



"Vigilada Mineducación"

Cosechador de Energía Piezo-inductivo de Baja Potencia para Vibraciones de Baja Frecuencia

CARLOS ALBERTO VARGAS SANCHEZ

Universidad Autónoma de Manizales

Maestría en Ingeniería

Manizales, Colombia

2019

Cosechador de Energía Piezo-inductivo de Baja Potencia para Vibraciones de Baja Frecuencia

Carlos Alberto Vargas Sánchez

Proyecto de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería

Director:

Héctor Andrés Tinoco Navarro

Línea de Investigación:

Diseño Mecánico y Mecánica computacional

Grupo de Investigación:

Diseño Mecánico y Desarrollo Industrial

Universidad Autónoma de Manizales

Maestría en Ingeniería

Manizales, Colombia

2019

DEDICATORIA

A mi esposa Gloria y mis hijas Daniela y Angélica

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer inmensamente al profesor Hector Andres Tinoco Navarro por su dedicación y paciencia durante este proceso. Por su profesionalismo y conocimiento los cuales aportaron lo necesario para mi formación en la maestría.

Gracias a la Universidad Autónoma de Manizales en cabeza del rector y vicerrectores, a la decanatura de ingeniería, al departamento de mecánica y producción, a la coordinación del programa de la maestría y en general a toda la comunidad UAM que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN

Este proyecto consiste en el desarrollo y evaluación de un cosechador de energía con el fin de encontrar valores óptimos de parámetros mecánicos y eléctricos que maximicen la potencia eléctrica cosechada en bajas frecuencias (entre 0 y 15 Hz) y baja potencia (orden de los mW) . Un dispositivo cosechador de energía fue desarrollado a partir de un Voice Coil Motor (VCM) adaptado con transductores inductivos y piezoeléctricos. Mediante ensayos experimentales de vibraciones, el cosechador de energía fue acondicionado a diferentes escenarios mecánicos y eléctricos que fueron valorados mediante las resonancias mecánicas determinadas en el espectro eléctrico medido en el dispositivo. Diferentes longitudes de vigas y masas fueron añadidas para pruebas dinámicas realizadas en el intervalo de frecuencia anteriormente indicado. Elementos magnéticos fueron adheridos como fuentes externas de variación forzada para estimular las resonancias en frecuencias no correspondientes a las propias del sistema cosechador. Esto con el fin de encontrar valores de maximización de cosecha de energía cuanto la fuente vibratoria estimulaba el dispositivo. A partir de un diseño óptimo determinado, la carga eléctrica del circuito cosechador fue minimizada obteniendo el mayor beneficio eléctrico, como se expone en los resultados del trabajo.

Palabras clave: Cosecha de energía, piezoelectricidad, Voice coil motor, Potencia, generación de energía, energía limpia por vibraciones.

ABSTRACT

This project consists of the development and evaluation of an energy harvester in order to find optimal values of mechanical and electrical parameters that maximize the electric power harvested at low frequencies (between 0 and 15 Hz) and low power (order of the mW). An energy harvesting device was developed from a Voice Coil Motor (VCM) adapted with inductive and piezoelectric transducers. Through experimental vibration tests, the energy harvester was conditioned to different mechanical and electrical scenarios that were valued by the mechanical resonances determined in the electrical spectrum measured in the device. Different lengths of beams and masses were added for dynamic tests carried out in the aforementioned frequency range. Magnetic elements were adhered as external sources of forced variation to stimulate resonances at frequencies not corresponding to those of the harvester system. This in order to find values of maximization of harvest of energy when the vibratory source stimulated the device. From a determined optimal design, the electric charge of the harvester circuit was minimized obtaining the greater electrical benefit, as it is exposed in the results of the work.

Key words: Energy harvest, piezoelectricity, Voice coil motor, Power, energy generation, clean energy by vibrations.

Contenido

	Pág.
Capítulo 1	10
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 MOTIVACIÓN	12
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.4 JUSTIFICACIÓN	17
1.5 CONTEXTO DEL ENERGY HARVESTING.....	18
1.6 OBJETIVOS	26
Capítulo 2	27
2.1 PIEZOELECTRICIDAD	27
2.2 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS	28
2.3 FUNDAMENTOS DE BOBINAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	33
2.4 CIRCUITO PIEZO-INDUCTIVO CON UNA RESISTENCIA DE CARGA.....	36
2.5 FUNDAMENTOS DE VIBRACIONES MECÁNICAS.....	39
2.5.1 Introducción.....	39
2.5.2 Conceptos Básicos.....	40
2.5.3 Vibración Libre De Un Sistema De Un Grado De Libertad.....	43
2.5.4 Vibración De Un Sistema De Un Grado De Libertad Debido A Una Fuerza Arbitraria.	45
2.5.5 Vibración Forzada Libre Y Armónica De Un Sistema De Múltiples Grados De Libertad.	46
2.5.6 Teoría De Análisis Modal De Un Sistema Dinámico Con Un Grado De Libertad	50
2.5.7 Funciones De Respuesta De Frecuencia De Un Sistema Con Un Grado De Libertad.	51
Capítulo 3	56
3.1 DISPOSITIVO COSECHADOR DE ENERGÍA	56
3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL.....	58
Capítulo 4	67
4.1 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1 MODO INDUCTIVO	67
4.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2	72
4.2.1 Resultados del experimento con imanes a 125°	72
4.2.2 Resultados del experimento con imanes a 110°	77
4.2.3 Resultados del experimento con imanes a 95°	80
4.3 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO EN MODO PIEZO INDUCTIVO.....	86
4.4 RESULTADOS DE POTENCIA DEL EXPERIMENTO EN MODO PIEZO- INDUCTIVO	89
Capítulo 5	93
5.1 CONCLUSIONES.....	93
Capítulo 6	95
6.1 ANEXO A	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Principios de trabajo de tecnologías usadas en cosecha de energía	11
Figura 2 Aplicación de la cosecha de energía en redes de sensores WSN	13
Figura 3 Boya que captura energía por el movimiento del mar.....	16
Figura 4 Cosechador de energía utilizando VCM adaptado a la pierna.	17
Figura 5 Diagrama de un cosechador de energía	19
Figura 6 Sistema cosechador de energía aplicado al monitoreo de carreteras.....	21
Figura 7 Materiales utilizados en cosechadores de energía. a) Piezo-polímero PVDF b) Piezo-cerámico PZT.....	21
Figura 8 Dipolos antes y después de la polarización de material piezoeléctrico	28
Figura 9 Modos de acoplamiento electromecánico	30
Figura 10 Transductor piezoeléctrico (material PZT) a) Disco b) Corte extraído del disco y representación eléctrica.....	31
Figura 11 Bobina de cobre. a) con núcleo de aire b) Símbolo	33
Figura 12 Determinación del flujo magnético mediante la mano derecha	34
Figura 13 Líneas del flujo magnético a) imán permanente b) bobina	34
Figura 14 Tipos y tamaños de bobinas de inducción.....	36
Figura 15 Representación esquemática del dispositivo cosechador piezo-inductivo con una resistencia de carga	37
Figura 16 Dos sistemas de vibratorios simples.....	41
Figura 17 Sistemas vibratorios con 2 grados de libertad	42
Figura 18 Sistema simple masa resorte.....	43
Figura 19 Sistema 2DoF	46
Figura 20 Sistema SDoF con una excitación armónica	51
Figura 21 a) Dispositivo cosechador de energía b) Base c) Imán anterior d) Brazo	57
Figura 22 Funcionamiento mecánico del dispositivo a) Movimiento de rotación relativo sobre ejes b) Dimensiones básicas del brazo y esquema eléctrico equivalente de la bobina	58
Figura 23 Detalle del brazo cosechador a) Con masas inerciales b) Dimensiones en milímetros de las masas inerciales	59
Figura 24 Conjunto experimental	60
Figura 25 Entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos de NI USB -6211 de National Instruments	61
Figura 26 Masas en vigas. a) Una masa b) Dos masas c) Montaje en el shaker.....	62
Figura 27 Longitudes en centímetros de las vigas utilizados en los experimentos	62
Figura 28 Base plástica a) con imanes para crear inestabilidad b) montaje del dispositivo apreciando la bobina del mismo	63
Figura 29 Dispositivo cosechador con piezoeléctrico a) con circuito equivalente b) Detalle del montaje del piezoeléctrico.	64

Figura 30 Etapas experimentales	65
Figura 31 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento sin imanes a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d)18 cm e)21 cm	68
Figura 32 Voltaje vs frecuencia de excitación. a) Una masa b) Dos masas	69
Figura 33 . Longitud de la viga con una y dos masas vs a) Voltios por segundo b) frecuencia natural	71
Figura 34 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento con imanes a 125° a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d)18 cm e)21 cm	74
Figura 35 Voltaje por segundo vs frecuencia de excitación con imanes a 125° a) Una masa. b) Dos masas	75
Figura 36 Longitud de la viga con imanes a 125° con una y dos masas vs a) Voltios por segundo b) frecuencia natural.....	76
Figura 37 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento con imanes a 110° a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d)18 cm e)21 cm	78
Figura 38 Resultados experimento con imán a 110° a) Voltios por segundo vs frecuencia para una masa b) Voltios por segundo vs frecuencia para dos masas	79
Figura 39 Resultados experimento con imán a 110° a) Voltios por segundo vs longitud b) Frecuencia natural vs longitud.....	80
Figura 40 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento con imanes a 95° a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d)18 cm e)21 cm.....	81
Figura 41 Resultados experimento con imán a 95° a) Voltios por segundo vs frecuencia para una masa. b) Voltios por segundo vs frecuencia para dos masas	82
Figura 42 Voltaje de salida por experimento para todas las longitudes de viga, una masa	84
Figura 43 Voltaje de salida por experimento para todas las longitudes de viga, dos masas	85
Figura 44 Voltaje por segundo para cada experimento	87
Figura 45 Salida de voltaje experimento piezo-inductivo a) Sin estabilidad con viga de 9 cm. b) Con inestabilidad, viga de 9 cm y ángulo de 125°. c) Con inestabilidad, viga de 15 cm y ángulo de 110°. d) Con inestabilidad, viga de 21 cm y ángulo de 95°.....	88
Figura 46 Potencia obtenida para circuito en serie en el rango de 0 a 10 Hz. a) Sin imanes b) Imanes a 125° c) Imanes a 110° d) Imanes a 95°	90
Figura 47 Potencia obtenida para circuito en serie en el rango de 10 a 15 Hz a) Sin imanes b) Imanes a 125° c) Imanes a 110° d) Imanes a 95°	91

Capítulo 1

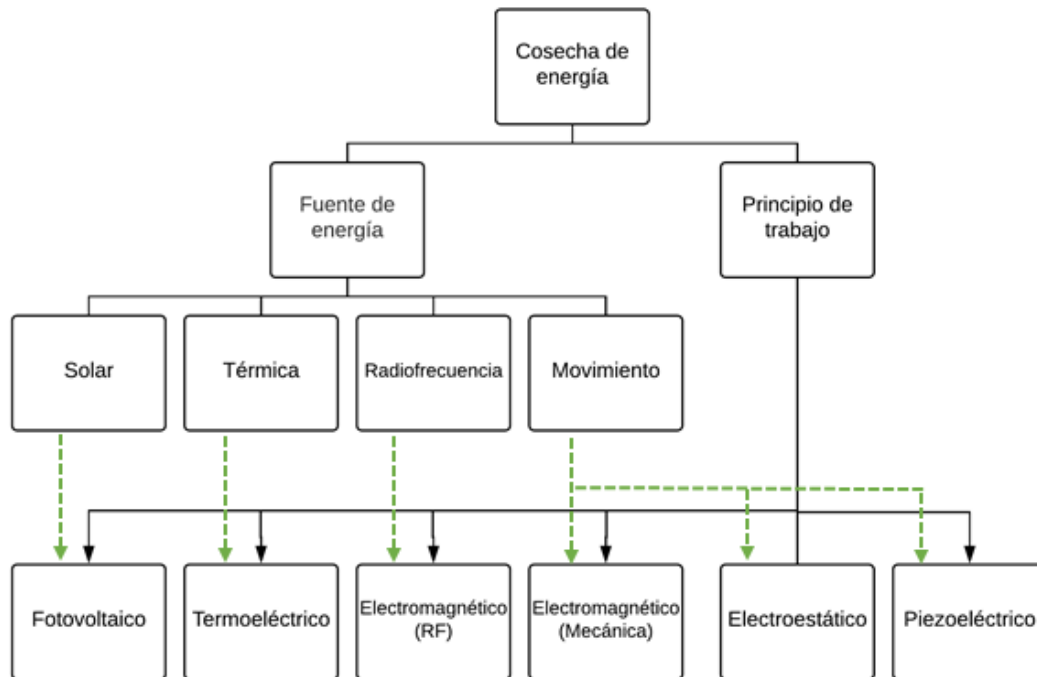
1.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas tecnologías ha facilitado la interacción con el entorno a través del desarrollo de innumerables dispositivos electrónicos. Específicamente, las tecnologías inalámbricas han expandido sus aplicaciones hacia un rango muy amplio de usos en la ingeniería. Por ejemplo diversos tipos de sensores han sido desarrollados para ser conectados a redes con el fin de obtener mediciones in-situ, de algunas variables físicas en aplicaciones destinadas al control de procesos en la industria [1]; bio-monitoreo, sistemas de seguridad, comunicación móvil, monitoreo estructural, entre otras [2]. El uso incremental de estos sistemas en forma acumulativa (sistemas que requiere pequeñas cantidades de energía) incrementan la demanda de energía para mantenerlos en funcionamiento. En las últimas décadas, diferentes alternativas han sido propuestas para generar de forma remota energía aprovechable; con el fin de convertir estos sistemas dependientes en autónomos. Una alternativa importante es la cosecha de energía que puede definirse como aquel proceso mediante el cual la energía proveniente de algunas fuentes renovables puede ser transformada en pequeñas cantidades, almacenada y posteriormente usada.

La energía disponible en el entorno puede ser aprovechada dependiendo de la fuente; ya que la eficiencia en la generación depende del tipo de fuente y del sistema de cosecha de energía. Podemos mencionar algunas fuentes de energía comúnmente usadas y disponibles para estos propósitos; entre las cuales están la energía solar, la eólica, por radiación electromagnética,

térmica y por vibraciones mecánicas [3]. La Figura 1 muestra fuentes de energía y los principios de trabajo de algunas tecnologías utilizadas en la cosecha de energía.

Figura 1 Principios de trabajo de tecnologías usadas en cosecha de energía



Fuente: elaboración propia

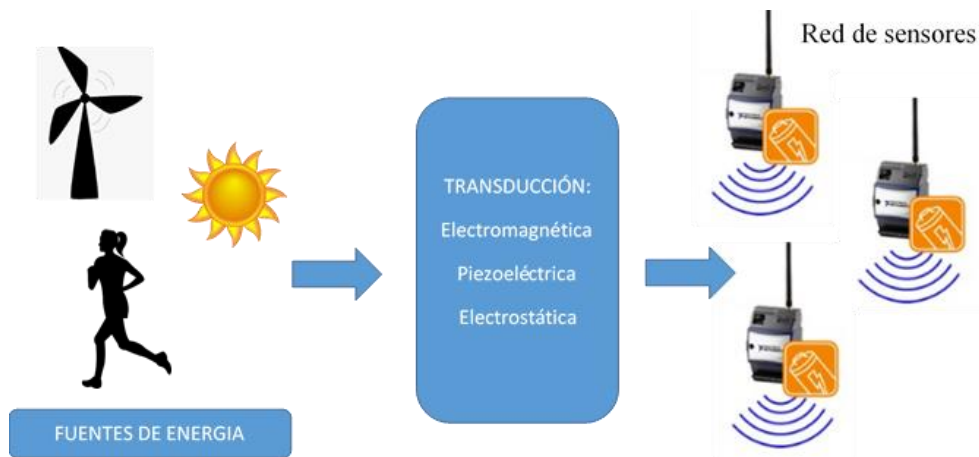
Los dispositivos cosechadores de energía proporcionan energía eléctrica a través de la conversión de energía disponible desde dichas fuentes. Por ejemplo; la energía cinética en forma de vibraciones generada por el movimiento de puentes, edificaciones, olas (ríos y mares) entre otras; pueden ser transformadas en energía eléctrica por diferentes tipos de transducción bien sea electromecánica, electrostática, electromagnética o piezoeléctrica como es mencionado en [4-5]. Una de las formas más eficientes de cosechar energía cinética a partir de vibraciones es mediante el uso de materiales piezoeléctricos; debido a que estos materiales no necesitan estructuras complejas para transformar la energía; y adicionalmente estos presentan una alta sensibilidad a las fuerzas de excitación y capacidad para convertir energía mecánica en energía

eléctrica [6]. Sin embargo, para lograr sistemas eficientes de cosecha de energía; se requiere de un proceso de diseño orientado a maximizar potencia (energía aprovechable) de salida en el sistema y adicionalmente minimizar el consumo en el circuito de carga generador.

1.2 MOTIVACIÓN

Los recientes avances en diferentes tipos de dispositivos electrónicos, como por ejemplo sistemas micro electromecánicos (MEMS) y redes de sensores inalámbricos (WSN), ha permitido un creciente campo de aplicaciones que facilitan el trabajo de diagnóstico y monitoreo en áreas específicas que así lo requieran, sin embargo, estos sensores requieren de energía permanente que es suministrada por baterías químicas. No obstante, la energía de las baterías es finita y por lo tanto deben ser cargadas constantemente [7]. El funcionamiento continuo de estos sistemas requiere de una mayor autonomía en aplicaciones remotas, ya que estos dependen de un suministro permanente. Una WSN se compone de un gran número de nodos con sensores que tienen capacidad de procesamiento y de comunicación inalámbrica [8]. Una fuente de energía alimenta cada nodo; y para la mayoría de aplicaciones se convierte en una tarea compleja el recambio de baterías debido a la localización de los nodos y debido al gran número de estos que presenta el sistema [9]. Estas redes pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones industriales, domóticas, entornos militares, detección ambiental, monitoreo, entre otras. La limitación que presenta el uso de las WSN ha permitido que sistemas cosechadores de energía puedan ser una solución a las innumerables aplicaciones [10].

Figura 2 Aplicación de la cosecha de energía en redes de sensores WSN



Fuente: elaboración propia

Podemos mencionar algunos casos donde sistemas WSN podrían requerir de autonomía en su funcionamiento. En el monitoreo de la integridad estructural; las estructuras son vigiladas de forma permanente a través de sensores remotos [11]. Esto permite aplicar técnicas de diagnóstico y pronóstico de servicio de la estructura. Otra aplicación es observada en el monitoreo de corrosión en las estructuras de concreto reforzado; el cual utiliza sensores alimentados con baterías, lo que dificulta en muchas ocasiones una operación continua debido al recambio de las mismas. En la referencia [12] los autores han sugerido utilizar energía de la corrosión para alimentar dispositivos cosechadores y resolver el problema de la baterías. En el ámbito militar, los equipos de telecomunicaciones usados en las campañas militares dependen de alimentación eléctrica para la recarga de los dispositivos. En el área de la salud, diferentes tipos sensores portátiles son usados para el monitoreo de algunos parámetros fisiológicos, como; ritmo cardíaco, temperatura corporal, entre otros. Esta área podría potencializar soluciones basadas en la cosecha de energía, haciendo que este tipo de sensores operen de manera autónoma [13]. En la industria del gas, el uso de sensores inalámbricos detectores de gases tóxicos y combustibles ha permitido la seguridad de los trabajadores en sitios confinados [1].

En Colombia se pretende a largo plazo, empezar a incorporar tecnologías más limpias con el fin de propiciar mejores usos de los recursos y aprovechar mejor el sector energético, y una de las mayores preocupaciones de los países como el nuestro es el aumento de la producción de dióxido de carbono lo cual está impactando y acelerando cada vez más el cambio climático [14]. En Colombia se muestra una poca participación de fuentes renovables diferentes que mitiguen el impacto ambiental [15], según los autores, muchos de ellos debido a falta de recursos financieros, altos costos de la tecnología y falta de consolidación de estrategias de sostenibilidad. Es importante que surjan nuevas tendencias e iniciativas que promuevan la utilización de tecnologías que permitan aprovechar muchas de las fuentes renovables de energía [16]. La realización de estudios que nos permita determinar los parámetros óptimos donde se maximice la cosecha de energía en los dispositivos cosechadores, es un factor clave para el adecuado desarrollo de la tecnología del *energy harvesting* de forma masiva que promueva la generación de energía en grandes cantidades.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los fenómenos naturales incluyen fuerzas que pueden ser generadoras de energía, las cuales podrían ser aprovechadas para ser transformadas en forma de energía disponible. Dentro de las fuentes primarias naturales encontramos solar, geotérmica, eólica, nuclear, combustibles fósiles, entre otras [17]. Actualmente existen plantas generadoras de energía que transforman la energía desde fuentes primarias a energía eléctrica consumiendo cada vez más los recursos renovables [18]. Estas plantas requieren infraestructuras complejas, ya que necesitan de diferentes tecnologías para la captura y conversión de la energía. Podemos mencionar algunas plantas usadas en la generación de energía de alta potencia; e.g. centrales nucleares,

termoeléctricas, geotérmicas, solares, eólicas, etc. La energía generada en estas centrales satisface el consumo parcial de la demanda mundial de energía.

Algunas fuentes primarias generan movimientos de baja frecuencia (e.g. olas, viento etc.) y otras fuentes secundarias a través de transmisibilidad, producen vibraciones. Algunos ejemplos de estas vibraciones son generadas por los movimientos de edificaciones, de puentes, de autos, del cuerpo humano, entre otros [19]. Estos movimientos producidos en menor escala son aprovechados con sistemas de captura de energía. La energía disponible de dichas fuentes puede ser obtenida de diversas formas; sin embargo, la eficiencia es un factor determinante para el aprovechamiento in situ. Diferentes enfoques han sido usados para este propósito; tales como optimización electromecánica, desarrollo de nuevos materiales, configuración funcional, entre otros; con el fin de lograr un aprovechamiento óptimo de la energía disponible [20]. Este proceso; en el que la energía es capturada en pequeñas cantidades, almacenada y posteriormente utilizada se llama cosecha de energía o captación de energía.

Diferentes dispositivos electrónicos como la tecnología móvil, sistemas de comunicación portable, sistemas de monitoreo de estructuras, redes de sensores inalámbricos, dispositivos biomédicos, presentan una dependencia funcional con respecto a la energía, ya que las necesidades energéticas de los dispositivos de baja potencia son suministradas por las baterías químicas. Pero la vida de las baterías es finita y es sobre todo difícil de recargarlas sin ningún suministro estacionario o fijo [9]. Esto es un gran problema cuando los dispositivos se encuentran en ambientes de difícil acceso. Para superar el desafío de provisión de energía remotamente; la cosecha de energía ha mostrado diferentes soluciones basadas en dispositivos resonantes que aprovechan los movimientos de las fuentes vibratorias [21].

En [22] los autores utilizan un dispositivo cosechador de energía basado en materiales piezoeléctricos aprovechando las vibraciones generadas por las olas del mar, como se muestra en la Figura 3.

