

CAPTACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA DINÁMICO  
ELECTROMAGNÉTICO DE SEGUNDO ORDEN

RICARDO FARUK AVENDAÑO ROSAS

KATHERINE RIAÑO MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2018

CAPTACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA DINÁMICO  
ELECTROMAGNÉTICO DE SEGUNDO ORDEN

RICARDO FARUK AVENDAÑO ROSAS  
KATHERINE RIAÑO MARTÍNEZ

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Ing. CARLOS BORRAS PINILLA  
Ingeniero Mecánico

Co-Director

Ing. JONATHAN ANDRES PEREA BARRIOS  
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2018

A mis padres, Mariela & Hernando, debo agradecerles por su amor incondicional, por apoyarme y creer en mí siempre, por enseñarme que la humildad y la constancia son los valores más importantes para crecer como personas y lo más importante, por hacerme quien soy hoy.

A mi hermano, Marlon Andrés Vesga Rosas, quien ha sido mi ejemplo de ser humano, de cariño, de amistad, de hijo y de hermano y por estar siempre ahí para mí; le agradezco enormemente por ser esa persona tan buena a la que algún día me quisiera parecer.

A mi novia, Diana Carolina Martínez, le agradezco por su amor, paciencia, apoyo, sinceridad y motivación para alcanzar mis objetivos.

A mis amigos más cercanos, Fernel, Elsa, Barajas, Cáceres, Brilla, Zamir y todos los que no nombro en este momento, ustedes saben quiénes son; a ustedes le agradezco por su amistad y cariño, por no dejarme desfallecer cuando casi lo hice.

A mis jefes y compañeros de la oficina de la Vicerrectoría Académica, en donde he trabajado por más de dos años por su apoyo, disposición, paciencia y flexibilidad para cumplir con mis objetivos académicos. Inmensas gracias, crecí mucho como persona con ustedes gracias por sus significantes aportes a mi vida.

Ricardo Faruk Avendaño Rosas

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sincero agradecimiento a cada una de las personas que influyeron en el desarrollo de la tesis con sus sugerencias, ideas, conocimientos, habilidades y su excelente voluntad y disposición.

PhD. CARLOS BORRÁS PINILLA, director de trabajo de grado, por su paciencia y confianza durante el desarrollo del proyecto, por su exigencia y amabilidad para encontrar una solución correcta en nuestra tesis de investigación.

Ing. CÉSAR EDUARDO PEÑA, por su tiempo, voluntad de colaboración, aportes de conocimiento disposición para mejorar el prototipo cada vez que lo requiriéramos.

Don Hugo, operario del taller en donde se realizó la construcción del prototipo por su disposición, tiempo e ideas para la construcción del prototipo.

Natalia Tarazona, estudiante de Ingeniería Electrónica, por su tiempo, paciencia e instrucción para la manipulación de los equipos de laboratorio así como la disposición de elementos propios para obtener datos más precisos. No lo hubiéramos logrado sin tan especial ayuda.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>20</b>
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	20
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA .....	20
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCION .....	21
<b>2. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>23</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	23
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	23
<b>3. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA.....</b>	<b>24</b>
3.1 ENERGÍA SOLAR.....	24
3.2 ENERGÍA TERMOELÉCTRICA O TÉRMICA .....	30
3.3 OTRAS FUENTES .....	32
3.4 ENERGÍA DE LAS VIBRACIONES.....	35
3.4.1 Energía Piezoeléctrica .....	35
3.4.2 Energía inductiva (imán-bobina) .....	38
<b>4. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA .....</b>	<b>42</b>
4.1 ECUACIONES DINÁMICAS DE MOVIMIENTO .....	44
4.1.1 Sistema mecánico .....	44
4.1.2 Sistema Electromagnético .....	46
<b>5. MODELADO EN MATLAB.....</b>	<b>48</b>
5.1 MATLAB.....	48
5.2 SIMULACIÓN DEL MODELADO EN MATLAB .....	48
<b>6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DINÁMICO .....</b>	<b>50</b>
6.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	52
6.1.1 Carro sin fricción.....	53
6.1.2 Mecanismo de oscilación.....	55

<b>7. SISTEMAS DE CONTROL.....</b>	<b>58</b>
7.1 SISTEMA DE CONTROL DEL MOTOR.....	58
7.1.1 Diseño del programa a través de arduino.....	58
7.1.2 Diseño del montaje electrónico.....	62
<b>7.2 CIRCUITO DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO .....</b>	<b>63</b>
7.2.1 Circuito de instrumentación para amplificar señales.....	64
7.3 DIAGRAMA GENERAL DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE COSECHA DE ENERGIA.....	67
<b>8. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
8.1 CÁLCULO TIPO DE VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR.....	72
8.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	74
8.2.1 Registro de datos experimentales .....	76
8.2.2 Análisis de experimentos .....	82
8.2.3 Pruebas finales .....	84
8.2.4 Resultados de pruebas finales.....	88
8.3 RESULTADOS MODELADO EN MATLAB .....	89
8.3.1 Análisis de resultados .....	90
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones del motor. ....	56
Tabla 2. Parámetros constantes. ....	70
Tabla 3. Parámetros variables. ....	71
Tabla 4. Calculo de tiempo promedio para un desplazamiento de 1[m]. ....	72
Tabla 5. Resumen de velocidades del motor sometido a variaciones del voltaje. .	74
Tabla 6. Resumen de respuesta experimental A. ....	77
Tabla 7. Resumen de respuesta experimental B. ....	78
Tabla 8. Resumen de respuesta experimental C. ....	79
Tabla 9. Resumen de respuesta experimental D. ....	80
Tabla 10. Resumen de respuesta experimental E. ....	81
Tabla 11. Resumen de respuesta experimental F. ....	82
Tabla 12. Resumen de datos experimentales. ....	83
Tabla 13. Respuesta prueba final A. ....	85

