prometedoras se encuentran los dispositivos piezoeléctricos, los cuales pueden ser

empleados en sistemas de recolección de energía a través de la conversión directa. A lo largo de este proyecto, se ha revisado una variedad de trabajos e investigaciones relacionados principalmente con la recolección de energía basada en la tecnología piezoeléctrica.

Uno de estos trabajos se enfoca en el desarrollo de un sistema para llevar a cabo pruebas experimentales de impacto en discos piezoeléctricos, evaluando la energía eléctrica generada a través de su concepto de conversión [21]. Este sistema controla la presión y la frecuencia, lo que permite emular situaciones de impacto, como las que se producen en suelos y zapatos. Las pruebas han demostrado que los discos piezoeléctricos muestran una actividad piezoeléctrica directa y pueden utilizarse para generar electricidad de baja amplitud, lo que a su vez puede alimentar y cargar una batería. Para aumentar la capacidad de generación de energía, se utilizaron discos piezoeléctricos de 25 y 35 [mm], apilándolos en paralelo en grupos de 4, 6, 8, 10 y 12. En la *Figura 4* se puede visualizar uno de los discos utilizados:

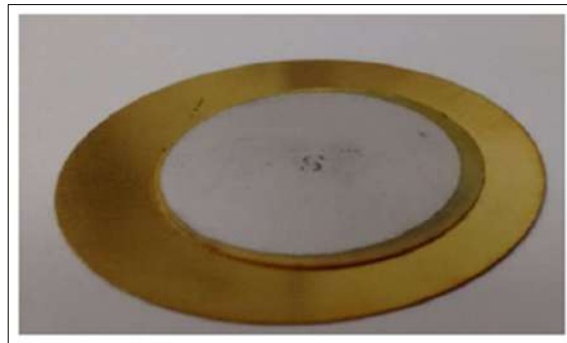


Figura 4: “Disco piezoeléctrico comercial utilizado”

Para analizar el impacto en los discos, se empleó un sistema hidráulico con aplicaciones de 3, 4 y 5 [bar] a una frecuencia de 1 y 2 [Hz]. En la *Figura 5* se puede visualizar la máquina en cuestión:

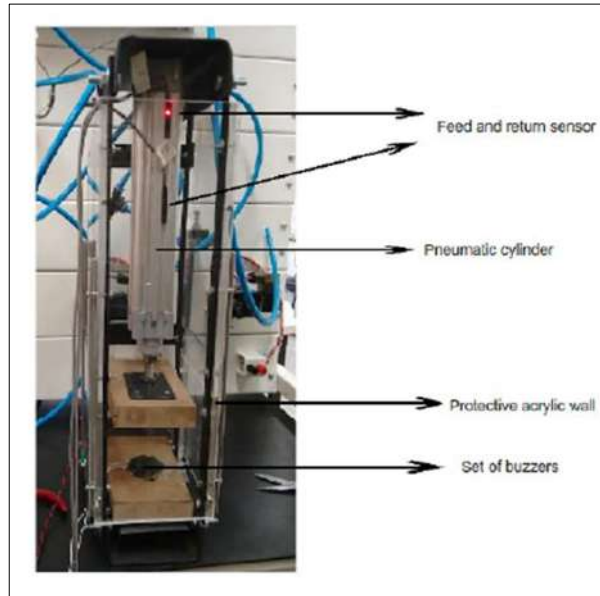


Figura 5: "Máquina de impacto"

Como es habitual, se implementó un circuito electrónico que consta de un rectificador de onda completa y un condensador para almacenar la energía generada por los impactos. Durante estos eventos, se generan impulsos eléctricos con valores máximos que alcanzan desde decenas hasta cientos de voltios. Para realizar una comparación precisa en términos de potencia eléctrica, se empleó un circuito regulador con una salida establecida en 5 [V]. Además, se utilizaron resistencias de carga con valores de 5, 10, 50 y 100 [k Ω], en función del voltaje de salida del regulador.

Como era de prever, el tiempo necesario para que el voltaje en la salida del regulador de 5 [V] se estabilice es significativamente menor cuando los impactos se aplican a conjuntos con un mayor número de discos, una frecuencia más alta y una mayor presión. El tiempo requerido en conjuntos con 14 discos es aproximadamente tres veces menor que en equipos con 4 discos. Se ha constatado que la potencia máxima de 250 [μ W] solo se alcanza cuando la resistencia de carga es de 100 [k Ω]. Para resistencias más bajas, la descarga del condensador es más rápida, lo que impide alcanzar valores de potencia más elevados. Por lo tanto, la potencia obtenida está directamente relacionada con la carga eléctrica generada en la cerámica y almacenada en el condensador.

También se descubrió que el rendimiento de los discos piezoeléctricos como recolectores de energía mejora cuando se disponen en pares de elementos. En todas las pruebas realizadas en esta investigación, se logró una potencia de 250 [μ W], que se alcanzó con

una carga resistiva de 100 [kΩ]. Las cargas eléctricas con resistencias más bajas no pudieron alcanzar potencias del mismo orden. Las potencias generadas por impactos de 5 bar fueron suficientes para cargar una batería eléctrica en aproximadamente 20 [min].

Otro artículo en particular, estudia la capacidad de recolección de energía de los elementos de discos piezoeléctricos que se utilizan principalmente en aplicaciones electroacústicas [22]. En este trabajo se analizó el rendimiento de dos elementos piezoeléctricos disponibles en el mercado de 27 y 35 [mm] de diámetro y se usó un agitador electrodinámico como mecanismo de excitación. Se fabricaron soportes personalizados para que el disco pudiera atornillarse al eje central del vibrador (*Figura 6*) y permitir la transmisión vertical a los elementos. Los soportes tenían forma circular y los discos piezoeléctricos estaban adheridos a ellos mediante un adhesivo.



Figura 6: “Disco piezoeléctrico, con masa adjunta colocado sobre el eje del agitador”

Se usó un generador de funciones junto con un amplificador de potencia para proporcionar una entrada de excitación sinusoidal al agitador. Se colocaron pesas mecánicas estándar encima de los elementos del disco para aplicar tensión previa.

Los discos piezoeléctricos funcionaron en resonancia y se usaron para cargar un supercondensador. El disco de 35 [mm] pudo cargar el super capacitor más rápido en comparación con el de 27 [mm]. Los tiempos necesarios para cargar el condensador a 5 [V] fueron 153 [min] y 167 [min] para los discos de 35 y 27 [mm] respectivamente. El supercondensador cargado se usó con éxito para alimentar una placa de microcontrolador Arduino durante 10 [s] (*Figura 7*). La placa Arduino estaba precargada con un programa para hacer parpadear un LED integrado usando una PC.

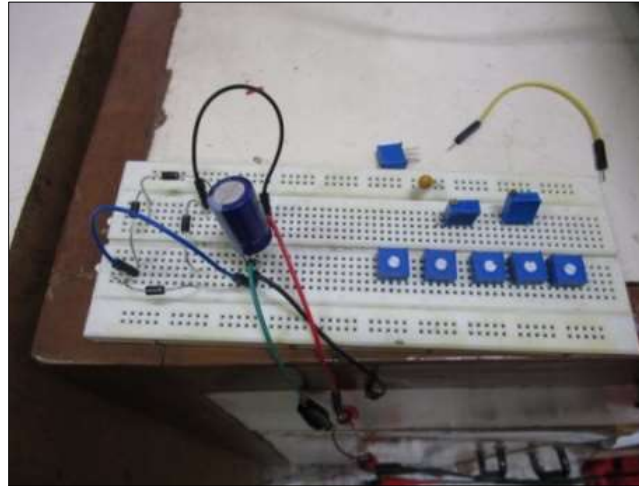


Figura 7: "Placa de microcontrolador Arduino"

Como la tensión de salida, sin precarga mecánica, fue muy baja, se decidió someter al disco a precargas mayores, en pasos de 5 [g]. Dicho aumento tuvo el efecto de reducir la frecuencia de resonancia de los elementos del zumbador piezoeléctrico.

Se obtuvo una potencia máxima de 220 [μW] a través de una carga (resistiva) de 126 [$\text{k}\Omega$] para un disco piezoeléctrico de 35 [mm] con una precarga de 57 [g]. Para el disco de 27 [mm] la potencia máxima entregada a una carga de 133 [$\text{k}\Omega$] fue de 86 [μW] con una precarga de 25 [g]. Se encontró que las frecuencias de resonancia para los dos discos eran de 22 y 24 [Hz], respectivamente, con una aceleración de $2 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$. Se logró cargar con éxito un supercondensador de hasta 5 [V] que se usó para alimentar un microcontrolador. Cuando el voltaje del supercondensador cayó por debajo de los 3 voltios, la placa Arduino dejó de funcionar. Esto se puede atribuir al voltaje mínimo requerido para alimentar la placa Arduino.

Estos discos piezoeléctricos, por su asequibilidad, resistencia y disponibilidad en el mercado, representan una opción sumamente conveniente. Su factor de forma delgado permite una integración sencilla en diversas estructuras vibratorias, lo que facilita la captación de energía vibracional para la generación de electricidad útil. Esta energía resultante puede ser aprovechada para alimentar dispositivos microelectrónicos tales como módulos Bluetooth, sistemas de posicionamiento global (GPS), microcontroladores, sensores de baja potencia y nodos para redes de sensores inalámbricos, entre otros.

En tercer lugar, se presentará un artículo que además de utilizar piezo-cerámicas accesibles a baja frecuencia de vibración (*Figura 8*), demuestra la capacidad de producir alta potencia en una amplia gama de frecuencias distintas a la resonancia fundamental del disco piezoeléctrico, es decir, lejos de su valor de resonancia de aproximadamente 4500 ± 500 [Hz] [23].

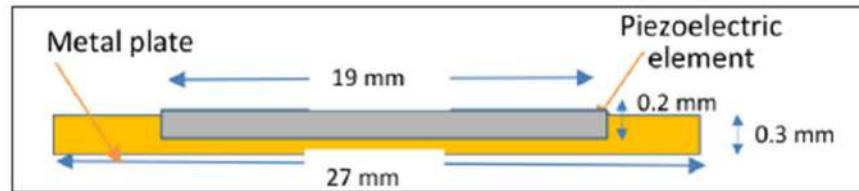


Figura 8: “Disco piezoeléctrico de 27 mm de diámetro”

Se utiliza un agitador con el objetivo de impulsar la estructura a varias frecuencias a través de un generador de funciones. El voltaje de salida de dicha estructura y la aceleración de vibración fue monitoreada por un osciloscopio digital (*Figura 9*). La piezo-cerámica fue adherida al elemento vibratorio y sometida a un rango de baja frecuencia, menos de 200 [Hz] (mucho más bajo que la frecuencia de resonancia).

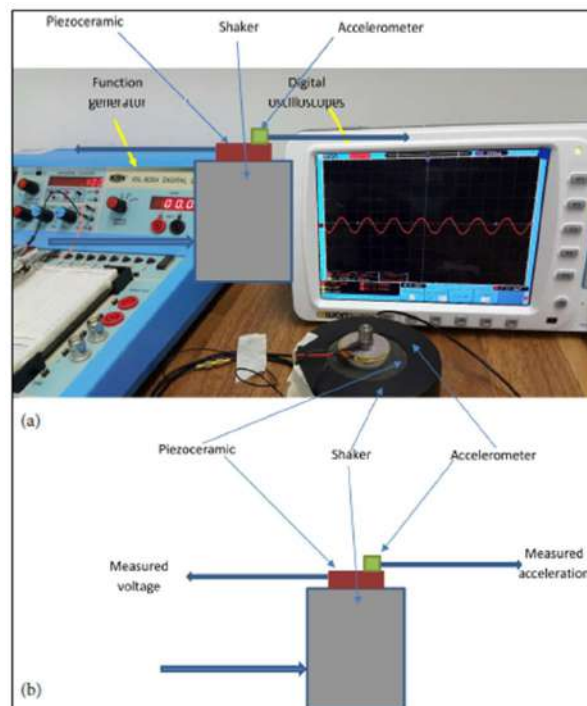


Figura 9: “Configuración Experimental: a) Aparato, b) Esquema”

La cantidad de voltaje generado dependió de la distribución de tensiones y deformaciones y, por lo tanto, las condiciones de sujeción de la estructura piezoeléctrica. Una sujeción inicial aleatoria por simple encolado de la estructura al elemento vibratorio, resultó en un voltaje de salida inferior a 0,7 [V] (*Figura 10*).

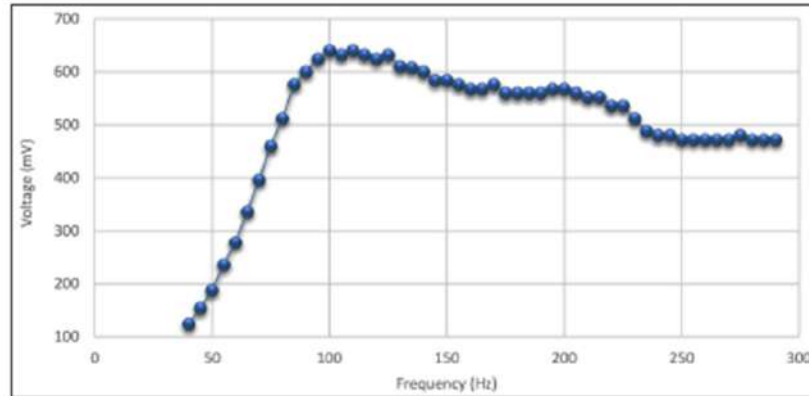


Figura 10: “Tensión generada en función de la frecuencia de vibración con sujeción inicial (sin tensión previa)”

El voltaje de salida (pico a pico) se midió sin carga en una amplia gama de bajas frecuencias. Para generar un voltaje de salida más alto, el pretensado se introdujo fijando la estructura piezoeléctrica al agitador usando cinta adhesiva (*Figura 12*). El voltaje de salida se midió a través de una resistencia variable (R) utilizando un osciloscopio digital. Se tomó un promedio de 16 lecturas para cada voltaje de salida y como se puede ver en la *Figura 11*, el mayor voltaje generado se midió a los 171 [Hz].

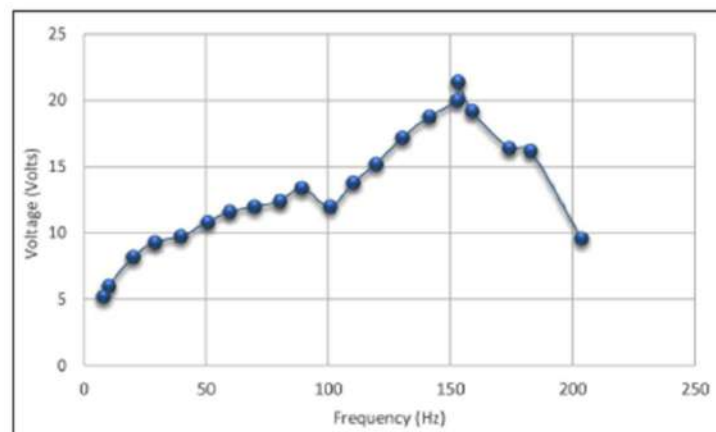


Figura 11: “Tensión generada en función de la frecuencia de vibración (con sujeción modificada)”

La variación de la potencia generada frente a la resistencia de carga, indicó que la potencia máxima se obtuvo entre 10 y 20 [kΩ] (Figura 13).

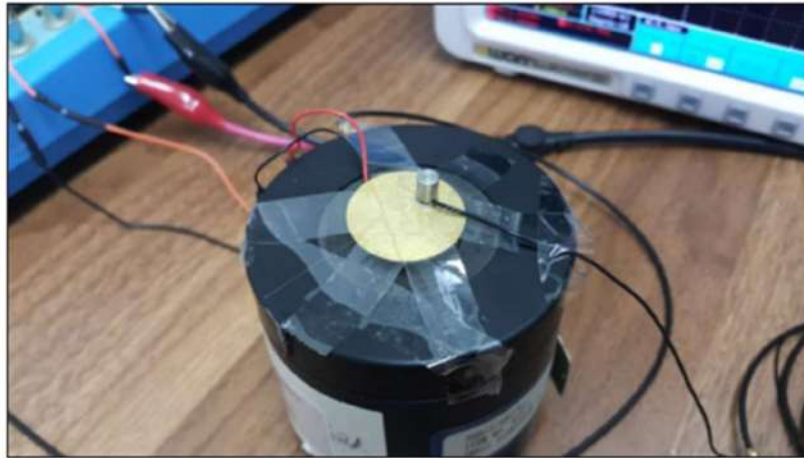


Figura 12: "Sujeción y pretensado alterados"

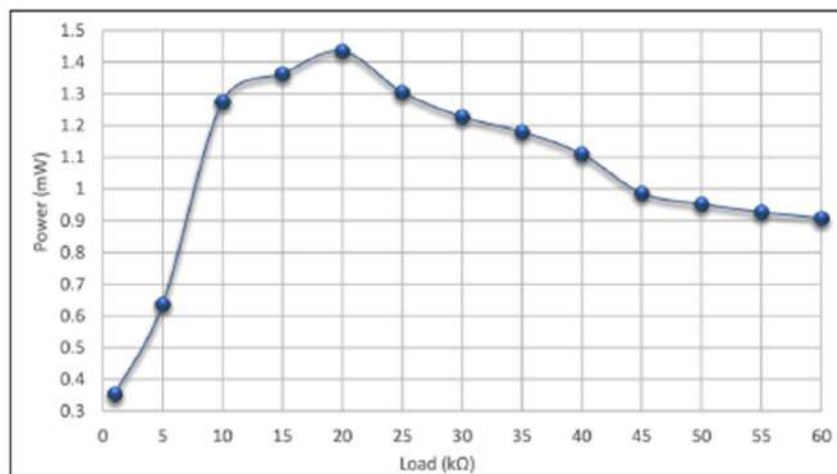


Figura 13: "Salidas de potencias contra resistencias de carga"

De acuerdo a Teorema de Thévenin, la máxima potencia se produce cuando la carga es igual a la resistencia interna. Para validar este resultado, la resistencia interna (impedancia equivalente de la estructura piezoeléctrica) se midió y se encontró que era 17.8 [kΩ] (que está en el rango de pico de potencia). Además, se obtuvo una mayor potencia cuando se fijó la carga exactamente a 17,8 [kΩ] y se encontró que era de 1,5 [mW]. Esta potencia se obtuvo a 171 [Hz] a una aceleración de 5,63 [m/s^2]. Los resultados también muestran

que a baja aceleración y muy baja frecuencia de vibración (10 [Hz]), un voltaje de pico a pico de 8 [V] puede ser generado.

Para aplicaciones del mundo real de recolectores de energía de vibración con materiales piezoeléctricos, la corriente alterna generada debe convertirse a corriente continua, que puede usarse más tarde para cargar una batería de un dispositivo electrónico. Alternativamente, el voltaje rectificado puede ser almacenado en un condensador para su uso posterior con el objetivo de alimentar un dispositivo. Además, desde un punto de vista práctico, el voltaje rectificado podría tener ondulaciones que deben ser filtradas antes de alimentar una carga. Esto se puede lograr agregando un condensador de filtro. La señal de salida de la cosechadora piezoeléctrica (PEH) fue rectificada por un rectificador convencional de puente completo (usando cuatro diodos Schottky) para cargar un condensador de 1000 [μ F]. La PEH puede cargar el condensador de 0,6 [V] después de 1 [min] como se muestra en la *Figura 14*. Este resultado es prometedor para cargar baterías de dispositivos portátiles.