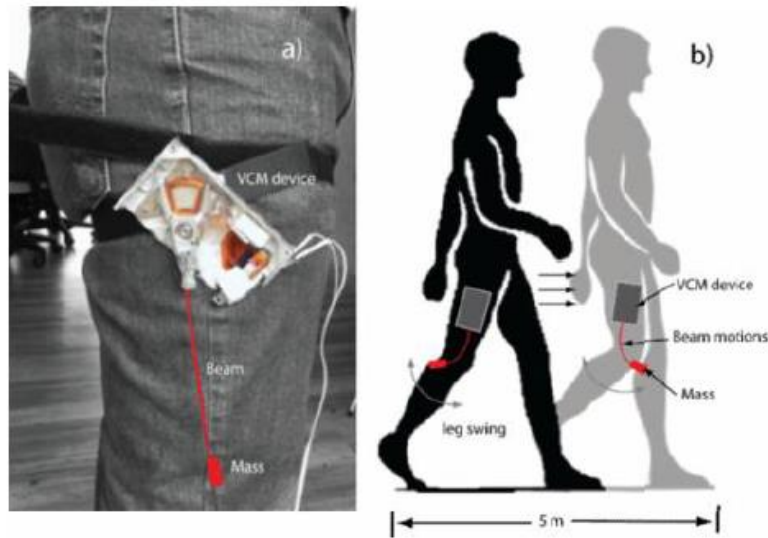
Figura 3 Boya que captura energía por el movimiento del mar



Fuente: Tomado de [22]

Un tipo de cosechador vibratorio lineal se basa en una viga empotrada que se deforma en la base por causa de una vibración; sobre la cual un material transductor es adherido para generar carga eléctrica [3]. En la referencia [23] se presentó una serie de dispositivos cosechadores de energía basados en este principio. Los resultados mostraron que la energía obtenida por materiales piezoeléctricos es significativamente alta comparado con otros materiales. Adicionalmente, [24] utilizó varios diseños del dispositivo para mejorar la cosecha de energía, demostrando que la potencia de salida puede optimizarse incluso por debajo de la frecuencia de resonancia de la viga [23]. Otros trabajos, como el de [25] muestran que una viga con una masa de prueba en el extremo aumenta la densidad de potencia obtenida cuando vibraciones de baja frecuencia son aplicadas. En [26] se hicieron pruebas con el fin de capturar energía proveniente del movimiento humano a través de un cosechador utilizando un VCM reciclado de un disco duro (HDD), ver Figura 4.

Figura 4 Cosechador de energía utilizando VCM adaptado a la pierna.



Fuente: Tomado de [26]

Los autores en [7] también lograron aumentar la salida de potencia y el voltaje mediante el arreglo de varias placas piezoeléctricas en una viga. Existen diferentes formas de optimizar la densidad de potencia ya que estos dispositivos son basados en la resonancia del sistema [27], sin embargo esto depende del sistema cosechador y de sus aplicaciones. Actualmente, grandes desafíos en el diseño de sistemas de generación están siendo encontrados para lograr verdaderas aplicaciones.

Este proyecto pretende obtener solución a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo maximizar la cosecha de energía capturada en una fuente vibratoria de baja frecuencia mediante un dispositivo cosechador de energía piezo-inductivo?

1.4 JUSTIFICACIÓN

La importancia de la cosecha de energía en diferentes aplicaciones, radica en el aprovechamiento natural de fuentes renovables y en aplicaciones remotas, en entornos donde el

suministro de energía eléctrica se hace difícil o prácticamente nulo, o en situaciones donde con la crisis energética, se hace primordial la minimización del consumo eléctrico. La captura de pequeñas cantidades de energía, acumulada y almacenada para uso posterior, se ha convertido en una técnica estudiada durante los últimos años, utilizando diferentes mecanismos de transducción electromagnética, electrostática, magnetostrictiva y piezoeléctrica y combinación de estas. El uso de materiales piezoeléctricos ha sido la técnica preferida debido a su alta favorabilidad en cuanto a la respuesta dinámica y densidad de la energía generada que puede llegar a ser hasta tres veces comparado con los otros métodos [28], además de las condiciones de operación estables y capacidad de convertir la energía de vibración en energía eléctrica a frecuencias relativamente bajas [6]. En los últimos años se han hecho esfuerzos por mejorar la eficiencia de cosechadores de energía basados en transductores piezoeléctricos utilizando como fuente las vibraciones mecánicas. Independientemente del mecanismo adoptado, la mayoría de los recolectores de energía de vibración son diseñados como resonadores mecánicos lineales que pueden recoger solamente con eficiencia la energía dentro de un ancho de banda específico [29]. El ajuste de la geometría y el diseño del dispositivo cosechador se convierten en factores altamente influyentes en la forma eficaz de mejorar su rendimiento [20].

1.5 CONTEXTO DEL ENERGY HARVESTING

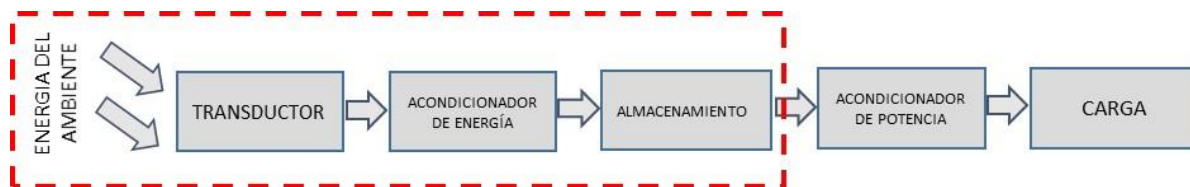
Cosecha de energía

La cosecha de energía es un proceso mediante el cual se aprovecha energía disponible en diferentes fuentes, la cual se captura, se almacena y se usa posteriormente [30]. La energía disponible en el entorno puede ser aprovechada dependiendo de la fuente; ya que la eficiencia en la generación depende del tipo de fuente y del sistema de cosecha de energía. Podemos mencionar algunas fuentes de energía comúnmente usadas y disponibles para estos propósitos;

entre las cuales están la energía solar, eólica, por radiación electromagnética, térmica y por vibraciones mecánicas. Según [31] las fuentes de energía principales provenientes del ambiente para cosecha son las térmicas, radiantes, mecánicas, magnéticas y bioquímicas. Las fuentes de vibraciones mecánicas pueden incluir las vibraciones generadas por el movimiento de puentes, edificaciones, olas (ríos y mares) entre otras.

Los dispositivos cosechadores son aquellos con capacidad de capturar, almacenar y convertir la energía obtenida de cualquier fuente, en energía eléctrica [32]. En la Figura 5 se muestra el esquema básico de un sistema cosechador de energía.

Figura 5 Diagrama de un cosechador de energía



Fuente: Adaptado de [30]

Cosecha de energía desde vibraciones

Cualquier movimiento que se repita durante un intervalo de tiempo es denominado vibratorio u oscilatorio. Un sistema vibratorio en general involucra la interacción entre energía potencial que es almacenada y posteriormente liberada como energía cinética. Lo anterior puede ocurrir alternativamente y de modo visceverso. Cuando a un cuerpo sometido a vibración no actúa una fuerza externa se dice que el tipo de vibración es libre, de lo contrario se presenta una vibración forzada. Cuando la frecuencia de la fuerza externa coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, ocurre el fenómeno de resonancia lo que provoca un aumento de la amplitud del movimiento vibratorio del sistema. Cuando no hay disipación de energía durante

la vibración debido a la fricción se considera un sistema no amortiguado por lo contrario cuando de alguna manera se disipa energía el sistema vibratorio es denominado **amortiguado** [33]

Diferentes investigaciones sobre la cosecha de energía han sido realizadas incluyendo revisiones acerca del estado actual en la investigación de dispositivos cosechadores de energía mediante el uso de materiales piezoeléctricos y otras tecnologías. En [24] se resalta la necesidad que hoy en día existe en el desarrollo de dispositivos cosechadores de energía debido a un sin número de aplicaciones que pueden demandar energía eléctrica de manera permanente y continuada, tales como sensores y dispositivos portables. Las diversas fuentes que pueden ser aprovechadas para estas tecnologías incluyen aquellas provenientes por el viento, el sol y algunas fuentes mecánicas que proporcionan alguna vibración.

El uso de tecnologías piezoeléctricas en la cosecha de energía es presentado en el año 2016 por [34] mediante un sistema cosechador de energía basado en elementos piezoeléctricos introducidos en estructuras pavimentadas como se ve en la Figura 6, para ser utilizadas en carreteras. El diseño del sistema implicó muchas pruebas de laboratorio para diferentes escenarios de peso de la carga que estimulará el dispositivo. Los resultados sugieren una tecnología promisoría para la alimentación de luces basados en leds y diversos sensores utilizados en las carreteras.

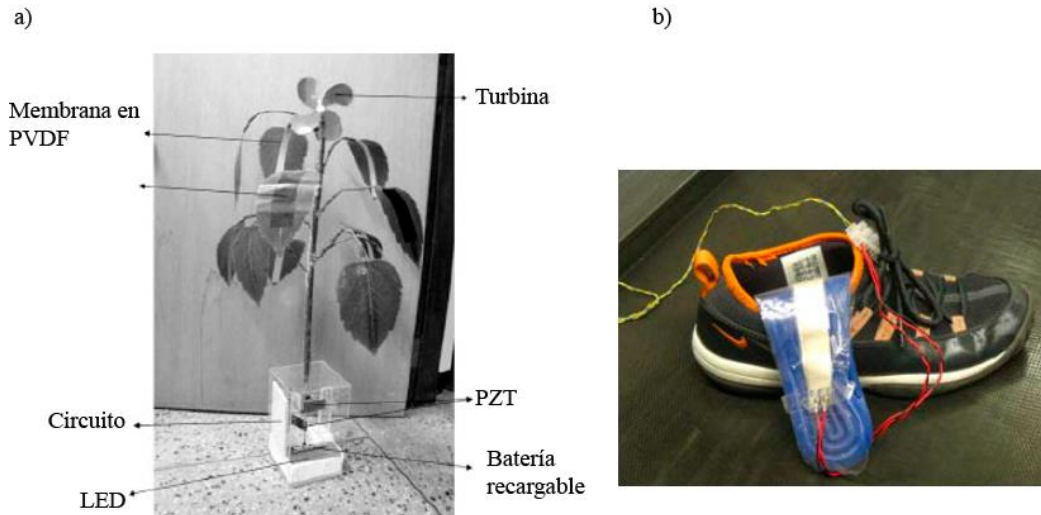
Figura 6 Sistema cosechador de energía aplicado al monitoreo de carreteras.



Fuente: Tomado de [34]

Una labor similar se encuentra en [3], en cuyo trabajo de investigación se categorizan los tipos de materiales en piezo-cerámicos y piezo-polímeros y se revisan diferentes dispositivos cosechadores en diferentes configuraciones y materiales. Ver Figura 7.

Figura 7 Materiales utilizados en cosechadores de energía. a) Piezo-polímero PVDF b) Piezo-cerámico PZT.



Fuente: Tomado de [34]

El uso de materiales piezo-cerámicos pueden presentar altos valores de acoplamiento electro-mecánico con respecto a los piezo-polímeros lo que indica que presentan mayor

eficiencia en la transducción eléctrica, pero a la vez puede presentar una desventaja en cuanto a la flexibilidad del material usado en el dispositivo. Se concluye así que la eficiencia del dispositivo cosechador puede depender del tipo de transductor usado según el material antes mencionado, y del circuito diseñado para aprovechar la energía generada en escala muy pequeña. Los autores en [9, 23] realizan una revisión acerca de los recientes desarrollos en las tecnologías utilizadas y experimentadas en el monitoreo de estructuras en aplicaciones aeronáuticas. El monitoreo estructural es un proceso mediante el cual se identifican fallas a nivel estructural de cualquier infraestructura mecánica, civil o aeroespacial. Para ello es necesario el uso de diversos sensores configurados en una red que son los responsables de detectar las posibles fallas. Los autores introducen un concepto de “sensado incorporado o embebido” el cual consiste en incorporar la red de sensores en la estructura a ser monitoreada, sin embargo, este concepto se complica cuando los sensores deben ser alimentados con algún tipo de energía, motivo por el cual se hace necesario dar cierta autonomía a los sensores en cuanto a su alimentación se refiere. En ese trabajo se sugiere utilizar fuentes térmicas y vibratorias para el diseño de dispositivos adecuados para alimentar los diferentes sensores que detectarían posibles daños estructurales de las aeronaves. Muchas fuentes de energía pueden ser aprovechadas para la cosecha, una de esas fuentes puede ser el viento como lo expone [5] en su trabajo acerca del aprovechamiento del viento como fuente vibratoria para cosechar energía mediante transducción electromagnética. Los autores describen un modelo para maximizar la cosecha con respecto a la rigidez y el parámetro de amortiguamiento electromagnético del dispositivo diseñado. El propósito de dicho trabajo es el de mostrar la viabilidad de cosechar energía con dispositivos electromagnéticos, siendo posible la captura de energía mediante la vibración inducida por la influencia de diversas velocidades en los vientos.

Un aspecto importante en la cosecha de energía es la obtención de voltaje con el dispositivo cosechador, la referencia [35] presenta una estimación analítica del voltaje producido por un dispositivo diseñado en forma de viga en voladizo con materiales piezoeléctricos sujeto a una excitación en la base con o sin masas de prueba en el extremo de la viga. Se utilizaron diferentes masas de prueba obteniendo diferentes salidas de voltaje y diferentes valores de las frecuencias naturales del sistema, lo que indica que variando ciertos parámetros del sistema se puede llegar a optimizar la cosecha de energía del dispositivo. El uso de masas ayuda en la inestabilidad del sistema cosechador por lo que en el presente proyecto puede ser útil el acoplamiento de vigas con masas en los extremos con el fin de aprovechar la inestabilidad obtenida y lograr mayor resonancia del sistema que se verá reflejado en una máxima cosecha de energía.

Por otro lado [36] ha motivado su trabajo en el uso de alguna fuente de energía para la alimentación de redes de sensores, pues estos pueden ser utilizados en aplicaciones donde puede ser impráctico el recambio de baterías debido a su ubicación remota o de difícil acceso. Este es un escenario donde se hace importante el uso de fuentes no limitadas de energía y su cosecha sería una tecnología promisoría en el aprovechamiento de dichas fuentes. Los dispositivos para tal fin deben capturar, almacenar y suministrar la energía de manera permanente y eficiente para el adecuado funcionamiento de las redes de sensores. Según los autores, algunas de las aplicaciones de las redes de sensores pueden ser: Monitoreo de condiciones ambientales, como son mediciones de presión, temperatura, turbiedad, salinidad de aguas, corrientes, etc. Monitoreo en construcciones y en el área de la salud, entre otras. Las fuentes de energía con potencial de compatibilidad con las redes de sensores podrían ser de tres tipos: radiante, térmica y mecánica. Las áreas a investigar con más profundidad comprenden los concernientes a la

reducción del porcentaje de energía que se utiliza para alimentar el mismo sistema cosechador, el cual podría ser aprovechado como energía disponible.

Los autores en [37] proyectan una aplicación de los cosechadores de energía con el diseño y experimentación de una batería construida con materiales piezoeléctricos en forma de capas formando una pila. Para su análisis utilizan el método de elementos finitos (FEM). el propósito de su trabajo es comparar los resultados experimentales y analíticos aprovechando como fuente de energía las vibraciones generadas por los vehículos al pasar por la carretera. En sus resultados pudieron observar que la eficiencia del cosechador presenta una fuerte dependencia de su diseño en cuanto al número de capas de piezoeléctricos con el que se construye la pila cosechadora, el cual es proporcional al espesor de cada capa, sin embargo, la dificultad radica en hacer coincidir las impedancias de la pila la cual genera la energía y la batería que almacenará la misma. Concluyeron que con un número alto de capas y con menor espesor, las impedancias se pueden acoplar más fácilmente, pero el potencial generado es mucho menor.

Muchos dispositivos se han desarrollado para cosechar energía y alimentar sensores en diversos ambientes, pero la dificultad se incrementa cuando deben ser usados en el cuerpo humano, por tal razón [32] propone un diseño alternativo basado en el impacto de una masa en movimiento sobre vigas piezoeléctricas. El dispositivo consiste en una masa que se mueve libremente con el movimiento del cuerpo humano, esta masa se desplaza de un lado a otro impactando en cada lado una estructura diseñada con materiales piezoeléctricos generando así energía. Se desarrolla un modelo matemático que representa el fenómeno de impacto de la masa sobre las vigas y se realizan mediciones experimentales con el dispositivo, concluyendo que uno de los aspectos críticos en la eficiencia de la cosecha de energía es que el factor de

acoplamiento electromecánico de los materiales piezoeléctricos utilizados sea lo bastante alto posible, lo cual depende del tipo de material seleccionado y de las configuraciones dimensionales en su diseño. De igual manera los autores en [38] evaluaron un dispositivo cosechador de energía electromagnéticos basado en vibraciones generadas por el movimiento del cuerpo humano, aquí el dispositivo fue fabricado de tal manera que un magneto esférico se pudiera mover libremente a lo largo de un cilindro el cual tiene unas espiras arrolladas a su alrededor. El libre movimiento del magneto permite generar una corriente eléctrica a través de las espiras de la bobina. Este dispositivo fue evaluado en diferentes velocidades que se presentan al caminar y al trotar de una persona. Sus resultados permiten identificar la ubicación donde el dispositivo puede cosechar más energía, así como la velocidad de la actividad donde se obtiene mayor potencia del mismo.

1.6 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un dispositivo cosechador de energía Piezo-inductivo de baja potencia usando vibraciones de baja frecuencia

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un dispositivo cosechador de energía que incluya generación piezoeléctrica e inductiva.
- Maximizar la cosecha de energía mediante su parametrización mecánica para la obtención de energía.
- Minimizar la potencia eléctrica consumida por el dispositivo de trabajo en función de la carga del circuito.

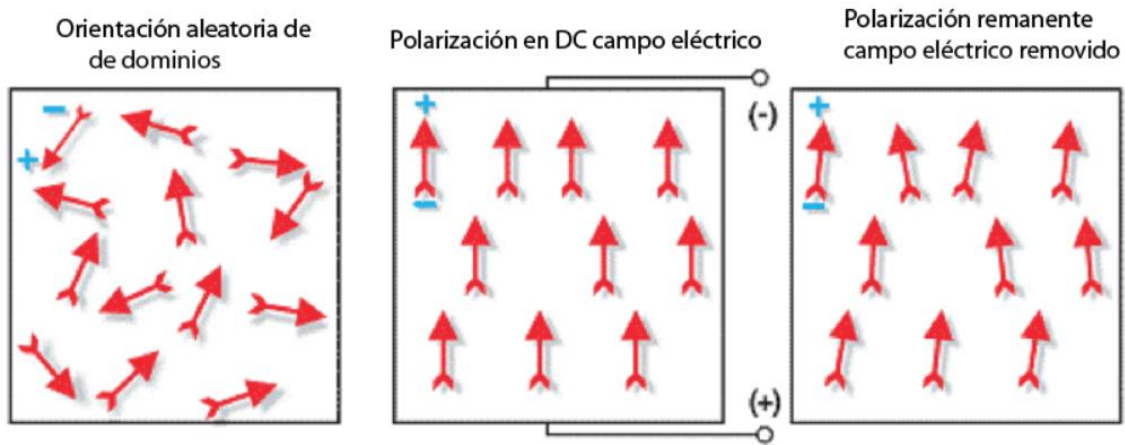
Capítulo 2

GENERALIDADES

2.1 PIEZOELECTRICIDAD

La piezoelectricidad es un fenómeno que fue observado por primera vez por Pierre y Jacques Curie en 1881 al estudiar los efectos eléctricos que se tenían cuando se comprimía un cristal de cuarzo. Al aplicar un campo eléctrico el material sufre un efecto electrostrictivo cambiando así sus dimensiones, de igual manera se produce el efecto contrario cuando se modifica su forma generando así un voltaje o campo eléctrico [39]. El efecto piezoeléctrico es altamente usado en el desarrollo de dispositivos transductores y de sensores, [40]. Estos dispositivos pueden estar embebidos en sistemas más complejos fabricados a escala nanométrica como en los dispositivos Micro Electro Mecánicos (MEMs). El hecho que existan dipolos en el cristal, hace posible que, al aplicar un campo eléctrico sobre el material, la estructura cristalina se deforme, expandiéndose o contrayéndose dependiendo de la dirección de la corriente; y que, al aplicar una fuerza sobre el cristal, sufriendo este una deformación mecánica, se genere un desplazamiento eléctrico de los dipolos, creándose una diferencia de potencial entre sus extremos. La Figura 8 muestra de manera esquemática como pueden encontrarse los dipolos eléctricos de manera desordenada en a), y la manera como se pueden ordenar dichos dipolos en b). Durante la fabricación de un material piezoeléctrico los dipolos son obligados a organizarse mediante un proceso de *poling* que consiste en la aplicación de un campo eléctrico intenso a una temperatura un poco más alta que la temperatura de Curie, consiguiendo que los dipolos permanezcan alineados.

Figura 8 Dipolos antes y después de la polarización de material piezoeléctrico



Fuente: elaboración propia

Una vez el material se encuentre polarizado, la aplicación de fuerzas de tracción o de compresión en el sentido de la polarización genera voltaje, cuya polaridad depende del sentido de aplicación de las fuerzas. De igual manera la aplicación de voltaje con la misma polaridad de los dipolos o de la tensión de polarización, generará deformaciones en el material que pueden ser de compresión o de estiramiento dependiendo de la polaridad del voltaje aplicado.

2.2 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Un material piezoeléctrico posee la capacidad de transformar energía en dos dominios: uno de ellos consiste en transformar la energía mecánica en energía eléctrica y el otro en convertir un campo eléctrico aplicado al material y en energía mecánica. Los materiales piezoeléctricos poseen una característica principal que consiste en que su estructura dipolar puede reorientarse aplicando temperatura y campos eléctricos. [41], La existencia de estos dipolos en el cristal, favorece el fenómeno piezoeléctrico, pues al aplicar un campo eléctrico sobre el material, la estructura cristalina consigue deformarse, sufriendo expansiones y contracciones en función de

la dirección de la corriente. Caso contrario, al aplicar una deformación mecánica provocada por una fuerza externa sobre el cristal, se genera un desplazamiento eléctrico de los dipolos, creándose una diferencia de potencial entre sus extremos [42].

Existen materiales que poseen piezoelectricidad natural como el cuarzo, y otros materiales que presentan piezoelectricidad una vez son sometidos a un proceso de polarización, este proceso consiste en calentar el material por encima de la temperatura de Curie a la vez que se le aplica un potente campo eléctrico en cuya dirección (dirección de polarización) se alinearán los dipolos. Posteriormente, el material es enfriado a su temperatura normal, generando una alineación permanente de sus dipolos, y después de suprimir el campo eléctrico el material queda polarizado presentando propiedades piezoeléctricas [10].

En el campo de la cosecha de energía se ha experimentado con diversos materiales cerámicos piezoeléctricos, particularmente las cerámicas del tipo plomo-zirconato-titanato (PZT), polyvinylidene fluoride (PVDF) y algunas fibras compuestas (MFC) conformadas por pequeños fibras rodeadas de un material epóxico [43]. Los materiales PZT son ampliamente utilizados en la fabricación de transductores y sensores, ya que su acoplamiento electromecánico es mas sensitivo que en la mayoría de los que presentan este tipo de propiedades. Los materiales piezoeléctricos generalmente presentan propiedades anisotropicas (eléctricas y mecánicas) dependen de la dirección en la que es aplicada la fuerza además de la orientación de la polarización de sus dipolos [44].

Figura 9 Modos de acoplamiento electromecánico



Fuente: elaboración propia

Los modos de acoplamiento electromecánico de los materiales piezoeléctricos se pueden representar como se muestra en la Figura 9, la cual indica que si un campo eléctrico es aplicado en la dirección de polarización entonces este se deforma, en este caso el material se define en modo actuador. Por otro lado, si una fuerza es aplicada un potencial eléctrico es generado, y para este caso el material se define como sensor. Para la aplicación requerida en este trabajo, el elemento piezoeléctrico será usado en este modo, ya que el material almacena la carga eléctrica y esta puede ser aprovechada en forma de energía eléctrica.

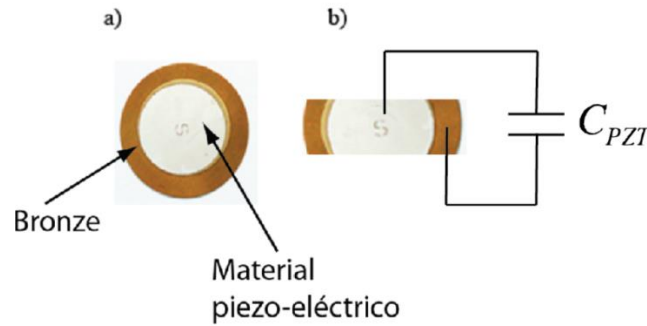
El acoplamiento electromecánico es definido físicamente mediante las siguientes ecuaciones constitutivas [45]:

$$D_i = \varepsilon_{ik}^T E_k + d_{ikl} T_{kl} \quad (2.1)$$

$$S_{ij} = d_{ijk} E_k + s_{ijkl}^E T_{kl} \quad (2.2)$$

donde, S_{ij} es la deformación (adimensional), D_i densidad del flujo eléctrico (C/m²), T tensión (MPa), E campo eléctrico (V/m), d constante dieléctrica (m/V) y ϵ permisividad del material (F/m). Los transductores piezoeléctricos pueden tener diferentes formas geométricas dependiendo de su fabricación, sin embargo, en este estudio fueron adquiridos los elementos que se muestran en la Figura 10 de referencia SEN10293 ROHS (SparkFun Electronics, Niwot, CO, USA).