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Panel Solar. ....	24
Figura 2. Detalle del Panel Solar. ....	26
Figura 3. Efecto Fotovoltaico. ....	27
Figura 4. Instalación Panel Solar. ....	30
Figura 5. Smart Floor. ....	33
Figura 6. Generador Piezoeléctrico. ....	36
Figura 7. Generador de Energía en Japón. ....	36
Figura 8. Energía generada a través de pisadas en baldosas en Londres. ....	37
Figura 9. Sistema piezoeléctrico instalado en las carreteras de Israel. ....	38
Figura 10. Imanes de Neodimio. ....	39
Figura 11. Esquema del sistema dinámico de segundo orden (masa-resorte-amortiguador) con acople de motor (entrada de movimiento) e imán y bobina (sistema de cosecha). ....	42
Figura 12. Esquema del sistema masa-resorte-amortiguador. ....	43
Figura 13. Diagrama MATLAB. ....	49
Figura 14. Kit de laboratorio PASCO. ....	50
Figura 15. Kit de laboratorio VERNIER. ....	50
Figura 16. Motorreductor de corriente continua. ....	56
Figura 17. Diagrama de flujo para control de motor. ....	59
Figura 18. Montaje electrónico esquemático del circuito de control para el motor. ....	62
Figura 19. Corriente continua (D.C) y corriente alterna (A.C). ....	64
Figura 20. Circuito amplificador simulado. ....	64
Figura 21. Esquema general del sistema de cosecha de energía. ....	68
Figura 22. Diagrama de flujo del Desarrollo del proyecto. ....	69

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Diseño de ruedas y riel de baja fricción.....	51
Fotografía 2. Perfil de aluminio .....	52
Fotografía 3. Masa 1 y Masa 2 alineadas. ....	53
Fotografía 4. Montaje de bobina. ....	53
Fotografía 5. Chasis.....	54
Fotografía 6. Carrocería.....	54
Fotografía 7. Amortiguadores. ....	55
Fotografía 8. Masa excéntrica .....	56
Fotografía 9. Montaje final. ....	57
Fotografía 10. Montaje real del circuito de control para el motor. ....	63
Fotografía 11. Circuito amplificador experimental.....	65
Fotografía 12. Generación de señales - encendido Diodo-LED.....	65
Fotografía 13. Señales sin filtro y sin rectificación. ....	66
Fotografía 14. Visualización de señal rectificadas.....	66
Fotografía 15. Circuito para recarga de batería. ....	67
Fotografía 16.. Montaje general para mediciones de prototipo.....	71
Fotografía 17. Osciloscopio. ....	75
Fotografía 18. Fuente regulada. ....	75
Fotografía 19. Multímetro.....	76
Fotografía 20. Vista de señal para prueba A. ....	77
Fotografía 21. Vista de señal para prueba B. ....	78
Fotografía 22. Vista de señal para prueba C. ....	79
Fotografía 23. Vista de señal para prueba D. ....	80
Fotografía 24. Vista de señal para prueba E. ....	81
Fotografía 25. Vista de señal para prueba F.....	82
Fotografía 26. Vista de señal prueba A y medición de tensión pico a pico.....	85

Fotografía 27. Vista de señal generada prueba B y medición de tensión pico a pico. ....86

Fotografía 28. Vista de señal generada prueba C y medición de tensión pico a pico. ....87

Fotografía 29. Medición de corriente con multímetro en la prueba C. ....87

## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Rampa de aceleración del motor libre de carga. ....	61
Gráfica 2. Rampa de aceleración del motor para los voltajes y cargas usadas. ....	61
Gráfica 3. Frecuencia vs Voltaje. ....	84
Gráfica 4. movimiento de las masas y Voltaje generado. ....	89
Grafica 5. Frecuencia.....	90

## LISTA ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. MODELADO MATEMATICO USANDO LAPLACE .....	98
ANEXO B. CÓDIGO FUENTE DE LA INTERFAZ DE MATLAB .....	99
ANEXO C. PLANOS PROTOTIPO .....	102
ANEXO D. CÓDIGO FUENTE ARDUINO .....	104
ANEXO E. INFORMACIÓN DE AMORTIGUADORES SELECCIONADOS .....	105
ANEXO F. DATASHEET TRANSISTOR NPN 2N2222.....	106
ANEXO G. OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-2062 .....	107

## RESUMEN

**TÍTULO:** CAPTACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA DINÁMICO ELECTROMAGNÉTICO DE SEGUNDO ORDEN\*

**AUTORES:** RICARDI FARUK AVENDAÑO ROSAS, KATHERINE RIAÑO MARTÍNEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** SISTEMA MASA RESORTE AMORTIGUADOR, SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN, PROTOTIPO, CONTRUCCIÓN DE PROTOTIPO, COSECHA DE ENERGÍA, MEDICIÓN DE DATOS, DISEÑO DE PRUEBAS, SUMULACIÓN, MATLAB.