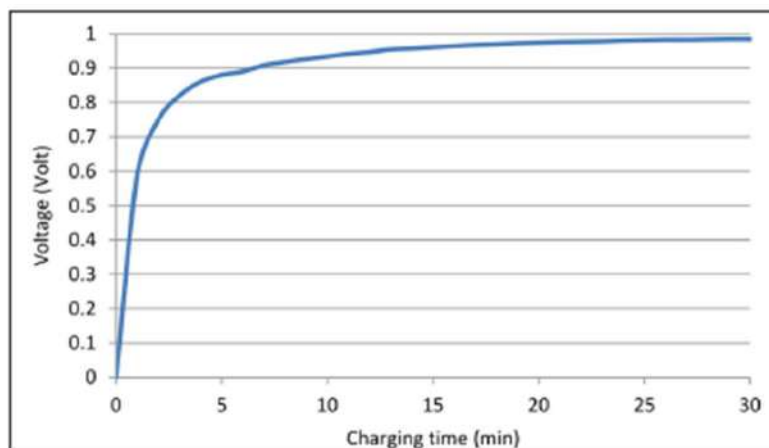


Figura 14: "Tiempo de carga para un condensador de 1000 μ F"

El estudio evidencia que la piezo-cerámica convencional posee el potencial para extraer energía del entorno, específicamente de las vibraciones, con el propósito de suministrar suficiente potencia a varios dispositivos que operan con baja potencia, como la electrónica portátil y los sensores inalámbricos.

2.2. DISEÑO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL

2.2.1. SELECCIÓN DEL DISCO PIEZOELÉCTRICO

Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de los discos disponibles en el mercado nacional, priorizando aquellos de uso comercial destinados al consumo general y que carecían de datos técnicos detallados. En este proyecto, la ausencia de esta información no representó un inconveniente, ya que estábamos proponiendo un modelo propio. Además, el tamaño del disco seleccionado se ajusta de manera accesible al diseño del soporte.

Es crucial destacar que, aunque el costo no fue el factor primordial, se mantuvo en un rango accesible y similar entre las opciones consideradas. En una fase inicial, contemplamos la adquisición de discos en dos tamaños diferentes (27 y 30 mm). Sin embargo, tras una evaluación más detallada, optamos por el tamaño de mayor diámetro (50 mm). Esta elección simplificó el diseño del soporte de sujeción y proporcionó flexibilidad para posibles aplicaciones futuras.

Este enfoque no solo se alinea con la concepción del soporte para este proyecto en particular, sino que también se diseñó teniendo en cuenta su utilidad potencial en trabajos futuros.

2.2.2. DISEÑO DEL CONJUNTO ENSAMBLADO

Tal como se mencionó en la Introducción, el inicio de este proyecto se centra en el diseño y la fabricación de un Soporte tridimensional (3D) con un propósito dual, constituido por 3 piezas diferentes. La herramienta utilizada para la elaboración de estos diseños fue el software Free-CAD.

El conjunto ensamblado, no solo tiene como función principal sostener de manera segura el disco piezoeléctrico, sino que también está diseñado para facilitar la transmisión eficiente de vibraciones verticales entre la fuente vibrante (parlante) y el disco. El objetivo es lograr la máxima rigidez posible, permitiéndole comportarse como un cuerpo rígido en un rango de baja frecuencia. Simultáneamente, se busca que el conjunto sea ligero y capaz de adaptarse a la geometría y dimensiones específicas del altavoz.

Es importante destacar que la caja-parlante fue diseñada y construida con anterioridad por otro estudiante de nuestra facultad en el Proyecto Final: “Desarrollo de una Fuente de Vibraciones Controladas” y será utilizada para este proyecto. Las dimensiones de la caja

acústica fueron determinadas con la utilización de un software de diseño y construida con material fenólico de 18 [mm] de espesor y un recubrimiento de corcho de 4 [mm] (*Figura 15*).

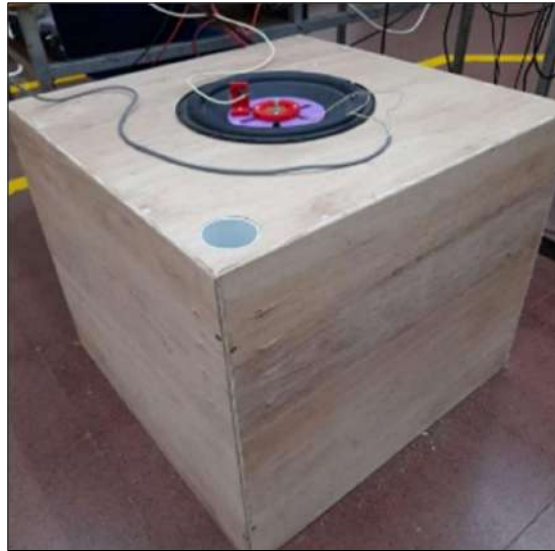


Figura 15: “Altavoz con caja acústica”

Un aspecto crucial de este diseño ensamblado, radica en la búsqueda de una sinergia entre bajo peso y rigidez, para lo cual se incorporaron estratégicamente agujeros y perforaciones en la estructura.

El conjunto ensamblado está compuesto por 3 piezas diferentes y se pueden observar fácilmente en la *Figura 16*.



Figura 16: “Pieza-Unión (Violeta), Pieza-Acelerómetro (Rojo) y Pieza-Piezoelectrico (Rojo) colocados en la base del parlante”

Por un lado, se encuentra la pieza que une la caja-parlante con la pieza que sostiene el disco piezoeléctrico (*Figura 17*). A dicha pieza la denominamos "Pieza Unión", cuya función es servir como interfaz entre el altavoz y el soporte del transductor piezoeléctrico (disco).



Figura 17: "Pieza-Unión (Violeta) colocada sobre la caja-parlante"

Su diseño, como se muestra en las *Figura 18.a y 18.b*, adopta una forma circular para asegurar que su base comparta características geométricas con el altavoz. Además de su función principal, se han incorporado diez opciones de agarre adicionales para brindar versatilidad en su futuro uso.

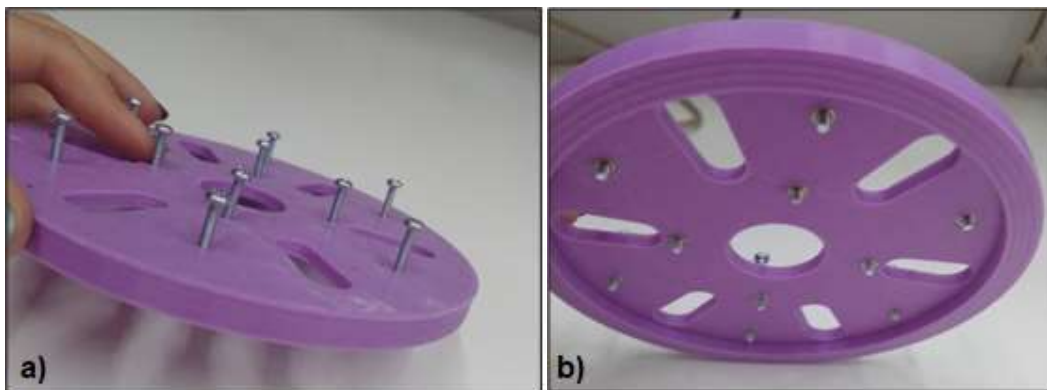


Figura 18: "a) Pieza Unión lado superior b) Pieza Unión lado inferior"

Es importante destacar que dicha pieza se diseñó tomando una base con características geométricas similares al contorno del parlante (*Ver Figura 19*) y se pensó en una pieza

inicial que se usó como prueba para analizar con exactitud la posición correcta para su posterior adhesión.

Para adoptar estas características geométricas, se decidió tomar el mismo diámetro “D” que se muestra en la siguiente imagen y se calculó aproximadamente la curvatura necesaria para un correcto ensamble. Para esto se tomo la mitad del diámetro y un punto de referencia a la altura del diámetro exterior del parlante para posteriormente medir las alturas a dicho punto de referencia y de esta manera calcular aproximadamente la curvatura que debe tener la Pieza-Unión. Dichas mediciones fueron pensadas y analizadas anteriormente para lograr el mejor encastre posible, teniendo en cuenta también el pegamento universal que se utilizó para lograr la adhesión. En la *Figura 20* se puede visualizar dichos cálculos y un diagrama de las alturas y punto de referencia. También se detalla un gráfico ilustrativo de la inclinación de la pieza, pegamento universal y curvatura real del parlante.

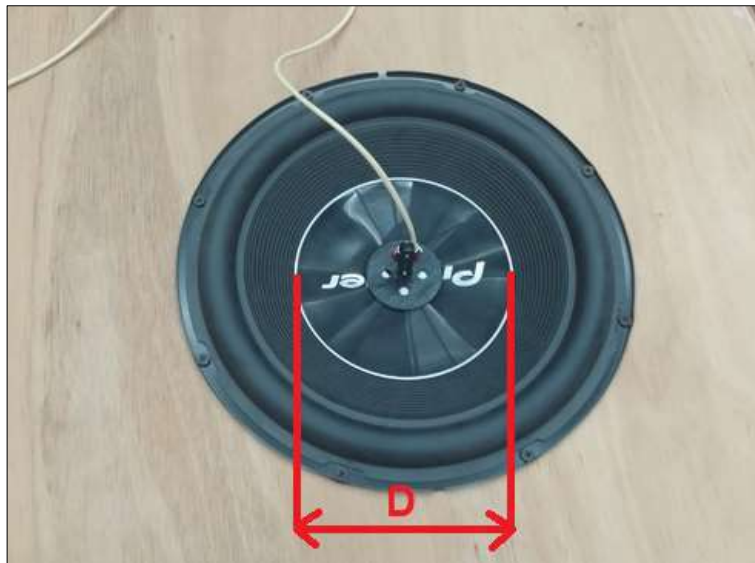


Figura 19: “Base del parlante donde se sujeta la Pieza-Unión”

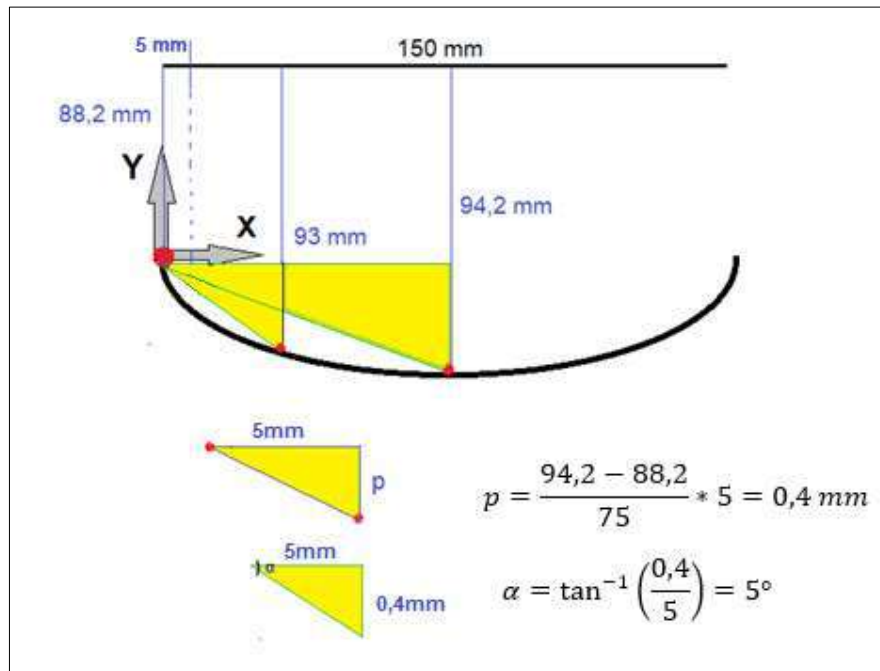


Figura 20: “Cálculos aproximados de curvatura para la Pieza-Unión”

Esta pieza inicial fue impresa pero no en su totalidad ya que la idea era probar la inclinación que tiene el parlante con la inclinación de la pieza y asegurar de esa forma un correcto ensamble y un innecesario gasto de material. Luego de comprobar que su calce era el adecuado, se decidió imprimir la pieza completa. En la *Figura 21*, puede verse la “Pieza Unión”, ensamblada al parlante. El plano de fabricación puede encontrarse en el Anexo II: Plano de Fabricación-Pieza-Unión.



Figura 21: “Pieza unión colocado en la base del parlante”

En segunda instancia, con el objetivo de sostener el disco piezoeléctrico y encastrarlo en la Pieza-Unión, se diseñó la "Pieza-Piezoeléctrico". Se colocaron además 4 orificios distribuidos convenientemente para el encastre. Para sus dimensiones se tuvo en cuenta el diámetro del disco cuyo plano de fabricación puede verse en el Anexo II: Plano de Fabricación Pieza-Piezoeléctrico). Como puede ver en la *Figura 22*, se imprimieron 2 unidades.

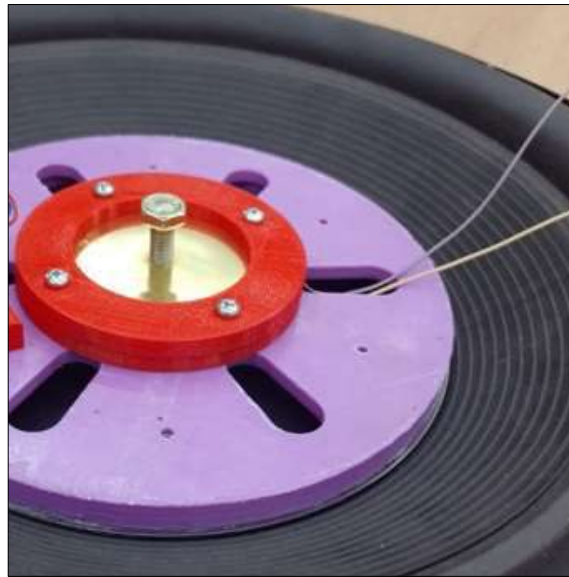


Figura 22: "Pieza Piezoeléctrico (Rojo)"

En último lugar, se diseñó y construyó la "Pieza-Acelerómetro" para acomodar el acelerómetro al conjunto ensamblado (*Figura 23*). En este caso se tuvieron en cuenta las medidas de la plaquita tomando una forma de agarre con el objetivo de sostener el acelerómetro sin atornillar. El plano de fabricación puede verse en el Anexo II: Plano de Fabricación Pieza-Acelerómetro.



Figura 23: "Pieza Acelerómetro (Rojo)"

2.2.3. PROCESO DE FABRICACIÓN

La tecnología de fabricación utilizada fue la Fabricación Aditiva, un nuevo concepto de producción industrial a través del cual, el material es depositado capa a capa de manera controlada, logrando formas geométricas personalizadas en función de cada necesidad. El proceso de **fabricación aditiva** comienza con un boceto CAD. A partir de ahí, el equipo de fabricación aditiva lee los datos de dicho archivo digital y agrega capas sucesivas de líquido, polvo o el material del que se trate (termoplástico, metal, resina, filamentos, fibra de carbono, etc.), capa sobre capa, para fabricar un objeto 3D. El material empleado en este proyecto es el PLA (Ácido Poliláctico), optando por una configuración tipo panal o nido de abeja para el relleno interno, lo que permitió minimizar el uso de material sin sacrificar la integridad estructural.

Para nuestro proyecto se utilizó la impresora 3D FDM cuyos diseños se fragmentaron en capas utilizando una herramienta conocida como "slicer". En nuestra instancia, optamos por el programa "Cura", el cual se encargó de acondicionar las piezas en 3D para su posterior impresión.

Para más información sobre la impresora utilizada puede verse en el *Anexo I: Impresora 3D FDM Createbot 400+*.

2.3. MODELO MATEMATICO PROPUESTO

2.3.1. VARIABLES DESCRIPTIVAS DEL MODELO

En primer lugar, haremos una descripción del modo de funcionamiento del dispositivo. Este consiste en un disco piezoeléctrico comercial, cuyos datos comerciales se encuentran en la *Tabla 1* del apéndice, el cual tiene adicionada una masa en su centro. Esta masa es la encargada de promover deformaciones elásticas cuando el disco es sometido a aceleraciones transversales a su superficie. En la *Figura 24* se puede observar un diagrama descriptivo del dispositivo. Los electrodos del piezoeléctrico se encuentran conectados a una resistencia de carga encargada de disipar la energía de deformación en calor.

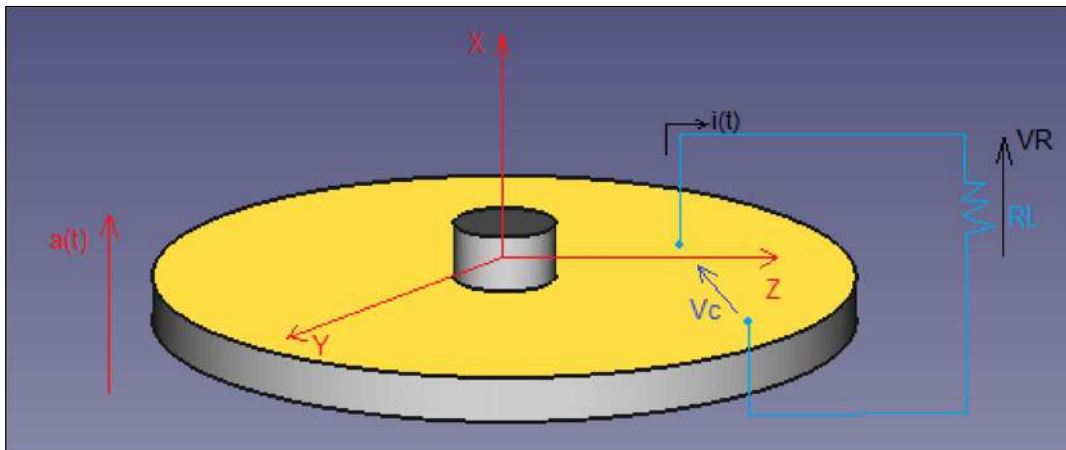


Figura 24: "ESQUEMA DESCRIPTIVO"

Los parámetros y las variables que se usan para describir la dinámica de este sistema electromecánico, son las siguientes:

- $a(t)$: Aceleración transversal del soporte $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
- $x(t)$: Coordenada generalizada para describir el desplazamiento transversal del centro del disco con respecto al soporte de excitación $[m]$
- $q(t)$: Carga eléctrica en el electrodo superior del disco $[C]$
- $i(t)$: Corriente Eléctrica $[A]$
- $V_p(t)$: Diferencia de Potencial entre los electrodos del piezoeléctrico $[V]$
- $V_R(t)$: Diferencia de Potencial eléctrico en la resistencia de carga R_L $[V]$

- α, β : Parámetros del modelo electromecánico de conversión del fenómeno piezoeléctrico
- R_L : Resistencia de carga del piezoeléctrico
- m_p : Masa de excitación [kg]
- m^* : Masa del piezoeléctrico [kg]
- $m_t = m^* + m_p$: Masa total del piezoeléctrico [kg]
- C_v : Constante de disipación proporcional del modelo $\left[\frac{Ns}{m}\right]$
- $F_{em}(t)$: Fuerza de restitución mecánica del piezoeléctrico [N]
- $F_{eq}(t)$: Fuerza de restitución eléctrica del piezoeléctrico [N]
- f_c : Frecuencia de corte filtro pasa-bajo señal de salida del acelerómetro [Hz]
- f_{est} : Frecuencia de corte del estimador [Hz]
- $q_f(t)$: Estado descriptor del filtro pasa-bajo del acelerómetro
- $q_e(t)$: Estado descriptor del estimador de aceleración
- w_0 : Frecuencia natural de resonancia mecánica teórica del piezoeléctrico
- ζ : Factor de amortiguamiento lineal de la dinámica mecánica del piezoeléctrico
- C : Capacidad eléctrica del piezoeléctrico sin deformación mecánica [F]
- k : Constante elástica de la dinámica mecánica $\left[\frac{N}{m}\right]$

El disco piezoeléctrico puede interpretarse como un cuerpo que puede almacenar energía a partir del mecanismo de deformación elástica y la polarización eléctrica inducida por la deformación del disco al ser sometido a esfuerzos externos.