Figura 10 Transductor piezoeléctrico (material PZT) a) Disco b) Corte extraído del disco y representación eléctrica



Fuente: elaboración propia

La ecuación (2.3) resume el acoplamiento de materiales basados en PZT, la cual es representada como

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

donde las variables D_x , D_y , D_z son el desplazamiento eléctrico and $d_{ij}, ij = 15, 31, 32, 33, 24$ son las constantes de acoplamiento dielectrico. $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ representan los esfuerzos normales

y $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$ son los esfuerzos cortantes. De acuerdo a la ecuación de Maxwell, el desplazamiento eléctrico puede relacionarse con la densidad de carga eléctrica ρ generada en el material por

$$\rho = \text{div}D \quad (2.4)$$

Con la densidad de carga eléctrica, puede determinarse la carga eléctrica de la siguiente manera:

$$Q = \iiint_V \rho dV \quad (2.5)$$

donde V es el volumen de la placa piezoeléctrica. Una carga Q genera un voltaje V_c a través de los electrodos, y es determinada como:

$$V_c = \frac{Q}{C_{PZT}}, \quad (2.6)$$

donde C_{PZT} es la capacitancia de la placa piezoeléctrica. Podemos observar que un material piezoeléctrico puede ser representado como una capacitancia eléctrica, ya que puede almacenar energía cuando es usado como sensor o acumulador en el caso de cosecha de energía (ver Figura 10). Según [46], la capacitancia del material piezoeléctrico se determina por medio de la relación

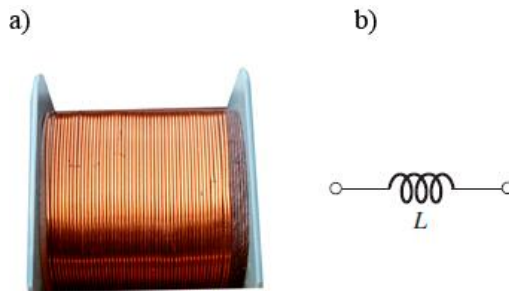
$$C_{PZT} = \frac{\epsilon_{33}^{\sigma} l_c b_c}{t_c} \quad (2.7)$$

donde l_c , b_c y t_c son largo, ancho y espesor de la placa PZT, y ϵ_{33}^{σ} es la permisividad eléctrica.

2.3 FUNDAMENTOS DE BOBINAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Una bobina de inducción es un elemento eléctrico pasivo que obedece a la ley de inducción electromagnética de *Faraday*, que establece que si un conductor es sometido a través de un movimiento dentro de un campo magnético de modo que el conductor siempre este cortando las líneas de flujo de dicho campo, se inducirá un voltaje en el conductor, el cual es proporcional a la velocidad del movimiento [47]. Un inductor básicamente consiste en una serie de espiras de alambre de cobre enrolladas alrededor de un núcleo, que puede ser de un material metálico con el fin de aumentar su campo magnético generado al paso de la corriente, sin embargo no necesariamente debe tener un núcleo metálico, puede tener un núcleo de aire mismo, Figura 11.

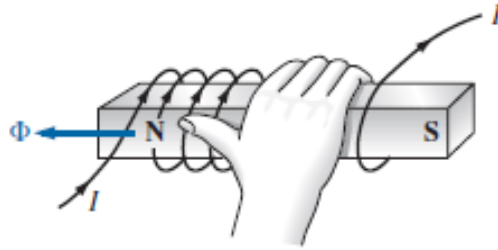
Figura 11 Bobina de cobre. a) con núcleo de aire b) Símbolo



Fuente: elaboración propia

La dirección del campo magnético puede determinarse por medio de la regla de la mano derecha donde el dedo pulgar nos indica la dirección del flujo de la corriente y el resto de los dedos nos indica el sentido del flujo magnético. Ver Figura 12.

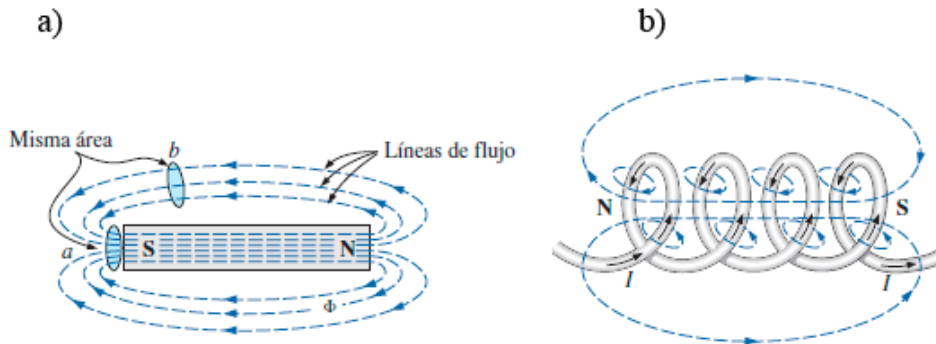
Figura 12 Determinación del flujo magnético mediante la mano derecha



Fuente: Tomado de [48]

La distribución del flujo magnético es similar al de un imán permanente, las líneas salen por un lado y entran por el otro, formando polos magnéticos, cuya fuerza está determinada por la densidad de líneas de flujo. Ver Figura 13.

Figura 13 Líneas del flujo magnético a) imán permanente b) bobina



Fuente: Tomado de [48]

En el sistema internacional de unidades el flujo magnético se mide en *webers* (Wb), en honor al físico alemán Whilhem E. Weber quien desarrollo teorías acerca del electromagnetismo y la electrostática. El Wb se representa por medio de la letra griega fi Φ . Por otro lado la densidad

del flujo magnético es denotado con la letra B y es medido en teslas. La relación entre estas unidades está dado por la ecuación (2.8)

$$B = \frac{\Phi}{A}, \quad (2.8)$$

donde A es el área de la sección transversal del alambre medida en m^2 .

un factor importante como se mencionó anteriormente es el tipo de núcleo que tenga la bobina, ya que afecta el flujo magnético de la misma. Los núcleos metálicos facilitan enormemente la presencia de las líneas de flujo por lo que se dice que presentan alta permeabilidad magnética (μ), contrario al aire que presenta muy baja capacidad para facilitar dichas líneas, o dicho de otra manera, el aire posee baja permeabilidad magnética.

La inductancia de la bobina determina la fuerza del campo magnético generada alrededor de la bobina debido a la corriente que circula por la misma [48]. La inductancia L se mide en *henrios* (H), e indica el nivel de inductancia que establecerá un voltaje de 1 voltio a través de la bobina, debido a un cambio en la corriente de 1 A/s, que pasa por el conductor de la bobina. La ecuación (2.9) relaciona los parámetros de la bobina.

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}, \quad (2.9)$$

donde l representa la longitud de las espiras medida en m, μ la permeabilidad magnética, N el número de vueltas y A el área de la sección transversal.

Las bobinas de inducción pueden construirse en diferentes formas y tamaños, y pueden ser de tipo fijo o de tipo variable, con núcleo de aire o con núcleo de ferrita, al igual que en forma de

toroide o en forma tubular. La Figura 14 muestra diferentes tipos de bobinas para diferentes aplicaciones.

Figura 14 Tipos y tamaños de bobinas de inducción

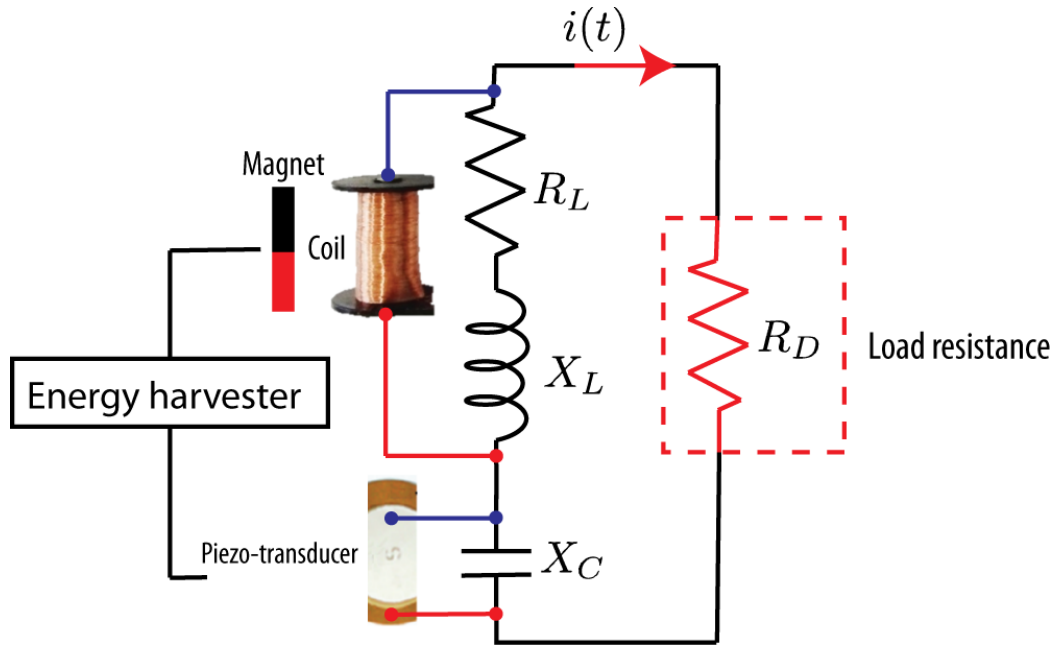


Fuente: elaboración propia

2.4 CIRCUITO PIEZO-INDUCTIVO CON UNA RESISTENCIA DE CARGA

Consideremos que dos transductores eléctricos, tales como un piezoeléctrico y una bobina componen un cosechador de energía. Estas características definirán un dispositivo como piezo-inductivo en este trabajo, este sería representado eléctricamente por elementos conectados en serie de la siguiente manera: la bobina con una resistencia e inductancia y el piezoeléctrico por un capacitor, la Figura 15 ilustra la representación eléctrica de los elementos. La conexión en serie de estos tres elementos desarrollan una impedancia eléctrica que denominaremos como Z_1 , y es importante resaltar que potenciales eléctricos alternos $V_s(\omega \cdot t + \phi)$ deben hacer fluir corrientes AC sobre el circuito para que haya impedancia. Los aspectos eléctricos fundamentales de cada elemento fueron discutidos en la sección anterior. Sin embargo, una ampliación de estos conceptos puede ser revisada en [48].

Figura 15 Representación esquemática del dispositivo cosechador piezo-inductivo con una resistencia de carga



Fuente: elaboración propia

En un proceso de generación de energía, la transformación no es dada de forma constante, por lo tanto la representación del circuito incluye una fuente alterna de energía. Según la teoría de circuitos, la impedancia de un inductor puede ser representado como muestra la ecuación (2.10)

$$X_L = R_L + X_L i \quad (2.10)$$

Donde la reactancia inductiva es $X_L = \omega L$, ω es la frecuencia en radianes por segundo y L es la propiedad de la inductancia en Henrios (H). En la realidad un inductor presenta una resistencia eléctrica (R_L) en el cable de la inductancia, por consiguiente esta debe ser incluida en la impedancia eléctrica. Para el caso del material piezoeléctrico [46] muestra que este puede ser representado por un capacitor, ya que la capacitancia puede ser medida desde sus propiedades, luego la reactancia capacitiva esta dada por la siguiente relación

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2.11)$$

Siendo C el valor de la capacitancia en Faradios (F). En la Figura 15 se aprecia una resistencia de carga R_D con impedancia Z_2 y que se encuentra en paralelo con el dispositivo cosechador cuya impedancia está dada por Z_1 . La impedancia Z_2 representa una resistencia que disipara la energía producida en la fuente de voltaje $V_s(\omega \cdot t + \phi)$ creada en la transformación electromecánica. La impedancia equivalente para las dos impedancias en paralelo se determina como el producto de las impedancias dividido entre la suma de las mismas, como sigue

$$Z_T = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.12)$$

donde Z_1 y Z_2 están dados por

$$Z_1 = R_L + j(X_L - X_C), \quad (2.13)$$

y

$$Z_2 = R_D. \quad (2.14)$$

Por lo tanto, la impedancia total queda de la siguiente forma

$$Z_T = \frac{(R_1 + jX_L - jX_C) \cdot R_L}{R_1 + jX_L - jX_C + R_L}. \quad (2.15)$$

Reorganizando la ecuación (2.15)

$$Z_T = \frac{R_1 R_L + jR_L (X_L - X_C)}{(R_1 + R_L) + j(X_L - X_C)} \quad (2.16)$$

Multiplicando por el conjugado y haciendo $\Delta_x = X_L - X_C$

$$Z_T = \frac{R_1 R_L + j R_L \Delta_X}{(R_1 + R_L) + j \Delta_X} \cdot \left[\frac{(R_1 + R_L) - j \Delta_X}{(R_1 + R_L) - j \Delta_X} \right] \quad (2.17)$$

Luego de desarrollar la formula anterior y separando la parte real de la parte imaginaria, la impedancia total del circuito queda representada de la siguiente forma.

$$Z_T = \frac{(R_1 + R_L)(R_1 R_L) + R_L \Delta_X^2}{(R_1 + R_L)^2 + \Delta_X^2} - j \left[\frac{R_1 R_L \Delta_X + (R_1 + R_L)(R_L \Delta_X)}{(R_1 + R_L)^2 + \Delta_X^2} \right] \quad (2.18)$$

Se observa en la ecuación anterior que la impedancia total está representada en forma rectangular, por lo que para el cálculo de la corriente, es necesario calcular la magnitud de Z_T de la siguiente forma:

$$Z_T = \sqrt{\left[\frac{(R_1 + R_L)(R_1 R_L) + R_L \Delta_X^2}{(R_1 + R_L)^2 + \Delta_X^2} \right]^2 + \left[\frac{R_1 R_L \Delta_X + (R_1 + R_L)(R_L \Delta_X)}{(R_1 + R_L)^2 + \Delta_X^2} \right]^2} \quad (2.19)$$

Una vez obtenida la magnitud de la impedancia total se calcula la corriente que circula por el dispositivo aplicando la ley de Ohm en

$$I = \frac{V_s}{Z_T} \quad (2.20)$$

donde $V_s = V_s(\omega \cdot t + \phi)$, la Ecuación 2.20 muestra como los sistemas alternos también son representados como los sistemas directos a través de la impedancia eléctrica. Estos conceptos serán aplicados experimentalmente en las secciones posteriores.

2.5 FUNDAMENTOS DE VIBRACIONES MECÁNICAS

2.5.1 Introducción

Los problemas de vibración pueden ser simples o complicados. La teoría de la vibración rara vez se aplica directamente a una estructura real, con la excepción de aquellas estructuras cuya

dinámica se puede describir con precisión mediante un número finito de ecuaciones diferenciales parciales. Esto se debe a que la teoría generalmente se desarrolla para una versión idealizada de un problema real con varios supuestos. No todas estas suposiciones se pueden explicar claramente. El modelo del proceso de idealización para una estructura real no es único. La necesidad de derivar un modelo que sea simple, efectivo y fácil para el análisis teórico es un desafío que se debe enfrentar reuniendo la experiencia como una comprensión profunda de la dinámica del sistema. Para el análisis modal, el modelo matemático suele ser discreto con un número finito de coordenadas. El comportamiento continuo, se representa mediante una resolución espacial seleccionada. Por lo tanto, el modelo a menudo se presenta mediante una serie de ecuaciones diferenciales ordinarias. En la transformada de Laplace o de Fourier, estas ecuaciones se pueden convertir en ecuaciones algebraicas. Esto resalta la necesidad de álgebra matricial en el análisis modal. La finitud de un modelo matemático también explica la dependencia del análisis modal en la teoría de un sistema de múltiples grados de libertad.

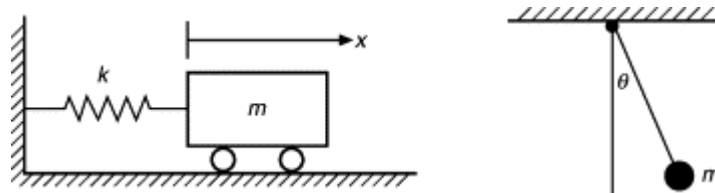
2.5.2 Conceptos Básicos

La vibración es un movimiento que se repite. Esta repetición puede o no perpetuarse. Algunas vibraciones pueden repetirse en un sentido estadístico. Contrariamente a una percepción general, los elementos vitales para la vibración no solo consisten en la presencia de componentes inerciales y elásticos como masa y resorte. Dado que la vibración puede considerarse como la transferencia entre la energía cinética y la energía potencial, un sistema vibratorio debe incluir un medio para almacenar (y liberar) ambas energías. El primero se hace a menudo por una masa y el segundo por un resorte. Una masa conectada a un resorte horizontal como se muestra en la Figura 16 es un sistema vibratorio típico. La masa es el componente

responsable de la energía cinética, mientras que el resorte es el de la energía potencial. Un péndulo es también un ejemplo típico de un sistema vibratorio.

Este sistema no tiene un componente similar a un resorte para energía potencial. De hecho, la masa juega un doble papel tanto para la energía cinética como para la energía potencial. Este es un ejemplo para argumentar la percepción de que un sistema vibratorio debe tener componentes de masa y rigidez.

Figura 16 Dos sistemas de vibratorios simples

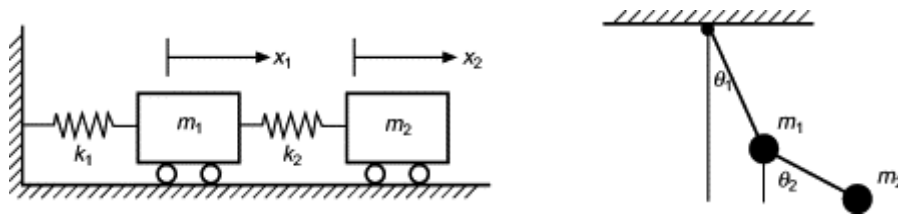


Fuente: elaboración propia

Para poder estudiar la vibración de un sistema dinámico, es esencial saber cuántos grados de libertad tiene el sistema antes de proceder con el análisis. El número de los grados de libertad de un sistema vibratorio se definen como el número mínimo de coordenadas independientes requeridas para determinar completamente el movimiento de todas las partes del sistema en cualquier momento del tiempo. Por ejemplo, el sistema de masa-resorte en la Figura 17 tiene dos bloques de masa, cada uno de los cuales puede moverse independientemente. Una simple prueba de "fijar" una masa dejará ver claramente que la otra todavía puede moverse físicamente. Por lo tanto, hay 2 grados de libertad para este sistema. Los grados de libertad pueden ser representados por diferentes coordenadas. Para el sistema de masa-resorte, las dos coordenadas utilizadas para el análisis pueden ser x_1 o x_2 , o pueden ser x_1 y $(x_1 - x_2)$, o incluso otras opciones. Una selección diferente de coordenadas conducirá a diferentes ecuaciones de

movimiento. Sin embargo, ya que estamos tratando con el mismo sistema, deberíamos esperar que las frecuencias naturales derivadas de estas diferentes ecuaciones sean las mismas, independientemente de la elección de las coordenadas.

Figura 17 Sistemas vibratorios con 2 grados de libertad



Fuente: elaboración propia

Existen diferentes formas de clasificar los tipos de vibración. Estas clasificaciones pueden superponerse. La tabla 1 resume estas vibraciones y sus breves descripciones.

Tabla 1 Tipos de vibraciones con su descripción

Términos de referencia	Tipo de vibración	Descripción
Excitación externa	Vibración libre	Vibración inducida solo por la (s) entrada (s) inicial(es).
	Vibración forzada	Vibración sometida a una o más entradas externas continuas.
Presencia de amortiguamiento	Vibración no amortiguada	Vibración sin pérdida de energía
	vibración amortiguada	Vibración con perdida de energía

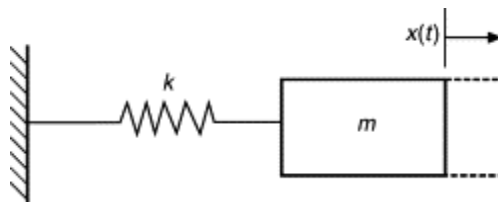
Linealidad de la vibración	Vibración lineal	Vibración para la que se mantiene el principio de super posición
	Vibración no lineal	Vibración que viola el principio de super posición
Previsibilidad	Vibración determinística	El valor de la vibración se conoce en un momento dado
	Vibración aleatoria	El valor de la vibración no se conoce en un momento dado, pero las propiedades estáticas de la vibración son conocidas

Fuente: Tomado de [49]

2.5.3 Vibración Libre De Un Sistema De Un Grado De Libertad

El estudio de la vibración libre de un sistema de un grado de libertad puede comenzar desde su ecuación de movimiento. El sistema simple de masa-resorte que se muestra en la Figura 18 es un ejemplo

Figura 18 Sistema simple masa resorte



Con el desplazamiento x , la segunda ley de movimiento de Newton deriva la siguiente ecuación:

$$m\ddot{x}(t) = -kx(t) \quad (2.21)$$

o

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.22)$$

donde los puntos en la parte superior de la variable representan derivados con respecto al tiempo. La raíz cuadrada de la relación de rigidez y masa se define como la frecuencia natural del sistema:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{rad / seg} \quad (2.23)$$

Contrariamente a la percepción, no es exacto decir que la frecuencia natural de dicho sistema depende de su masa y rigidez. La frecuencia realmente depende solo de la proporción de ellos. Por lo tanto, podemos tener sistemas que compartan la misma frecuencia natural cuando las cantidades de masa y rigidez difieren. La ecuación (2.22) también se puede derivar utilizando el enfoque de la energía. Dado que el sistema no tiene entrada o disipación de energía, la cantidad total de energía en un momento dado es una constante. Estimando tanto la energía potencial $U = \frac{1}{2}kx^2$ y energía cinética $T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$ en un momento con desplazamiento x , podemos tener la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2 = \text{const} \quad (2.24)$$

La derivada de la ecuación con respecto al tiempo produce la ecuación (2.22). Al mismo resultado se llegará usando la ecuación de Lagrange.

La respuesta de vibración libre del sistema de un grado de libertad está determinada por el desplazamiento inicial $x(0)$ y la velocidad inicial $\dot{x}(0)$:

$$x(t) = \frac{\dot{x}(0)}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) + x(0) \cos(\omega_0 t) \quad (2.25)$$

Esta solución muestra que el sistema de un grado de libertad presenta su propia frecuencia natural para su vibración libre. Esta conclusión también es correcta para un sistema de múltiples grados de libertad lineal, excepto cuando el sistema tiende a elegir todas sus frecuencias naturales para su vibración libre.