### DESCRIPCIÓN:

Desde la escuela de ingeniería mecánica se desea aplicar conocimientos adquiridos a lo largo del desarrollo del plan de estudios con el fin de encontrar alternativas para generación y aprovechamiento energético buscando así un aprovechamiento de las fuentes existentes en el planeta, como ya es conocido en el mundo este tipo de alternativas son cada vez más implementadas en busca de ayudar a conservar y aprovechar las fuentes que tenemos a disposición. Siguiendo con este objetivo, se desarrolló una investigación que busca probar el concepto de cosecha de energía a partir de las vibraciones mecánicas que harán de simulador por las corrientes presentes en el ambiente, es decir, estas vibraciones representan las fuentes con el viento, olas o cualquier otra perturbación natural que permita generar vibración, utilizando estas vibraciones ya sean para ser distribuida a sistemas de bajo consumo o almacenadas en baterías para su posterior disposición.

Para conseguirlo se desarrolló una interfaz en Matlab con la cual se puede saber el comportamiento de un sistema dinámico (masa-resorte-amortiguador) de segundo orden en términos de desplazamientos, velocidades y frecuencias, con el objetivo de llevar estos parámetros a una configuración apropiada para generar energía. Posteriormente, para confirmar este concepto de captación energética se realizó la construcción de un prototipo de pruebas sobre la cual se pueden aplicar variaciones de diseño elementales, con el fin de conseguir una configuración que potencie la generación de energía.

---

\*

Trabajo de grado

\*\*

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla, Ingeniero Mecánico, PhD en Ingeniería Mecánica

## SUMMARY

**TITLE:** MECHANICAL ENERGY CAPTATION THROUGH A SECOND-ORDER ELECTROMAGNETIC DYNAMIC SYSTEM\*

**AUTHORS:** RICARDI FARUK AVENDAÑO ROSAS, KATHERINE RIAÑO MARTÍNEZ\*\*

**KEYWORDS:** MASSAGE SPRING AMORTIGUADOR, SECOND ORDER SYSTEM, PROTOTYPE, PROTOTYPE CONSTRUCTION, ENERGY HARVESTING, DATA MEASUREMENT, TEST DESIGN, SUMMATION, MATLAB.

### DESCRIPCIÓN:

From the school of mechanical engineering it is desired to apply knowledge acquired throughout the development of the curriculum in order to find alternatives for generation and energy exploitation looking for an advantage of existing sources on the planet, as is known in the world, these types of alternatives are increasingly implemented in order to help preserve and take advantage of the sources we have available. Following this objective, an investigation was developed that seeks to test the concept of harvesting energy from mechanical vibrations that will act as a simulator for the currents present in the environment, that is, these vibrations represent the sources with the wind, waves or any other natural disturbance that allows generating vibration, using these vibrations to be distributed to low consumption systems or stored in batteries for later disposal.

To achieve this, an interface was developed in Matlab with which you can know the behavior of a dynamic system (mass-spring-damper) of second order in terms of displacements, speeds and frequencies, in order to bring these parameters to an appropriate configuration to generate energy. Subsequently, to confirm this concept of energy collection, the construction of a prototype of tests was carried out on which elementary design variations can be applied, in order to achieve a configuration that enhances the generation of energy.

---

\*

Work degree

\*\*

Faculty of Physicomechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: Carlos Borrás Pinilla, Mechanical Engineer, Doctor Of Philosophy In Mechanical Engineering

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad nos enfrentamos a una de las mayores problemáticas que afecta al medio ambiente; ésta se refiere a la existente dependencia de los combustibles fósiles para la obtención de energía con la cual funciona una vasta porción de las máquinas creadas por el hombre. Como principal consecuencia, el planeta atraviesa por cambios climáticos que maltratan los ecosistemas hasta el punto de acabar con algunas especies de fauna, reducir los recursos hídricos alrededor del mundo y por consiguiente afectar fuentes de alimentación y sostenimiento económico en algunas poblaciones.

El deterioro ambiental debido a la utilización de fuentes energéticas contaminantes ha conducido a que una porción de la población del mundo se preocupe por la sustentabilidad del mismo y, desde la ciencia e ingeniería, enfoque sus esfuerzos en la explotación de fuentes de energéticas limpias y renovables. Es por esto que a partir de la cosecha de la energía o recolección de la energía, la cual es una tendencia mundial hoy en día, se busquen alternativas en donde la energía presente en numerosas fuentes (solar, térmica, eólica, cinética) sea captada y almacenada para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo de potencia en localidades con ausencia de redes eléctricas.

Nace esta propuesta de cosecha de energía como solución potencial a la problemática mencionada, y se está expandiendo alrededor del mundo conforme los gobiernos (principalmente) han mostrado preocupación por encontrar métodos alternativos de abastecimiento energético en sectores aislados, en los cuales es complicado y costoso extender la conexión eléctrica debido a condiciones geográficas, geológicas y en algunos casos, culturales. La inversión en este trabajo de investigación se expone el proceso de modelado y simulación aplicado

a un modelo matemático de captación de energía mediante un sistema electromagnético cuyo objetivo principal del prototipo a desarrollar es la generación de potencia entre  $1\mu W - 500\mu W$  partiendo de la idea central de demostrar que todo movimiento se puede convertir en voltaje y ese voltaje se puede almacenar y así mismo convertir en energía [2].

El presente proyecto expone inicialmente un capítulo sobre la formulación del problema y las solución que planteamos para su desarrollo, el siguiente capítulo describe los objetivos a lograr en este proyecto de grado, así mismo, el capítulo 3 es un introductorio a los diferentes sistemas de captación de energía que tienen un mayor potencial de aprovechamiento en la actualidad. Posteriormente en el capítulo 4, se presenta el modelo matemático de un sistema de segundo orden masa-resorte-amortiguador, con el cual, en el capítulo 5 se lleva a cabo la simulación del sistema dinámico, con ayuda de la herramienta computacional MATLAB. La sección recientemente mencionada está destinada a la variación de parámetros, con lo cual se espera obtener las respuestas necesarias para generar un sistema funcional con valores de masas y constantes de amortiguación apropiados para realizar la respectiva construcción del prototipo; dicha parametrización se corroborará de acuerdo a los resultados de generación de energía que se obtengan al finalizar la simulación.