El modelo que proponemos para describir el proceso de acumulación de energía vía deformación es el asumir la existencia de una fuerza de restitución $F_{em}(t)$ proporcional al desplazamiento transversal del disco. La ecuación que modela esta fuerza es:

$$F_{em}(t) = -kx(t) \quad k > 0 \quad (1)$$

Es la clásica fuerza interna de restitución mecánica de un resorte lineal.

Una segunda fuerza de restitución que se propone presente en el piezoeléctrico es $F_{eq}(t)$. Esta fuerza es proporcional a la carga eléctrica acumulada en los electrodos del piezoeléctrico. Esta se modela de la siguiente manera:

$$F_{eq}(t) = -\alpha q(t) \quad \alpha > 0 \quad (2)$$

Ahora bien, vamos a proponer un modelo simplificado para describir la diferencia de potencial $V_p(t)$ entre los electrodos del piezoeléctrico. El mismo ha de ser proporcional al estado de carga eléctrica $q(t)$ presente en los electrodos y el estado de deformación elástica $x(t)$. Es decir:

$$V_p(t) = \frac{1}{C}q(t) - \beta x(t) \quad (3)$$

Donde C es la capacidad del capacitor conformado por ambos electrodos del disco piezoeléctrico y β es el parámetro que modela la diferencia de potencial producto de la deformación del piezoeléctrico.

Las ecuaciones (1), (2) y (3) están en concordancia con el modelo lineal Tensión mecánica- Campo eléctrico propuesto por la IEEE. [24] y establecen el acoplamiento entre la dinámica eléctrica y la dinámica mecánica del piezoeléctrico. En lo que respecta a la dinámica eléctrica proponemos el siguiente modelo de acuerdo con el diagrama presentado en la *Figura 25*:

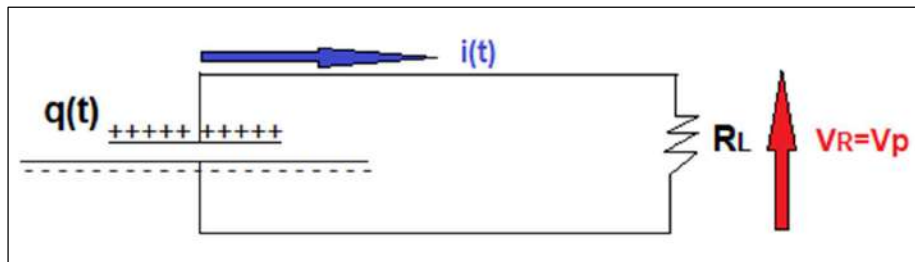


Figura 25: "Dinámica Eléctrica"

En él, se representa un capacitor con una carga eléctrica $q(t)$ proporcional no solo a la diferencia de potencial entre sus electrodos $V_p(t)$ sino que también al estado de deformación del piezoeléctrico $x(t)$, tal como lo modela la ecuación (3).

A este capacitor, se conecta una resistencia de carga R_L cerrando una malla eléctrica. Siendo que la suma de las diferencias de potencial dentro de una malla es nula, esto implica que:

$$V_R(t) = V_p(t) \quad (4)$$

El principio de conservación de carga eléctrica determina que la corriente de malla $i(t)$ es la tasa de cambio temporal de la carga eléctrica:

$$\frac{dq(t)}{dt} = -i(t) \quad (5)$$

Por otro lado, la ley de Ohm establece que la caída de potencial $V_R(t)$ que experimenta la resistencia eléctrica R_L es proporcional a la corriente $i(t)$ que la atraviesa de la siguiente manera:

$$V_R(t) = R_L i(t) \quad (6)$$

Reuniendo las ecuaciones (3), (4), (5) y (6), podemos arribar a la siguiente ecuación diferencial ordinaria de primer orden:

$$CR_L \frac{dq(t)}{dt} + q(t) = C\beta x(t) \quad (7)$$

Teniendo ya definidas las fuerzas de restitución, la dinámica mecánica del cosechador puede obtenerse a partir de las leyes de Newton. La ecuación diferencial resultante es:

$$m_t \ddot{x}(t) = -C_v \dot{x}(t) + F_{em}(t) + F_{eq}(t) - m_t a(t) \quad (8)$$

, donde $m_t a(t)$ es la fuerza inercial que experimenta el piezoeléctrico.

En la *Figura 26* se puede visualizar un Diagrama de dicha dinámica:

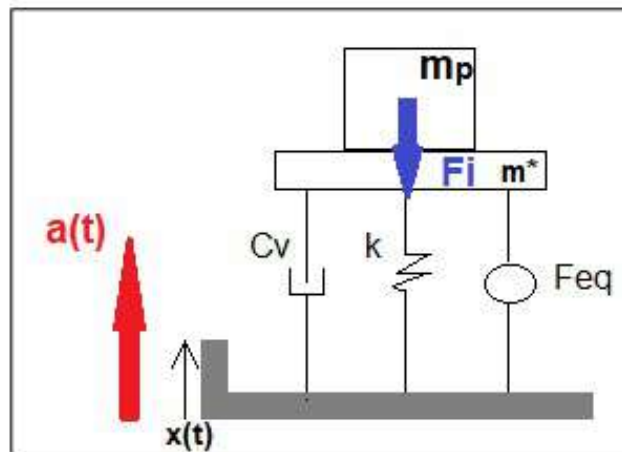


Figura 26: "Dinámica Mecánica"

Si introducimos la ecuación (1) en la ecuación (8) y reordenamos los sumandos, se observa una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden:

$$m_t \ddot{x}(t) + C_v \dot{x}(t) + kx(t) = F_{eq}(t) - m_t a(t) \quad (9)$$

Considerando la dinámica mecánica del piezoeléctrico (*Fig.21*), sabemos que la frecuencia angular y el factor de amortiguamiento se los puede definir de la siguiente manera: $\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m_t}}$, $\zeta = \frac{C_v}{2\omega_o m_t}$.

Por otro lado, la velocidad angular está relacionada con la frecuencia por la siguiente relación: $\omega = 2\pi f$.

Por lo tanto, despejando C_v y k de estas definiciones y reemplazando en la ecuación (9) resulta:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_o \dot{x}(t) + \omega_o^2 x(t) = -\frac{\alpha}{m_t} q(t) - a(t) \quad (10)$$

Las ecuaciones (7) y (10) describen la dinámica total del piezoeléctrico. En este trabajo se asume que dicha dinámica es excitada por la aceleración transversal del disco $a(t)$, tal como se evidencia en la ecuación (10). A esta variable la consideraremos como la única señal de entrada de dicha dinámica. Por otro lado, es de nuestro interés la evolución temporal de la diferencia de potencial en la resistencia, ya que a partir de ella es posible determinar la potencia eléctrica disponible en el piezoeléctrico excitado. A esta variable temporal la consideraremos nuestra única señal de salida.

Proseguiremos ahora a construir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace que representa la dinámica total del piezoeléctrico y presenta el acoplamiento entre la dinámica mecánica (10) y la dinámica eléctrica (7).

Aplicando las propiedades de Laplace a las ecuaciones (7), (10) y considerando condiciones iniciales nulas tenemos:

$$q(s) = \frac{\beta}{R_L} \frac{1}{(s + \frac{1}{CR_L})} x(s) \quad (11)$$

$$x(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_o s + \omega_o^2} \left(-\frac{\alpha}{m_t} q(s) - a(s) \right) \quad (12)$$

Por otro lado, de la ecuación (5) y (6) tenemos:

$$V_R(s) = -R_L s q(s) = -R_L s \frac{\beta}{R_L} \frac{1}{\left(s + \frac{1}{CR_L}\right)} x(s) = -\beta \frac{s}{\left(s + \frac{1}{CR_L}\right)} x(s) \quad (13)$$

Llamando $G(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$, $H(s) = \frac{\beta}{R_L} \frac{1}{\left(s + \frac{1}{CR_L}\right)}$ y $P(s) = -\beta \frac{s}{\left(s + \frac{1}{CR_L}\right)}$ las ecuaciones

anteriores nos quedan de la siguiente forma:

$$q(s) = H(s)x(s) \quad (14)$$

$$x(s) = G(s)\left(-\frac{\alpha}{m_t} q(s) - a(s)\right) \quad (15)$$

$$V_R(s) = P(s)x(s) \quad (16)$$

A partir de las ecuaciones (14), (15) y (16) es posible arribar a la función transferencia $G_p(s) = \frac{V_R(s)}{a(s)}$ de nuestro interés. Esta FT representa, en términos matemáticos, la dinámica total del piezoeléctrico en función de la señal de entrada y la señal de salida.

En la *Figura 27* se presenta el diagrama de bloques en el dominio de Laplace que representa el acoplamiento entre la dinámica mecánica y eléctrica.

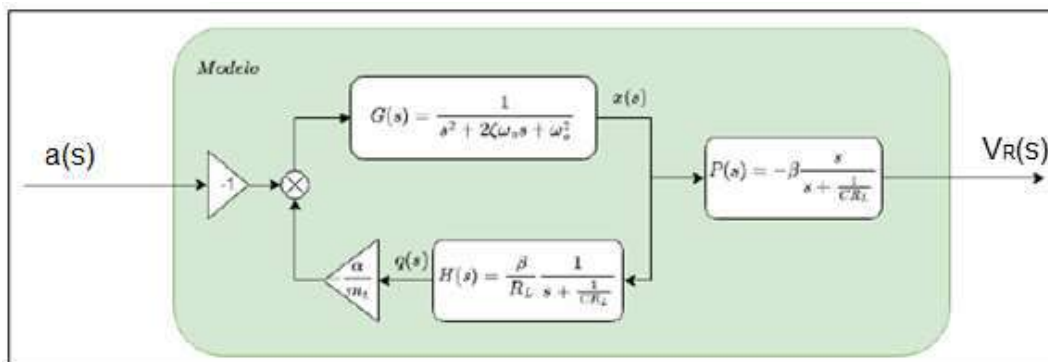


Figura 27: "Diagrama de Bloques en el dominio de Laplace: Representa el acoplamiento entre la dinámica Eléctrica y la dinámica Mecánica"

La retroalimentación que aparece en el diagrama hace referencia a la sumatoria de $q(s)$ y $a(s)$ que se visualiza en la ecuación (12).

Finalmente, la función transferencia del sistema a lazo cerrado es:

$$G_p(s) = \frac{V_R(s)}{a(s)} = \frac{-G(s)P(s)}{1 + \frac{\alpha}{m_t} G(s)H(s)} = \frac{\frac{-1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \frac{-\beta s}{\left(s + \frac{1}{CR_L}\right)}}{1 + \frac{\alpha}{m_t} \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \frac{\beta}{R_L} \frac{1}{\left(s + \frac{1}{CR_L}\right)}} \quad (17)$$

$$G_p(s) = \frac{\beta s}{(s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2) \left(s + \frac{1}{CR_L} \right) + \frac{\alpha\beta}{m_t R_L}} \quad (18)$$

$$G_p(s) = \frac{\beta s}{s^3 + \left(\frac{1}{CR_L} + 2\zeta\omega_0 \right) s^2 + \left(\frac{2\zeta\omega_0}{CR_L} + \omega_0^2 \right) s + \left(\frac{\omega_0^2}{CR_L} + \frac{\alpha\beta}{m_t R_L} \right)} \quad (19)$$

Si analizamos la función transferencia $G_p(s) = \frac{V_R(s)}{a(s)}$ podemos ver que es un sistema de tercer orden. Posee un Zero ubicado en el origen y 3 Polos cuya ubicación dependerán de los valores de $C, R_L, \zeta, \omega_0, m_t, \alpha$ y β .

Esta función de transferencia representa un sistema que tiene un comportamiento caracterizado por un par de polos complejos conjugados que determinan la respuesta en frecuencia y la dinámica de oscilación, y un tercer polo real que introduce una atenuación adicional de las componentes espectrales de alta frecuencia.

La posición de los polos conjugados determinara la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico y la magnitud del fenómeno de resonancia. Las ecuaciones (7) y (10) que describen la dinámica total del piezoeléctrico, pone en evidencia que la posición de estos polos en el plano complejo estará determinada, en primer lugar, por el cociente entre la rigidez mecánica del piezoeléctrico y la masa total del mismo, (*Ver ecuación 10*). En segundo lugar, el acoplamiento de esta dinámica con la dinámica eléctrica del piezoeléctrico (*Ver ecuación 7 y diagrama de la figura 27*), introducirá un corrimiento de la frecuencia de resonancia que dependerá de la realimentación entre ambas dinámicas. Este corrimiento estará en función de la masa total, los parámetros alfa y beta del piezoeléctrico, la resistencia de carga y la capacidad eléctrica del piezoeléctrico.

Por lo tanto, el modelo propuesto predice la existencia de un pico de resonancia en la respuesta en frecuencia del piezoeléctrico en relación con la diferencia de potencial observada en la resistencia al someter el piezoeléctrico a una excitación de aceleración transversal.

2.4. ESTIMACION DE PARAMETROS

La estimación de parámetros requiere la creación de un algoritmo que fusione el modelo matemático propuesto y la data experimental. Ahora bien, es necesario representar las ecuaciones diferenciales de dicho modelo de manera controlada y completa. En función de esta necesidad, se ha decidido transformar las ecuaciones diferenciales en una representación en variable de estado.

2.4.1. REPRESENTACIÓN EN VARIABLE DE ESTADO

El objetivo de esta sección es determinar una representación en variable de estado de las ecuaciones diferenciales del modelo propuesto. Esta representación reduce la complejidad de cómputo del modelo dentro del contexto de Matlab.

Para convertir las ecuaciones diferenciales (7) y (10) en una representación en variable de estado, primero tenemos que identificar la cantidad de condiciones iniciales necesarias para estas ecuaciones. Para la ecuación (7) hay una condición inicial, la carga eléctrica inicial $q(0)$. Para la ecuación (10), hay dos condiciones iniciales, el desplazamiento inicial $x(0)$ y la velocidad inicial $\dot{x}(0)$. Entonces las tres variables que determinan el estado dinámico del piezoeléctrico son: $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $q(t)$.

Si reunimos dichas variables en un vector de estado tenemos que:

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ q(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Ahora la descripción en variable de estado requiere describir la derivada temporal del vector estado a partir del propio vector de estado y las señales de entrada:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \frac{dq}{dt}(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

En nuestro caso disponemos de una única señal de entrada, la aceleración del soporte $a(t)$.

La descripción posee la siguiente estructura:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}a(t) \quad (22)$$

Donde $\mathbf{A} \in R^{3 \times 3}$ y $\mathbf{B} \in R^{3 \times 1}$.

Comencemos con el primer elemento de $\dot{\mathbf{X}}(t)$, $\dot{x}(t)$. Para describirlo en términos del vector de estado $\mathbf{X}(t)$ y $a(t)$ implica que la primera

fila de la matriz **A** sea $[0 \ 1 \ 0]$ y el primer elemento de **B** sea nulo:

$$\dot{x}(t) = [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ q(t) \end{bmatrix} + [0] a(t) \quad (23)$$

Para el segundo elemento hacemos uso de la ecuación (10). A partir de esta arribamos a:

$$\ddot{x}(t) = \begin{bmatrix} -\omega_o^2 & -2\zeta\omega_o & \frac{-\alpha}{m_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ q(t) \end{bmatrix} + [-1] a(t) \quad (24)$$

Para el último elemento $\dot{q}(t)$, tomamos la ecuación (3), (4) y (6) y arribamos a:

$$\dot{q}(t) = \begin{bmatrix} \frac{\beta}{R_L} & 0 & \frac{-1}{cR_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ q(t) \end{bmatrix} + [0] a(t) \quad (25)$$

Con respecto a la señal de salida $V_R(t)$, esta puede computarse a partir de la ecuación (16).

$$V_R(t) = \begin{bmatrix} -\beta & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ q(t) \end{bmatrix} + [0] a(t) \quad (26)$$

Entonces la descripción en variable de estado de toda la dinámica es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\omega_o^2 & -2\zeta\omega_o & \frac{-\alpha}{m_t} \\ \frac{\beta}{R_L} & 0 & \frac{-1}{cR_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} a(t) \quad (27)$$

$$V_R(t) = \begin{bmatrix} -\beta & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ q(t) \end{bmatrix} + [0] a(t) \quad (28)$$

2.4.2. ESTIMACIÓN DE ACELERACIÓN REAL

Dado que el modelo propuesto emplea la aceleración real del piezoeléctrico como señal de entrada, y la evaluación experimental captura la aceleración transversal del disco mediante un acelerómetro. Este acelerómetro posee una dinámica propia produciendo una atenuación de las componentes espectrales de las altas frecuencias registradas. Por lo tanto, proponemos la conformación de un estimador de aceleración a partir de la señal registrada por el acelerómetro.

En esta línea, se parte del supuesto de que la dinámica del acelerómetro puede ser caracterizada como una dinámica de primer orden. Esto se sustenta, principalmente, en

que la salida del acelerómetro actúa como un filtro pasivo de tipo RC con una frecuencia de corte teórica de 50 [Hz].

El modelo propuesto para describir la dinámica del acelerómetro utiliza las siguientes variables:

- $q_f(t)$: Estado descriptor del filtro pasa-bajo del acelerómetro
- f_c : Frecuencia de corte filtro pasa-bajo señal de salida del acelerómetro [Hz]
- $a(t)$: Aceleración transversal del soporte [$\frac{m}{s^2}$]

El estado del filtro es descrito por:

$$\dot{q}_f(t) + 2\pi f_c q_f(t) = 2\pi f_c a(t) \quad (29)$$

y la señal de salida del acelerómetro se obtiene de:

$$a_m(t) = q_f(t) \quad (30)$$

La función transferencia asociada a las ecuaciones (28) y (29) es:

$$G_a(s) = \frac{a_m(s)}{a(s)} = \frac{2\pi f_c}{s+2\pi f_c} \quad (31)$$

Se propone el siguiente modelo dinámico como estimador de la aceleración real, denominada aceleración estimada $\hat{a}(t)$ a partir de la señal de salida del acelerómetro $a_m(t)$. El modelo de esta dinámica es:

$$\dot{q}_e(t) = -2\pi f_{est} q_e(t) + 2\pi f_{est} a_m(t) \quad (32)$$

$$\hat{a}(t) = q_e(t) + \frac{1}{2\pi f_c} \dot{q}_e(t) \quad (33)$$

Donde $q_e(t)$ es el estado descriptor del estimador de aceleración y f_{est} es la frecuencia de corte del estimador [Hz].

La función transferencia asociada a esta dinámica resulta:

$$G_{\hat{a}}(s) = \frac{\hat{a}(s)}{a_m(s)} = \frac{f_{est}}{f_c} \frac{s+2\pi f_c}{s+2\pi f_{est}} \quad (34)$$

Si se encadenan las funciones transferencia presentadas en las ecuaciones (30) y (33), es posible ver que la función transferencia para obtener la estimación de la aceleración real a partir de la aceleración transversal del disco es:

$$E(s) = G_a(s)G_{\hat{a}}(s) = \frac{a_m(s)}{a(s)} \frac{\hat{a}(s)}{a_m(s)} = \frac{2\pi f_{est}}{s+2\pi f_{est}} \quad (35)$$

Si la frecuencia de corte del estimador es seleccionada de forma tal que $f_{est} \gg 400$ [Hz], entonces podemos compensar la atenuación del filtro pasa-bajo a alta frecuencia en la señal de salida del acelerómetro. Esto en la práctica lo haremos offline haciendo pasar el

registro de la señal del acelerómetro por la dinámica del estimador (Ver ecuación 25), a través de una implementación en Matlab.

2.4.3. PROPOSICIÓN DE ALGORITMOS PARA LA IDENTIFICACIÓN

2.4.3.1. Algoritmo de búsqueda exhaustiva

En esta sección haremos la descripción de la metodología propuesta para ajustar los parámetros del modelo en función de las señales experimentales. En la *Figura 28*, se representa un esquema del algoritmo de procesamiento de las señales experimentales y las estimadas por el modelo. Durante el proceso de evaluación experimental se ha registrado de manera digital la señal de salida del acelerómetro $a_m(t)$ y la caída de tensión en la resistencia $V_R(t)$. Como el modelo tiene como señal de entrada la aceleración real, la aceleración medida por el acelerómetro pasa por el estimador para compensar su atenuación y así obtener una aceleración real estimada. Esta señal es la termina excitando al modelo.