2.5.4 Vibración De Un Sistema De Un Grado De Libertad Debido A Una Fuerza Arbitraria.

El sistema de un grado de libertad también puede estar sujeto a una fuerza de excitación no armónica. Hay varios métodos matemáticos disponibles para derivar la solución de la vibración resultante. La transformada de Laplace es un método conveniente para derivarla. Para una fuerza arbitraria $f(t)$, la ecuación de movimiento se puede derivar como:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x} + kx(t) = f(t) \quad (2.38)$$

Tomar la transformada de Laplace y considerar las condiciones iniciales conducirá a la siguiente solución para la vibración de desplazamiento:

$$X(s) = \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k} + \frac{(ms + c)x(0) + m\dot{x}(0)}{ms^2 + cs + k} \quad (2.39)$$

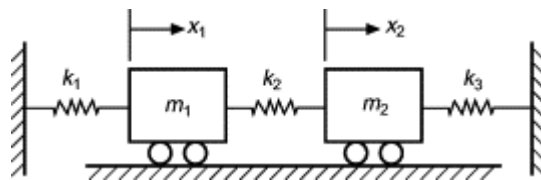
Aquí, $X(s)$ y $F(s)$ son las transformadas de Laplace de la función de tiempo $x(t)$ y $f(t)$, respectivamente. Para todas las condiciones cero, la ecuación se reduce a:

$$X(s) = \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k} = G(s)F(s) \quad (2.40)$$

Esta es una ecuación típica para un sistema dinámico lineal donde $G(s)$ se llama la función de transferencia del sistema. La vibración $x(t)$ en el dominio del tiempo se puede determinar a partir de la transformada inversa de Laplace de $X(s)$.

2.5.5 Vibración Forzada Libre Y Armónica De Un Sistema De Múltiples Grados De Libertad. Siempre que sea posible, siempre es útil comparar el estudio de un sistema de múltiples grados de libertad con el de un sistema de un grado de libertad. El estudio de la vibración libre de un sistema con múltiples grados de libertad comienza en sus ecuaciones de movimiento, como lo hizo para un sistema de un solo grado. En aras de la simplicidad pero sin perder generalidad, podemos utilizar el sistema simple de dos grados de libertad que se muestra en la Figura 19 como el sistema para estudiar la vibración libre de un sistema con múltiples grados de libertad.

Figura 19 Sistema 2DoF



Al seleccionar x_1 y x_2 como las coordenadas para describir la vibración de desplazamiento del sistema, las ecuaciones de movimiento del sistema se pueden derivar como:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + (k_2 + k_3)x_2 - k_2 x_1 = 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

Cuando se combinan, este conjunto de ecuaciones diferenciales se convierten en una sola ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.42)$$

Esta ecuación matricial es una representación general para un sistema con múltiples grados de libertad, que puede escribirse como indica la ecuación (2.43):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2.43)$$

La solución de vibración libre es matemáticamente la solución no trivial de la ecuación (2.42), tomando la siguiente forma:

$$\{x\} = \{X\} \sin \omega t \quad (2.44)$$

Esta forma de solución, cuando se sustituye en la ecuación (2.43), la convertirá en una ecuación de matriz algebraica simple:

$$[K] - \omega^2 [M]\{X\} = \{0\} \quad (2.45)$$

Para que esta ecuación tenga una solución distinta de cero $\{X\}$, la matriz $([K] - \omega^2 [M])$ debe ser:

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (2.46)$$

Esta es la ecuación característica del sistema. Las soluciones de esta ecuación son sus frecuencias naturales. De hecho, la ecuación (2.45) representa un problema de valor propio donde ω^2 es el valor propio y $\{X\}$ el vector propio. El valor propio es en realidad el cuadrado de la frecuencia natural del sistema y el vector propio, la forma del modo. De la ecuación (2.44)

es evidente que la forma del modo $\{X\}$ no es única, ya que cualquier múltiplo de ella satisface la ecuación.

Usando el sistema con dos grados de libertad como ejemplo, la ecuación (2.45) se convierte en:

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - \omega^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

La ecuación característica del sistema es una ecuación cuadrática para ω^2 . Las dos raíces de la ecuación. ω_1^2 y ω_2^2 son los cuadrados de las dos frecuencias naturales ω_1 y ω_2 . Las formas de modo del sistema se pueden determinar como:

$$\begin{Bmatrix} X_1^{(1)} \\ X_2^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{k_1 + k_2 - \omega_1^2 m_1}{k_2} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.48)$$

$$\begin{Bmatrix} X_1^{(2)} \\ X_2^{(2)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{k_1 + k_2 - \omega_2^2 m_1}{k_2} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.49)$$

La vibración libre del sistema se convierte en:

$$\begin{cases} x_1(t) = X_1^{(1)} \sin \omega_1 t + X_1^{(2)} \sin \omega_2 t \\ x_2(t) = X_2^{(1)} \sin \omega_1 t + X_2^{(2)} \sin \omega_2 t \end{cases} \quad (2.50)$$

Esta vibración libre es una combinación lineal de dos vibraciones armónicas con frecuencias ω_1 y ω_2 . Dado que dos frecuencias naturales no suelen ser idénticas, la vibración libre de un sistema de dos grados de libertad es periódica con dos frecuencias. Las 'amplitudes' en la ecuación (41) $X_i^{(j)}$ ($i, j = 1, 2$) no están completamente determinadas porque las formas de modo no están determinadas de manera única. Estas 'amplitudes' se cuantificarán

completamente con la ayuda de las condiciones iniciales. Desde la vibración libre $x_i(t)(i = 1, 2)$ consiste en las contribuciones del modo 1 y el modo 2, cada uno de ellos armónico y similar a un solo grado de libertad, la composición del comportamiento de un sistema de un solo grado de libertad en una respuesta del sistema con múltiples grados es evidente. Este concepto es importante a lo largo del desarrollo del análisis modal.

Es posible diseñar condiciones iniciales de modo que solo uno de los dos modos esté excitado. En este caso, vemos una vibración libre de armónicos para el sistema con dos grados de libertad. Sin embargo, esto no tiene generalidad. Estas observaciones para el sistema con dos grados se pueden extender a un sistema con múltiples grados.

Habiendo discutido la vibración libre, ahora es útil analizar la vibración forzada de un sistema múltiple, en comparación con un sistema de un solo grado. Por ejemplo, es posible que las fuerzas aplicadas tengan diferentes frecuencias, ángulos de fase, amplitudes o una combinación de ellas. A medida que se usa más de una coordenada, la fase relativa entre las coordenadas se hace posible. Para entender la esencia de la vibración forzada, consideramos un caso simple donde las funciones de forzamiento tienen la misma frecuencia y las fases entre ellas son cero. Esto no excluye el caso de que algunas de las fuerzas puedan incluso tener una amplitud cero. Si las funciones de forzado tienen diferentes frecuencias.

La ecuación de movimiento para un sistema con múltiples grados de libertad con un conjunto de funciones de forzado que tienen la misma frecuencia y cero fases se puede escribir como:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \sin \omega t \quad (2.51)$$

Aquí, el vector $\{F\}$ contiene las amplitudes de las funciones de forzado. El supuesto de respuesta armónica en la ecuación (2.44) todavía se puede utilizar para que la ecuación (2.51) se pueda convertir en una ecuación algebraica:

$$[[K]-\omega^2[M]]^{-1} = \{F\} \quad (2.52)$$

La respuesta de vibración forzada del sistema con múltiples grados de libertad viene dada por:

$$\{x(t)\} = [[K]-\omega^2[M]]^{-1} \{F\} \sin \omega t \quad (2.53)$$

A diferencia de la vibración libre, esta vez la frecuencia de vibración es idéntica a la frecuencia de las funciones de forzado.

2.5.6 Teoría De Análisis Modal De Un Sistema Dinámico Con Un Grado De Libertad

A diferencia de la teoría clásica de la vibración, que se ocupa principalmente de la respuesta de un sistema dinámico, el análisis modal se ocupa de sus propiedades intrínsecas. Una forma más efectiva de investigación para el análisis modal es usar la función de respuesta de frecuencia. Este apartado definirá la función de respuesta de frecuencia de un sistema con un grado de libertad y estudiará diferentes métodos de presentación de la función y sus propiedades intrínsecas. Estas propiedades formarán la base para los métodos experimentales de análisis modal. El enfoque se extenderá a un sistema con más de un grado de libertad.

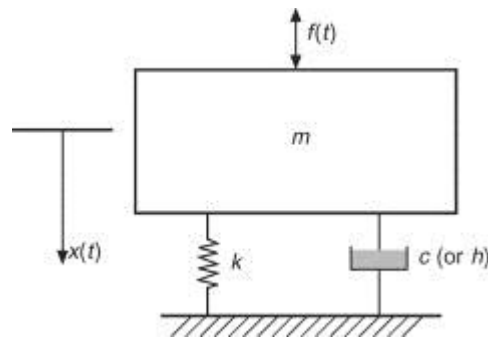
El análisis modal también se puede realizar utilizando la respuesta de impulso en el dominio del tiempo o la respuesta debida a la entrada de vibración ambiental.

2.5.7 Funciones De Respuesta De Frecuencia De Un Sistema Con Un Grado De Libertad.

Algunos sistemas mecánicos y estructurales pueden idealizarse como sistemas simples o de un solo grado de libertad. La teoría para un sistema simple forma la base para el análisis de un sistema con más de un grado de libertad. También proporciona una visión física de la vibración de un sistema estructural.

Utilizaremos el sistema simple que se muestra en la Figura 20 que tiene una masa, un resorte y un amortiguador con amortiguamiento viscoso o estructural (histerético).

Figura 20 Sistema SDoF con una excitación armónica



Para una fuerza armónica $f(t) = F(\omega)e^{j\omega t}$, La respuesta del sistema es otra función armónica $x(t) = X(\omega)e^{j\omega t}$ donde $X(\omega)$ es una amplitud compleja. Al sustituirlos en las ecuaciones de movimiento de diferentes modelos de amortiguación, podemos derivar la relación de la respuesta de desplazamiento y la entrada de fuerza para amortiguamiento viscoso como:

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (2.54)$$

y para amortiguamiento estructural como:

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k - \omega^2 m + jh} \quad (2.55)$$

Esta relación, a menudo denotada como $\alpha(\omega)$, se define como la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF) del sistema. Aunque se define como la proporción de la fuerza y la respuesta, la FRF es independiente de ellos. Cuando la amortiguación es cero, la función FRF compleja se relega a una función real.

El FRF es la función principal de la que dependerá el análisis modal. Aunque en teoría el FRF solo lo dicta el sistema, en realidad la precisión de los datos FRF medidos es fundamental para el éxito del análisis modal.

Las FRF definidas en las ecuaciones (2.54) y (2.55) pueden tomar diferentes formas. Para el caso de amortiguamiento viscoso, por ejemplo,

$$\alpha(\omega) = \frac{1/k}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j2\frac{\omega}{\omega_0}} \quad (2.56)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{1/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2\omega\omega_0\xi} \quad (2.57)$$

Para el caso de amortiguamiento estructural, las expresiones son similares:

$$\alpha(\omega) = \frac{1/k}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\eta^2} \quad (2.58)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{1/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega_0^2\eta} \quad (2.59)$$

El FRF definido utiliza el desplazamiento como respuesta. Se le conoce como receptancia FRF. La respuesta de vibración también puede ser velocidad o aceleración. Al reemplazar la respuesta de desplazamiento $X(\omega)$ con la velocidad $\dot{X}(\omega)$ y aceleración $\ddot{X}(\omega)$, Se pueden definir dos tipos diferentes de FRF como:

Movilidad FRF para un amortiguamiento viscoso,

$$Y(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{j\omega}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (2.60)$$

Movilidad FRF para un amortiguamiento histeretico,

$$Y(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{j\omega}{k - \omega^2 m + jh} \quad (2.61)$$

Acelerancia FRF para un amortiguamiento viscoso

$$Y(\omega) = \frac{\ddot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{-\omega^2}{k - \omega^2 m + j\omega c} \quad (2.62)$$

Acelerancia FRF para un amortiguamiento histeretico

$$Y(\omega) = \frac{\ddot{X}(\omega)}{F(\omega)} = \frac{-\omega^2}{k - \omega^2 m + jh} \quad (2.63)$$

Es evidente que los tres tipos de FRF, $\alpha(\omega)$, $Y(\omega)$ y $A(\omega)$, son fácilmente intercambiables. Los tres son funciones complejas de frecuencia. Sus amplitudes siguen:

$$|A(\omega)| = \omega |Y(\omega)| = \omega^2 |\alpha(\omega)| \quad (2.64)$$

La diferencia de fase entre ellos permanece constante en cualquier frecuencia:

$$\theta_{A(\omega)} = \theta_{Y(\omega)} + \frac{\pi}{2} = \theta_{\alpha(\omega)} + \pi \quad (2.65)$$

Los recíprocos de las tres FRF de un sistema simple también tienen un significado físico útil y, en ocasiones, se utilizan en el análisis modal. Son respectivamente:

Para rigidez dinámica,

$$\frac{1}{\alpha(\omega)} = \frac{\text{fuerza}}{\text{desplazamiento}} \quad (2.66)$$

Impedancia mecánica,

$$\frac{1}{Y(\omega)} = \frac{\text{fuerza}}{\text{velocidad}} \quad (2.67)$$

Masa aparente,

$$\frac{1}{A(\omega)} = \frac{\text{fuerza}}{\text{aceleracion}} \quad (2.68)$$

El FRF de un sistema simple se puede presentar en formas diferentes a las de las ecuaciones anteriores. Para el caso de la amortiguación viscosa, la FRF de recepción puede factorizarse para convertirse en:

$$\alpha(\omega) = \frac{R}{j\omega + \lambda} + \frac{R^*}{j\omega + \lambda^*} \quad (2.69)$$

dónde

$$R = \frac{1}{2m\omega_0 j} \quad (2.70)$$

$$\lambda = (-\zeta + \sqrt{1 - \zeta^2} j)\omega_0 \quad (2.71)$$

Los coeficientes conjugados R y R^* se denominan residuos de la receptancia. λ y λ^* son los polos complejos del sistema de un solo grado de libertad. Si se considera que la misma FRF de recepción es la función de transferencia con la parte real de la variable de Laplace anulada, entonces se puede expresar como:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 m + (j\omega)c + k} \quad (2.72)$$

La FRF también se puede ver como la transformada de Fourier inversa de la respuesta al impulso del sistema, por lo tanto:

$$\alpha(\omega) = F^{-1}(h(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{j\omega t} dt \quad (2.73)$$

Capítulo 3

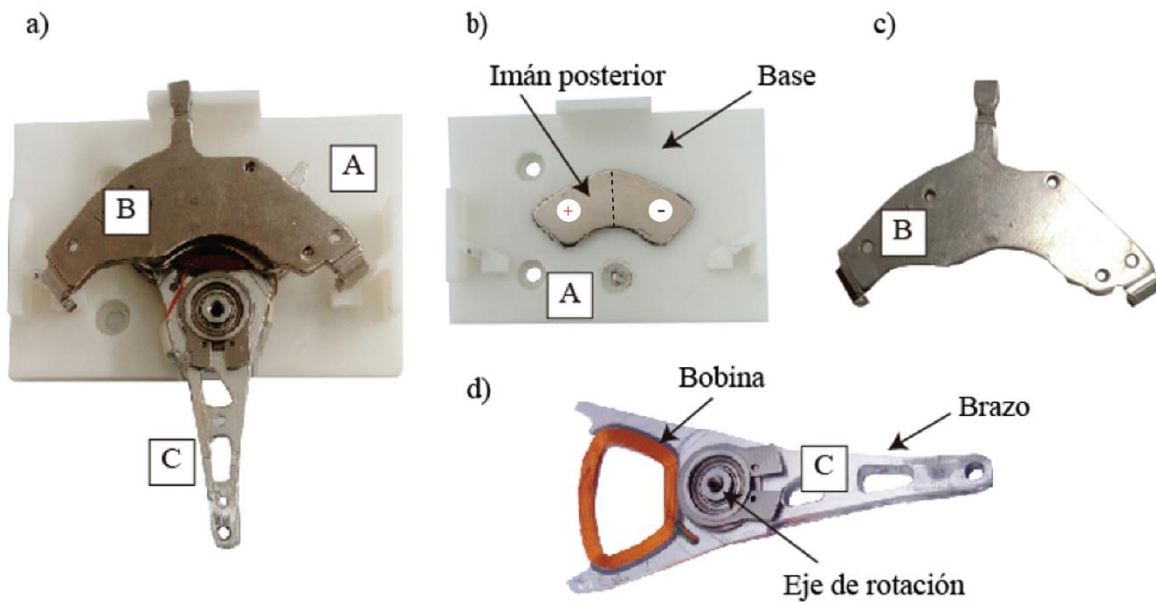
MATERIALES Y DISPOSITIVO

3.1 DISPOSITIVO COSECHADOR DE ENERGÍA

Para la realización de los experimentos en este estudio, un sistema electromecánico de transducción electromagnética fue reciclado de un disco duro (HDD) con el propósito de aprovechar los elementos que contiene. El sistema reciclado es llamado comúnmente motor de bobina de voz (Voice Coil Motor) como se describe en la referencia [26]. En la Figura 24a se muestran los elementos principales que componen el dispositivo: un elemento principal o brazo (C), que contiene una bobina ubicada en la parte superior, un soporte o base (A), imanes de Neodimio superior e inferior. Los elementos mencionados anteriormente son ensamblados de la siguiente forma; el brazo es conectado a través de un rodamiento a la base (A), El rodamiento crea una junta de rotación entre la base y el brazo, que permite movimientos angulares de la bobina sobre los imanes para producir la transducción electromagnética.

La transducción electromagnética es realizada por la excitación de la bobina a través de los imanes que generan un campo magnético. La base fue fabricada en políácido láctico (PLA), por medio de impresión 3D, sobre la cual se apoya el sistema cosechador con sus respectivos imanes. El brazo cosechador observado en la Figura 21d muestra la bobina construida en alambre de cobre calibre 33 (0.18 mm) y con aproximadamente 180 espiras.

Figura 21 a) Dispositivo cosechador de energía b) Base c) Imán anterior d) Brazo



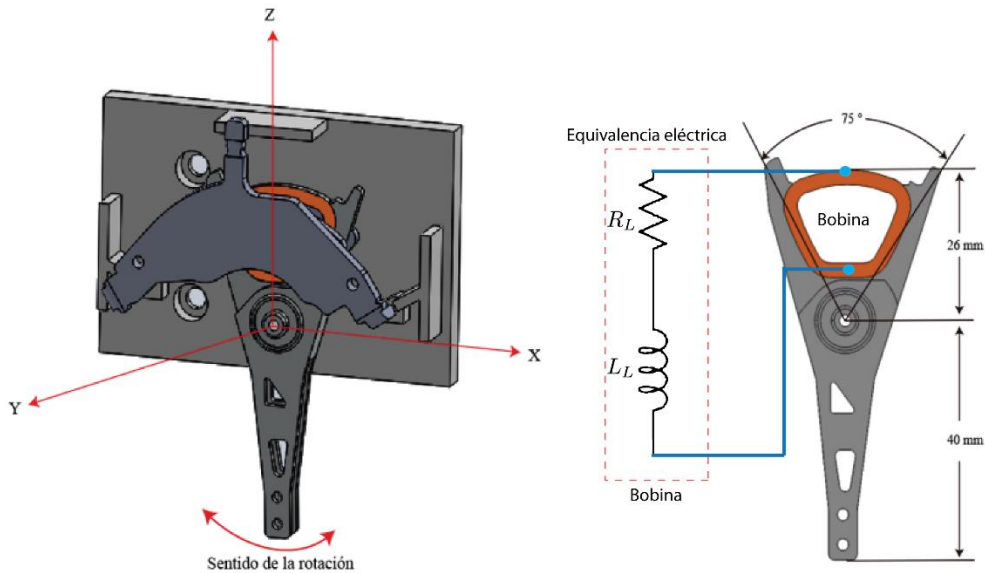
El brazo brinda soporte a la bobina y por medio de su eje de rotación permite su movimiento libre en medio de los imanes posterior y anterior. la Figura 22 muestra el dispositivo sobre los tres ejes cartesianos como también sus dimensiones, podemos observar el funcionamiento del dispositivo, el cual básicamente gira alrededor del eje Y, eje localizado en la junta de rotación.

El sistema electromecánico del dispositivo puede ser usado como *actuador*. Para este caso se controla la corriente que pasa por la bobina para generar el movimiento del brazo. Una manera adicional de usar el sistema es como *sensor*, enfoque que será utilizado en este proyecto. Ya que las señal eléctrica generada será medida en la bobina.

La activación del cosechador depende del movimiento del brazo que es generado por una fuerza dinámica inducida externamente en la base. Estos movimientos producen una corriente eléctrica por los hilos de la bobina proporcional a la frecuencia de oscilación. Este principio permite que el dispositivo actúe como un sistema cosechador de energía [50] [51]. En la Figura 23b se

observa el circuito equivalente que representa la bobina del cosechador. El circuito es compuesto por una resistencia eléctrica y una inductancia relacionadas entre si como un circuito abierto en serie.

Figura 22 Funcionamiento mecánico del dispositivo a) Movimiento de rotación relativo sobre ejes b) Dimensiones básicas del brazo y esquema eléctrico equivalente de la bobina



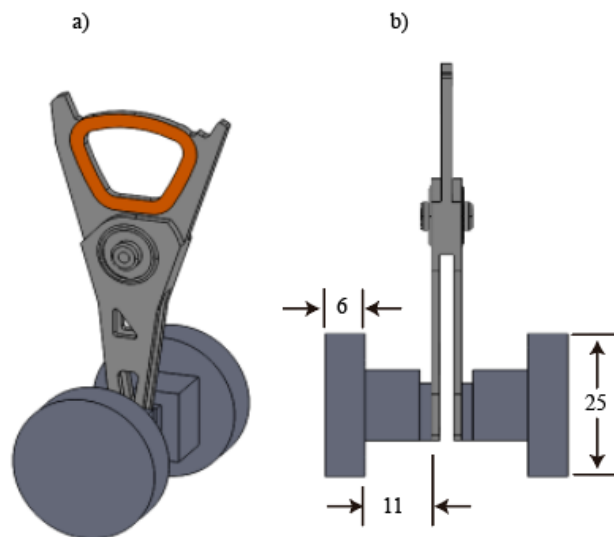
3.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

En esta sección se describe la preparación del dispositivo reciclado (desde un HDD) y el montaje experimental diseñado para la evaluación dinámica con vibraciones controladas, de amplitud constante y frecuencia variable entre 0 Hz -15 Hz. Las vibraciones aplicadas en este trabajo son consideradas de baja frecuencia.

Como se observó en la sección anterior, es visible que el tamaño del dispositivo hace que su estructura sea ligera, y de este modo no presenta una inercia suficiente para actuar como péndulo en el momento de oscilar, ya que la rigidez de los cables no lo permiten, Es decir, cuando el dispositivo es perturbado por movimientos, este es amortiguado en el instante de la excitación.