El capítulo 6, se destina a explicar el diseño en detalle del prototipo experimental, que consta de un sistema masa-resorte-amortiguador, acoplado con dos sistemas necesarios para su funcionamiento: uno de excitación y uno de aprovechamiento energético, cuyo diseño se explica en el capítulo 7 del presente proyecto.

Al finalizar la construcción de cada uno de los sistemas requeridos para el funcionamiento del prototipo y su correspondiente acople, procedemos a realizar las pruebas que darán veracidad al cumplimiento del principio de cosecha de energía a través del aprovechamiento de las vibraciones mecánicas que se obtienen en sistemas oscilatorios como las suspensiones de los vehículos.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El cosechamiento de la energía o recolección de la energía, es una tendencia mundial hoy en día, donde la energía presente en numerosas fuentes (solar, térmica, eólica, cinética) es captada y almacenada para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo de potencia, como los utilizados en la electrónica y redes de sensores inalámbricos permitiendo así una mayor aprovechamiento de las fuentes naturales que el ambiente nos proporciona.

### 1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

En los últimos años, el impacto ambiental por el que esta atravesando el planeta ha conducido a que la población se preocupe por la sustentabilidad del mismo, queriendo enfocarse en el desarrollo viable de nuevas fuentes de energía, limpias y renovables; buscando desarrollar tecnologías capaces de captar energía residual presente en el ambiente para transformarla en energía eléctrica que permita alimentar pequeños dispositivos de bajo consumo o almacenarla en baterías para posteriores usos.

La energía captada puede originarse de diferentes fuentes de calor, movimiento, luz y muchas otras, pero solo es útil si la energía generada por el sistema es mayor que las pérdidas que se producen por transmitirla y administrarla. Por ello los esfuerzos de investigación se llevan a cabo tanto en aumentar la energía captada en el ambiente, como en reducir las pérdidas del sistema, es por esto que el uso de energía mecánica en forma de vibraciones es una iniciativa favorable para el proceso de captación de energía.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCION

En la actualidad nos enfrentamos a una de las mayores problemáticas que han afectado al medio ambiente; esta es la dependencia de combustibles fósiles para la obtención de energía con la cual funcionan la gran mayoría de máquinas creadas por el hombre. Por este motivo se requiere abordar el problema desde las diferentes áreas de la ciencia e ingeniería, desde las cuales se pueda contribuir a brindar soluciones enfocadas a contribuir con la reducción, mitigación o, de ser posible, eliminación del impacto ambiental causado por el abuso de fuentes energéticas poco amigables con la naturaleza.

Siguiendo con este propósito, desde la ingeniería se busca integrar conocimientos de sistemas mecánicos, electrónicos e informáticos, con los cuales se logre crear e implementar sistemas innovadores que suplan o complementen las fuentes de energía existentes, cuyos requerimientos para alimentar energéticamente a los dispositivos para los cuales fueron diseñados, no tienen en cuenta, los efectos negativos que causan en el medio ambiente. Un ejemplo claro es el desecho irresponsable de las baterías.

Es importante tener en cuenta que mediante la puesta en funcionamiento de estos medios de alimentación energética alternos, se podría extender la autonomía de aquellos artefactos cuyo funcionamiento se ve limitado por la duración (tanto de carga, como de vida útil) de las baterías que requieren, o incluso implementar fuentes de energía independientes de redes eléctricas o baterías; y es por eso que a través de la investigación a realizar en este proyecto, se tiene como propósito demostrar y profundizar el conocimiento expuesto en el material intelectual actual, acerca de las diferentes formas de captación de energía. En este caso, haciendo énfasis en la captación de energía mecánica obtenida de las vibraciones generadas en sistemas mecánicos creados con este fin, se propone demostrar tanto teórica como experimentalmente, mediante un prototipo de prueba y su

respectiva simulación, que a partir de todo movimiento vibracional se puede generar voltaje, el cual puede ser almacenado y transformado en energía eléctrica.

## 2. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la Universidad Industrial de Santander en el desarrollo de una línea de investigación en el área de captación de energía de tipo mecánica vibracional, con el fin de generar material científico que ayude a la formación técnica de profesionales en el campo de cosechamiento y recolección de energía.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Compilar el estado del arte actual en cuanto a alternativas de captación de energía, a través de dispositivos mecánicos, con el fin de generar material bibliográfico para investigaciones futuras.
- Desarrollar un modelo matemático que permita modelar y simular el comportamiento de un sistema electromagnético-MRA, mediante herramientas computacionales como Matlab y Simulink, con el fin de obtener una representación dinámica para evaluar el comportamiento y alcance que puede tener el concepto de captación de energía.
- Construir un prototipo experimental de prueba que permita validar experimentalmente el concepto de captación de energía en un sistema electromagnético de segundo orden MRA con un rango de generación de potencia entre  $1 \mu\text{W}$ -  $500 \mu\text{W}$
- Implementar un sistema de control que permita la excitación de la vibración mecánica-eléctrica para capturar y almacenar la energía cosechada en una batería.