El modelo estima la caída de tensión en la resistencia $\hat{V}_R(t)$. En base a esta señal $\hat{V}_R(t)$ y la señal $V_R(t)$, se obtiene la señal error de predicción del modelo $e(t)$.

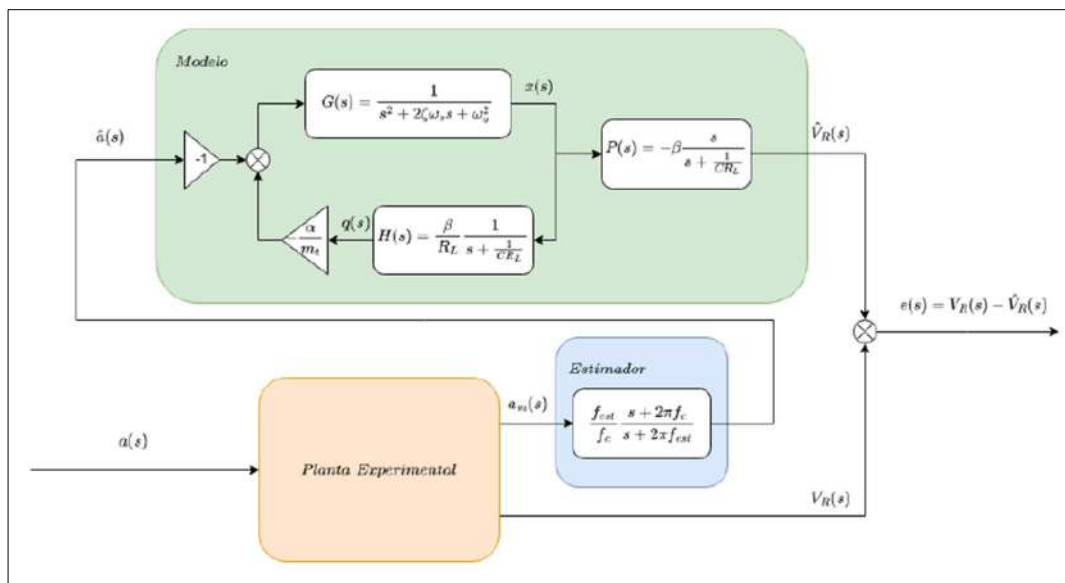


Figura 28: "Diagrama de Identificación"

La metodología que se propone para identificar los parámetros del modelo $(\alpha, \beta, C, R_L, m_t, \zeta, k)$, es una metodología por búsqueda exhaustiva con el objetivo de

minimizar la señal error. Cuando nos referimos a minimizar la señal error es a partir de una norma que a continuación definiremos.

- Paso 1. Se selecciona de manera aleatoria dentro de los rangos permitidos los valores de cada uno de los parámetros del modelo $(\alpha, \beta, C, R_L, m_t, \zeta, k)$. En la práctica se asume que los parámetros C, R_L, m_t son conocidos.
- Paso 2. Se obtiene el modelo numérico de la dinámica del piezoeléctrico a partir de evaluar nuestro modelo con los valores seleccionados para los parámetros. Se verifica que el modelo numérico obtenido sea estable. Para eso se verifica que los polos del modelo numérico se encuentren en el semiplano izquierdo del plano complejo. En caso de inestabilidad se registra dicha configuración de parámetros como inestable y se retorna al Paso 1.
- Paso 3. Teniendo ya computada la señal digital, que es la aceleración real estimada $\hat{a}(nT)$ en un proceso offline, a partir de la señal digital $a_m(nT)$ pasada por el estimador, se procede a obtener la señal digital $\hat{V}_R(nT)$ a partir del modelo numérico obtenido en el Paso 2.
- Paso 4. Se computa la señal digital error $e(nT) = V_R(nT) - \hat{V}_R(nT)$ y luego se computa la siguiente medida $\|e\| = \frac{\sum_{n=1}^N |e(nT)|}{\sum_{n=1}^N |V_R(nT)|}$. Se registra dicha medida $\|e\|$. Y se vuelve al Paso 1.

Este proceso se realiza una cantidad N_{test} de veces y se procede a identificar la configuración de parámetros $(\alpha^*, \beta^*, C^*, R_L^*, m_t^*, \zeta^*, k^*)$ cuya medida $\|e^*\|$ resulte la mínima sobre el $W = (\|e_1\|, \|e_2\|, \dots, \|e_{N_{test}}\|)$.

Este algoritmo se implementó en un conjunto de datos experimentales en 10 bloques de ejecución, cada uno compuesto por 10,000 tuplas de valores para cada uno de los parámetros: α, β, ζ, k .

Tanto la masa total como la resistencia se mantuvieron constantes en el experimento, mientras que la capacidad C se tomó de la información proporcionada en el datasheet del piezoeléctrico (*Ver Tabla 1*).

Los resultados obtenidos mediante este algoritmo permitieron identificar rangos posibles para los parámetros cuyos valores eran desconocidos.

2.5. VALIDACION DEL FENOMENO DE RESONANCIA EN EL PROTOTIPO EXPERIMENTAL

2.5.1. EQUIPAMIENTO UTILIZADO

Buzzer seleccionado

Los elementos del buzzer, se fabrican mediante la unión de chips de cerámica piezoeléctrica sobre chips de metal, los cuales están montados en cavidades resonantes y excitados por circuitos oscilantes. Estos tienen amplias aplicaciones en relojes electrónicos, aparatos telefónicos, juguetes, tarjetas y timbres electrónicos, alarmas de electrodomésticos, sistemas de prueba y control, etc. Se caracterizan por su pequeño tamaño, ligero peso, bajo consumo de energía, agradable sonido, sin chispas, alta confiabilidad y larga vida útil.

Luego de una exhaustiva búsqueda sobre qué tipo de piezoeléctrico podíamos utilizar, se decidió por uno del tipo Buzzer de 50 mm de diámetro cuyas características se muestran en la *Tabla 1*.

MODELO	Dimensiones (mm)				Características		
	$D \pm 0,1$	$d \pm 0,2$	$t \pm 0,03$	$T \pm 0,05$	$f_r(\text{kHz})$	$R(\Omega)$	$C \pm 30\% (\text{PF})$
FT-50T-3A	50	25	0,23	0,45	$3,2 \pm 0,5$	≤ 200	40000

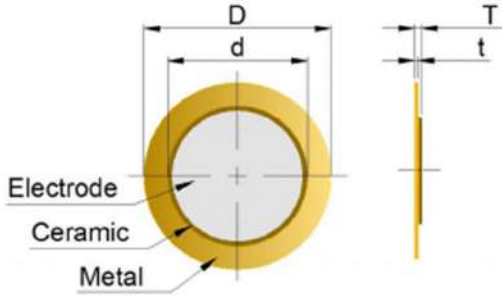


Tabla 1: "Dimensiones y Características del Piezoeléctrico"

Osciloscopio de Rayos Catódicos

En nuestro experimento, se utilizó un osciloscopio Tektronix TDS 1001B de dos canales, como se puede visualizar en la siguiente *Figura 29*, con el objetivo de observar las señales de entrada y de salida en función del tiempo:



Figura 29: "Imagen del Osciloscopio utilizado"

Generador de Funciones

Para este proyecto, se utilizó un generador Topward 8110 (*Figura 30*) cuya función principal fue generar la señal de entrada del tipo sinusoidal.

Para más información puede verse el *Anexo I: Generador de funciones*.



Figura 30: "Imagen del Generador de Funciones"

Amplificador de 2 canales

El amplificador que se utilizó en las experiencias fue un B52 de 800 Watt modelo rc802 (*Figura 31*), adecuado para las potencias manejadas, permitiendo así aprovechar al máximo el altavoz y la fuente de alimentación disponible en el laboratorio de Mecatrónica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNLPam.

Para más información acerca de sus características principales ver en el *Anexo I: Amplificador de 2 canales*.



Figura 31: "Vista superior del amplificador BS52 RC-802"

Protoboard o placa de prueba

Para nuestros experimentos se utilizó la siguiente placa (*Figura 32*) cuyas conexiones se explicarán más adelante:

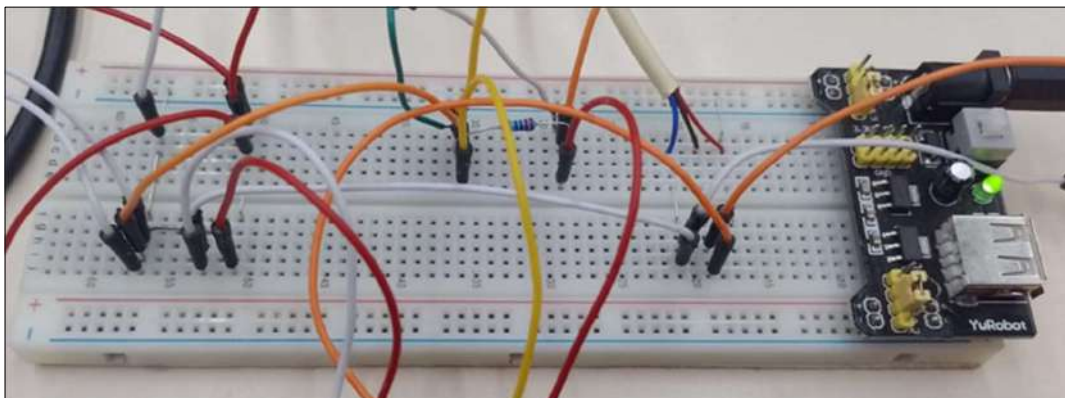


Figura 32: "Placa de Prueba en laboratorio"

Fuente de Alimentación

Marca	Megalite	
Modelo	SFL12300	
Origen	China	
Características eléctricas	Entrada	
	Tensión	220[Vca]
	Frecuencia	50/60[Hz]
	Corriente nominal	2,05[A]
	Potencia	360[W]
	Protección eléctrica	Clase I
	Salida	
	Tensión	12[Vcc]
Corriente máxima	30[A]	

Tabla 2: “Características técnicas de la Fuente de alimentación”



Figura 33: “Imagen de la fuente de alimentación utilizada en el laboratorio”

Acelerómetro

En este proyecto se utilizó el acelerómetro ADXL203 de Analog Devices (*Figura 34*) cuya principal función es medir la vibración y/o aceleración del movimiento del disco piezoeléctrico en la dirección vertical.

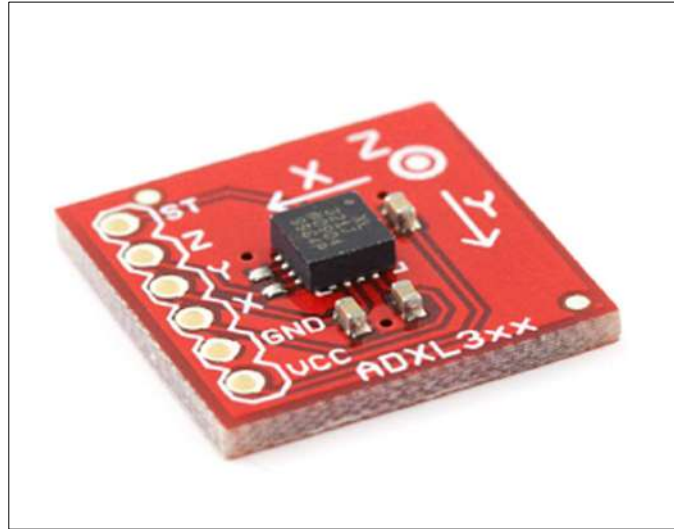


Figura 34: “Imagen del acelerómetro ADXL203 de Analog Devices”

El ADXL203 es un dispositivo de bajo consumo de energía que utiliza una interfaz de comunicación SPI para conectarse con otros dispositivos electrónicos y **tiene un filtro de paso bajo incorporado para reducir el ruido y mejorar la precisión de la medición.**

Para conocer más de sus características técnicas, puede ver el *Anexo I: Acelerómetro* de este mismo trabajo.

Placa adquisidora LabJack U6

El LabJack U6 es un potente adquisidor de datos USB que presenta como principales características: 14 entradas analógicas con un rango de +/- 10V, ganancia ajustable por software y la posibilidad de elegir entre una resolución de 16 o de 18 bits.

La placa adquisidora de datos LabJack U6 (*Figura 35*) es un dispositivo que permite adquirir y recopilar datos de sensores y actuadores. Cuenta con 14 canales de entrada analógicos, 20 canales de entrada digitales y 2 canales de salida digitales, y se comunica con una computadora a través de un puerto USB. Es compatible con diferentes lenguajes de programación y cuenta con características adicionales como protección contra sobrecarga y ESD. Es una herramienta versátil utilizada en aplicaciones industriales, científicas y educativas.

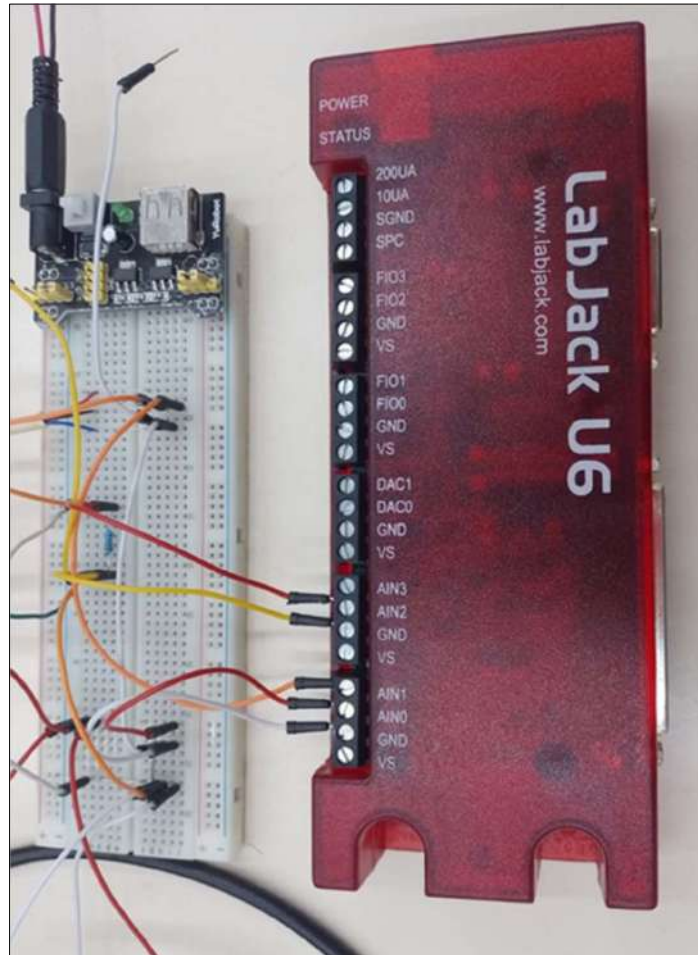


Figura 35: “Imagen de Placa adquisidora de datos LabJack U6”

La descripción del Hardware y Software puede encontrarse en el *Anexo I: Placa adquisidora LabJack U6*.

2.5.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS EXPERIMENTOS

En esta sección se desarrolla la descripción del dispositivo experimental realizado en el laboratorio de Mecatrónica Aplicada. En la *Figura 36* podemos visualizar una imagen del sistema preparado antes de realizar las experiencias.



Figura 36: "Set-up del laboratorio de Mecatrónica Aplicada"

En la *Figura 37* se muestra dicho sistema de transmisión de información el cual describe el siguiente comportamiento:

Como hemos nombrado anteriormente, el generador vibracional entrega una función del tipo sinusoidal al amplificador (*Figura 39*). Éste está conectado a una fuente de 12 [V] y a su vez amplifica dicha señal de entrada. Luego, se conecta la salida del amplificador al altavoz Pioneer de 12" (*Figura 38*). Las bobinas del altavoz se conectan en paralelo.

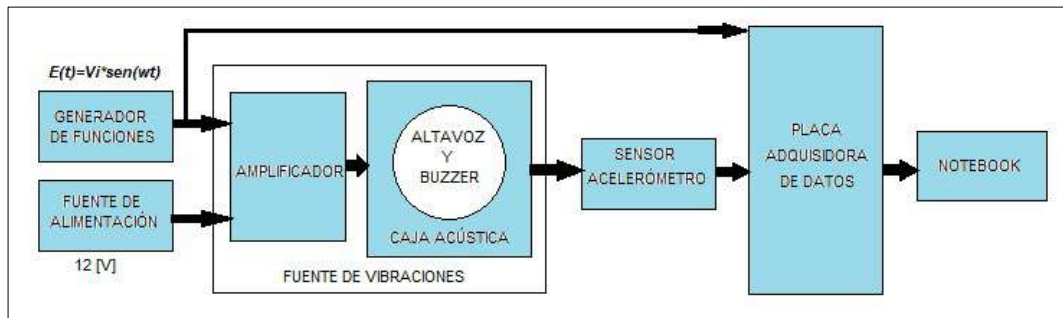


Figura 37: “Diagrama del Set-up experimental”

El modelado dinámico teórico de la fuente de vibraciones, se puede ver en el Trabajo de Tesis Final: “Desarrollo de una Fuente de Vibraciones Controladas”. Dicha fuente está compuesta por el conjunto amplificador-caja acústica-altavoz y para nuestro caso en particular se adicionan los soportes y el piezoeléctrico. Como se trata de una fuente de vibraciones **controladas**, la medida de aceleración que se registra del sistema es por medio de un sensor, el sensor acelerómetro. Este último cuenta con un filtro pasa bajos que reduce el ruido y mejora la precisión de la medición, limitando la frecuencia hasta dónde llega el ancho de banda del sistema.

Para la obtención de los datos, se utiliza una notebook cuyo puerto USB se conecta a la placa adquisidora. Dicha placa cuenta con varios puertos analógicos donde 3 de ellos se utilizan para registrar la **señal chirp** generada por la fuente de señales, la señal de tensión brindada por el acelerómetro y la señal de tensión a la salida del piezoeléctrico. *La **señal chirp** corresponde a una onda de tipo sinusoidal pura, cuya frecuencia varía linealmente con el tiempo.* Para nuestro caso, esta variación se logra manualmente donde el rango de frecuencia se especifica en los Experimentos 1, 2 y 3 que se explicaran más adelante.



Figura 38: "Conexión del amplificador"



Figura 39: "Conexión del Generador de Funciones y Configuración del Amplificador"

Es importante aclarar que los pines de la placa adquisidora de datos se conectan a una Protoboard (*Figura 40*) en la que se interconectan distintos pines, tales como la alimentación de 3,3 [V] necesaria para el funcionamiento del acelerómetro, los pines del acelerómetro (datos, alimentación y GND), los pines del generador de funciones (datos y GND), los pines del osciloscopio para visualizar entrada y salida de señales (datos y GND), los pines del amplificador (datos y GND), los pines del piezoeléctrico y las diferentes resistencias de cargas.