Para mejorar la funcionalidad, un conjunto de masas fueron añadidas para incrementar la inercia y de esta forma el dispositivo pueda oscilar a la hora de excitar la base. Por lo tanto, en el extremo del brazo fueron añadidas 6 masas. Los elementos inerciales adheridos al oscilador tienen una masa de 20.8 gramos (3 masas) y se colocaron en ambos lados en el extremo inferior del brazo como se ilustra en la Figura 23

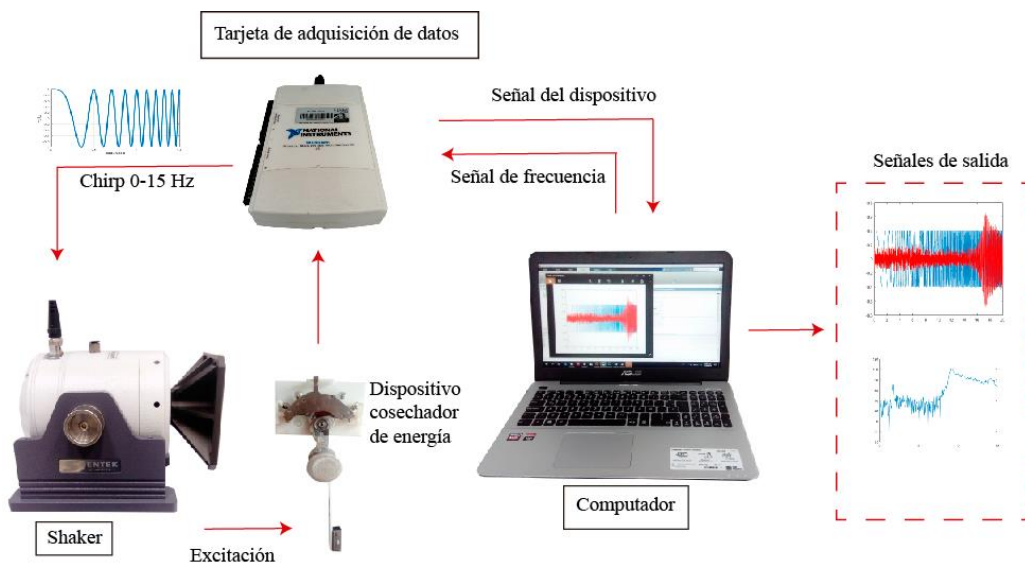
Figura 23 Detalle del brazo cosechador a) Con masas inerciales b) Dimensiones en milímetros de las masas inerciales



Para realizar el experimento de cosecha de energía, los siguientes aspectos son considerados como relevantes; una fuente vibratoria debe excitar el dispositivo y en los mismos instantes de tiempo el parámetro eléctrico (voltaje o corriente) de cosecha debe ser medido. Por lo tanto, la base se excitó con un excitador electrodinámico shaker (Mini Shaker Sentek Dynamics) el cual es activado por una señal barrido de frecuencia programada entre 0 a 15 Hz de forma lineal durante un tiempo de 20 segundos. Una ventaja del mini shaker es que el amplificador de potencia está integrado en el actuador. Para la adquisición y escritura de las señales se utilizó una tarjeta de adquisición de datos DAQ National instruments 6211 (esquema de conexión Figura 25) que

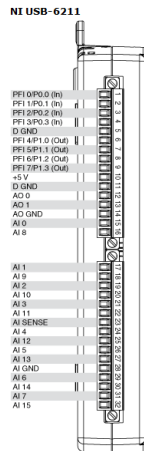
sirvió de interfaz de conexión mediante las salidas y entradas análogas. Las conexiones fueron realizadas de la siguiente forma, el shaker fue conectado en la salida análoga de la tarjeta para la excitación electrodinámica y las bobinas del dispositivo cosechador fueron conectadas a la entrada análoga para la medición del potencial eléctrico. La Figura 24 indica de manera esquemática la conexión entre cada elemento del conjunto experimental.

Figura 24 Conjunto experimental



En el shaker la señal de excitación comúnmente es denominada como señal de barrido (chirp), ya que esta varía en la frecuencia y el tiempo. Esta señal fue generada por una función de Matlab®. Los valores de voltaje generados por la función fueron escritos directamente en el buffer de la tarjeta de adquisición de datos con el fin de activar el shaker. Cuando la excitación es provocada en el dispositivo, las señales son leídas en la variable del tiempo a través de un puerto análogo de la tarjeta como se mencionó anteriormente. El código que realiza estas funciones es mostrado en el anexo A.

Figura 25 Entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos de NI USB -6211 de National Instruments



3.3 CONFIGURACIÓN DE EXPERIMENTOS

Esta sección describe los diferentes tipos de experimentos que serán realizados con el dispositivo, estos son definidos de acuerdo a los elementos que se adhieren al dispositivo base. El dispositivo base es el dispositivo mostrado en la Figura 23, es denominado de esta forma ya que siempre será el mismo en todos los experimentos.

Experimento 1: Modo inductivo

Para esta configuración es definido el primer conjunto de experimentos basado en cambios en la configuración inercial y dimensional (variaciones de rigidez). Las configuraciones inerciales se componen de la adición de vigas de poliestireno de diferentes longitudes 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm y 21 cm (ver Figura 27) que incluyen elementos de masa concentrada. Para cada una de las longitudes se realizaron dos experimentos de la siguiente forma: el primer experimento consiste en adherir una masa de 11.4 gramos en el extremo inferior de la viga (extremo libre) y otro con dos masas en ambos extremos, tal como se indica en la Figura 26.

Las vigas son adheridas al brazo mecánicamente y las masas fueron pegadas a la viga con adhesivo epoxico Loctite 4096.

Figura 26 Masas en vigas. a) Una masa b) Dos masas c) Montaje en el shaker

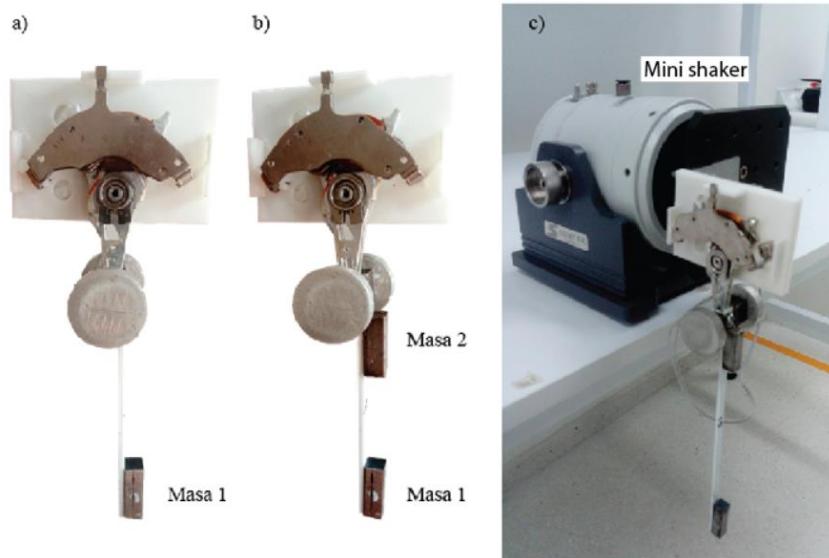
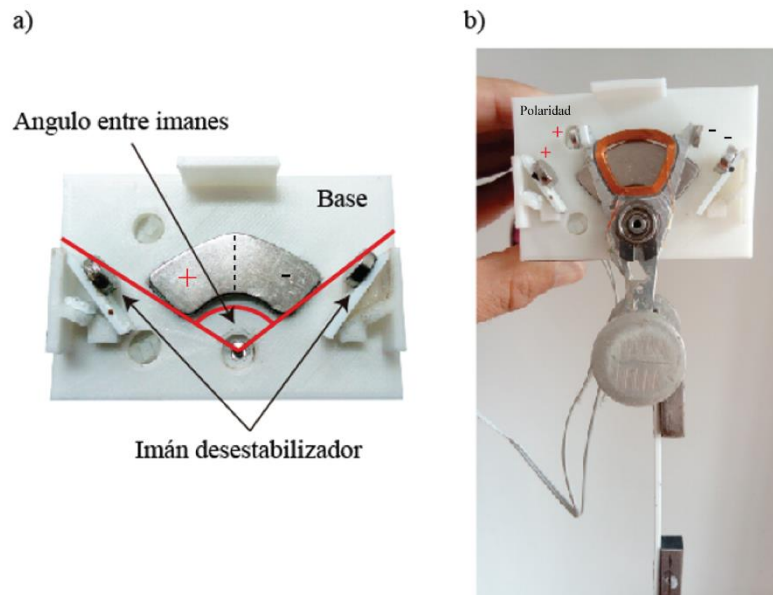


Figura 27 Longitudes en centímetros de las vigas utilizados en los experimentos



Experimento 2: Modo inductivo con inestabilidad

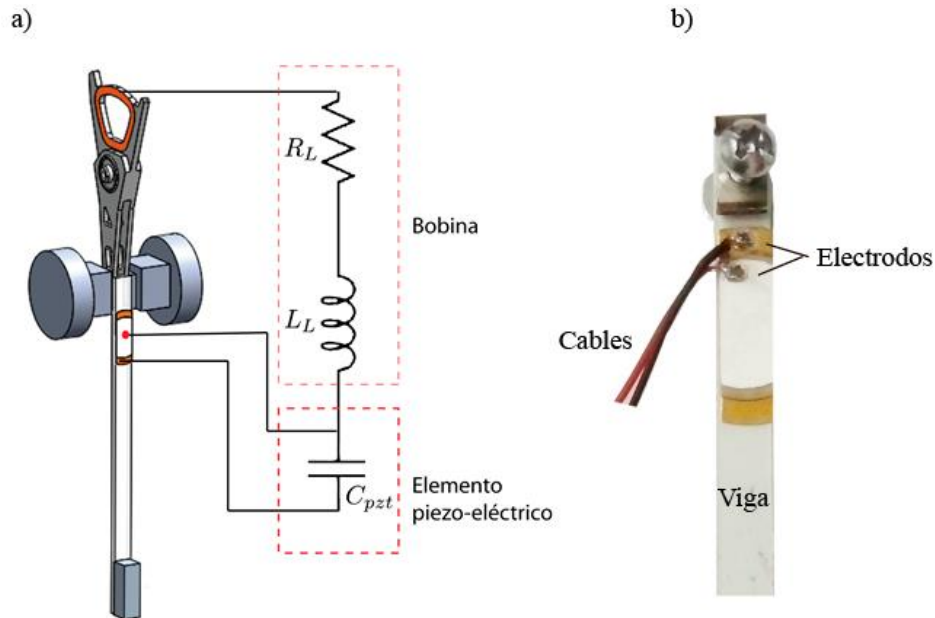
Figura 28 Base plástica a) con imanes para crear inestabilidad b) montaje del dispositivo apreciando la bobina del mismo



En cada experimento realizado con imanes se varía la longitud de la viga con las dimensiones indicadas en la Figura 27, y los experimentos se realizan tanto para una sola masa como para dos masas tal como se hizo en el experimento I en modo inductivo.

Experimento 3: Modo piezo-inductivo con inestabilidad

Figura 29 Dispositivo cosechador con piezoeléctrico a) con circuito equivalente b) Detalle del montaje del piezoeléctrico.



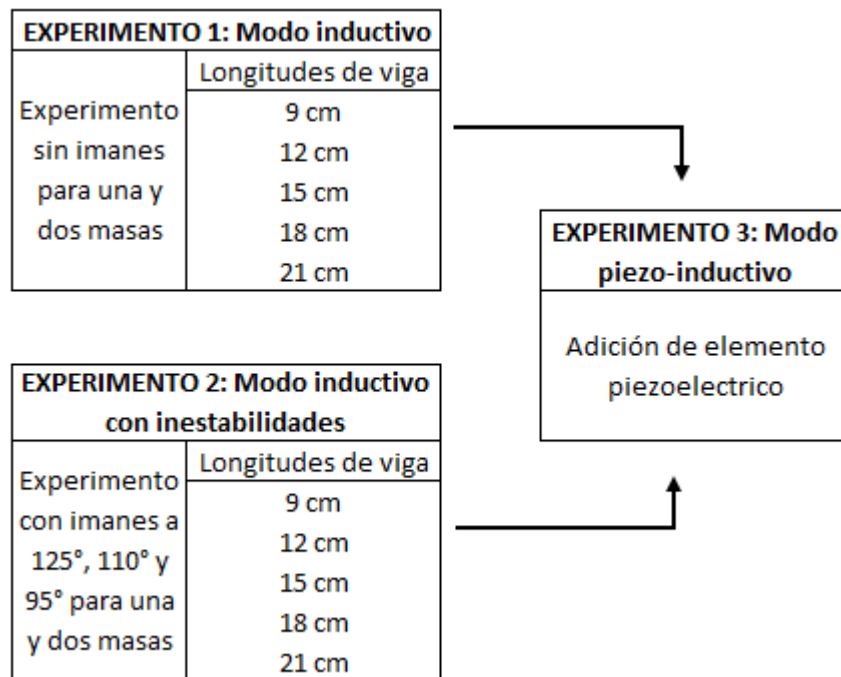
Con el propósito de definir la configuración experimental más eficiente en salida de voltaje con respecto a la frecuencia de operación para la cosecha de energía, se realizó un tercer experimento donde se seleccionaron los mejores resultados obtenidos en los dos experimentos anteriores, y se repitieron con la adición de un transductor piezoeléctrico pegado al inicio de la viga donde se presenta la mayor deformación por la flexión generada durante el funcionamiento del sistema cosechador.

La Figura 29 muestra el dispositivo cosechador con el elemento piezoeléctrico ubicado en el extremo superior de la viga y que corresponde al experimento 3.

Para la captura de energía en el experimento en modo piezo-inductivo se definió una conexión en serie para el circuito formado entre el elemento inductivo conformado por la bobina del cosechador y el elemento piezoeléctrico ubicado en la viga del mismo; dado que para el caso de

una conexión en paralelo las salidas de voltaje obtenidas fueron muy bajas, se descartó esta configuración.

Figura 30 Etapas experimentales



Para determinar las configuraciones que maximicen el rendimiento electromecánico del dispositivo, se propone una metodología experimental basada en dos etapas y un conjunto de experimentos que determinan que configuración dimensional y inercial es mas adecuada, un esquema de la metodología es descrito en la Figura 30.

La primera etapa se compone de dos conjuntos de experimentos (Experimento 1 y 2) que están basados en las siguientes configuraciones; a. dispositivo con vigas y masas; b. dispositivo con vigas, masas e inestabilidad con imanes. De acuerdo a nuestra proposición, todas las

combinaciones experimentales determinarán un experimento por cada configuración establecida. Los experimentos de la etapa 2 son determinados por las siguientes combinaciones:

- Diferentes longitudes de viga (ver Figura 27) con una masa adicionada en el extremo libre (Ver Figura 26a).
- Diferentes longitudes de viga con dos masas adicionadas, una en cada extremo (Ver Figura 26b)
- Diferentes longitudes de viga con una masa adicionada, en el extremo libre. Adición de imanes en el soporte para inestabilizar el dispositivo en diferentes ángulos como se ilustra en la figura 28
- Diferentes longitudes de viga con dos masas adicionadas, una en cada extremo. Adición de imanes en el soporte para inestabilizar el dispositivo en diferentes ángulos.

El parámetro de rendimiento estará basado en el potencial eléctrico determinado en el tiempo y la frecuencia.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1 MODO INDUCTIVO

En esta sección son discutidos los resultados obtenidos con los montajes mostrados en la Figura 26. Este corresponde a la variación de longitudes en las vigas combinadas en dos configuraciones inerciales, con una masa y dos masas. Los voltajes medidos producidos por la vibración del shaker en un barrido de frecuencia entre 0 Hz y 15 Hz durante 20 s son mostrados en la Figura 31. En esta figura se consolidaron cinco gráficos que relacionan el tiempo versus el voltaje medido, cada gráfico corresponde con cada longitud de viga y en cada uno se realizó una comparación entre colocar una masa o dos sobre la viga. En la Figura 31a, se muestra la salida de voltaje para la viga de 9 cm la cual compara ambas señales medidas para una y dos masas, es observado que hasta 16 segundos, la amplitud máxima es cercana a los 0.5 voltios, amplificándose luego hasta un máximo cercano a los 0.8 voltios entre los 18 s y 19 s. Este comportamiento es muy similar tanto para una masa como para dos masas. La Figura 31b, corresponde a la viga de 12 cm, donde podemos observar una salida constante de aproximadamente 0.4 voltios hasta los 12 s, tiempo en el cual se ve un incremento de la salida hasta 0.7 voltios, un poco menor comparado con los resultados mostrados en la Figura 31a. Se evidencia que en los valores máximos las señales están desfasadas entre estas pero la amplitud no presenta diferencias significativas.

Figura 31 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento sin imanes a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d)18 cm e)21 cm

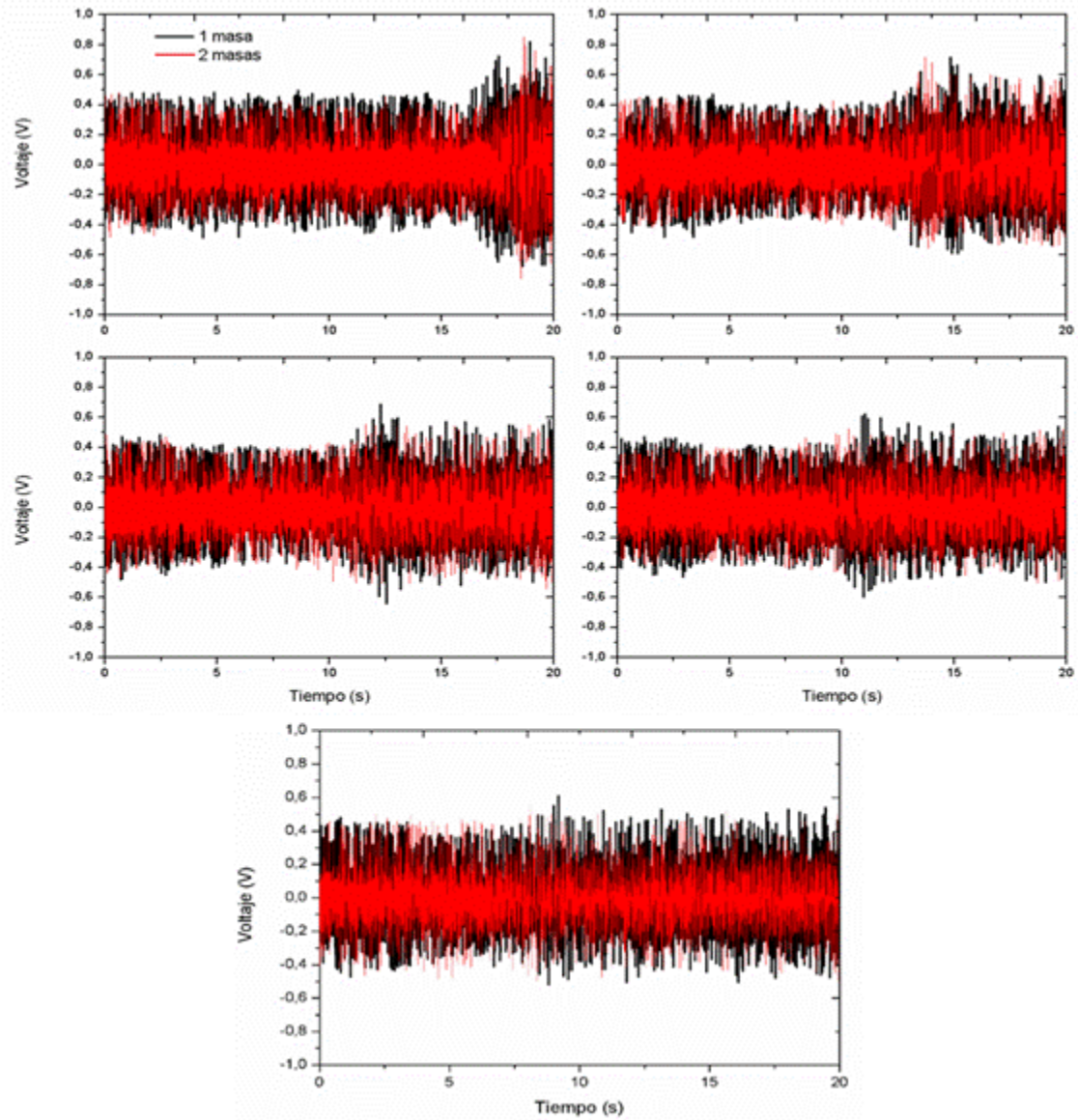
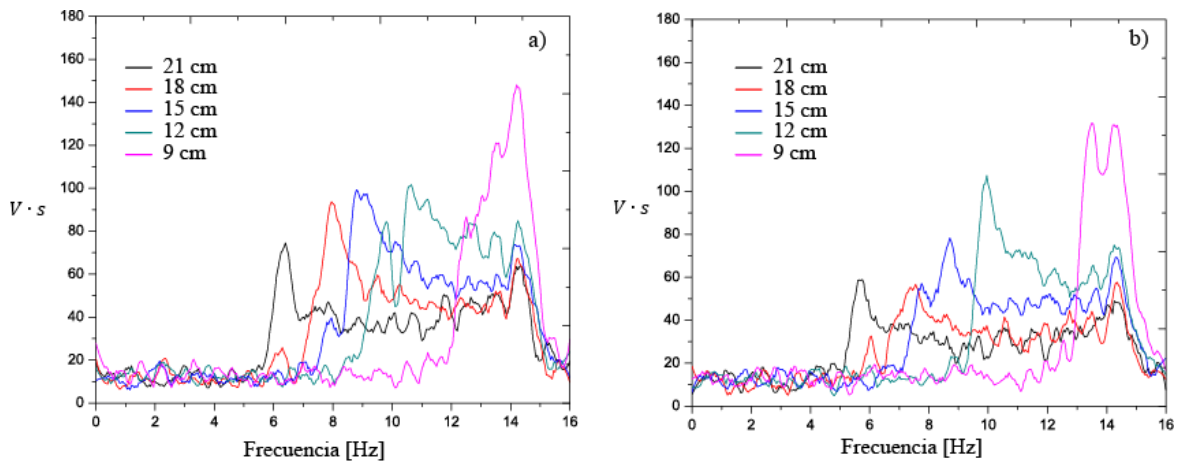


Figura 32 Voltaje vs frecuencia de excitación. a) Una masa b) Dos masas



En las vigas de 15 cm y 18 cm (Figuras 31c y 31d) el voltaje se amplifica entre 11 s y 12.5 s, respectivamente. Esto demuestra que la señal que se maximiza se va desplazando hacia la izquierda de la gráfica, con respecto a las anteriores longitudes. También se aprecia que para estas vigas el valor de la salida de voltaje va disminuyendo hasta alcanzar los 0.6 voltios. Para el caso de la viga de 21 cm, se ve como como los máximos valores inician aproximadamente a los 8 segundos, alcanzando un máximo de 0.6 voltios. Las señales en el tiempo no dimensionan el verdadero significado de la frecuencia, pero si de la amplitud de la señal en todos los casos. Con este objetivo se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a todas las señales discutidas anteriormente. Posteriormente se obtuvieron las funciones de respuesta en frecuencia del voltaje generado por segundo, para las las longitudes de vigas establecidas configuradas con una masa y dos masas. Los resultados se ilustran en las Figuras 32a y b.

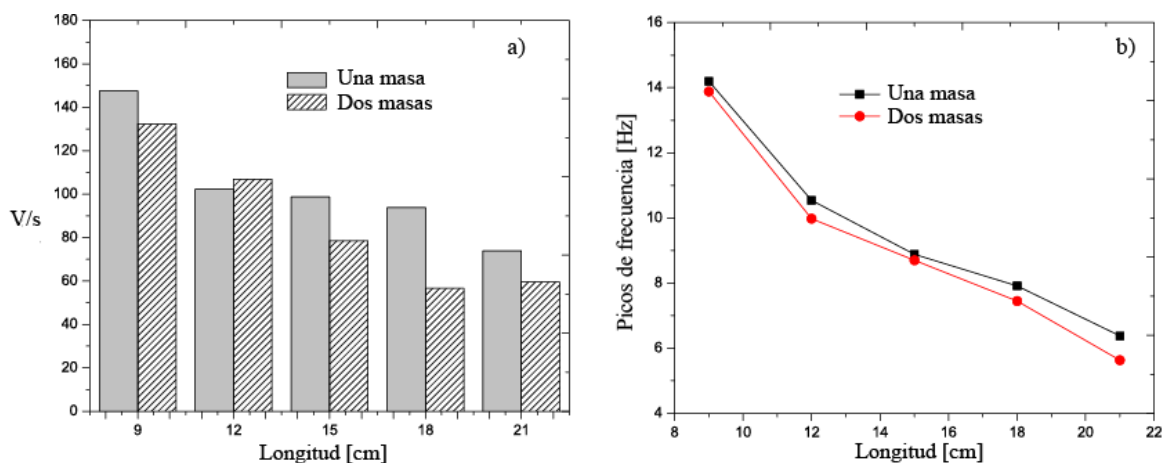
Antes de generar un análisis de la Figura, los principios mecánicos expuestos en la sección fundamentos de vibraciones son destacados en el siguiente argumento. Un sistema mecánico presenta amplitudes de sus movimientos que son maximizados en valores específicos de frecuencia, estos valores se denominan frecuencias naturales. Como se discutió en las secciones anteriores, los valores de las frecuencias son definidos por la relación entre la cantidad de masa y la rigidez del mismo [52]. Estas propiedades son invariantes, sí y solo sí, ninguna fuente de energía de gran escala cambia las mismas. Para el experimento estas relaciones juegan un papel importante ya que en algunas frecuencias se observaran picos o resonancias que indican que el sistema transforma la energía eficientemente en ese espectro. Lo cual es un objetivo fundamental de este trabajo.