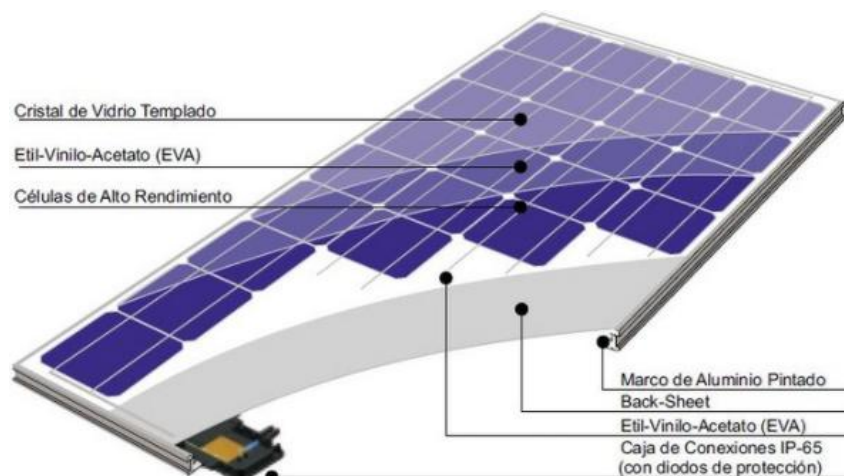
### 3. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA

En la actualidad se ha optado por destacar aquellos medios alternos que permiten generar energía mediante la utilización de recursos renovables y limpios. A continuación se expondrán las fuentes más importantes a tener en cuenta para ser utilizadas como cosechas para la producción de energía[5]:

#### 3.1 ENERGÍA SOLAR

La cosecha de la energía proveniente del sol es la más explorada y explotada en la actualidad debido a que se considera la energía más universal por excelencia, además es considerada como un recurso indispensable en temas referentes a generación de energía eléctrica a partir de fuentes no contaminantes. Como beneficiarios de esta fuente de energía renovable y sostenible, se pretende buscar mecanismos para el aprovechamiento y la optimización de sistemas que empleen energía solar con el fin de obtener electricidad.

Figura 1. Panel Solar.



Fuente: <http://eliseosebastian.com/partes-de-un-panel-solar-fotovoltaico/>

Para su cosecha se utilizan principalmente tecnologías que, mediante efecto fotovoltaico, tienen la capacidad de transformar la energía solar en energía eléctrica. Lo anterior se logra principalmente a través de la utilización de paneles fotovoltaicos o paneles solares (como el mostrado en la figura anterior), cuyos componentes principales son:

- **Cubierta:** es antirreflectante, tiene una transmisividad elevada (superior al 90%), resistente a la abrasión e impactos inesperados. Su gran importancia se debe a que reduce la reflectividad en un alto porcentaje, permitiendo una mayor entrada de luz a en la célula solar, con lo que se consigue una mayor conversión de potencia. Puede ser de cristal de vidrio templado, aunque en la búsqueda de brindar una mejor durabilidad a los productos, se ha desarrollado una cubierta de “vidrio orgánico”, compuesta por láminas de plexiglás (compuesto de vidrio, resinas y acrílicos) que cuenta con excelentes propiedades mecánicas que brindan estabilidad al panel bajo diferentes condiciones químicas y atmosféricas.
- **Marco:** se fabrica principalmente de aluminio o acero inoxidable y es el encargado de aportar la rigidez requerida además de proteger las partes más importantes del panel solar, aislándolas de la humedad del ambiente. Todo esto se logra mediante la utilización de elementos de fijación como anclajes y tornillos.
- **Plancha base:** es una estructura sencilla sobre la cual se fijan las células fotovoltaicas, generalmente con silicona, la cual evita el ingreso de aire, agua o partículas diminutas en suspensión. En muchos casos se utiliza un polímero termoplástico conocido como foamy (Etil-vinilo-acetato).
- **Células solares (células de alto rendimiento):** es el elemento más importante en el panel y sobre el cual se siguen realizando innumerables investigaciones con el fin de potenciar el aprovechamiento energético, es decir, elevar su eficiencia. Su composición se centra, principalmente, en el silicio (Si);

éste actúa como fuente de fotoelectrones, y su aporte se basa esencialmente en proporcionar el campo eléctrico necesario para separar las cargas y crear una corriente.

- Otros componentes:

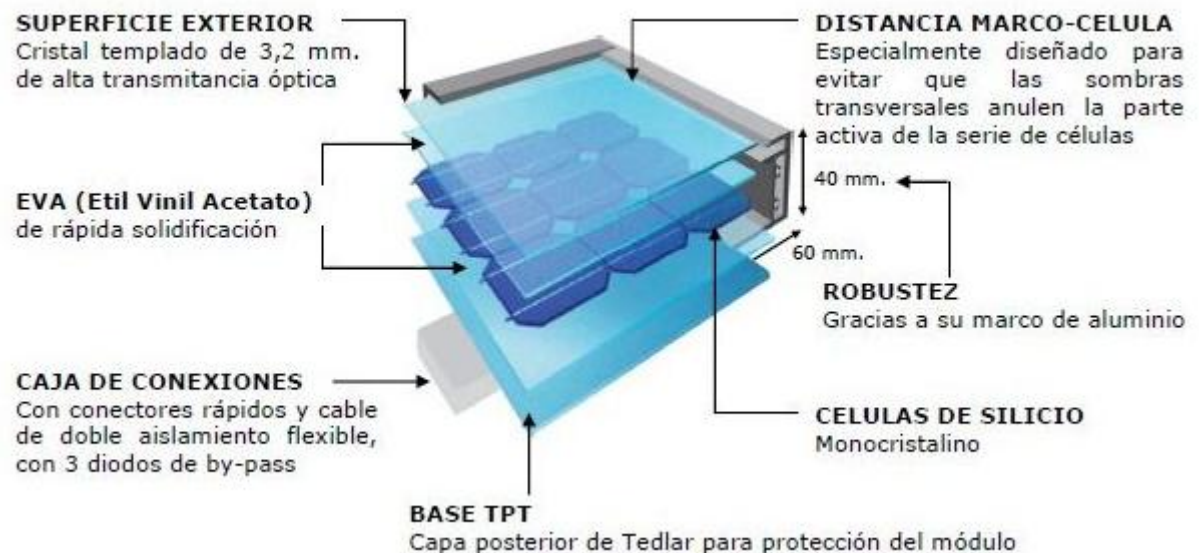
- ✓ Toma a tierra: mecanismo de protección que consiste en un electrodo enterrado en el suelo. Su función es evitar derivaciones eléctricas que puedan causar daños a equipos o lesiones a las personas.