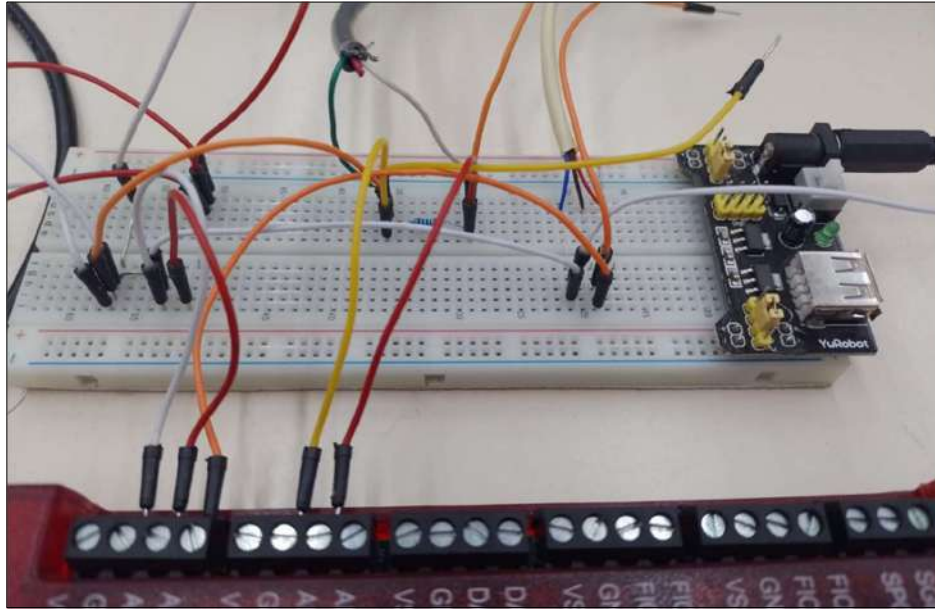


Figura 40: "Protoboard con todas las conexiones"

Se configura el crossover del amplificador en "FULL", de manera que no se aplique ningún filtro y la señal completa, con todas sus frecuencias, se envíe al altavoz. Por otro lado, el bass boost se deja en cero (0) decibelios, para que no se amplifiquen las frecuencias bajas de la señal. En cuanto a la ganancia del amplificador, se analizarán las distintas opciones en la próxima sección y cómo varían en relación a la señal de salida.

En el software de la placa adquisidora LJStreamUD se establece como frecuencia de muestreo 2000 [Hz], rango de tensión en 10 [V] y se guardan los datos en un archivo de texto (.txt).

En una fase inicial, este prototipo experimental se sometió a una serie de experimentos exploratorios con el objetivo de validar la existencia del fenómeno de resonancia pronosticado por el modelo propuesto. Siguiendo esta premisa y considerando que los únicos parámetros previamente conocidos y susceptibles de modificación son la masa total y la resistencia de carga, se llevó a cabo un conjunto de experimentos de exploración controlados. El propósito de estos experimentos fue confirmar la existencia del fenómeno de resonancia tal como lo había previsto el modelo, y, además, observar cómo la variación en la masa y la resistencia afecta la frecuencia de resonancia y la magnitud del fenómeno.

EXPERIMENTO N°1:

En un **primer experimento** se inyectó una **señal chirp**, senoidal con una tensión máxima de 50 [mV] pico a pico. Debido al trabajo de tesis “Desarrollo de una fuente de vibraciones controladas”, sabemos que cuando se genera una función senoidal a una determinada frecuencia, pero con un pico de 50 [mV], el generador de vibraciones se comporta de manera lineal. El rango de frecuencia de esta señal va a estar comprendido entre los 20 y 200 [Hz].

Se registraron 3 señales a una tasa de muestreo de 2000 [Hz].

Señal 1: Se refiere a la señal chirp generada por una fuente de señales.

Señal 2: Se refiere a la tensión a la salida del piezoeléctrico.

Señal 3: Se refiere a la señal del acelerómetro ADX 033.

En esta primera experiencia, se decidió ajustar la resistencia de carga del piezoeléctrico a diferentes valores y repetimos cada prueba dos veces para obtener resultados confiables. Las resistencias utilizadas en los experimentos fueron: 220 [Ω], 1 [k Ω], 10 [k Ω] y 40 [k Ω], con una masa total de 26,7 [g].

La configuración de los canales del LabJack U6 se muestra a continuación:

SEÑAL DE EXCITACIÓN: ENTRADA AIN0.

SEÑAL DE PIEZOELECTRICO: AIN2.

SEÑAL DEL ACELEROMETRO: ENTRADA AIN1.

Se alimentó el acelerómetro con un voltaje de 3,3 [V]. Este dato es de suma importancia ya que nos va a facilitar la conversión de tensión que grabamos, con la verdadera aceleración que el dispositivo mide. Posteriormente, se procedió a guardar los archivos como lo muestra la *Tabla 3*:

Nombre de los archivos de LabJack	Resistencia de Carga utilizada
DATA0-DATA1	10 [k Ω]
DATA2-DATA3	220 [Ω]
DATA4-DATA5	1 [k Ω]
DATA6-DATA7	40 [k Ω]

Tabla 3: “Nombre de los archivos correspondiente a cada Resistencia de Carga”

Utilizando un algoritmo desarrollado internamente, se procesaron las señales capturadas para obtener la respuesta en frecuencia del dispositivo. Esta respuesta se relaciona con la variación de potencial detectada en la resistencia en función de la aceleración transversal, medida por el acelerómetro. Esta representación se muestra de manera visual en la *Figura 41*.

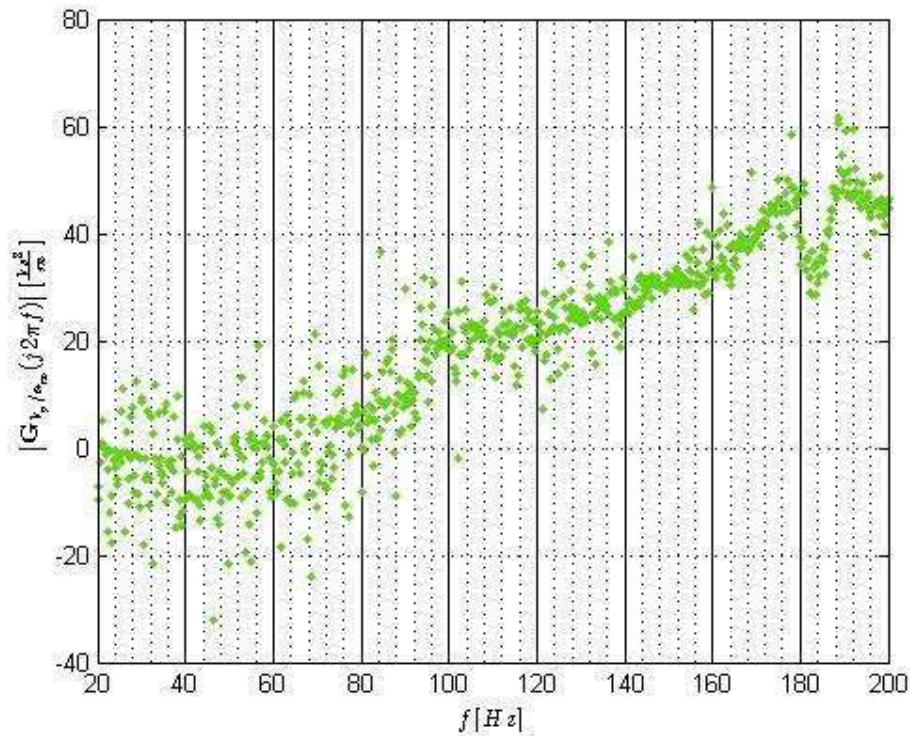


Figura 41: “Respuesta en frecuencia del dispositivo experimental para una resistencia de 10 [k Ω] y una masa de 26,7 [g]”

En la *Figura 41*, se presenta la respuesta en frecuencia para una resistencia de carga de 10 [k Ω] y una masa total de 26,7 [g]. Como es posible observar en dicho rango de frecuencias NO es posible observar un pico de resonancia. A pesar de ello, identificamos una pendiente ligeramente ascendente, lo que nos llevó a la suposición de que el pico podría situarse por encima de los 200 [Hz]. El mismo comportamiento se hizo presente también en los experimentos con resistencias de: 220 [Ω], 1 [k Ω] y 40 [k Ω]. Basándonos en esta observación, tomamos la decisión de llevar a cabo un segundo experimento en el cual ampliamos el rango de frecuencias, abarcando desde 200 [Hz] hasta 2000 [Hz].

EXPERIMENTO N°2:

El objetivo del segundo experimento es el mismo que el anterior, es decir, relevar la respuesta en frecuencia del piezoeléctrico sujeto a vibraciones perpendiculares a su superficie. Procedimos a someter el piezoeléctrico a aceleraciones con una evolución temporal del tipo sinusoidal con una frecuencia comprendida entre los 200 y los 2000 [Hz]. Al igual que la Experiencia N°1, la señal de excitación del generador de funciones es una señal del tipo chirp, con una magnitud máxima de 50 [mV].

Se registraron las señales de excitación del **shaker**, la señal del acelerómetro y la caída de tensión en la resistencia shunt del piezoeléctrico de 40 [kΩ] (nominal). Los canales de registro están ordenados tal como el experimento 1. La frecuencia de sampleo para este caso se llevó a 4000 [Hz]. *Llamamos señal **shaker** al todo el conjunto de dispositivos utilizados para generar vibraciones controladas y evaluar su comportamiento bajo condiciones específicas (generador de funciones, caja, altavoz, acelerómetro, etc.).*

En la *Figura 42*, se presenta la respuesta en frecuencia para una resistencia de carga de 40 [kΩ] y una masa total de 26,7 [g].

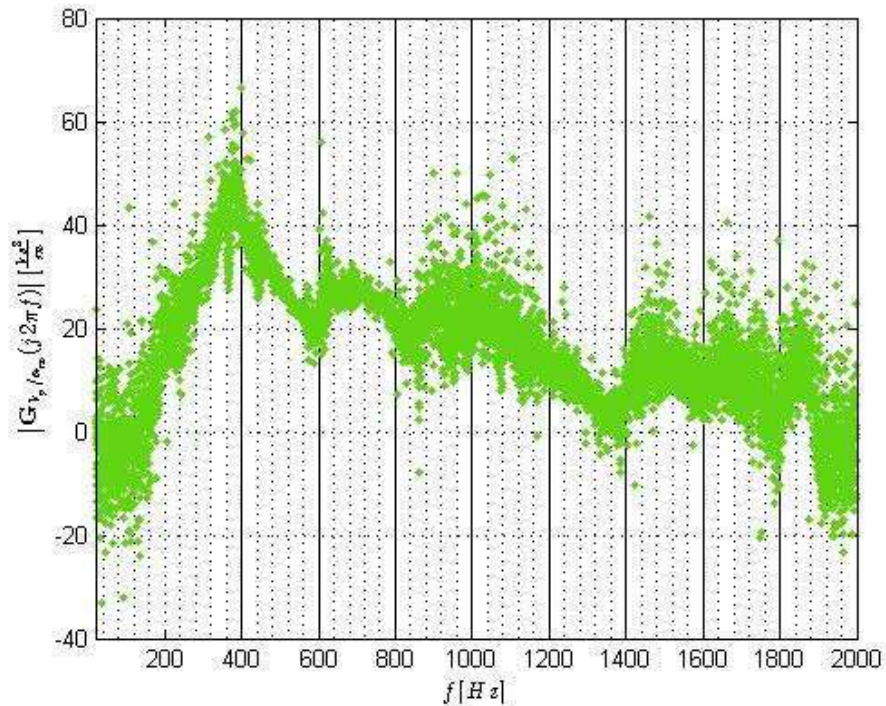


Figura 42: "Respuesta en frecuencia experimental del dispositivo con una Masa:26,7 [g] y RL:40 [kΩ]. Frecuencia de resonancia aprox: 380 [Hz]"

En este gráfico se puede observar fácilmente la aparición del pico de resonancia anteriormente buscado, el cual se ubica aproximadamente a los 400 [Hz].

EXPERIMENTO N°3:

Finalmente, pero no menos importante, se llevaron a cabo cinco ensayos adicionales, esta vez variando tanto la masa aplicada sobre el piezoeléctrico como la resistencia de carga. El propósito de esta serie de pruebas fue analizar cómo se comporta la gráfica de Bode al modificar estos dos parámetros. Las condiciones experimentales, como la frecuencia de muestreo, el rango de frecuencias evaluadas y el registro de canales, se mantuvieron idénticas al Experimento N°2.

<i>Experimento N° 3</i>		
<i>N° de Ensayos</i>	<i>Resistencia de Carga [k Ω]</i>	<i>Masa Total [g]</i>
1	20	26,7
2	20	38,5
3	40	38,5
4	20	52,5
5	40	52,5

Tabla 4: "Ensayos realizados en la Experiencia N°3 donde se decidió variar la masa total y la resistencia de carga"

Conforme se muestra en la *Tabla 4*, en el primer ensayo se procedió a añadir una masa específica al piezoeléctrico, registrando simultáneamente las señales del generador de funciones, la señal del acelerómetro y la caída de tensión en la resistencia shunt del piezoeléctrico. El pesaje se realizó primero para el piezoeléctrico y luego para las piezas adicionales, obteniendo un valor de 11 [g] para el buzzer y de 26,7 [g] para el conjunto completo. Para este conjunto con una masa total de 26,7 [g], se optó por una resistencia de carga de 20 [kΩ]. La *Figura 43*, ilustra la masa adicional aplicada al piezoeléctrico:

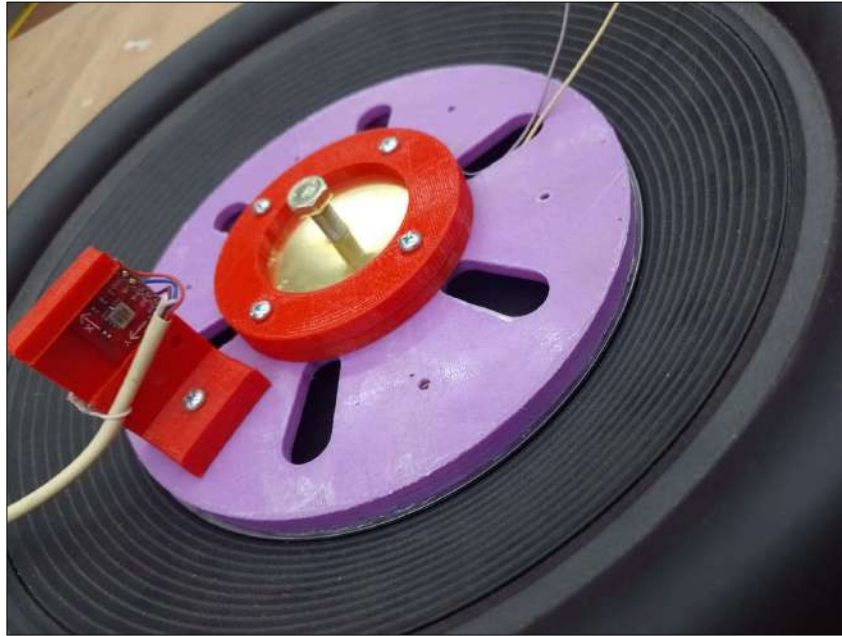


Figura 43: “Primer ensayo con una masa de 26,7 [g]”

En el segundo ensayo, la masa se incrementó a 38,5 [g], manteniendo la resistencia en 20 [k Ω]. Posteriormente, en el tercer ensayo, se mantuvo la masa en 38,5 [g], pero se modificó la resistencia de carga a 40 [k Ω]. La masa adicional puede observarse en la *Figura 44*:



Figura 44: “Segundo y tercer ensayo con una masa de 38,5 [g]”

En el cuarto ensayo, la masa sobre el piezoeléctrico se incrementó nuevamente, variando la resistencia de carga entre 20 [k Ω] y 40 [k Ω]. Este comportamiento se visualiza en la *Figura 45*:

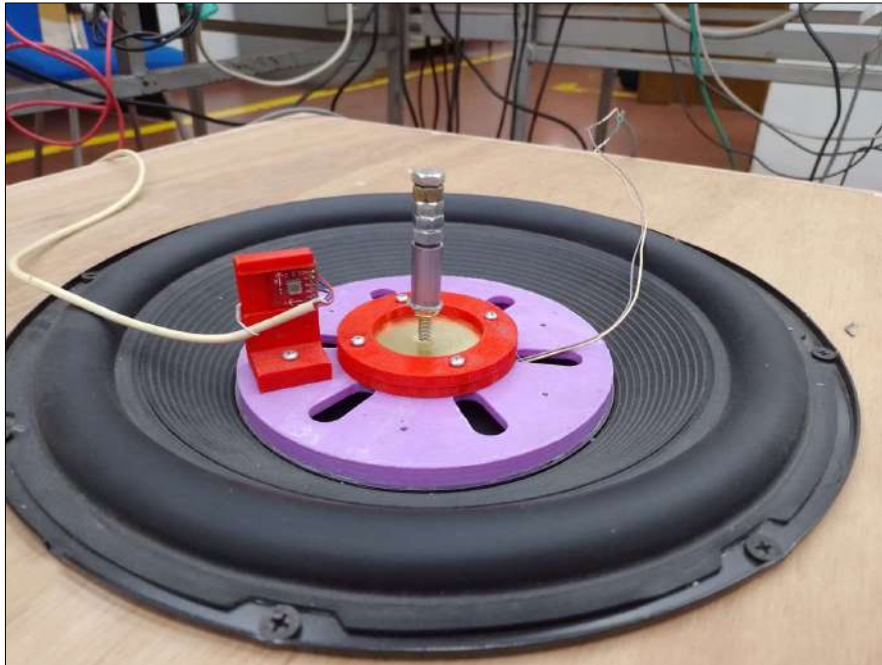


Figura 45: "Cuarto y quinto ensayo con una masa de 52,5 [g]"

Nuevamente se procesaron las señales registradas y se obtuvieron las respuestas en frecuencia del dispositivo en tanto a la diferencia de potencial en función de la aceleración transversal. Para cada uno de los casos detallados en la *Tabla 10* se generaron y graficaron los correspondientes diagramas de Bode (*Ver Figuras 46,47,48,49 y 50*).