Por lo tanto, vemos en la Figura 32a las señales correspondientes a la variaciones de longitudes con una masa. Se observa que para la viga de 9 centímetros se presenta el pico más alto para una frecuencia aproximada de 14 Hz. A medida que aumenta la longitud de las vigas el pico correspondiente al valor más alto, se va desplazando hacia la izquierda a la vez que se va reduciendo dicho valor, es decir que, a mayores longitudes de la viga, menor es la salida de los voltios por segundo, y cada vez es menor la frecuencia donde se presentan los valores más altos cuando se tiene una sola masa agregada al sistema. Podemos decir que, cada vez que una viga es menos rígida, su frecuencia natural disminuye (rigidez depende de la longitud), presentándose un desfase de su frecuencia natural hacia la izquierda. Observando de nuevo la Figura 32a, vemos que, cuando la viga es más larga, se presenta menor captura de energía, debido a que, a pesar de disminuir su rigidez, la viga se deforma más y la energía cosechada es disipada por esta deformación.

En la Figura 32a se observa una señal recurrente sobre la frecuencia de 14 Hz, en la que se puede concluir que esta resonancia es adicionada por el sistema de excitación, ya que aparece en todos los casos de longitud.

Para el caso de la Figura 32b, esta presenta un comportamiento similar a la Figura 32a, ya que la magnitud determinada, disminuye cuando la longitud de la viga aumenta. Por lo tanto, la amplitud de las resonancias en la Figura 32a es mayor. Para realizar una comparación, entre los dos sistemas inerciales, las amplitudes máximas de los picos fueron listadas con respecto a la longitud en la Figura 33a. Podemos evidenciar que la amplitudes en $V \cdot s$ son mayores en casi todos los casos de longitud, siendo el caso mas diferencial, el de la viga de 18 cm ya que la diferencia absoluta entre amplitudes es de 40% aproximadamente.

Figura 33 . Longitud de la viga con una y dos masas vs a) Voltios por segundo b) frecuencia natural



Se puede observar una disminución en la frecuencia del pico a medida que la longitud de la viga va aumentando, pues cada vez que la viga es más larga, su rigidez disminuye, ocasionando disminución en la resonancia de la señal. De igual manera se observó que al agregarle dos masas, la curva de resonancia vs longitud se encuentra por debajo de la curva correspondiente

a una sola masa, con valores menores de frecuencia. Este comportamiento es debido a que las frecuencias naturales en un sistema mecánico, dependen de la relación existente entre la rigidez y la masa $\omega = \sqrt{k/m}$, lo que implica que si a una viga se le aumenta la masa dicha relación disminuye, y adicionalmente el cambio en la geometría (aumento de la longitud de la viga) representa una disminución en la rigidez. Los resultados de las resonancias muestran que aparentemente los picos corresponden a las frecuencias naturales del sistema, ya que cambios en la longitud corresponde con cambios de frecuencia.

4.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2

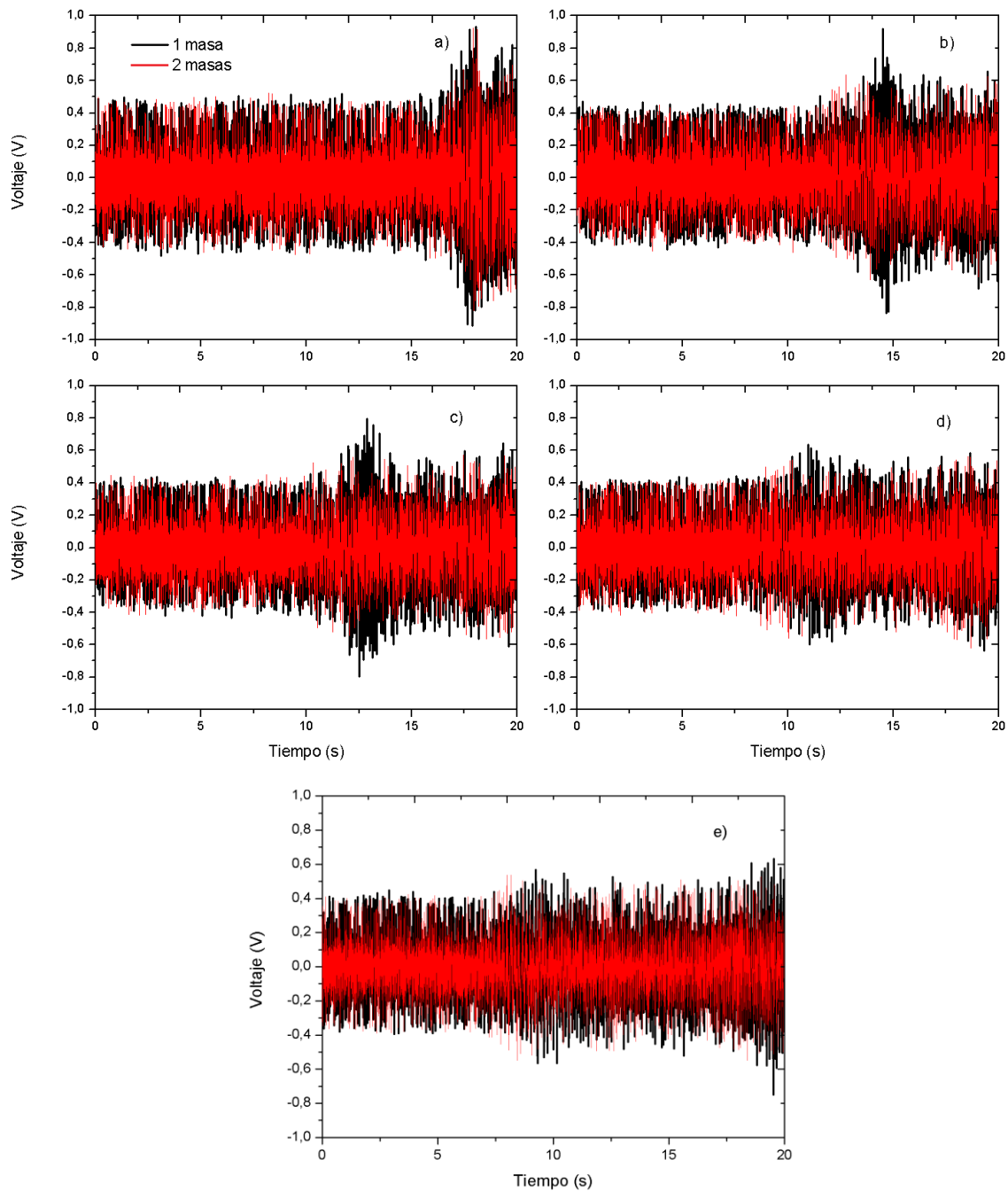
Como se planeó en la metodología de los experimentos, el segundo experimento corresponde con la adición de imanes en modo inestable con ángulos de 125° , 110° y 95° , como se indica en la Figura 28. Consecuentemente, se obtuvieron los resultados correspondientes a los experimentos para cada configuración angular de los imanes usando una y dos masas en los extremos de la misma.

4.2.1 Resultados del experimento con imanes a 125°

La Figura 34 muestra los resultados para la configuración angular de imanes posicionados a 125° con una y dos masas a los extremos de la viga. En la Figura 34a, se ilustra las mediciones obtenidas con la viga de 9 cm, y se observa que, para una masa, se presenta una salida constante de 0.5 voltios durante los primeros 17 s. Para dos masas el voltaje se marca prominentemente en una salida constante de 0.2 voltios aproximadamente. En los 17 s se aprecia un incremento de la salida hasta alcanzar un pico máximo de 0.9 voltios aproximadamente cerca de los 18 s. La Figura 34b, representa los resultados para la viga de 12 cm, para este caso, el pico máximo alcanzado se logra cerca de los 15 s para un valor pico de 0.9 voltios. Para la viga de 15 cm, que

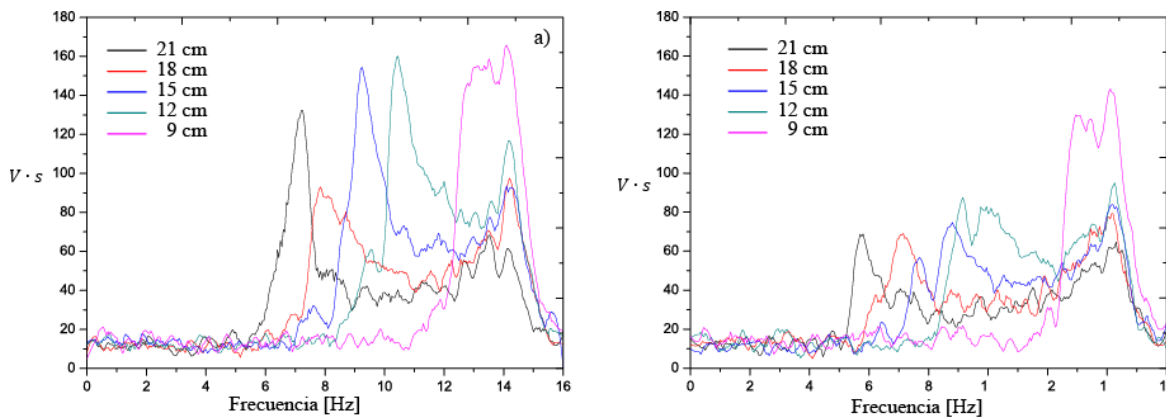
se observa en la Figura 34c muestra este pico de salida alrededor de los 12.5 s con una disminución en su valor de 0.1 voltios, alcanzando así 0.8 voltios en su máximo. Para la Figura 34d correspondiente a la viga de 18 cm, el pico se consigue en 11 s con un valor máximo de 0.6 voltios. Finalmente, para la viga de 21 cm, en la Figura 34e se puede considerar que la amplificación de la salida de voltaje se consigue casi de manera constante a partir de los 9 s hasta los 18 segundos aproximadamente, percibiéndose otro incremento de voltaje a partir de este tiempo hasta los 20 s. En conclusión podemos observar que las vigas de 9 cm y 12 cm producen un amplitud mayor en lugares correspondientes de frecuencias que favorecen la dinámica del sistema. Ya que es importante recordar que la excitación armónica del sistema varía en tiempo y frecuencia.

Figura 34 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento con imanes a 125° a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d) 18 cm e) 21 cm



Las graficas 35a y 35b muestran los resultados en la frecuencia de las funciones de voltaje en el tiempo mostradas en la figura 34, funciones anteriormente discutidas. Aplicando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre estas funciones son determinadas las funciones de respuesta en frecuencia del voltaje. En las graficas se puede apreciar que a medida que la longitud de las vigas aumenta, los picos de salida en voltaje correspondientes a una frecuencia de resonancia, se van desplazando hacia la izquierda, lo que significa que dicha frecuencia disminuye, tal como se evidencio en el primer experimento. Sin embargo, las amplitudes de los resultados con una masa son mayores. Esto puede ser contrastado con la respuestas en el tiempo, ya que los lugares de mayor amplitud corresponden con la resonancia en el dominio de la frecuencia.

Figura 35 Voltaje por segundo vs frecuencia de excitación con imanes a 125° a) Una masa. b) Dos masas

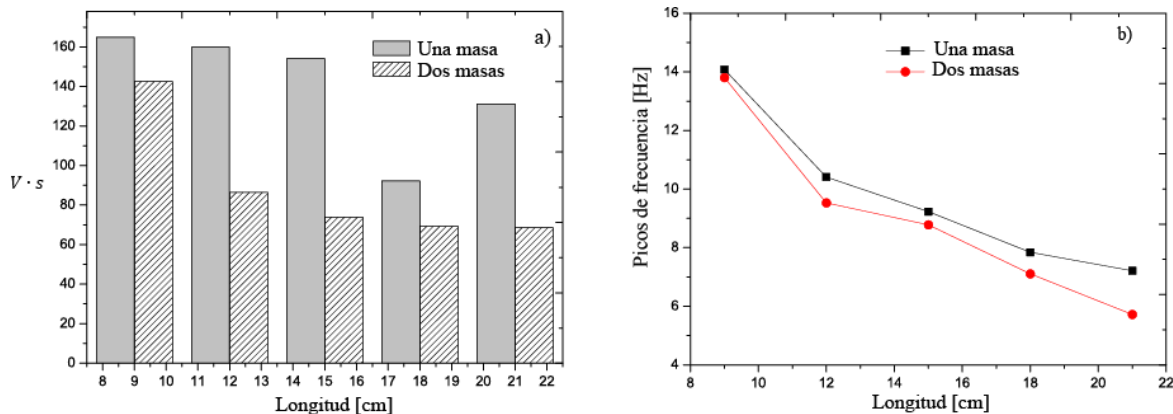


Comparando el experimento anterior, es observado que las amplitudes son mayores en este experimento en ambos casos de adición de masa. Sin embargo, el aumento es considerablemente mayor para una masa, ya que los imanes puestos a 125° provocan inestabilidad en el movimiento del brazo del dispositivo cosechador generando mayor energía. El aumento en amplitud para

cada viga de acuerdo a la Figura 35 es de 85 %, 100 %, 114 %, 28.5 % y 85 % para las longitudes de 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm y 21 cm respectivamente

De acuerdo a la comparación mostrada en la Figura 36a, se evidencia una gran diferencia entre los experimentos realizados con una y con dos masas, respecto a la salida medida en voltios por s contra la longitud de la viga. Para una misma viga se presenta una mayor salida cuando solo tiene una sola masa ubicada en su extremo inferior, que cuando se colocan dos masas, observando así un aumento del 18 % y del 28 % en la salida de voltaje para las vigas de 9 cm y 18 cm. Para las vigas de 12 cm, 15 cm y 21 cm el aumento es bastante considerable con valores de 100%, 106 % y 92 % en su orden cuando solo se coloca una sola masa en el extremo inferior de la viga, estando estos resultados en concordancia con los aumentos en la salida mostrados en la Figura 35.

Figura 36 Longitud de la viga con imanes a 125° con una y dos masas vs a) Voltios por segundo b) frecuencia natural

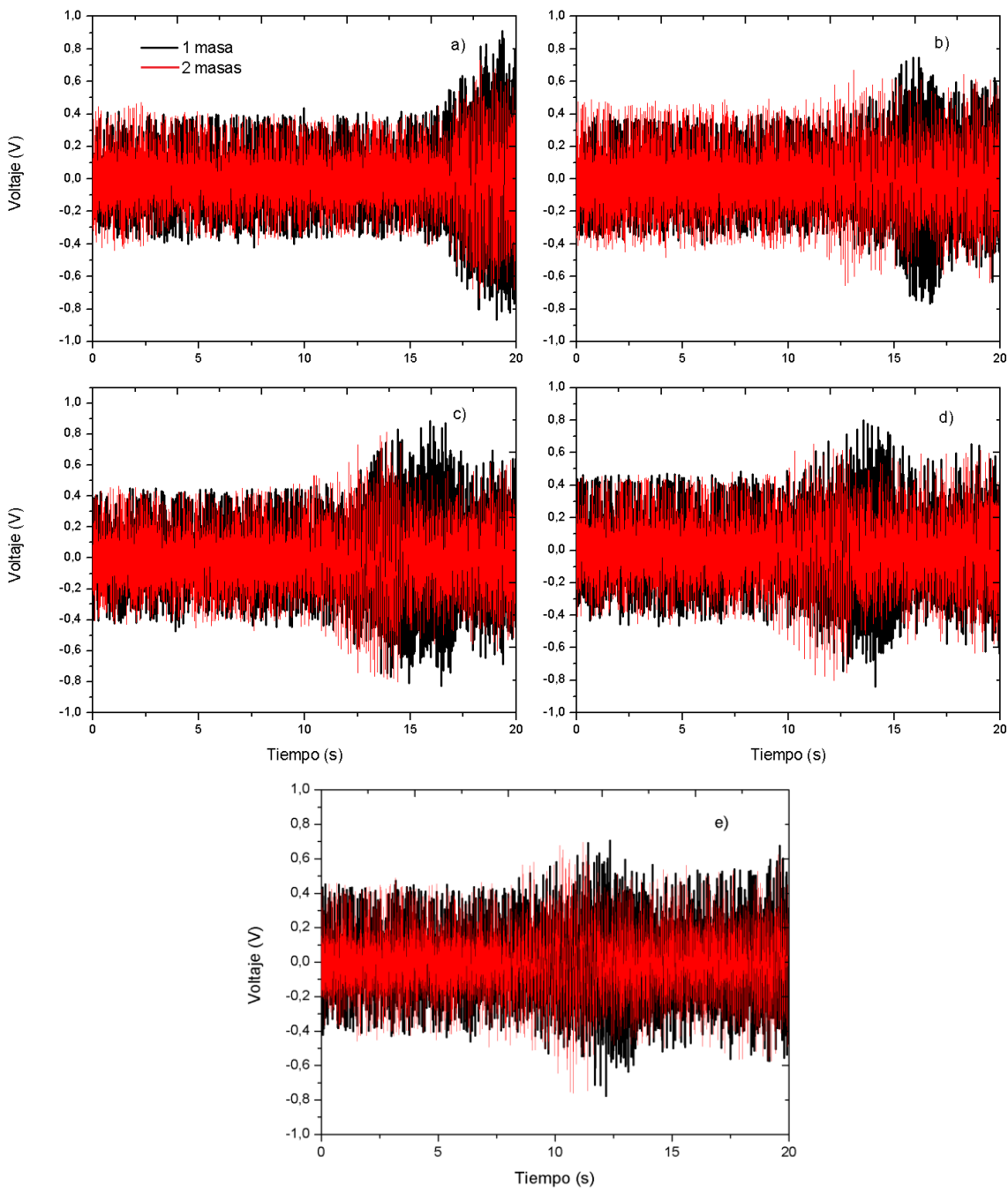


El efecto de la longitud de la viga sobre la frecuencia natural, presenta comportamiento similar al del experimento sin imanes desestabilizadores. Sin embargo, las amplitudes son mayores en este experimento, lo cual muestra que es favorable para la cosecha de energía.

4.2.2 Resultados del experimento con imanes a 110°

La Figura 37 muestra los resultados para el experimento con imanes ubicados a un ángulo de 110° . Se observa que los picos correspondientes a valores amplificados de la salida de voltaje tienen un ancho un poco mayor (amplitud en el tiempo) comparado con los experimentos anteriores. Estos valores amplificados como ha sido la tendencia, se van desplazando hacia la izquierda, es decir que la frecuencia donde se presentan estos picos, va disminuyendo conforme la longitud de la viga aumenta, con la diferencia que estos valores presentan un ancho de banda mayor. También se aprecia que estos valores son mucho más amplificados para el caso de una masa que para el caso donde se tienen dos masas. En la Figura 37a se identifica el valor amplificado para la viga de 9 cm y una masa, en un promedio de 19 s, y se puede ver un ligero corrimiento o desfase con respecto al caso de dos masas, curva de color rojo, donde se presenta aproximadamente a los 18 s. De la misma manera en la Figura 37b, correspondiente a la viga de 12 cm, el máximo valor se encuentra en el tiempo de 17 s para una masa y cerca de los 14 s para dos masas. Para la viga de 15 cm los valores son 16 s y 14 s aproximadamente, como lo evidencia la Figura 37c. En la Figura 37d vemos que para una masa el valor máximo es de 14 s, y, para dos masas de 12 s.

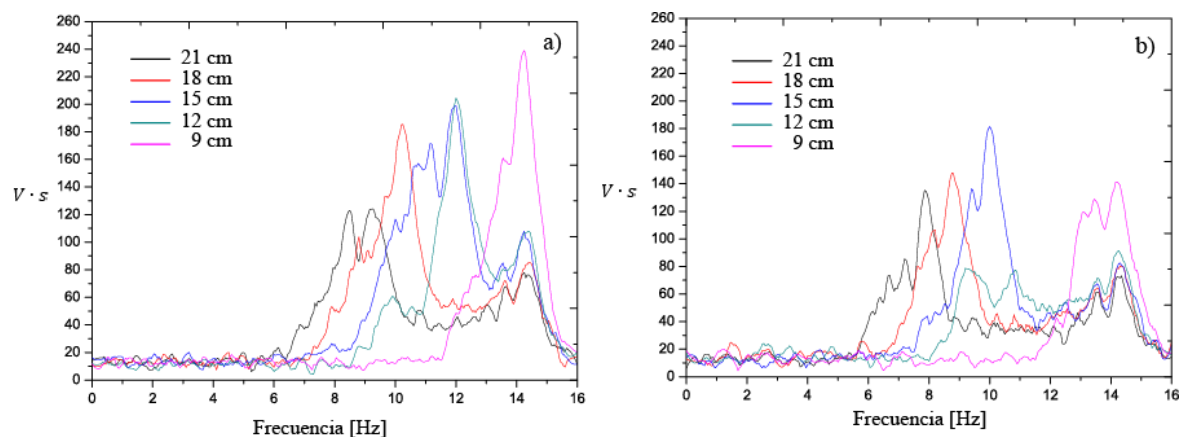
Figura 37 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento con imanes a 110° a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d) 18 cm e) 21 cm



Finalmente, para el caso de la viga de 21 cm estos valores se presentan en tiempos de 12 s y 10 s, para una y dos masas respectivamente.

La salida obtenida en voltios por s para cada una de las vigas con respecto a la frecuencia de excitación se muestran en 38a y b. La viga de 9 cm presenta el mayor pico, y se evidencia que la amplitud de los picos va disminuyendo a medida que se aumenta la longitud de la viga, siendo la viga de 21 cm la que menor salida presenta. Con dos masas, la salida en voltios por s disminuye como lo reporta la Figura 38b. Una característica especial en este resultado, puede observarse en el ancho del pico, este cubre un mayor espectro de frecuencia y aparentemente se aprecian dos picos en cada resonancia, esto es un aspecto favorable porque el incremento del ancho de banda contribuye al propósito de cosecha de energía.

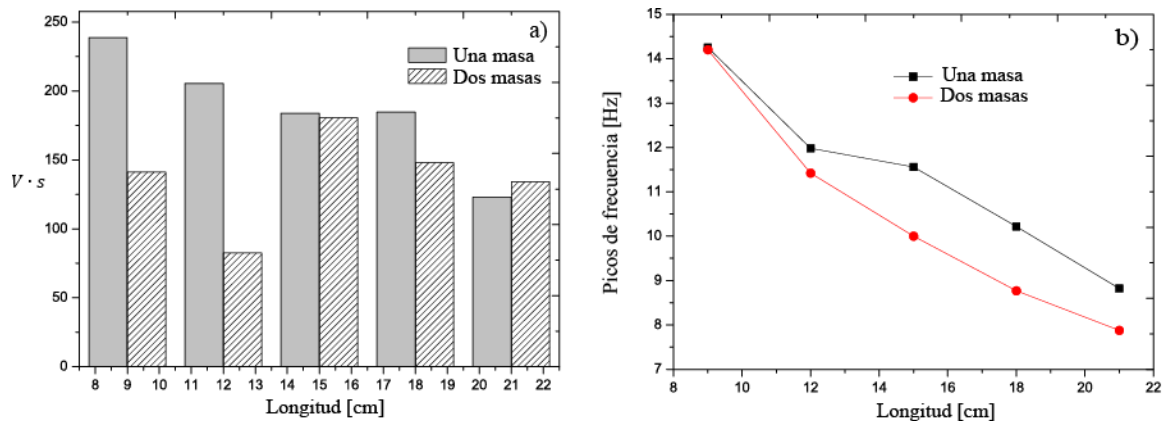
Figura 38 Resultados experimento con imán a 110° a) Voltios por segundo vs frecuencia para una masa b) Voltios por segundo vs frecuencia para dos masas



Consecuente con los cálculos realizados en los anteriores experimentos, fueron determinadas las funciones de respuesta en frecuencia para las cinco funciones de voltaje en el tiempo. Figura 39b, el comportamiento no difiere mucho de los experimentos anteriores, sin embargo, se presenta mayor diferencia entre los experimentos realizados con una masa y aquellos realizados

con dos masas, pues ambas curvas se separan un poco más comparado con los experimentos realizados sin imanes y con imanes ubicados a 125° . La separación significa que la relación frecuencia longitud fue perturbada, ya que no mantiene la tendencia de los otros experimentos. La frecuencia natural disminuye normalmente cuando se agregan dos masas a la viga.