- ✓ Caja de terminales: es un elemento ubicado en la parte posterior del panel y cuenta con bornes de salida, los cuales establecen la conexión del panel con reguladores de corriente o baterías, por ejemplo.

- ✓ Diodos de protección: sienten el panel un dispositivo sensible, se disponen protectores o guidores de corriente eléctrica, cuidando a las células solares de posibles retornos de corriente.

Figura 2. Detalle del Panel Solar.

**Detalles constructivos:**



Fuente: <http://eliseosebastian.com/partes-de-un-panel-solar-fotovoltaico/>

Como se mencionó anteriormente, los paneles solares están principalmente compuestos por fotocélulas que tienen como función absorber los fotones de luz y emitir electrones; éstos últimos, al ser capturados, generan una corriente que puede ser usada como electricidad. Lo anterior se entiende como efecto fotovoltaico y es indispensable para la generación eléctrica a partir de la energía solar.

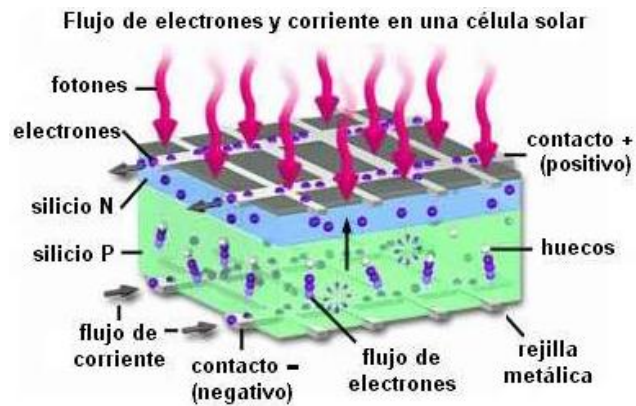
Se utilizan semiconductores, los cuales tienen un comportamiento particular ante una fuente energética externa, siendo la radiación solar para este caso. “Algunos de los materiales más usados en la construcción de las células fotovoltaicas son el silicio cristalino (c-Si), multicristalino (mc-Si) y amorfo (a-Si), el arsénico de galio (GaAs), el fosforo de indio y galio (GaInP), la calcopirita (CIGS) y el telurio de cadmio (CdTe). La mayoría de las tecnologías, sufren un descenso brusco de generación de energía cuanto menor es la irradiación solar. En el caso de las tecnologías que emplean a-Si y CdTe sufren cambios muy pequeños al variar de una mayor irradiación a otra menor”.<sup>1</sup>

El efecto fotovoltaico se da en las placas compuestas por las fotocélulas, generalmente compuestas por silicio, que a pesar de no ser el único semiconductor existente, sí es el más utilizado debido a que se extrae de la sílice encontrada en la arena. La irradiación solar contiene fotones (partículas de luz radiante), los cuales son absorbidos por las fotoceldas; al llegar allí, la energía que llevan los fotones entra en contacto con los electrones de valencia del silicio, los cuales salen de su órbita, quedando libre del átomo y finalmente formando un flujo de corriente eléctrica directa a través del material conductor.

Figura 3. Efecto Fotovoltaico.

---

<sup>1</sup> BEEBY, Stephen; WHITE, Neil. Energy Harvesting for Autonomous Systems, Artech House Series. Pág. 83.



Fuente: <http://celdasfotovoltaicas.blogspot.com.co/>

La energía solar, aprovechada mediante el uso de paneles solares, puede ser utilizada como alternativa para suplir necesidades energéticas ya que es un recurso considerado infinitamente renovable y, como todos sistemas de cosecha de energía, promover la conservación saludable del medio ambiente. Algunas de sus ventajas y desventajas se mencionan a continuación:

Ventajas:

- Ahorro de dinero debido al consumo energético.
- Bajo costo de mantenimiento y operación. Eso se debe a que no cuentan con partes mecánicas que puedan fallar.
- Su nivel de ruido al generar energía es nulo, lo cual causa un bienestar adicional si lo comparamos con fuentes convencionales.
- Disponibilidad de energía solar a nivel mundial, con lo cual se obtiene energía en mayor o menos medida, dependiendo de la localidad.
- Se puede generar energía en lugares remotos; es decir, sin necesidad de conectarse a la red eléctrica principal se puede suplir esta necesidad.
- Es de fácil distribución.

Desventajas:

- A pesar de ser totalmente renovable, la energía solar es intermitente y los sistemas diseñados para su aprovechamiento no pueden funcionar en la noche.
- Para muchas personas pueden ser elevados los costos de instalación de estos equipos de cosecha energética.
- Es impredecible la cantidad de energía que se obtendrá en un día.
- El almacenamiento de energía es costoso.
- Generalmente, los paneles solares son de baja eficiencia.