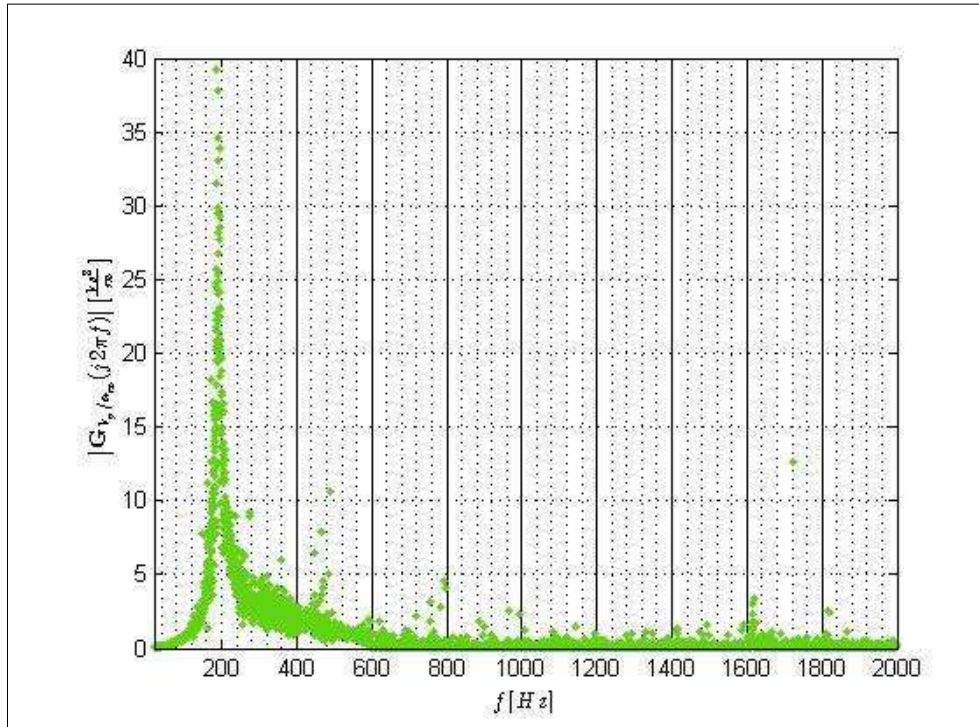


Figura 46: "Respuesta en frecuencia experimental del dispositivo con una Masa:26,7 [g] y RL:20 [kΩ]. Frecuencia de resonancia aprox: 190 [Hz]"

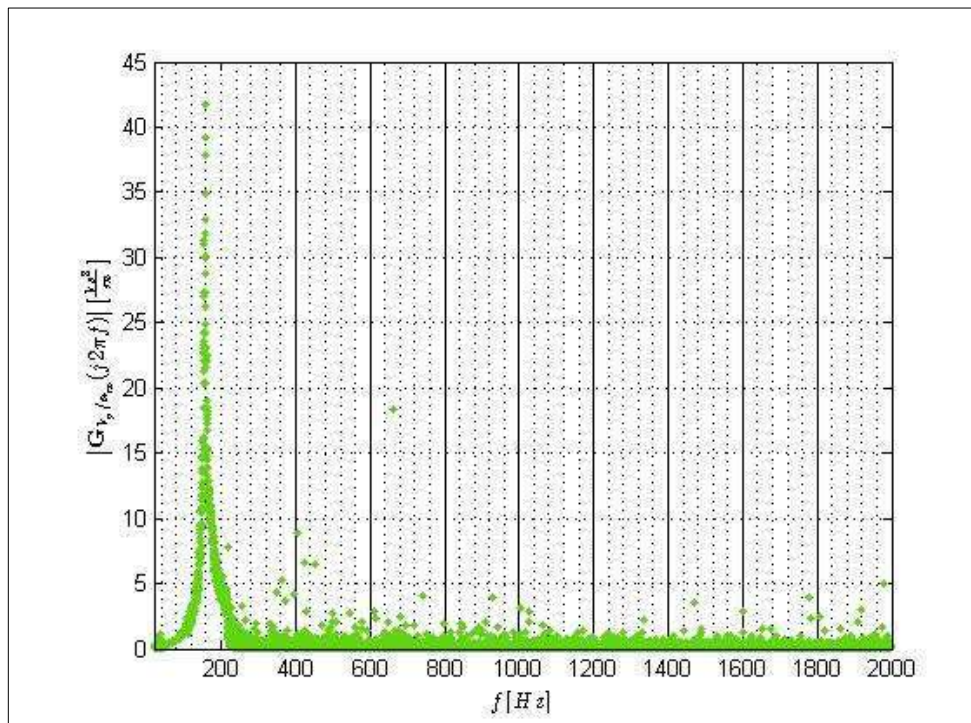


Figura 47: "Respuesta en frecuencia experimental del dispositivo con una Masa:38,5 [g] y RL:20 [kΩ]. Frecuencia de resonancia aprox: 158 [Hz]"

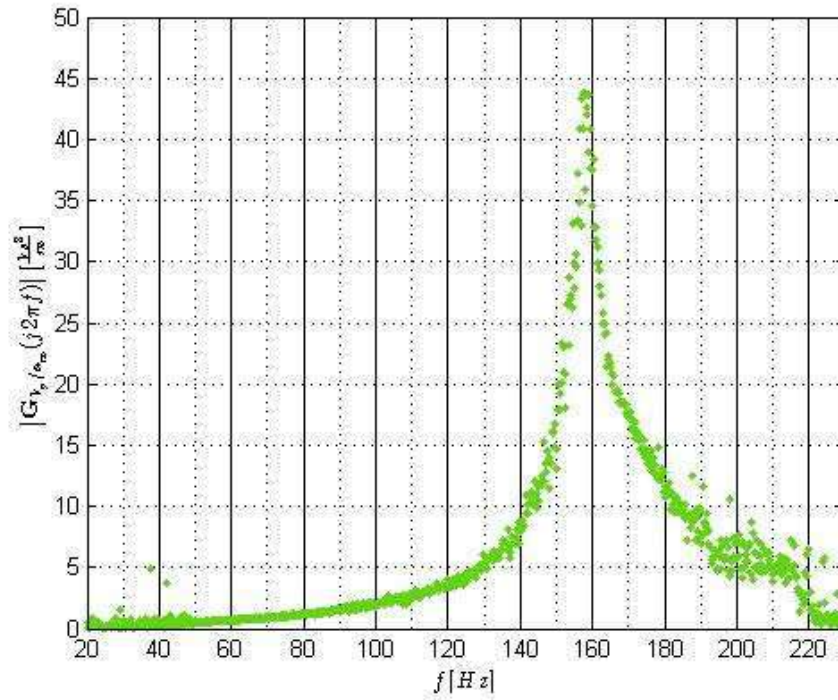


Figura 48: "Respuesta en frecuencia experimental del dispositivo con una Masa:38,5 [g] y RL:40 [kΩ]. Frecuencia de resonancia aprox: 158 [Hz]"

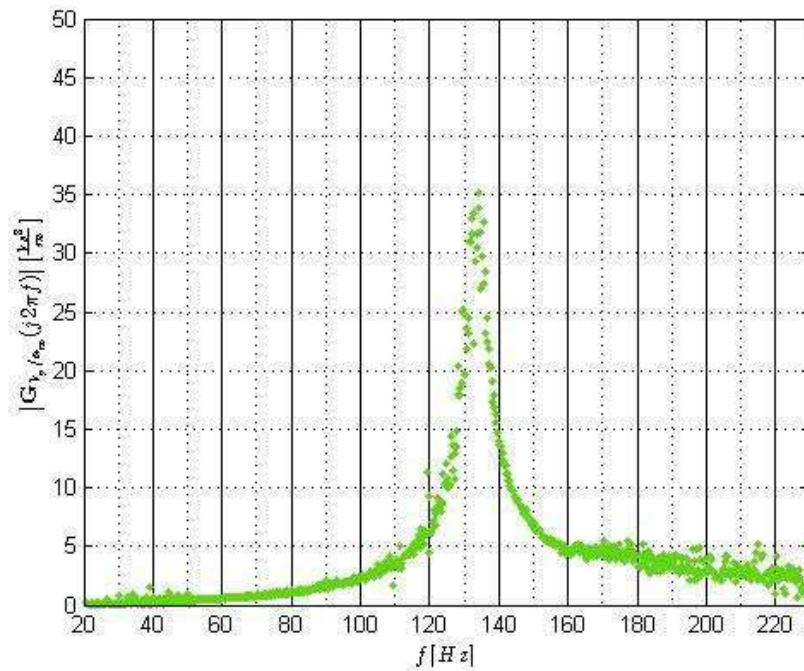


Figura 49: "Respuesta en frecuencia experimental del dispositivo con una Masa:52,5 [g] y RL:20 [kΩ]. Frecuencia de resonancia aprox: 136 [Hz]"

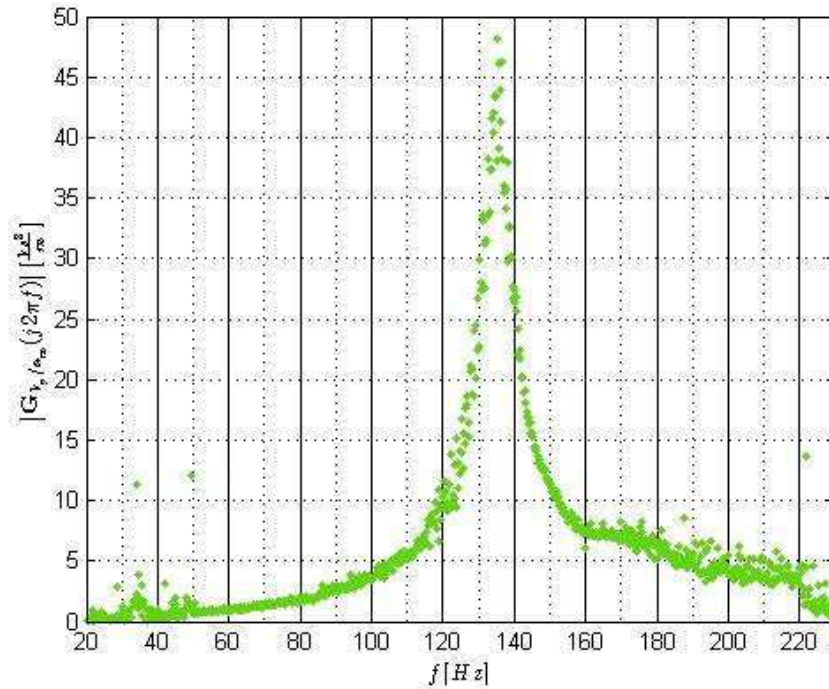


Figura 50: "Respuesta en frecuencia experimental del dispositivo con una Masa:52,5 [g] y RL:40 [kΩ]. Frecuencia de resonancia aprox: 136 [Hz]"

Realizando un análisis comparativo entre las distintas respuestas en frecuencia que se relevaron se puede observar que:

1. El incremento de la masa total produce una disminución en la frecuencia de resonancia del dispositivo. Esto se puede notar en los gráficos anteriores o en la *Tabla 5*:

Experimento N° 3			
N° de Ensayos	Resistencia de Carga [kΩ]	Masa Total [g]	Frecuencia de Resonancia [Hz]
1	20	26,7	190
2	20	38,5	158
3	40	38,5	158
4	20	52,5	136
5	40	52,5	136

Tabla 5: "Ensayos realizados en la Experiencia N°3 donde se puede observar cómo disminuye la frecuencia de resonancia a medida que se aumenta el valor de la masa total"

2. No se observan cualitativamente variaciones en la frecuencia del pico de resonancia ante variaciones en las resistencias de carga (manteniendo la masa). Este punto también puede visualizarse en los gráficos anteriores o en la *Tabla 5*.

3. El incremento de la resistencia de carga trae consigo un aumento de la magnitud del pico de resonancia. Esto puede ver en los gráficos correspondientes a las *Figuras 49 y 50*.

2.6. OBTENCION DE PARAMETROS EXPERIMENTALES Y VALIDACION CON EL MODELO PROPUESTO

2.6.1. SINTONIZACIÓN FINAL DE PARÁMETROS

Basándonos en la información previamente expuesta en la sección anterior, procedimos a generar tuplas de los parámetros del modelo a través del mismo proceso iterativo pero esta vez de forma manual. Es necesario hacer una aclaración: en el algoritmo de búsqueda exhaustiva presentado en la sección anterior, la identificación de parámetros se hizo a partir de datos experimentales sobre el prototipo manteniendo fijas la masa y la resistencia de carga. En este segundo proceso de identificación se procedió a utilizar los datos experimentales de distintas configuraciones de masa y resistencia (*Capítulo 2.5*). Se procedió a minimizar la norma de la señal error, en función de cada conjunto de datos experimentales. Es decir, se computaron tantas predicciones del modelo de acuerdo a las masas y resistencias fijadas.

En la *Tabla 6* se muestran los valores del error entre el modelo propuesto y la data experimental para cada una de los ensayos realizados dentro del Experimento N°3:

Experimento N° 3			
N° de Ensayos	Resistencia de Carga [$k\Omega$]	Masa Total [g]	Error
1	20	26,7	0,2575
2	20	38,5	0,2402
3	40	38,5	0,2541
4	20	52,5	0,243
5	40	52,5	0,2591

Tabla 6: "Valores del error entre el modelo propuesto y la data experimental para cada uno de los ensayos realizados en el Experimento N°3"

Los errores mínimos resultantes de cada experimento proporcionaron los valores desconocidos de $\alpha, \beta, C, \zeta, k$ los cuales se presentan a continuación en la *Tabla 7*:

PARÁMETROS OBTENIDOS	
α	-2,6 E4
β	1 E6
k [N/m]	3,81 E4
ζ	0,011
C [F]	4 E-8

Tabla 7: "Valores de los parámetros obtenidos"

Al observar el gráfico siguiente (*Ver Figura 51*), se puede apreciar claramente cómo el modelo se ajusta a los datos experimentales.

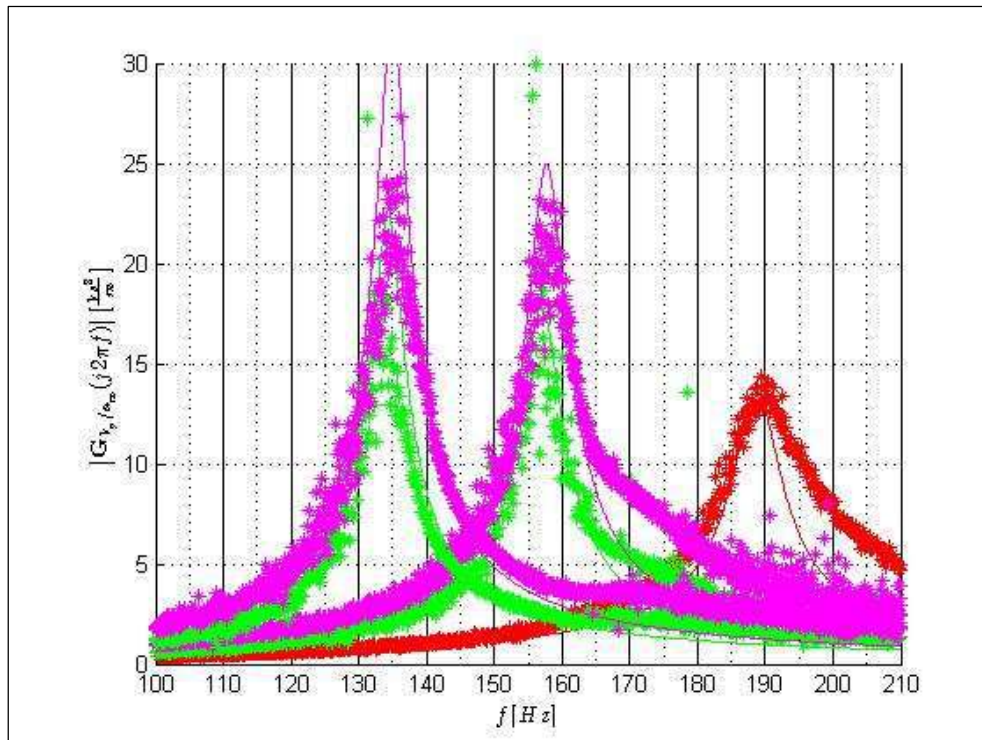


Figura 51: "Magnitud de la respuesta frecuencial teórica y experimental del piezoeléctrico para las distintas configuraciones de masa y resistencia: Experiencia con masa de 26,7 [g] y RL 20 [k Ω] (ROJO). Experiencia con masa de 38,5 [g] y RL 20 [k Ω] (VERDE). Experiencia con masa de 38,5 [g] y RL 40 [k Ω] (MAGENTA). Experiencia con masa de 52,5 [g] y RL 20 [k Ω] (VERDE). Experiencia con masa de 52,5 [g] y RL 40 [k Ω] (MAGENTA)"

En esta figura se pueden observar la respuesta en frecuencia experimental (gráficas con ***) para cada una de las configuraciones de masa y resistencia de carga, aplicadas en el piezoeléctrico y por otro lado se pueden ver las gráficas lineales del modelo propuesto.

En color rojo se representa la Experiencia N°1. En el centro de la figura se representan los gráficos correspondientes a la Experiencia N° 2 (Verde) y 3 (Magenta). Por último, con frecuencias cercanas a los 136 [Hz] se representan las gráficas correspondientes a la Experiencia N°4 (Verde) y 5 (Magenta).

2.6.2. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

El algoritmo de búsqueda exhaustiva propuesto es un proceso aleatorio. Esto implica que no necesariamente el método pueda identificar los parámetros del modelo que mejor ajusten los datos experimentales. En teoría, con una cantidad muy elevada de ejecuciones, aumenta la probabilidad de poder determinar los valores adecuados para los parámetros del modelo. Sin embargo, se ha utilizado este enfoque con el objetivo de identificar tuplas de parámetros cuya medida de error son tendientes a cero. Esto marcó un horizonte para el segundo algoritmo cuyo proceso iterativo se realizó de manera manual.

El algoritmo de ajuste manual fue configurado con el objetivo de que el modelo pueda predecir la variabilidad de la respuesta dinámica del piezoeléctrico ante variaciones de la masa y la resistencia de carga. Como se puede observar en la *Tabla 6* el modelo predice el comportamiento dinámico del piezoeléctrico de manera satisfactoria ante variaciones de masa y resistencia. Entendiendo que una medida de error menor a 1 y tendiente a cero implica que las predicciones del modelo son correctas.

En tanto a la dinámica del piezoeléctrico se observó que el incremento de la masa produce una disminución de la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico, tal como se puede observar en la *Figura 51*. En tanto la resistencia de carga en el piezoeléctrico produce un incremento de la magnitud de pico de resonancia en la medida que la resistencia de carga se incrementa.

En tanto al proceso de conversión de Energía Mecánica en Energía Eléctrica por parte del piezoeléctrico, éste está gobernado tanto por la magnitud de la masa y la resistencia de carga conectada al piezoeléctrico. El modelo predice que esta dinámica posee una frecuencia de resonancia y ésta se ha observado en los datos experimentales. La frecuencia de resonancia está determinada por la masa y la resistencia de carga. Por lo tanto, cuando este cosechador esté excitado con vibraciones transversales con determinado contenido espectral, el solo hará un proceso de conversión significativo de la energía mecánica de las componentes espectrales de la vibración cuya frecuencia esté

muy próxima a la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico. Por ejemplo, el piezoeléctrico sintonizado con una masa de $52,5[g]$ y una resistencia de carga de $40 [k\Omega]$ es capaz de entregar una potencia máxima de $5[mW]$ cuando es excitado con una aceleración sinusoidal de $1 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ a $136[Hz]$.

3. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido constatar el potencial significativo y versátil de la cosecha de energía a través de dispositivos piezoeléctricos. El prototipo desarrollado en base a un disco piezoeléctrico con una masa puntual, ha demostrado ser capaz de promover una conversión de energía útil para generar electricidad de baja amplitud.

El fenómeno de resonancia que se presenta en este cosechador de energía desarrollado, implica sintonizar la magnitud de la masa, en pos de sintonizar la frecuencia de resonancia dentro del rango espectral de las vibraciones mecánicas cuya energía se desea convertir en energía útil.

El modelo matemático, propuesto para describir la dinámica de este tipo de cosechador, ha demostrado ser eficaz a la hora de predecir el comportamiento del mismo bajo distintas configuraciones de masa adicional y resistencia de carga.

En última instancia, esta investigación no solo expande nuestro conocimiento sobre la conversión de energía a partir de vibraciones mecánicas, sino que también contribuirá positivamente en el desarrollo del proyecto de investigación “Desarrollo mecatrónico de sistemas flexibles para la ingeniería de precisión”. Específicamente, el diseño de vigas flexibles piezoeléctricas permite avanzar sobre nuevas técnicas para la obtención de energía a partir de vibraciones mecánicas.

El prototipo desarrollado establece el punto de partida para el desarrollo de soluciones tecnológicas tendientes a la generación de energía eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Consideramos que los cosechadores basados en el fenómeno piezoeléctricos son una de las tantas piezas claves en la búsqueda de un futuro energético más prometedor y responsable.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] F. J. J. Martínez, J. de Frutos, D. Alonso y M. Vázquez, "Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting", *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, vol. 54, no 6, pp. 247-253, 2015.
- [2] M. López, F. Roger, "Estudio de la captación de energía eléctrica a través del efecto piezoeléctrico para aplicaciones de baja potencia", Tesis, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica, Huancayo, Perú, 2022.
- [3] C. M. RODRÍGUEZ, J.A.P. RODRÍGUEZ, M. H. SUÁREZ, "Análisis del estado actual de la cosecha de energía por medio de vibraciones producidas por cargas de viento", *Dominio de las ciencias*, vol. 7, no 4, pp. 126, 2021.
- [4] H. S. KIM, J.H. KIM, J. KIM, "A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration", *International journal of precision engineering and manufacturing*, vol. 12, pp. 1129-1141, 2011.
- [5] N. O. BENCOMO, "ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA DE BAJA POTENCIA PROVENIENTE DE LA COSECHA DE ENERGÍA SOLAR", Tesis Doctoral, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA, 2022.
- [6] Báez, Bagatella, Guadarrama, y Peláez, "COSECHA DE ENERGÍA SOLAR CON USO DE FOTOCELDA Y SU TRANSFORMACIÓN DE LUMINOSA A MECÁNICA EN DIFERENTES HORARIOS", Congreso de Ciencias IMM Centro, Instituto Mexicano Madero Plantel Centro, 2016.
- [7] S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications", *Measurement science and technology*, vol. 17, no 12, pp. R175, 2006.
- [8] N. S. SHENCK, J. A. PARADISO, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics", *IEEE micro*, vol. 21, no 3, pp. 30-42, 2001.
- [9] T. Starner y J. A. Paradiso, *Human Generated Power for Mobile Electronics*, en Low-Power Electronics Design, CRC Press, 2004, pp. 896.
- [10] R. RIEMER, A. SHAPIRO, "Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions", *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 8, pp. 1-13, 2011.