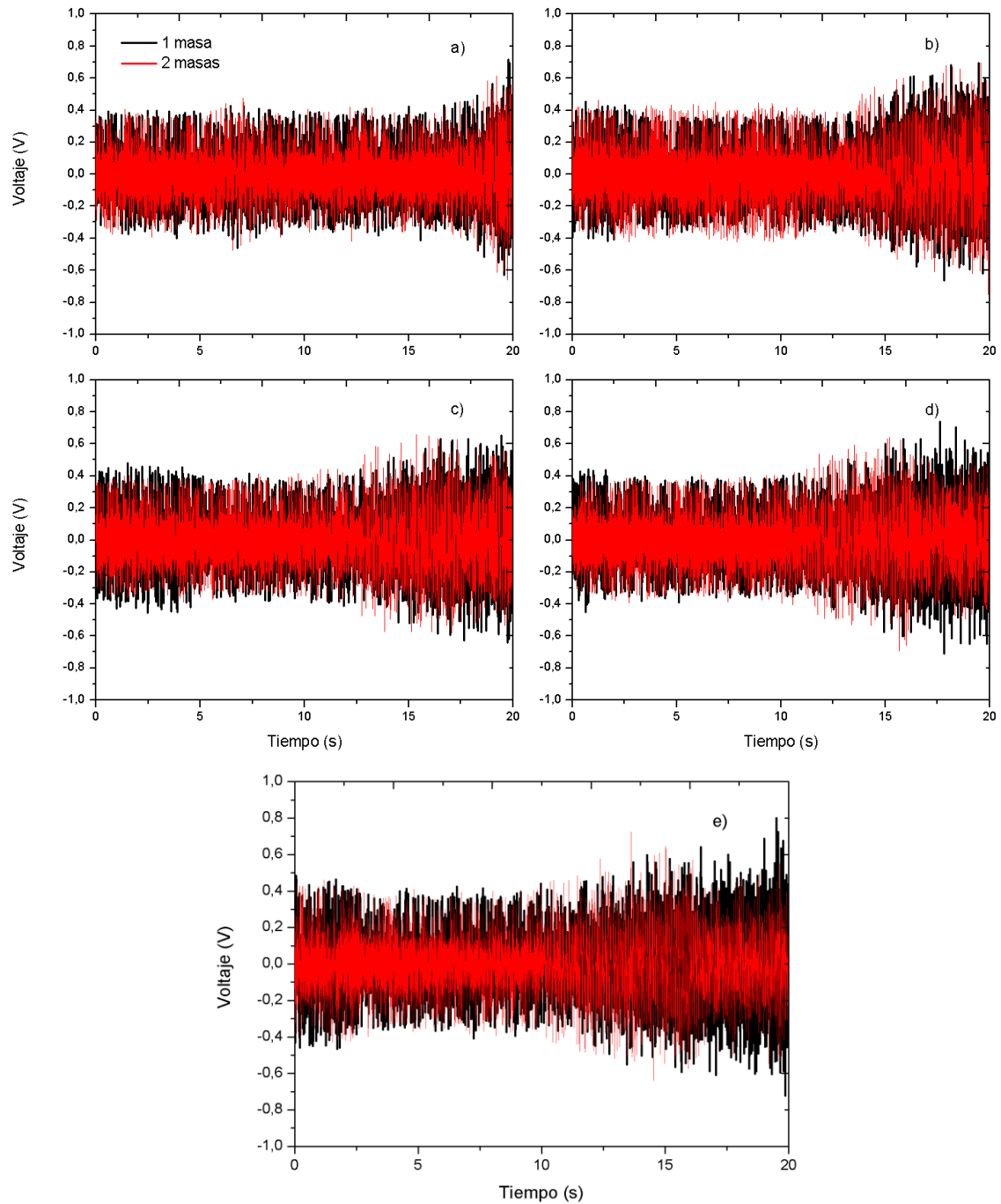
Figura 39 Resultados experimento con imán a 110° a) Voltios por segundo vs longitud b) Frecuencia natural vs longitud



4.2.3 Resultados del experimento con imanes a 95°

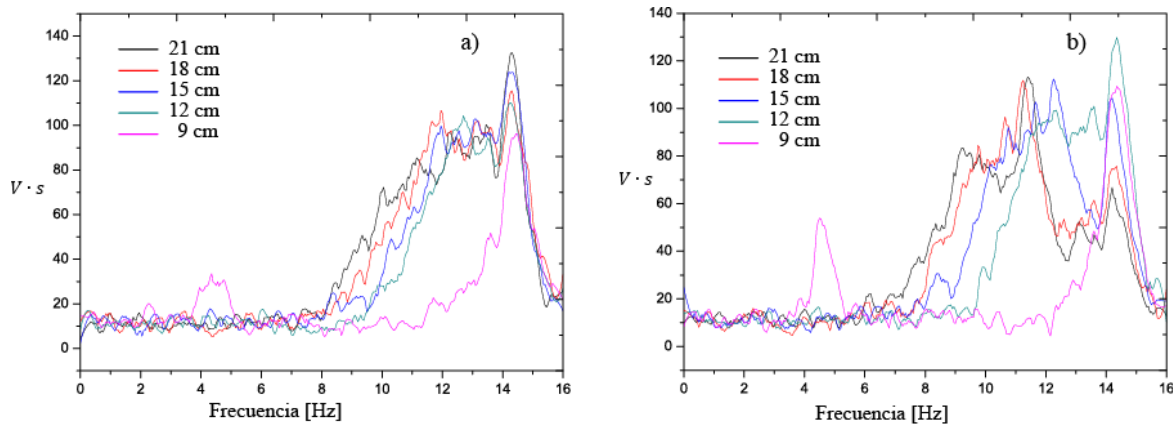
En la Figura 40 se representan los resultados obtenidos para el experimento con imanes a 95° . Se observa como caso particular el aumento de ancho de banda para la amplitud de la salida de voltaje para todas las longitudes de viga. En este experimento se ve claramente el corrimiento de este valor amplificado, que puede ser un indicador de que se estaría excitando más en la frecuencia, creándose una resonancia externa debido a una desestabilización del sistema provocada por la configuración del experimento con imanes ubicados a un ángulo menor.

Figura 40 Tiempo vs Salida de voltaje para una y dos masas y diferentes longitudes de viga, para el experimento con imanes a 95° a) 9 cm b) 12 cm c) 15 cm d) 18 cm e) 21 cm



Con respecto a la salida en voltios por segundo contra la frecuencia, los resultados obtenidos no presentan mucha diferencia para vigas con una y dos masas, según se aprecia en las Figuras 41a y 41b respectivamente. Se aprecia un ancho de banda para ambos casos, que va aproximadamente desde los 8 Hz hasta los 14 Hz, siendo mucho mayor para el caso de la viga de 21 cm y mucho menor para la viga de 9 cm. De igual manera se observa que para la viga más corta de 9 cm se presenta un pico de resonancia cerca de los 4 Hz tanto para una masa como para dos masas, la cual puede ser una resonancia en cuerpo rígido.

Figura 41 Resultados experimento con imán a 95° a) Voltios por segundo vs frecuencia para una masa. b) Voltios por segundo vs frecuencia para dos masas



Las graficas correspondientes a los voltios por segundo y la frecuencia vs la longitud de la viga no se realizaron debido a que no es posible identificar una resonancia específica, pues el sistema distribuyó la resonancia y la colocó en un intervalo más amplio como se observó en la figura 41.

4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

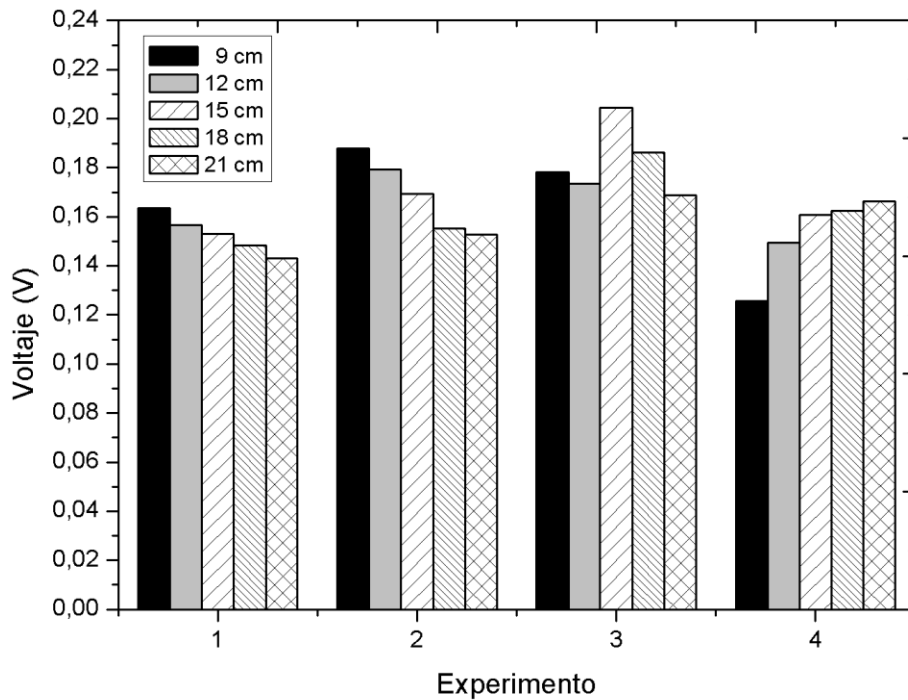
La Figura 42 muestra el voltaje RMS de salida calculado para todos los experimentos realizados, los valores fueron determinados con la siguiente expresión :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n}(V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2)} \quad (2.21)$$

En dicha Figura el experimento 1 corresponde al experimento realizado en modo inductivo, los experimentos 2, 3 y 4 corresponden al modo inductivo con inestabilidad en los cuales los imanes fueron ubicados a 125° , 110° y 95° , respectivamente. Se observa un patrón de comportamiento similar en el modo inductivo (Experimento 1 de la Figura 42), y en el de 125° (Experimento 2 de la Figura 42), donde se aprecia que a medida que aumenta la longitud de la viga la salida de voltaje va disminuyendo, presentando un mejor comportamiento para la viga más corta, de 9 cm. En el experimento con imanes ubicados a 110° (experimento 3 de la Figura 42), el comportamiento apreciado es diferente respecto a los demás, donde puede verse que la viga intermedia correspondiente a la viga de 15 cm, es la que más voltaje de salida tiene, siendo esta la que presenta un mejor aprovechamiento de la energía cinética.

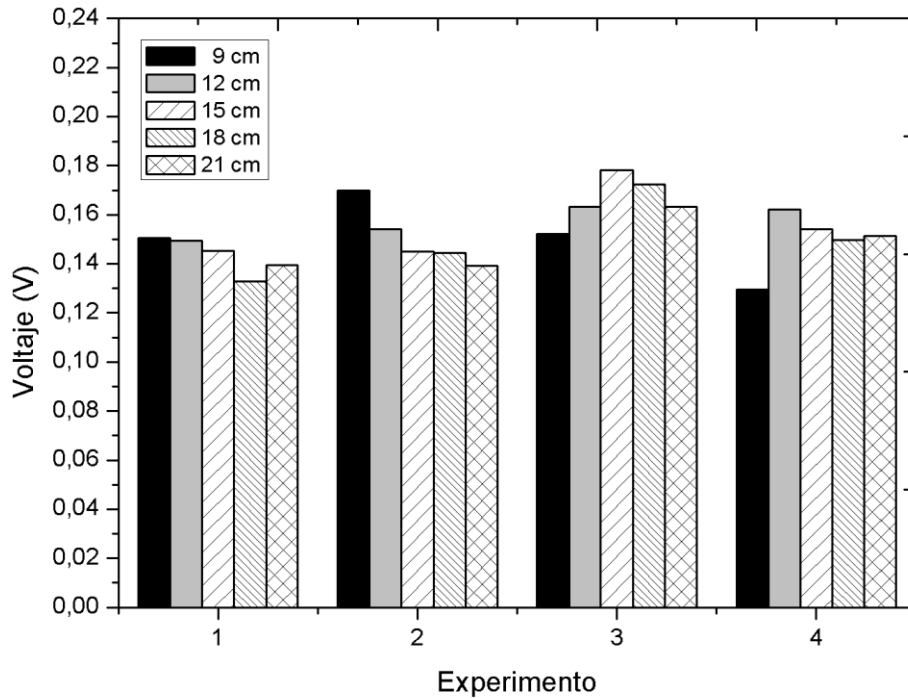
Para el caso del experimento 4, realizado con los imanes ubicados a 95° , se observa claramente un comportamiento opuesto al presentado con los dos primeros experimentos, donde a medida que se aumenta la longitud de la viga se tiene una mejor salida de voltaje, siendo mas eficiente la viga de 21 cm para este experimento.

Figura 42 Voltaje de salida por experimento para todas las longitudes de viga, una masa



En la Figura 43 se observa la salida de voltaje con respecto a todos los experimentos y todas las longitudes de vigas, para el caso de dos masas. La tendencia es muy parecida en cuanto al comportamiento observado en la Figura 42. Para el caso de los dos primeros experimentos la viga más corta presenta la mejor salida de voltaje, y en cuanto al mejor aprovechamiento de la energía cinética, observamos que viga de 15 cm con imanes desestabilizadores ubicados a 110° presenta la mayor salida de voltaje (Experimento 3).

Figura 43 Voltaje de salida por experimento para todas las longitudes de viga, dos masas



En comparación con los experimentos de una sola masa, los valores de voltaje de salida son menores para el caso de dos masas en todos los experimentos. Para el caso del experimento 1, tanto con una como con dos masas, la viga de 9 cm tiene la salida más alta, con valores de 0.16 y 0.15 voltios respectivamente, lo que equivale a un 10 % más para el experimento de una sola masa. Este comportamiento es ligeramente diferente para el experimento dos, en el cual para ambas configuraciones, el incremento es de 11 % aproximadamente para el experimento con una masa en la misma viga de 9 cm con respecto al mismo experimento con dos masas. Sin embargo, los resultados permiten constatar que la viga de mejor respuesta en salida de voltaje, corresponde a la viga de 15 cm (Experimento 3) tanto para una como para dos masas, y el

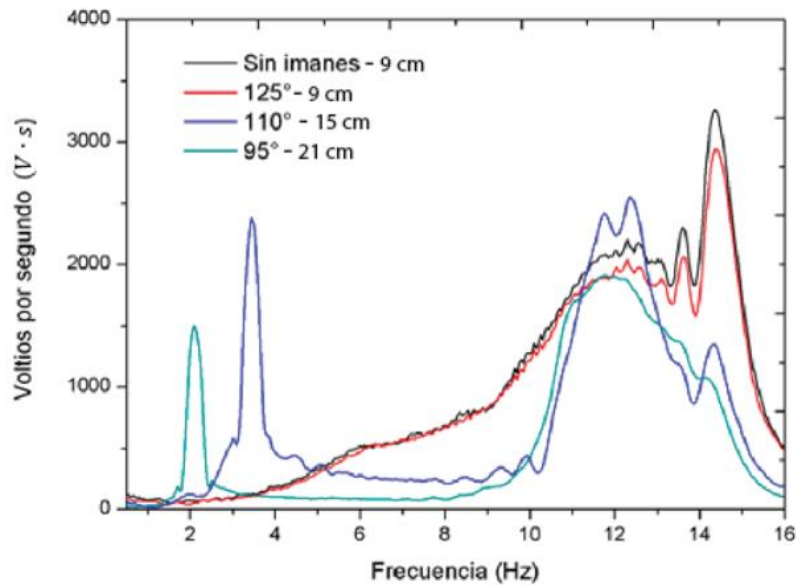
aumento observado sobrepasa el 15 % de incremento en la salida de voltaje para el caso de una masa con respecto al mismo experimento con dos masas.

4.3 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO EN MODO PIEZO INDUCTIVO

Para este experimento, tal como se explicó en la sección 3.3, se le adicionó un elemento piezoeléctrico a los experimentos que presentaban mejores rendimientos de voltaje, es decir todos los experimentos en modo inductivo y en modo inductivo con inestabilidad. De acuerdo a la sección 4.3 y a las figuras 42 y 43 se concluyen los mejores resultados. Para el experimento 1 el mejor resultado se obtuvo con la viga de 9 cm, y para el experimento 2 los mejores resultados fueron para las vigas de 9 cm, 15 cm y 21 cm correspondientes a los experimentos con imanes ubicados a 125° , 110° y 95° respectivamente, y para el caso de una sola masa. La Figura 44 muestra la salida de voltaje por segundo para cada experimento seleccionado realizado en modo piezo-inductivo.

En dicha Figura se aprecia que para el rango de frecuencia experimentado se presentan unos picos de resonancia a determinadas frecuencias en cada uno de los cuatro experimentos. Para el caso del experimento sin imanes el mayor valor del pico obtenido corresponde a una frecuencia aproximada de 14.5 Hz. Así mismo se observan varios picos para los demás experimentos. Para los experimentos correspondientes a los imanes ubicados a 110° y 95° , se presentan picos a bajas frecuencias aproximadas de 3.5 Hz y 2 Hz respectivamente, volviendo a presentar picos en las frecuencias 12 Hz aproximadamente.

Figura 44 Voltaje por segundo para cada experimento

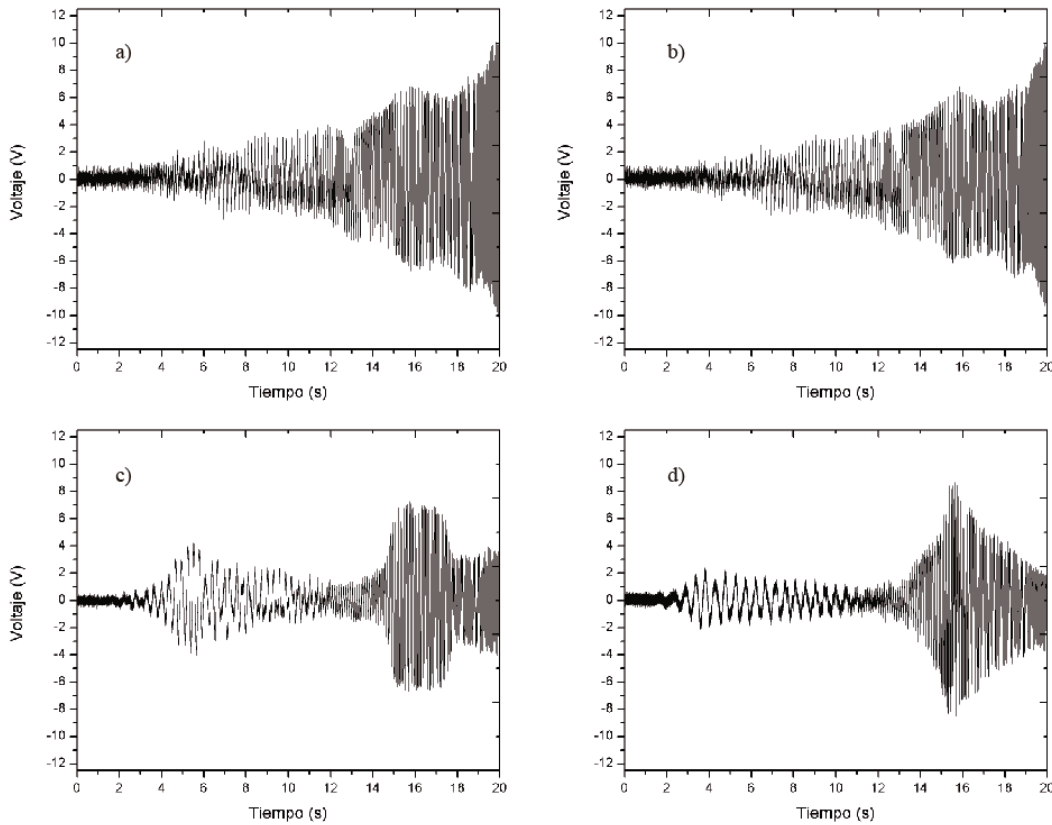


En la Figura 45 se observa la salida de voltaje para el experimento en modo piezo-inductivo, teniendo un circuito en serie entre el elemento inductivo (bobina) y el elemento piezoeléctrico, cuyo circuito equivalente fue mostrado en la Figura 29.

Para el caso del experimento en modo piezo-inductivo sin inestabilidad y viga de 9 cm, se aprecia en la Figura 45a, un voltaje creciente, presentando un valor pico de 10 voltios correspondiente al voltaje más alto en un tiempo de 20 s lo que equivale a la frecuencia máxima de excitación de 15 Hz. Un caso similar se observa para el caso b de la misma Figura, el cual corresponde al experimento en modo piezo-inductivo con inestabilidad, ubicando imanes a 125° y con una viga de 9 cm. Este comportamiento puede ser debido a que el sistema distribuyó la resonancia en un rango más amplio aproximadamente desde los 9 Hz o 10 Hz en concordancia con lo mostrado en la Figura 44 para estos dos experimentos. Observando la Figura 45c, que corresponde al experimento realizado en modo piezo-inductivo con inestabilidad, con imanes

ubicados a 110° y utilizando viga de 15 cm, se observan dos picos de resonancia en tiempos de 5 s y 16 s respectivamente, lo que concuerda con los picos correspondientes a las frecuencias mostradas en la Figura 44 de aproximadamente 3.5 Hz y 12 Hz. El pico en la frecuencia de 3.5 Hz genera un voltaje pico de 4 voltios, mientras que el pico en la frecuencia de 12 Hz genera un voltaje pico cercano a los 5.5 voltios.

Figura 45 Salida de voltaje experimento piezo-inductivo a) Sin estabilidad con viga de 9 cm. b) Con inestabilidad, viga de 9 cm y ángulo de 125° . c) Con inestabilidad, viga de 15 cm y ángulo de 110° . d) Con inestabilidad, viga de 21 cm y ángulo de 95° .



Para el experimento piezo-inductivo con un ángulo de 95° y una viga de 21 cm mostrado en la Figura 45d, se observa un aumento de voltaje con un valor de 2 voltios entre los 3 s y 4 s lo que corresponde de acuerdo a la Figura 44 al pico de resonancia a una frecuencia de 2 Hz, y también

se observa un voltaje máximo de 8 voltios en un tiempo cercano a los 16 s, equivalente a una frecuencia de 12 Hz para dicho experimento mostrado en la Figura 44. El comportamiento de los últimos dos experimentos en el modo piezo-inductivo mostrados en las Figura 45c y d, son similares y no presentan un incremento de voltaje de manera continua como se ve en los casos a y b de la misma Figura. Este hecho podría relacionarse con la ubicación de los imanes a ángulos menores que lo que hacen es limitar el movimiento del brazo cosechador sin generar así algún voltaje producido por el mismo movimiento y solo se observa el voltaje generado por el pico de resonancia.

Los voltajes rms para un ancho de banda común en tiempos de 15 s a 17 s los cuales corresponden a frecuencias entre un rango de 11 Hz a 13 Hz para los cuatro experimentos de la Figura 45 son de 4.2 voltios, 3.9 voltios, 4.6 voltios y 4.1 voltios respectivamente. Para los casos de los numerales c y d de la figura donde se aprecian unos picos de resonancia en 3.5 Hz y 2 Hz respectivamente, los voltajes rms son de 1.8 voltios y 1.1 voltios.