Colombia cuenta con una ubicación geográfica que le permite contar con treinta por ciento más radiación que en muchos otros países del mundo; esto le permite apostarle a la implementación de sistemas de captación de energía solar para generar energía eléctrica en diferentes zonas que no cuenta con suministro energético y tienen disponibilidad de radiación solar durante casi la totalidad de las 12 horas del día. Dichas condiciones permiten que se proporcione la totalidad del suministro energético en lugares que actualmente no cuentan ni siquiera con un alumbrado mínimo o se podría proveer hasta un 70% de energía eléctrica en un hogar urbano convencional, dependiendo de las necesidades que energéticas propias.

Aunque no es posible fijar paneles solares en cada rincón del país, sí se puede contar con grandes extensiones de tierras desérticas (que son receptoras de grandes cantidades de radiación solar), para disminuir en gran medida la contaminación del medio ambiente:

“Se calcula que la generación de 82 GW por hora al año, el aproximado de generación de un huerto de 30 MW, puede evitar la emisión anual de 60 mil

toneladas de contaminante, como el bióxido de carbono, reduciendo significativamente la quema de combustibles fósiles”.<sup>2</sup>

Es por eso que actualmente, en Colombia, se han venido realizando proyectos como el de la Institución Salazar Herrera, universidad antioqueña, la cual implementó más de 350 paneles cuya energía es utilizada de manera directa sobre la red energética; adicional a esto, este sistema solar fotovoltaico cuenta con un laboratorio adscrito a las escuelas de ingeniería. Esto con el fin de concientizar a los estudiantes y generar una ampliación en términos de incentivar la investigación.

Figura 4. Instalación Panel Solar.



Fuente: <http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/universidad-salazar-y-herrera-impulsa-proyecto-de-energia-solar-195658>.

### 3.2 ENERGÍA TERMOELÉCTRICA O TÉRMICA

La energía térmica, también llamada energía calórica o calorífica, es la manifestación de energía en forma de calor. Se parte del principio en el que toda

---

<sup>2</sup> GONZÁLEZ, Berenice. Cosecha solar, energía poco aprovechada. El universal, Septiembre de 2014. <http://archivo.eluniversal.com.mx/ciencia/2014/cosecha-solar-energia-94014.html>

la materia está compuesta por moléculas cuyos átomos se encuentran en continuo movimiento (rotacional o traslacional); dicho movimiento expresa la existencia de energía cinética en los átomos y se expresa en forma de calor, el cual es perceptible.

Dicho en otras palabras, la energía termoeléctrica es la energía interna de las partículas y cuyas pérdidas o ganancias son detectables y, de cierta manera, medibles. La energía térmica se puede transferir mediante tres mecanismos, siguiendo los lineamientos de las leyes de la termodinámica; dichos mecanismos de transferencia de calor son:

- Transferencia de calor por radiación: se transmite a través de ondas electromagnéticas. El ejemplo más claro se tiene al observar la forma en la que llega la energía térmica proveniente del sol, la cual es comúnmente aprovechada en instalaciones térmicas diseñadas para calentar agua o mecanismos de calefacción de ambiente.
- Transferencia de calor por conducción: se obtiene mediante el contacto de dos cuerpos a diferentes temperaturas, teniendo en cuenta que la transmisión de calor siempre se da desde un medio caliente a uno de menor temperatura.
- Transferencia de calor por convección: se da cuando las moléculas calientes se trasladan de un lugar a otro. Por ejemplo el viento, tiene la capacidad de mover moléculas con cierta energía calórica de un lado a otro.

La energía térmica se puede obtener de diferentes medios, como bien son:

- Naturales: el sol
- Reacciones exotérmicas: combustibles fósiles y su proceso de combustión.
- Reacción nuclear: originado por la fisión (cuando reacciona se origina en el núcleo atómico) o por fusión (al unirse núcleos similares y crear un núcleo más pesado con la capacidad de liberación de elevadas cantidades de energía).

Los mecanismos utilizados para obtener energía eléctrica a partir de la cosecha de energía térmica, requieren un método de conversión; por ejemplo, se emplea el efecto termoeléctrico ligado al calentamiento de la unión de dos materiales conductores o semiconductores térmicos diferentes. Pero, además de ser necesario seleccionar correctamente materiales adecuados, es indispensable pensar tanto en una eficiencia de contactos eléctricos y térmicos elevada, como una geometría adecuada.

### 3.3 OTRAS FUENTES

- **ENERGÍA HUMANA:** Se refiere a la combinación de energía mecánica y térmica que se obtiene a partir de acciones cotidianas como caminar, correr, montar una bicicleta o hacer deporte en el gimnasio; incluso se ha optado por aprovechar de espacios peatonales de mediano o alto tráfico para que, de una forma divertida y recreativa, las personas sean motivadas a participar voluntariamente de la generación de energía, como es el caso de los pasillos en terminales de transporte aéreo y terrestre en el que se han implantado pasillos con una configuración llamativa y con un transductor electrónico con fundamento en la piezoelectricidad se generan secuencias de luces o sonidos llamativos que hacen que las personas se acerquen y contribuyan con la energización de sistemas de comunicación o dispositivos de seguridad de algunos de los lugares que se mencionaron.