- [11] D. P. ARNOLD, “Review of microscale magnetic power generation”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no 11, pp. 3940–3951, 2007.
- [12] P. D. Mitcheson, P. Miao, B. Start, E. Yeatman, A. Holmes, and T. Green, “MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 115, no 2-3, pp. 523–529, 2004.
- [13] M. ZAROG, “Piezoelectric ceramic for energy harvesting from ambient vibration”, *Energetika*, vol. 67, no 1-2, 2021.
- [14] T. OGAWA, et al. “Energy harvesting devices utilizing resonance vibration of piezoelectric buzzer”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, no 9S1, pp. 09KD14, 2013.
- [15] J. A. BOLAÑOS MARTÍNEZ, “Diseño, construcción y puesta en operación del prototipo: sistema de suministros de energía por paneles piezoeléctricos”, Tesis Doctoral en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, USAC, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016.
- [16] M. T. Penella y M. Gasulla, “A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors”, en *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings IMTC 2007*, pp. 1-5, 2007.
- [17] S. Roundy, P. K. Wright and J. M. Rabaey, *Energy scavenging for wireless sensor networks with special focus on vibrations*, Kluwer Academic Publishers, En Norwell, 2003, pp. 45-47.
- [18] A. Erturk y D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.
- [19] [Online]. Available: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezoeory/piezoelectricity.html>
- [20] A. ARNAU, et al. (ed.). *Piezoelectric transducers and applications*. Berlin: Springer, 2004.
- [21] T. Scalet, J. F. Viana, R. Arthur and F. J. Arnold, "Experimental Evaluation of Piezoelectric Buzzers as Devices for Energy Harvesting". In *Brazilian Technology Symposium*, 2018.

[22] Mishra, Ritendra, Shruti Jain, and C. Durgaprasad, "Analysis of piezoelectric buzzers as vibration energy harvesters" in 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), IEEE, 2016, pp. 1660-1664.

[23] M. ZAROG, "Piezoelectric ceramic for energy harvesting from ambient vibration". *Energetika*, 2021, vol. 67, no 1-2.

[24] A. PREUMONT. Piezoelectric systems. *Mechatronics: Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*, 2006, pp. 95-130.

5. ANEXOS

5.1. ANEXO I

5.1.1. IMPRESORA 3D FDM CREATEBOT 400+



Figura 52: “Impresora 3D utilizada para la adquisición de las piezas”

En la *Figura 52*, podemos observar la impresora Createbot Max 400 2E FDM de doble extrusor, la cual está diseñada para uso profesional con gran capacidad de fabricación ya que tiene un área de impresión de 280 x 250 x 400 [mm].

Puede utilizar materiales de todo tipo, incluidos los que necesitan cama caliente. Posee una Tecnología denominada FMD (Modelado por Deposición Fundida).

El FDM es el método de impresión 3D más sencillo en comparación a la estereolitografía (SLA) o el sinterizado selectivo por láser (SLS). Se basa en tres elementos, a saber, una cama o placa donde se imprime la pieza, una bobina de filamento o material de impresión, y un extrusor. El extrusor de la **impresora 3D FDM** succiona el filamento y lo funde para depositarlo capa por capa sobre la cama de impresión.

Una **impresora 3D FDM** es compatible con numerosos polímeros termoplásticos tales como el PLA o el ABS, pero también con PET, ASA, PVA, nylon y otros muchos

filamentos. Así, esta tecnología 3D es interesante en situaciones en las que se requieren características como la **conductividad, la biocompatibilidad, la resistencia a altas temperaturas o a condiciones extremas.**

La impresión 3D FDM o de deposición por filamento fundido puede emplearse para la producción de piezas en serie y ya es empleada en muchos campos como la industria aeroespacial, la automoción, la arquitectura o la medicina entre otras.

Fue desarrollada por primera vez a finales de 1980 en Estados Unidos y sus siglas en inglés son FFF, Fused Filament Fabrication.

¿Cómo es el funcionamiento de estas impresoras 3D?

El proceso para utilizar una **impresora 3D FDM** comienza cuando la máquina alcanza los 200°C, la temperatura necesaria para la fusión del material. Después el filamento escogido, de 1,75 o 2,85 mm de diámetro por lo general, se extruye sobre la plataforma de la impresora 3D a través de una boquilla que se mueve sobre los ejes (X, Y, Z) hasta que forma el objeto.

Aunque lo más común es que las impresoras 3D FDM tengan una sola boquilla, algunos modelos como los fabricados por *BCN3D* disponen de dos gracias a la *tecnología IDEX* (doble extrusión independiente). Ciertas impresiones pueden requerir utilizar soportes para mejorar la calidad final del resultado. En ocasiones están hechos del mismo material que el resto de la pieza y, otras veces, se opta por emplear materiales solubles en agua o en sustancias como el limoneno.

En este proyecto, antes de emplear la impresora 3D FDM, se llevó a cabo el diseño del modelo mediante el software Free-CAD. A continuación, el modelo se fragmentó en capas utilizando una herramienta conocida como "slicer". En nuestra instancia, optamos por el programa "Cura", el cual se encargó de acondicionar la pieza en 3D para su posterior impresión.

Es importante resaltar que el material empleado en este proyecto es el PLA (Ácido Poliláctico).

En la *Tabla 8 y 9* se podrán visualizar las especificaciones técnicas de la impresora utilizada:

Especificaciones	
Número de Extrusores:	2
Colores:	Azul, Negro.
Tecnología:	FMD (modelado por deposición fundida).
Material del cuerpo:	Metal.
Precisión de Posicionamiento:	Z-eje 0.002 mm / XY-eje 0.01 mm.
Resolución de Impresión:	0.02 - 0.25 mm
Resolución capa:	0.05 - 0.03 mm (ajustable por software)
Dimensión Boquilla:	0.4 mm
Superficie para construir:	280 x 250 x 400 mm
Velocidad de impresión:	hasta 250 mm/s

Tabla 8: "Primera Parte: Especificaciones de impresora 3D FDM"

Dimensiones (L x W x H):	460 x 405 x 685 mm
Tamaño empaque:	530 x 480 x 750 mm
Peso:	Neto 27 Kg / Empaque 27 Kg
Temperatura extrusor:	Hasta 240 °C
Voltaje:	110V
Potencia:	200W
Filamentos:	1.75 mm PLA/ABS/Flexible/PVA/PETG
Temperatura ambiente ideal:	≥25 °C
Sistema Operativo:	Windows, Linux, OSX / Mac
Potencia:	200W
Filamentos:	1.75 mm PLA/ABS/Flexible/PVA/PETG
Temperatura ambiente ideal:	≥25 °C
Sistema Operativo:	Windows, Linux, OSX / Mac
Formato de archivo 3D:	STL, OBJ, DAE, BMP, JPG
Interfaz para impresión:	Tarjeta SD / Cable USB
Software:	Cura

Tabla 9: "Segunda Parte: Especificaciones de impresora 3D FDM"

5.1.2. GENERADOR DE FUNCIONES

Un Generador de Funciones es un aparato electrónico que produce ondas senoidales, cuadradas y triangulares, además de crear señales TTL. Sus aplicaciones incluyen pruebas y calibración de sistemas de audio, ultrasónicos y servo.

Generalmente las aplicaciones de un generador de funciones podemos dividirla, de manera general, en tres:

- **Crear señales:** Señales creadas desde cero para simular, estimular y probar distintos circuitos y dispositivos.
- **Replicar señales:** Ya sea una anomalía, un error o una señal adquirida por un osciloscopio, podemos recrearla utilizando un generador de funciones en nuestro laboratorio para variar sus parámetros y analizarla en un ambiente controlado.
- **Generar señales:** Señales ideales o funciones ya conocidas para utilizarlas como referencia o como señal de entrada para pruebas.

Las características se muestran en la siguiente *Tabla 10*:

Waveforms	Sine, square, triangle, ramp, pulse
Amplitude	20Vp-p, Open [Output protected up to 30V (DC+AC)]
Output Impedance	50Ohms 10% for main and sync
DC Offset	+10V ~ -10V
Duty Control	20:80 (frequency unchanged) continuously variable with 50:50 calibrated switch
V.C.F.	0 to +5V control frequency to 1000:1
Frequency Range	0.1Hz to 2MHz in 7 ranges
Frequency Accuracy	5% of full scale
Distortion	< 1%, 10Hz ~ 100KHz
Rise/Fall Time	< 100nS
Rise Time for Sync Output	< 20nS
Sync Output Level	< 20nS
Power Requirement	115/230 Vac; 50/60Hz single phase
Accessories Supplied	Power cord, hook-up leads, instruction manual
Dimension	10.2"(W) x 3.3"(H) x 10.1"(D)
Weight	3.5 Pounds

Tabla 10: "Características técnicas del Generador de funciones: Topward 8110"

5.1.3. AMPLIFICADOR DE 2 CANALES

Sus características se encuentran en la siguiente *Tabla 11*.

Datos del Amplificador de potencia para automóvil		
1	Marca	B52
2	Modelo	RC-802
3	Canales	2
4	Potencia RMS @ 14.4VDC	
5	Potencia continua @ 2Ω	175 W x 2
6	Máxima Potencia @ 2Ω	400 W x 2
7	Máxima Potencia Puente @ 4Ω	800 W x 1
8	Impedancia mínima del parlante	2Ω
9	Distorsión THD	0.01%
10	Respuesta de frecuencia	20 Hz ~ 20 kHz
11	Sensibilidad de entrada	0.2 V ~ + 6 V
12	Impedancia de entrada	10 kΩ
13	Relación Señal - Ruido	98 dB
14	Separación de canal	50 dB
15	Red Crossover	
16	Filtro pasa bajos	50 Hz ~ 250 Hz
17	Aumento de bajos (Bass Boost)	0 dB / + 6 dB / + 12 dB
18	Filtro pasa altos	100 Hz ~ 2.2 kHz
19	Índice del fusible	30A x 1
20	Medidas largo x ancho x alto	295 x 267 x 61 mm

Tabla 11: "Características técnicas de amplificador"

Debido a que está diseñado para amplificar altavoces dentro de todo el rango audible de frecuencias, este amplificador posee distintas configuraciones para aplicar filtros y acotar el ancho de banda, con el fin de optimizar su funcionamiento. El amplificador cuenta con varios controles de ecualización que le permiten ajustar el sonido a su gusto (*Figura 53 y 54*). A continuación, se explica cómo configurar cada uno de ellos:

- **GANANCIA**

Este control ajusta la ganancia de entrada del amplificador. Para configurarlo correctamente, siga estos pasos:

- Asegúrese de que el volumen de su fuente de audio (por ejemplo, su radio o reproductor de música) esté configurado al nivel que normalmente escucharía su música.
- Gire el control de ganancia hacia la izquierda (en sentido antihorario) hasta el mínimo.
- Encienda su sistema de sonido y ajuste el volumen de su amplificador al nivel deseado.
- Gire el control de ganancia hacia la derecha (en sentido horario) hasta que el indicador de sobrecarga (o-over) parpadee ocasionalmente en los

momentos más fuertes de su música. Una vez que lo haga, gire el control de ganancia ligeramente hacia la izquierda hasta que deje de parpadear.

- **CROSSOVER (X-OVER)**

Esta configuración es utilizada para dividir la frecuencia de audio a reproducir dependiendo del altavoz que se quiera utilizar. Esto permite que cada altavoz se especialice en la reproducción de un rango específico de frecuencia, lo que resulta en una mejor calidad de sonido.

Para configurar este parámetro, en primer lugar, hay que determinar la frecuencia de corte deseada para el sistema de audio. Esta es la frecuencia en la que el crossover dividirá la señal de audio en dos partes: una para las frecuencias bajas (subwoofers, woofers) y otra para las frecuencias altas (altavoces, componentes, drive, etc.). El amplificador cuenta con tres modos de operación: Full range, HPF y LPF, al seleccionar algunos de ellos se tiene:

- **Full Range:** envía la señal de audio completa (todas las frecuencias) a los altavoces.
- **HPF (High Pass Filter):** Este control ajusta la frecuencia de corte del filtro de paso alto. El filtro de paso alto corta las frecuencias más bajas que pueden dañar los altavoces y permite que las frecuencias más altas pasen a través de ellos. Para configurarlo correctamente, gire el control HPF hacia la derecha (en sentido horario) hasta la frecuencia deseada. La frecuencia de corte recomendada según el fabricante es de 80 Hz.
- **LPF (Low Pass Filter):** Este control ajusta la frecuencia de corte del filtro de paso bajo. El filtro de paso bajo corta las frecuencias más altas que pueden distorsionar el sonido y permite que las frecuencias más bajas pasen a través de ellos. Para configurarlo correctamente, gire el control LPF hacia la derecha (en sentido horario) hasta la frecuencia deseada. La frecuencia de corte recomendada es de 250 Hz.
- **BASS BOOST**

Es una función que aumenta selectivamente el nivel de las frecuencias bajas o graves en la señal de audio. Es similar a un control de tono, pero en lugar de ajustar el nivel de todas

las frecuencias bajas y altas, sólo aumenta el nivel de las frecuencias bajas en la señal de audio.

Puede configurarse en diferentes niveles, 0dB, 6dB o 12dB, para permitir al usuario ajustar el nivel de graves según sus preferencias personales. Sin embargo, es importante tener cuidado al utilizar esta función, ya que un aumento excesivo del nivel de graves puede hacer que el sonido se vuelva distorsionado o incluso dañar los altavoces del sistema de sonido.



Figura 53: "Vista lateral izquierda del amplificador donde se realizan las conexiones de alimentación y altavoz"



Figura 54: "Vista lateral derecha donde se realizan las configuraciones y se conecta el generador de señales"

5.1.4. ACELERÓMETRO

Se lo utiliza en aplicaciones como sistemas de navegación inercial, monitores de vibración, sistemas de seguridad automotriz y dispositivos portátiles. Este dispositivo de 2 ejes puede medir la aceleración en dos direcciones perpendiculares y tiene un rango de medición de $\pm 1,7g$, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren alta precisión en la medición de la aceleración.

El acelerómetro utiliza el principio de capacitancia variable, con dos masas suspendidas por resortes en un marco, donde la aceleración en una dirección hace que una de las masas se mueva en relación con la otra, lo que cambia la capacitancia entre ellas. Esta señal eléctrica se convierte en una medición de la magnitud y dirección de la aceleración.

TA=-40°C a +125°C, Vs=5V, Cx=Cy=0,1µF, aceleración = 0 g, a menos que se indique lo contrario. Todas las especificaciones mínimas y máximas están garantizadas. Todas las especificaciones típicas no están garantizadas (*Ver Tabla 12 y 13*).

ADXL203					
Parámetros	Condiciones de prueba	Valores			Unidades
		Min.	Típico	Max.	
Sensor					
Rango de medición ¹	En cada eje				<i>g</i>
No linealidad	% de la escala completa		±0,2	±1,25	%
Error de alineación de paquetes			±1		Grados
Error de posicionamiento	Sensor X a Y		±0,1		Grados
Sensibilidad entre ejes			±1,5	±3	%
Sensibilidad (radiométrica)²					
Sensibilidad en X_{out}, Y_{out}	$V_s = 5V$	960	1000	1040	<i>mV/g</i>
Cambio de sensibilidad debido a la temperatura ³	$V_s = 5V$		±0,3		%
Nivel de desviación de cero g (radiométrico)					
0g voltaje en X_{out}, Y_{out}	$V_s = 5V$	2,4	2,5	2,6	<i>V</i>
Desviación inicial de salida de 0g respecto al ideal	$V_s = 5V,$ $25^{\circ}C$		±25		<i>mg</i>
Compensación de 0g vs. temperatura			±0,1	±0,8	<i>mg/°C</i>
Ruido					
Ruido de salida			1	3	<i>mV rms</i>
Densidad de ruido			110		$\mu g/\sqrt{Hz rms}$

Tabla 12: "Primera parte: Especificaciones de ADXL203 de Analog Devices"

Respuesta en frecuencia ⁴					
Rango de C_x, C_y ⁵		0,00		10	μF
Tolerancia R_{filt}		24	32	40	$k\Omega$
Frecuencia resonante del sensor			5,5		kHz
Autoevaluación ⁶					
Entrada lógica baja				1	V
Entrada lógica alta		4			V
Resistencia de entrada de ST a GND		30	50		$k\Omega$
Cambio de salida en X_{out}, Y_{out}	ST 0 a ST 1	450	750	1000	mV
Amplificador de salida					
Oscilación de salida baja	Sin carga	0,05	0,2		V
Oscilación de salida alta	Sin carga		4,5	4,8	V
Fuente de alimentación V_{DD}					
Rango de voltaje de operación		3		6	V
Corriente de consumo en reposo			0,7	1,1	mA
Tiempo de encendido ⁷			20		ms

Tabla 13: "Segunda parte: Especificaciones de ADXL203 de Analog Devices"

1. Garantizado por la medición del offset inicial y la sensibilidad.
2. La sensibilidad es esencialmente radiométrica con respecto a VS. Para VS=4,75V a 5,25V, la sensibilidad es de 186mV/V/g a 215mV/V/g.
3. Definido como el cambio de salida desde la temperatura ambiente a la temperatura máxima o mínima.
4. La respuesta de frecuencia real está controlada por el capacitor externo suministrado por el usuario (C_x, C_y).
5. Ancho de banda = $1/(2 \times \pi \times 32 k\Omega \times C)$. Para $C_x, C_y = 0,002 \mu F$, el ancho de banda es de 2500 Hz. Para $C_x, C_y = 10 \mu F$, el ancho de banda es de 0,5Hz. Los valores mínimos/máximos no están probados.
6. La respuesta de autoevaluación cambia de forma cúbica con VS.
7. Valores mayores de C_x, C_y aumentan el tiempo de encendido. El tiempo de encendido es aproximadamente $160 \times C_x$ o $C_y + 4 ms$, donde C_x, C_y están en μF .

5.1.5. PLACA ADQUISIDORA LABJACK U6

DESCRIPCION DEL HARDWARE:

- El U6 tiene 3 áreas de E/S diferentes:
 1. Borde de Comunicación: Tiene un conector USB tipo B.
 2. Borde de Terminales de Tornillo: Conexiones convenientes para 4 entradas analógicas, ambas salidas analógicas, 4 E/S digitales flexibles (FIO) y ambas fuentes de corriente. Los terminales de tornillo están dispuestos en bloques de 4, cada bloque consta de Vs, GND y dos E/S. También en este borde hay dos LED. Uno simplemente indica la alimentación, mientras que el otro sirve como indicador de estado.
 3. Borde de DB: Tiene 2 conectores tipo D-sub: un DB37 y un DB15. El DB37 tiene algunas E/S digitales y todas las E/S analógicas. El DB15 tiene 12 E/S digitales adicionales (3 son duplicados de E/S DB37).