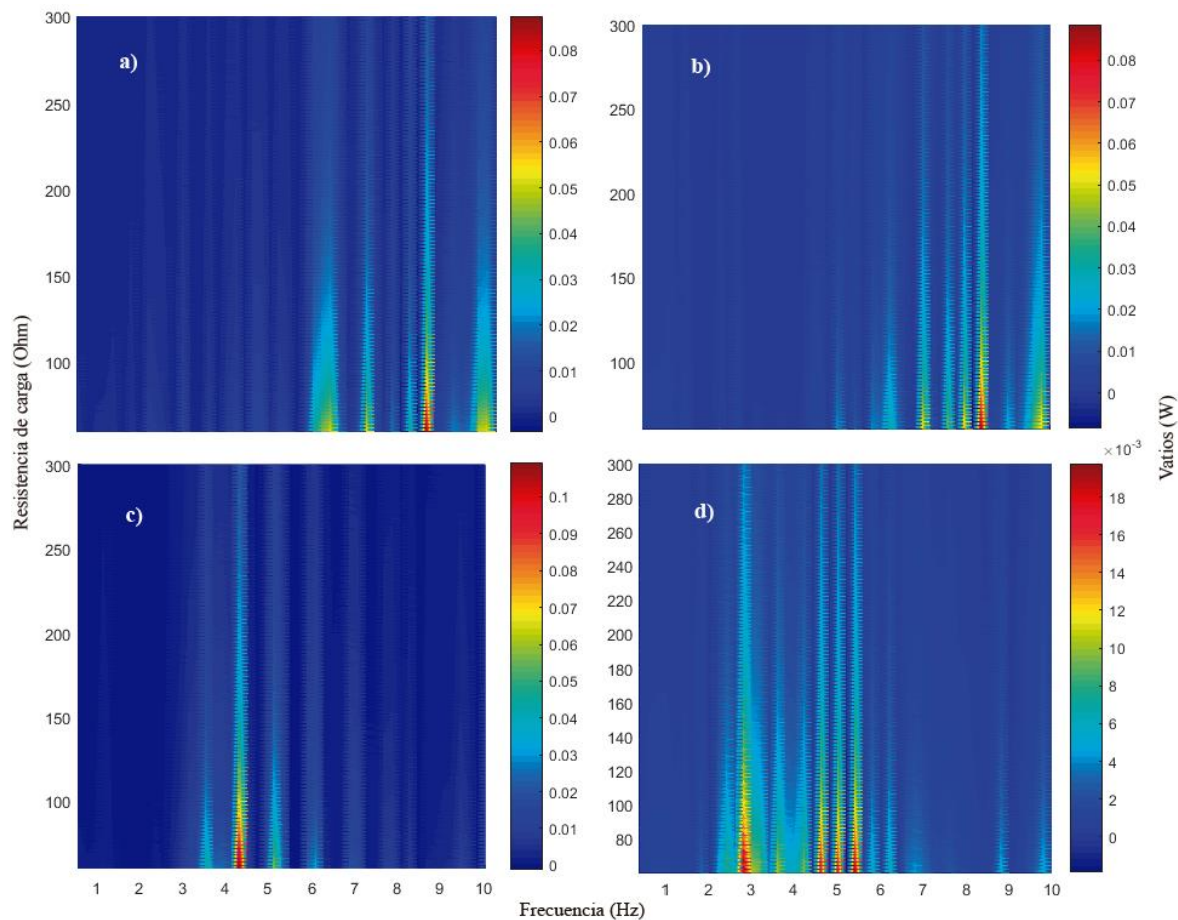
4.4 RESULTADOS DE POTENCIA DEL EXPERIMENTO EN MODO PIEZO-INDUCTIVO

En esta sección son mostrados los cálculos de potencia para el sistema cosechador considerando que la fuente de energía proviene del shaker usado como fuente vibratoria en el experimento.

En las Figuras 46 y 47 se observan los resultados de la potencia obtenida para el experimento en modo piezo-inductivo. La potencia es obtenida para el circuito en serie entre el piezoeléctrico y la bobina del dispositivo. La potencia se calculó para los cuatro experimentos de la siguiente manera: Sin imanes, y con imanes a 125°, 110° y 95°, representados en los numerales a, b, c y d de las mismas figuras. Los valores de potencia fueron obtenidos para un rango de frecuencia

entre 0 Hz y 15 Hz y valores de resistencia de carga variable entre 10 Ohms y 300 Ohms. En este contexto en la Figura 46 se presentan los resultados de la potencia para un rango de frecuencia entre 0 Hz y 10 Hz, y en la Figura 47 para un rango de frecuencia entre 10 Hz y 15 Hz.

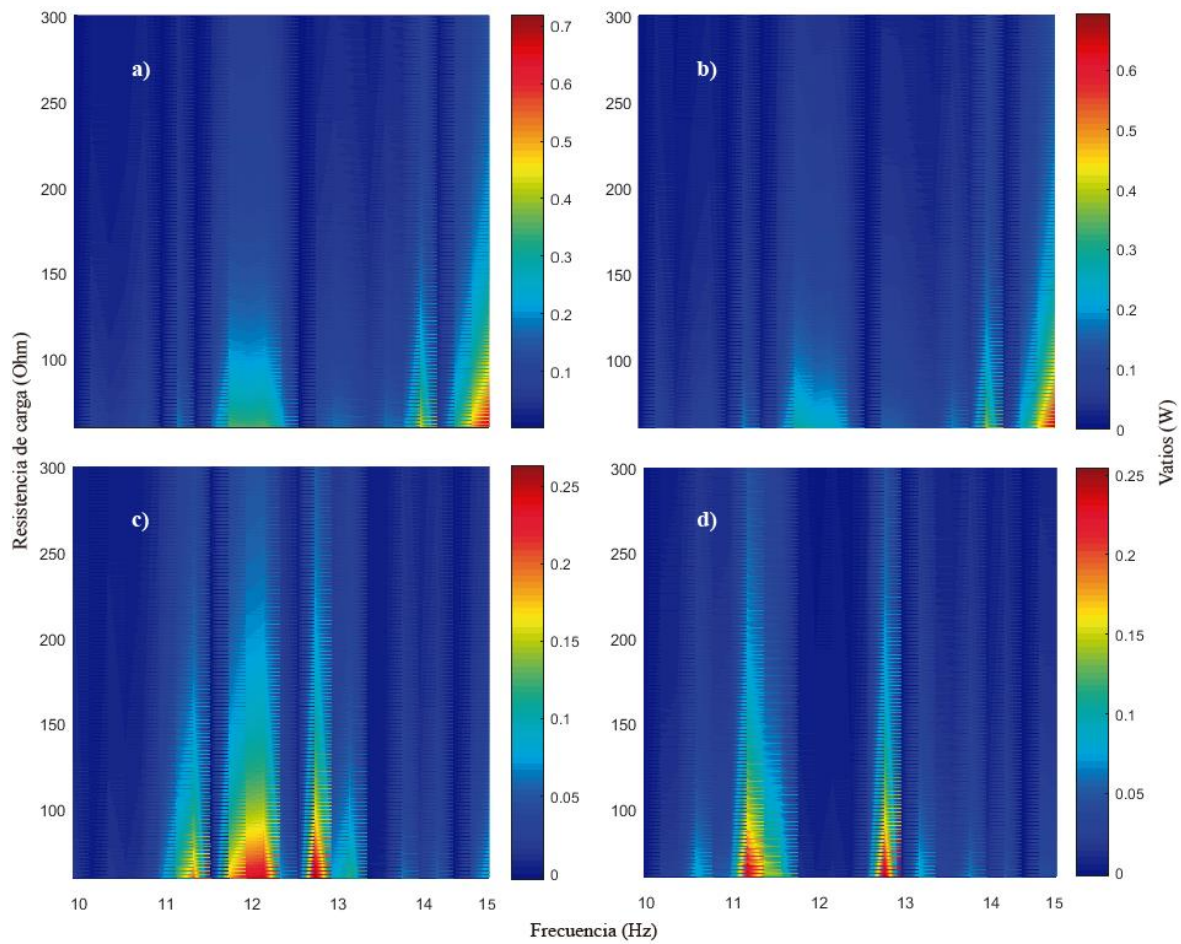
Figura 46 Potencia obtenida para circuito en serie en el rango de 0 a 10 Hz. a) Sin imanes b) Imanes a 125° c) Imanes a 110° d) Imanes a 95°



En la Figura 46, se observan valores de potencia muy bajos para los cuatro experimentos y para dicho rango de frecuencia, identificando algunos picos de mayor potencia de acuerdo al experimento. Para el caso de los experimentos sin imanes y con imanes a 125°, numerales a) y b) de la Figura, se presentan los valores más altos de la potencia cerca de los 9 Hz y para resistencias de carga muy bajas por el orden de los 10 Ohms. Para el caso del experimento con

imanes a 110° , c de la misma Figura se observa que el valor más alto de la potencia con un valor próximo a 0.1 vatios, se encuentra en una frecuencia cercana a los 4.2 Hz.

Figura 47 Potencia obtenida para circuito en serie en el rango de 10 a 15 Hz a) Sin imanes b) Imanes a 125° c) Imanes a 110° d) Imanes a 95°



Los valores de potencia más bajos se observan en el experimento con imanes a 95° correspondiente a gráfica c) de la Figura 46. La potencia se reduce a medida que aumenta la resistencia de carga, como puede apreciarse en ambas Figuras.

En la Figura 47 se presentan los valores obtenidos de potencia para un rango de frecuencia entre 10 Hz y 15 Hz para los cuatro experimentos. Como es lógico los valores altos de potencia se dan a valores bajos de la resistencia de carga.

Para el experimento sin imanes, Figura 47a, el valor más alto de la potencia se encuentra cerca de los 15 Hz, al igual que para el experimento con imanes a 125° observado en b de la misma Figura, sobrepasando ligeramente los 0.6 vatios. Esta potencia tan alta puede ser ocasionada por una resonancia de todo el sistema de excitación en el último valor de la frecuencia. Para los experimentos representados en c) y d) y que corresponden a los experimentos con imanes a 110° y 95° , se presentan varios picos en diferentes valores de frecuencia. En c) de la Figura podemos apreciar tres picos muy cercanos que pueden ser considerados formando un ancho de banda entre los 11 Hz y 13 Hz aproximadamente, con potencias aproximadas a los 0.25 vatios. Para el último caso en d) de la misma Figura, se observan dos picos con valores de potencia igualmente cercanos a los 0.25 vatios, pero con una separación más distante, pues uno se encuentra en una frecuencia de 11 Hz aproximadamente, y el otro cercano a los 13 Hz.

Capítulo 5

5.1 CONCLUSIONES

En este estudio se mostró el desarrollo y evaluación de un dispositivo cosechador de energía con tecnología piezo-inductiva para la captura de vibraciones entre 0 Hz y 15 Hz (intervalo de frecuencia) y generación de energía de baja potencia, es decir en el orden de los mW. El desarrollo del dispositivo se basó en el mecanismo interno diseñado para los discos duros HDD usados como sistemas de almacenamiento masivo de datos. El diseño propuesto permitió que fueran adheridos diferentes tipos de elementos como vigas de diversas longitudes y masas. Todos estos elementos fueron aplicados en un análisis paramétrico que consistió en la evaluación del rendimiento energético bajo diferentes condiciones geométricas e inerciales. Los resultados mostraron que las correlaciones entre la frecuencia y la longitud de las vigas pueden ser usadas como herramienta de diseño, si la resonancia del dispositivo debe coincidir con alguna frecuencia en particular de excitación.

Sin embargo, para este trabajo fueron seleccionadas 5 longitudes fijas, con el fin de elegir un diseño óptimo correspondiente con la máxima generación de energía; por lo tanto, la metodología de los experimentos fue organizada de la siguiente forma: a. Dispositivo en modo inductivo. b. Dispositivo en modo inductivo con inestabilidades. c. Dispositivo en modo piezo-inductivo. Los experimentos a y b fueron realizados de forma paralela y el experimento c fue llevado a cabo de forma secuencial. Los resultados de los experimentos a y b mostraron que el sistema con inestabilidades es más eficiente que el sistema únicamente en modo inductivo, particularmente donde se utilizaron vigas con una sola masa adherida. Los aumentos de voltaje de los experimentos con inestabilidad (vigas con imanes ubicados a 125° y 111°) presentaron un promedio de 10 % y 19 % por encima del experimento en modo inductivo (sin

inestabilidades magnéticas). Por otro lado, para cada una de las vigas utilizadas, el rendimiento de una sola masa con respecto a dos masas presentó un aumento de 8.9 %, 4.8 %, 10.5 %, 8.7 % y 6.4% en la salida de voltaje desde la viga mas corta de 9 cm, hasta la mas larga de 21 cm, respectivamente.

La combinación de un elemento inductivo y un material piezoeléctrico permitió lograr mayor eficiencia en cuanto a la cosecha de la energía, ya que el elemento inductivo generó energía desde el movimiento y el material piezoeléctrico desde la deformación de la viga. Se observó como los voltajes generados aumentaron cuando fue adherido el elemento piezoeléctrico para establecer un modo piezo-inductivo en el sistema. El aumento fue comparado con respecto a los experimentos realizados únicamente en modo inductivo con o sin inestabilidad. Los voltajes muestran que las magnitudes superaron los experimentos inductivos en un orden de hasta 20 veces. Como ejemplo resaltamos el caso del mejor resultado obtenido del experimento realizado con inestabilidad a un ángulo de 110° (viga 15 cm) con una sola masa adherida, el cual generó un voltaje rms de 0.2 voltios aproximadamente. En esta misma configuración con la adición del elemento piezoeléctrico, se generó un voltaje RMS de 4.6 voltios. Como resultado final, esto proporcionó mayor potencia entregada por el dispositivo cosechador alcanzando los 250 mW en un resistencia de carga simulada.

Los desafíos que se tienen para los trabajos futuros, se encuentran en la posibilidad de evaluar el sistema en condiciones operacionalmente reales. El diseño de dispositivos en las configuraciones evaluadas y aplicados en zonas donde se aproveche el movimiento y las vibraciones basados en los resultados obtenidos en este trabajo, pueden ser parte de futuros proyectos en el ámbito de la cosecha de energía.

Capítulo 6

6.1 ANEXO A

Programa realizado en Matlab para obtener los datos de frecuencia y salidas de voltaje del dispositivo.

```
%% Data; 11 September 2017

clear all, close all
time=20; % Tiempo del muestreo
Freq=15; %% Limite 12000
n=40;
rate=Freq*n; %% Tasa de Muestreo 40 datos

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
s = daq.createSession('ni');
s.DurationInSeconds=time;
s.Rate=rate;
addAnalogInputChannel(s, 'Dev1', [1], 'Voltage'); %Analog input 1
addAnalogOutputChannel(s, 'Dev1', 'ao0', 'Voltage'); %analog output 0
set(s.Channels(1), 'TerminalConfig', 'SingleEnded')
t=0:time/(rate*time-1):time;
Amplitude=0.23; %Maximum value 0.5 Volts
data=Amplitude*chirp(t,0,time,Freq); % datos a Escribir
figure
spectrogram(data,256,250,256,rate,'yaxis')
%% Colocando datos en la Tarjeta
queueOutputData(s,data')
figure
plot(t,data)
disp('Ready')
[data2, time]=s.startForeground();
freq=0:(rate-0)/(length(data2(:,1))-1):rate;
Tff=abs(fft(data2(:,1)));
figure
plot(time,data)
hold on
plot(time,data2,'-r')
%% <b
DB=[time data' data2 freq' Tff];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure
plot(freq(1:round(length(data2(:,1)))/(n)),20*log(Tff(1:round(length(data2(
(:,1)))/(n))))))
%
% figure
```

```
%  
FRF=Tff(1:round(length(data2(:,2))/5))./Tffs(1:round(length(data2(:,2))/5))  
;  
% plot(freq(1:round(length(data2(:,3))/5)),20*log(FRF))
```

Referencias bibliográficas

- [1] F. Aliyu and T. Sheltami, “Development of an energy-harvesting toxic and combustible gas sensor for oil and gas industries,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 231, pp. 265–275, Aug. 2016.
- [2] D. Motter, F. A. Dias, and S. Silva, “Vibration Energy Harvesting Using Piezoelectric Transducer and Non- Controlled Rectifiers Circuits,” 2006.
- [3] H. S. Kim, J. H. Kim, and J. Kim, “A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 12, no. 6, pp. 1129–1141, 2011.
- [4] M. Jang, S. Song, Y. H. Park, and K. S. Yun, “Piezoelectric energy harvester operated by noncontact mechanical frequency up-conversion using shell cantilever structure,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 6, pp. 6–11, 2015.
- [5] G. Caruso, G. Chirianni, and G. Vairo, “Energy harvesting from wind-induced bridge vibrations via electromagnetic transduction,” *Eng. Struct.*, vol. 115, pp. 118–128, 2016.
- [6] W.-S. Kang and J.-H. Koh, “ $(1-x)\text{Bi}0.5\text{Na}0.5\text{TiO}3-x\text{BaTiO}3$ lead-free piezoelectric ceramics for energy-harvesting applications,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 35, no. 7, pp. 2057–2064, Jul. 2015.
- [7] J.-Q. Liu *et al.*, “A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting,” *Microelectronics J.*, vol. 39, no. 5, pp. 802–806, May 2008.
- [8] R. M. Ferdous, A. W. Reza, and M. F. Siddiqui, “Renewable energy harvesting for wireless sensors using passive RFID tag technology: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1114–1128, May 2016.
- [9] F. K. Shaikh and S. Zeadally, “Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, Mar. 2016.
- [10] R. Calì *et al.*, “Piezoelectric Energy Harvesting Solutions,” *Sensors*, vol. 14, no. 3, pp. 4755–4790, Mar. 2014.
- [11] J. J. McCullagh *et al.*, “Long-term testing of a vibration harvesting system for the structural health monitoring of bridges,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 217, pp. 139–150, Sep. 2014.
- [12] G. Qiao, G. Sun, Y. Hong, Y. Qiu, and J. Ou, “Remote corrosion monitoring of the RC structures using the electrochemical wireless energy-harvesting sensors and networks,” *NDT E Int.*, vol. 44, no. 7, pp. 583–588, Nov. 2011.
- [13] G. Pellegrinelli, M. Baù, F. Cerini, S. Dalola, M. Ferrari, and V. Ferrari, “Portable

- Energy-logger Circuit for the Experimental Evaluation of Energy Harvesting Solutions from Motion for Wearable Autonomous Sensors,” *Procedia Eng.*, vol. 87, pp. 1230–1233, 2014.
- [14] Ministerio de Minas y Energía, “PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050,” Bogotá, 2015.
- [15] M. V. Gualteros and E. Hurtado, “REVIEW OF THE REGULATIONS AND INCENTIVES FOR THE USE OF THE RENEWABLE ENERGY IN COLOMBIA.”
- [16] D. C. S. A. J. H. A. E. Universidad Militar Nueva Granada., *Revista facultad de ciencias económicas : investigación y reflexión.*, vol. XX, no. 2. Universidad Militar Nueva Granada, 2012.
- [17] *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables.* PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2009.
- [18] F. Petrakopoulou, “On the economics of stand-alone renewable hybrid power plants in remote regions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 118, pp. 63–74, Jun. 2016.
- [19] H. Li, C. Tian, and Z. D. Deng, “Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials,” *Appl. Phys. Rev.*, vol. 1, no. 4, p. 041301.
- [20] A. Jemai, F. Najar, and M. Chafra, “Parametric analysis of multilayered unimorph piezoelectric vibration energy harvesters,” *J. Vib. Control*, p. 1077546315617870, Nov. 2015.
- [21] M. Scapolan, M. G. Tehrani, and E. Bonisoli, “Energy harvesting using parametric resonant system due to time-varying damping,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 79, pp. 149–165, 2016.
- [22] S. F. Nabavi, A. Farshidianfar, and A. Afsharfard, “Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from off shore buoys,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 76, no. May, pp. 174–183, 2018.
- [23] E. S. Leland and P. K. Wright, “Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 15, no. 5, p. 1413, 2006.
- [24] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, “A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes,” *Comput. Commun.*, vol. 26, no. 11, pp. 1131–1144, Jul. 2003.
- [25] D. Shen *et al.*, “Micromachined PZT cantilever based on SOI structure for low frequency vibration energy harvesting,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 154, no. 1, pp. 103–108, Aug. 2009.
- [26] H. A. Tinoco, C. Garcia-Diaz, and O. L. Ocampo-Lopez, “Performance Assessment in a Voice Coil Motor for Maximizing the Energy Harvesting with Gait Motions,” *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Electr. Comput. Energ. Electron. Commun. Eng.*, vol. 1,

no. 2, pp. 133–137, 2017.

- [27] H. A. Tinoco, “Beam design for voice coil motors used for energy harvesting purpose with low frequency vibrations: A finite element analysis,” *Int. J. Model. Simulation, Sci. Comput.*, vol. 07, no. 03, p. 1640001, Jun. 2016.
- [28] V. Ostasevicius *et al.*, “Cutting tool vibration energy harvesting for wireless sensors applications,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 233, pp. 310–318, Sep. 2015.
- [29] L. Tang, Y. Yang, and C.-K. Soh, “Improving functionality of vibration energy harvesters using magnets,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, p. 1045389X12443016, May 2012.
- [30] A. S. De Paula, D. J. Inman, and M. A. Savi, “Energy harvesting in a nonlinear piezomagnetoelastic beam subjected to random excitation,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 54, pp. 405–416, 2015.
- [31] M. T. Penella and M. Gasulla, “A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors,” *2007 IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf. IMTC 2007*, pp. 1–5, 2007.
- [32] M. Renaud, P. Fiorini, R. van Schaijk, and C. van Hoof, “Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 3, p. 035001, 2009.
- [33] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2011.
- [34] A. T. Papagiannakis, S. Dessouky, A. Montoya, and H. Roshani, “Energy Harvesting from Roadways,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 83, no. Seit, pp. 758–765, 2016.
- [35] M. N. Fakhzan and A. G. A. Muthalif, “Mechatronics Harvesting vibration energy using piezoelectric material : Modeling , simulation and experimental verifications q,” *Mechatronics*, vol. 23, no. 1, pp. 61–66, 2013.
- [36] A. S. M. Zahid Kausar, A. W. Reza, M. U. Saleh, and H. Ramiah, “Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 973–989, 2014.
- [37] S. Shevtsov and S.-H. Chang, “Modeling of vibration energy harvesting system with power PZT stack loaded on Li-Ion battery,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 29, pp. 12618–12625, Aug. 2016.
- [38] A. Haroun, I. Yamada, and S. 'ichi Warisawa, “Investigation of Kinetic Energy Harvesting from Human Body Motion Activities using Free/Impact Based Micro Electromagnetic Generator,” *Diabetes Cholest Metab.*, vol. 1, no. 1, pp. 12–16, 2016.
- [39] *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3rd ed. Mexico: Thompson Editores, 1998.
- [40] J. Kim and J.-H. Koh, “(Na,K)NbO₃–(Bi,Na)TiO₃ piezoelectric ceramics for energy-

- harvesting applications,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 35, no. 14, pp. 3819–3825, Nov. 2015.
- [41] H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, “A Review of Power Harvesting from Vibration Using Piezoelectric Materials,” *Shock Vib. Dig.*, vol. 36, no. 3, pp. 197–205, 2004.
- [42] “Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico (Energy Harvesting) Mediante Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar,” Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2014.
- [43] H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, “Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 16, no. 10, pp. 799–807, 2005.
- [44] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, “Energy harvesting vibration sources for microsystems applications,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 12, p. R175, 2006.
- [45] F. A. (Frederick A. Leckie and D. J. Dal Bello, *Strength and stiffness of engineering systems*. Springer, 2009.
- [46] J. Sirohi and I. Chopra, “Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 11, no. 4, pp. 246–257, Apr. 2000.
- [47] A. H. Robins and W. C. Miller, *Analisis de circuitos, teoría y practica*, Cuarta Ed. Mexico, 2008.
- [48] R. L. Boylestad, *Introducción al análisis de circuitos*, Decimosegu. Mexico: Prentice Hall, 2011.
- [49] J. H. and Z.-F. Fu, *Modal Analysis*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [50] S. Banerji, A. Bagchi, and S. Khazaeli, “Energy harvesting methods for structural health monitoring using wireless sensors: a review,” *Resilient Infrastructure, London 2016*, pp. 1–10, 2016.
- [51] D. Zhu, “Vibration Energy Harvesting: Machinery Vibration, Human Movement and Flow Induced Vibration,” *Sustain. Energy Harvest. Technol. Present Futur.*, no. Viv, pp. 25–29, 2011.
- [52] W. Thomson, *Teoría de vibraciones, aplicaciones*, Segunda Ed. Mexico: Prentice-Hall, 1982.