En la *Figura 55*, se puede visualizar una imagen del Hardware:

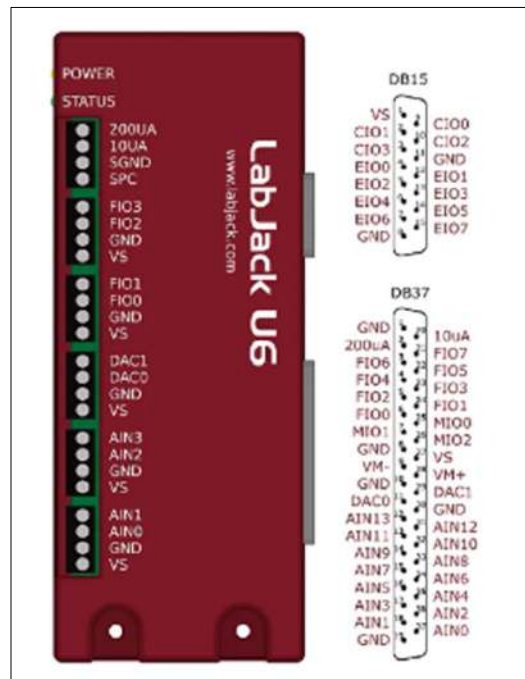


Figura 55: "LabJack U6: Imagen de Entradas y Salidas"

- **USB:** Toda la alimentación y comunicación son manejadas por la interfaz USB.
- **LEDs:** Los LEDs de alimentación y estado transmiten información diferente sobre el dispositivo.
- **GND/SGND:** Todos los terminales de GND son iguales. SGND tiene un fusible térmico de auto-reinicio en serie con GND.
- **VS:** Todos los terminales de VS son iguales. Estas son salidas que se pueden utilizar para suministrar alrededor de 5 voltios.
- **10UA/200UA:** Fuentes de corriente fija que proporcionan $10 \mu\text{A}$ / $200 \mu\text{A}$ a un voltaje máximo de alrededor de 3 voltios.
- **AIN#:** AIN0-AIN13 son las 14 entradas analógicas.
- **DAC#:** DAC0 y DAC1 son las 2 salidas analógicas. Cada DAC se puede ajustar a un voltaje entre aproximadamente 0,02 y 5 voltios con 12 bits de resolución.
- **FIO#/EIO#/CIO#/MIO#:** Estos son los 20 I/O digitales, también conocidos como DIO0-DIO19. Además de las operaciones básicas de I/O digital, algunos de estos terminales también se pueden configurar como temporizadores y contadores (entrada de frecuencia, salida PWM, etc.), serie SPI, serie I2C y serie asíncrona.

DESCRIPCION DEL SOFTWARE:

El fabricante de la placa adquisidora de datos LabJack ofrece diversos programas que se adaptan a las necesidades del usuario en función de la cantidad de señales a registrar y/o inyectar, la frecuencia de muestreo, entre otras características.

En el presente caso, se emplea el software LJStreamUD, un programa que permite adquirir y visualizar datos en tiempo real. Se puede configurar la tasa de muestreo, la resolución y el rango de entrada de los canales de entrada analógicos de la placa, así como seleccionar los canales de entrada que se deseen ver en tiempo real. Asimismo, LJStreamUD puede guardar los datos adquiridos en un archivo de texto o binario para su posterior análisis. Además, cuenta con funciones para controlar la placa y enviar señales digitales a través de los canales de salida de la misma.

Se trata de un software de ejecución inmediata que transmite hasta 16 canales de entrada desde un solo dispositivo, los cuales se muestran en un gráfico como se puede visualizar

en la (Figura 56). Por lo general, se utiliza para capturar más de 100 muestras por segundo.

Para ejecutar el programa y registrar los datos, se deben configurar previamente los canales que se utilizarán (Figura 56), establecer el rango de las tensiones de entrada que se registrarán, elegir la frecuencia de muestreo y seleccionar la carpeta donde se guardarán los archivos, además de dar un nombre al stream de datos registrado. También, se debe configurar el tamaño máximo del archivo que guardará los datos registrados, ya que una vez que alcanza su tamaño máximo, el programa creará un nuevo archivo para seguir guardando los datos que se vayan registrando.

Una vez que se han establecido estas configuraciones, se puede iniciar el registro presionando el botón "Start" y detenerlo en cualquier momento utilizando el botón "Stop". De esta manera, se asegura la correcta grabación de los datos necesarios para su posterior análisis.

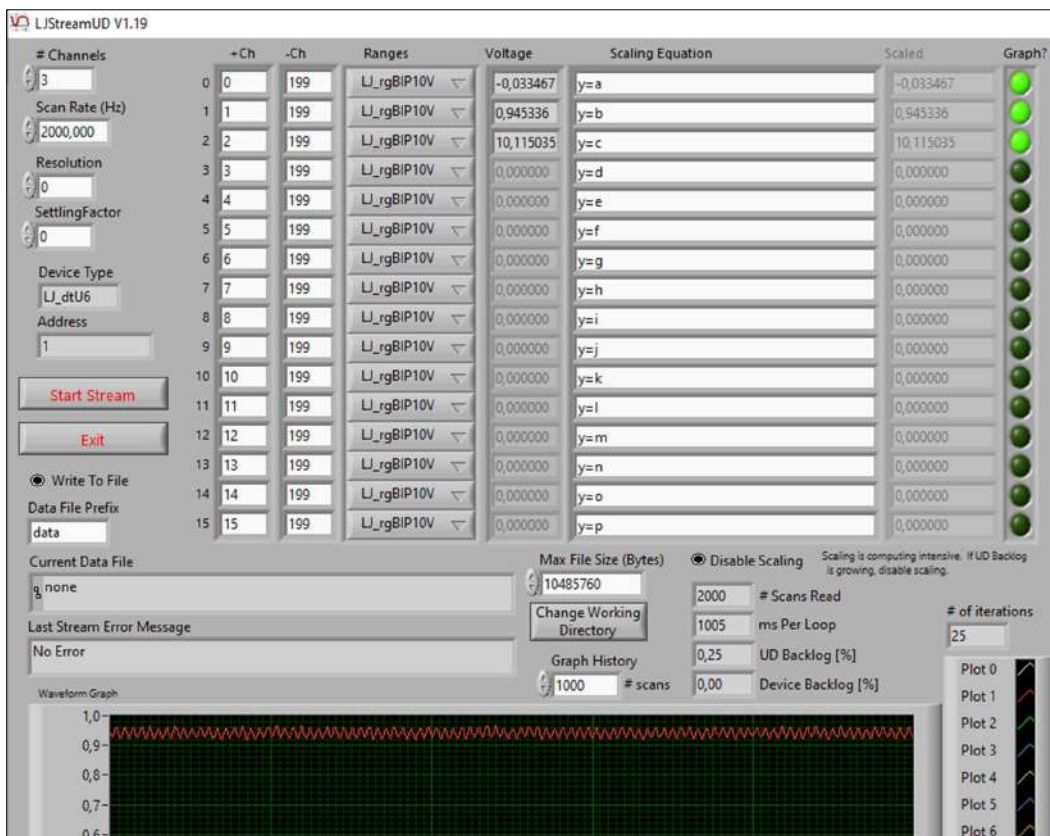
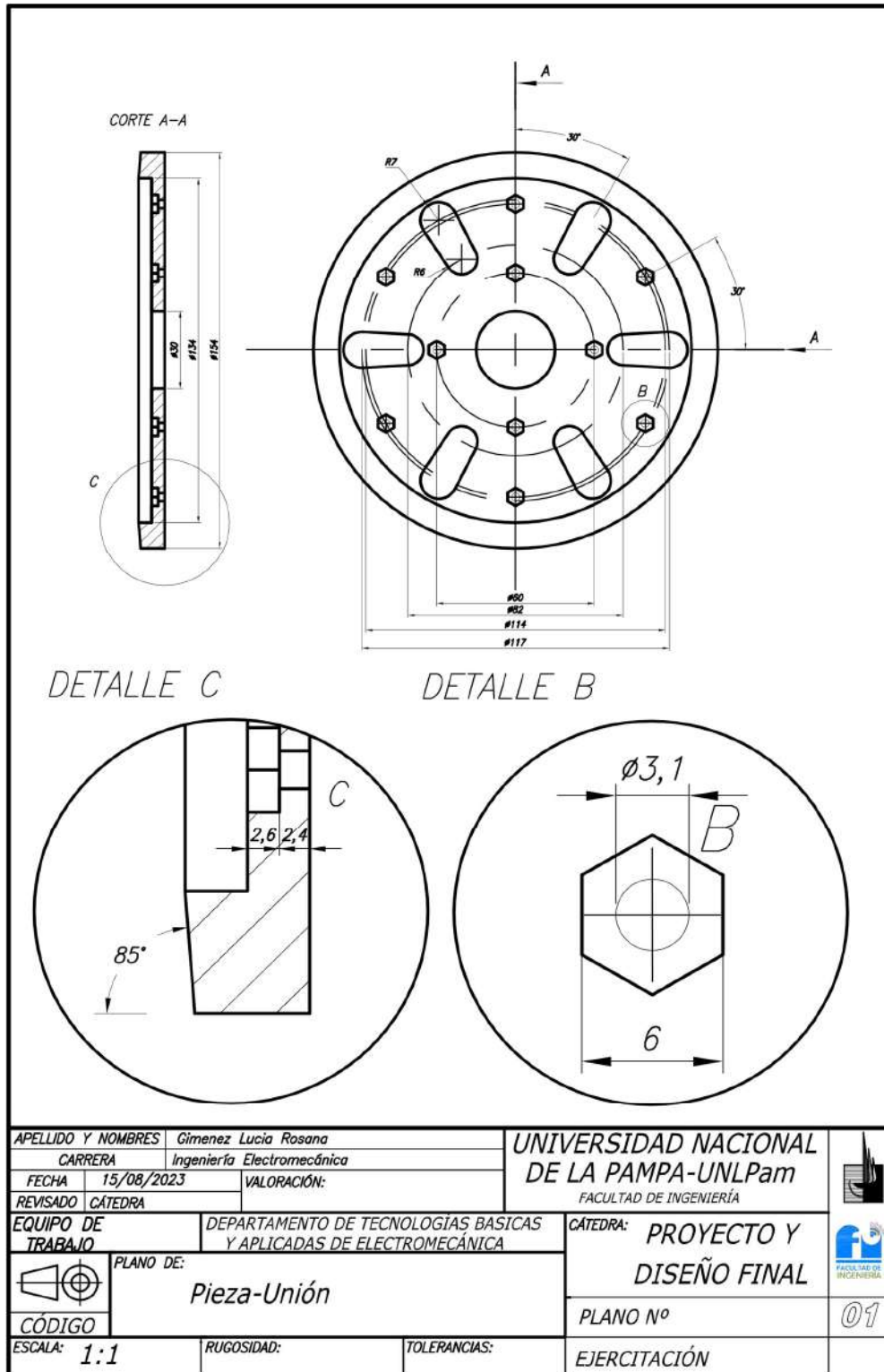


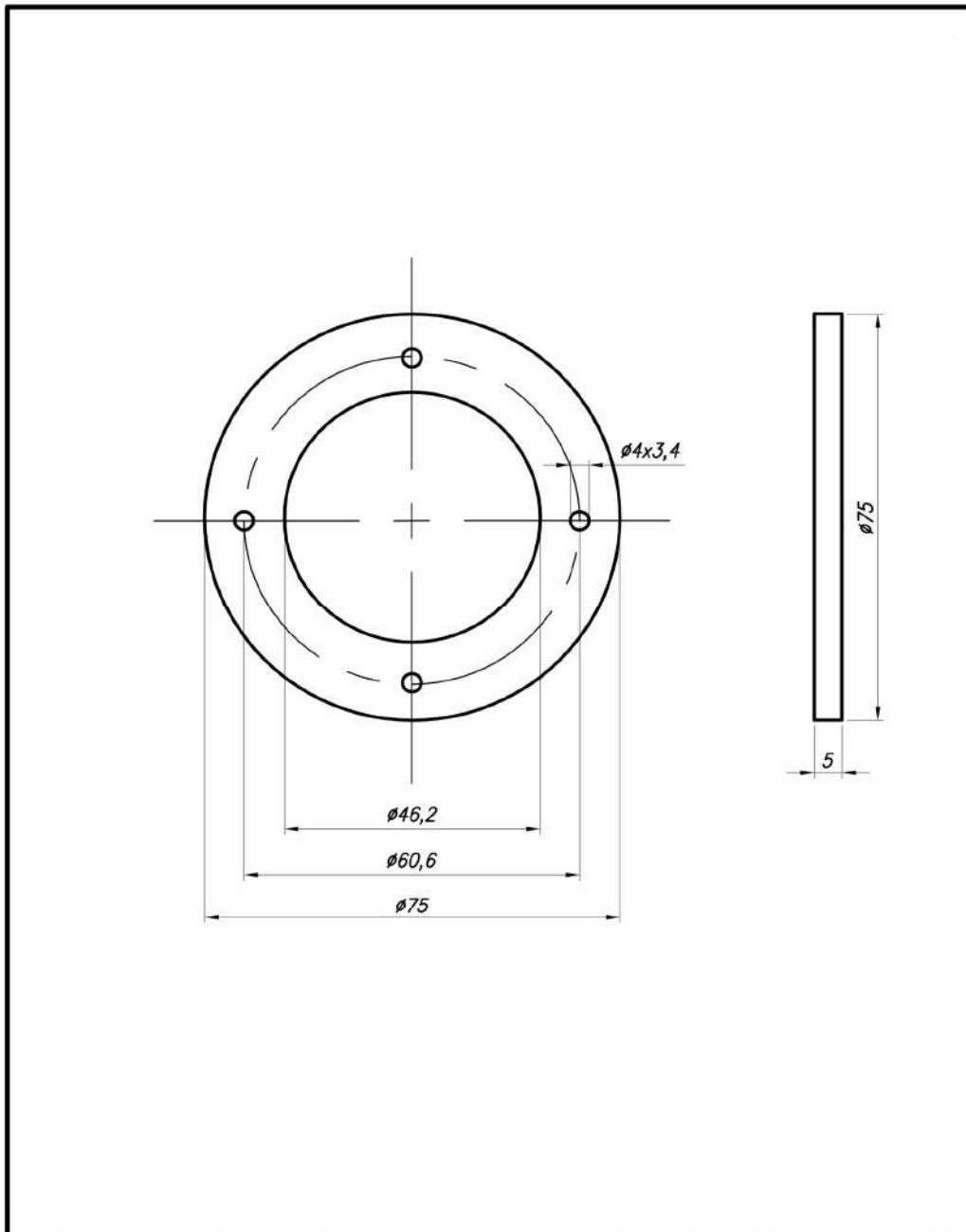
Figura 56: "Configuración de canales en el software LJStreamUD V1.19"

5.2. ANEXO II

5.2.1. PLANO DE FABRICACIÓN: PIEZA-UNION

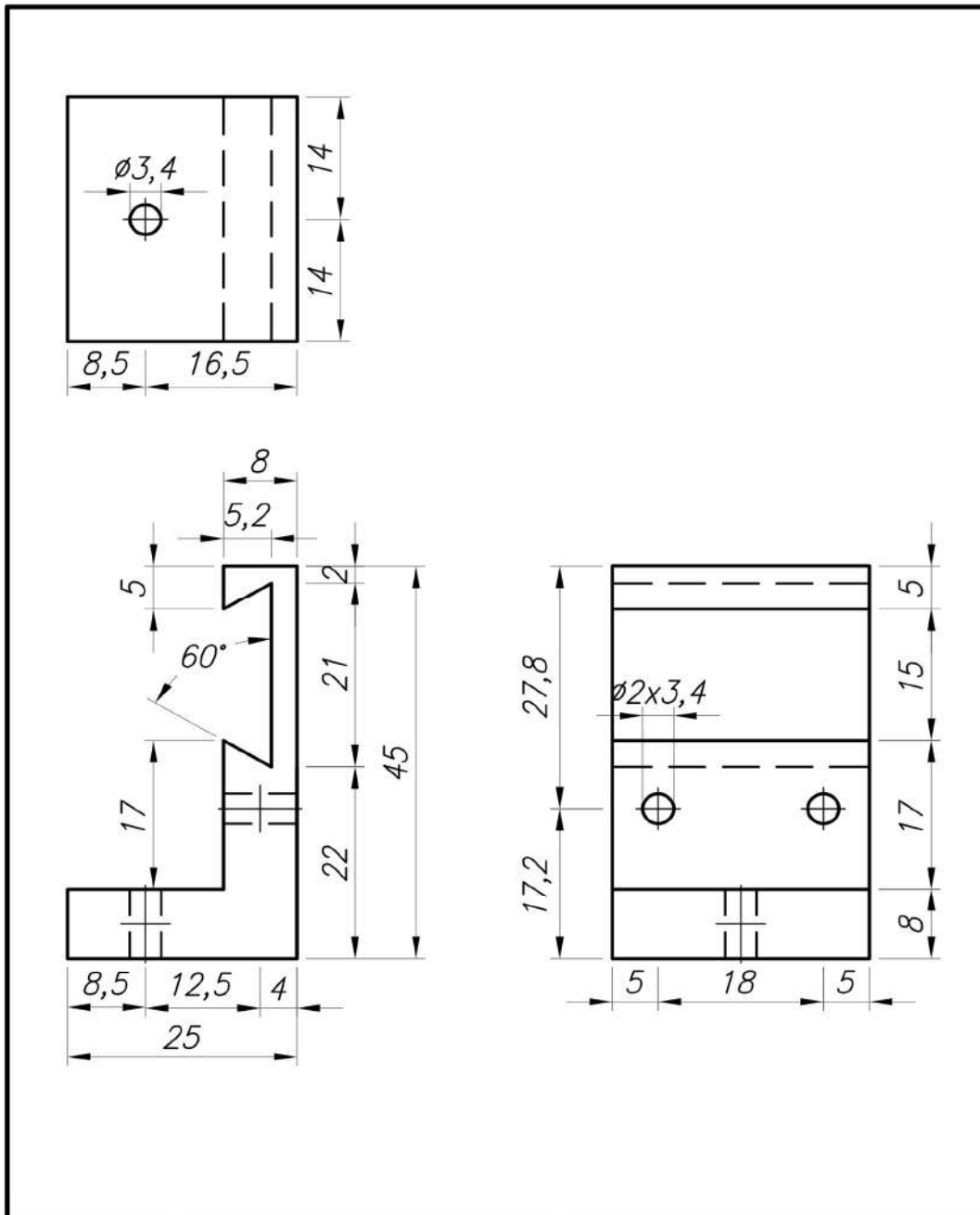


5.2.1. PLANO DE FABRICACIÓN: PIEZA-PIEZOELECTRICO



APELLIDO Y NOMBRES		Gimenez Lucia Rosana		UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA-UNLPam FACULTAD DE INGENIERÍA		
CARRERA		Ingeniería Electromecánica				
FECHA	15/08/2023	VALORACIÓN:				
REVISADO	CÁTEDRA					
EQUIPO DE TRABAJO		DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS BÁSICAS Y APLICADAS DE ELECTROMECAÁNICA		CÁTEDRA: PROYECTO Y DISEÑO FINAL		
PLANO DE:		Pieza-Piezoeléctrico		PLANO N°		
CÓDIGO				EJERCITACIÓN		
ESCALA: 1:1		RUGOSIDAD:		TOLERANCIAS:		

5.2.2. PLANO DE FABRICACIÓN: PIEZA-ACELEROMETRO



APELLIDO Y NOMBRES		Gimenez Lucia Rosana		UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA-UNLPam FACULTAD DE INGENIERÍA			
CARRERA		Ingeniería Electromecánica					
FECHA	15/08/2023	VALORACIÓN:					
REVISADO	CÁTEDRA	DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS BÁSICAS Y APLICADAS DE ELECTROMECÁNICA		CÁTEDRA: PROYECTO Y DISEÑO FINAL			
EQUIPO DE TRABAJO		PLANO DE: Pieza-Acelerómetro		PLANO N°			03
CÓDIGO		ESCALA: 1:1		RUGOSIDAD:			TOLERANCIAS:
EJERCITACIÓN							