Con el ánimo de hacer más fructíferas las actividades diarias de las personas, se ha venido trabajando en la creación de sistemas de captación de la energía cinética que emplean las personas en lugares como clubes nocturnos, cafeterías, estaciones de metro, gimnasios, entre otros, disponiendo de diferentes sistemas que buscan captar la energía que invierten las personas en sus actividades cotidianas. Un ejemplo de esto es el desarrollo de una pista de baile utilizando material piezoeléctrico por una compañía holandesa llamada “Energy Floors”, la

cual se flexiona ligeramente, creando un movimiento que se traduce en energía eléctrica gracias a un generador interno.

Figura 5. Smart Floor.



Fuente: <https://www.energy-floors.com/smart-energy-floor/>

De igual manera, se puede apreciar cómo en la actualidad, pensando la utilidad energética que se podría obtener del calor humano, se desarrolló un proyecto que logró fructificar el calor producido por más de 250.000 pasajeros que circulan por la Estación Central de Estocolmo para calentar el agua de un edificio y disminuir en al menos un 25% el consumo energético utilizado en esa acción, o la manera en que se aprovecha el paso de las personas a través de pisos equipados con material piezoeléctrico, con el fin de usar la energía del paso de las personas en disposiciones de alumbrado o sonido.

- **ENERGÍA NATURAL:** Se refiere a la energía aprovechable proveniente del aire, agua (fuentes hídricas en movimiento), sol, entre otras.

La energía eólica fue considerada una de las mejores alternativas para contrarrestar el impacto ambiental que se viene presentando como una de las principales consecuencias del uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, pero al contar con limitantes claros como la intermitencia del aire y la necesidad de una ubicación estratégica para obtener una eficiencia aceptable; además, su implementación ha venido disminuyendo debido a su impacto en el medio ambiente al afectar la vida de las aves en donde se realiza la instalación de estos sistemas.

Por otra parte, la energía cinética de las corrientes de agua ha venido siendo aprovechada por siglos para realizar tareas de transporte de maderas, de molienda y para generar electricidad mediante un mecanismo de transmisión desde el molino de agua en vías fluviales. Mientras que en los últimos años se ha venido desarrollando la tecnología que permite obtener energía undimotriz (otro tipo de energía aprovechable del movimiento de las olas diferente a la mareomotriz) y es de las más prometedoras actualmente, como bien lo explica la ingeniera Yasmila Herrera Toledo en su tesis de maestría.

“La energía de las olas o energía undimotriz, ha sido acogida como la más prometedoras fuente de energía renovable para los países marítimos. No causa daño ambiental y es inagotable, las olas van y vienen eternamente. Y debido al amor sentimental que la gente tiene por el mar, es invariablemente popular... El recurso potencial de las olas es vasto. Por lo general se lo estima en unos 2.000 gigavatios (GV), si bien la UNESCO lo ha declarado como de aproximadamente el doble de esa cantidad. Mas lo que hace falta calcular es qué cantidad es posible cosechar y suministrar a un precio económico”<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> HERRERA, Yasmila. Universitat Politècnica de Catalunya. Tesis de Máster: Ingeniería Estructural y de la Construcción Pag 36

### 3.4 ENERGÍA DE LAS VIBRACIONES

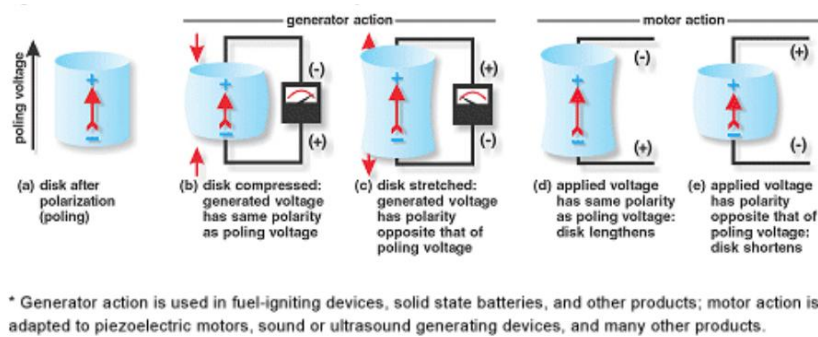
La energía obtenida a través de vibración busca aprovechar las energías ambientales de baja potencia para convertirlas en fuente de alimentación de diversos dispositivos electrónicos portátiles de bajo consumo, donde la energía ambiental existente puede ser captada, almacenada y utilizada para alimentar dichos dispositivos, aunque dichas energías generan potencias muy limitadas, pueden llegar a ser muy importantes, ya que ofrecen la posibilidad de disponer de sistemas electrónicos autoalimentados de modo indefinido. La mayor parte de la investigación sobre cómo captar energía a través de vibraciones se ha efectuado sobre circuitos electrónicos de recolección o adquisición de energía ambiental vibratoria, más concretamente, sobre circuitos que utilizan transductores piezoeléctricos sometidos a vibración y la idea principal es someter dichos materiales a tensión o movimientos mecánicos, para generar un desplazamiento de carga eléctrica conocido comúnmente como potencial eléctrico[1].

#### 3.4.1 Energía Piezoeléctrica

La piezoelectricidad es un fenómeno que ocurre en determinados cristales que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, en su masa adquiere una polarización eléctrica y aparece una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también ocurre a la inversa: se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma. Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que carecen de centro de simetría. Una compresión o un cizallamiento provocan disociación de los centros de gravedad de las cargas eléctricas, tanto positivas como negativas. Como consecuencia, en la masa

aparecen dipolos elementales y, por influencia, en las superficies enfrentadas surgen cargas de signo opuesto<sup>4</sup>.

Figura 6. Generador Piezoeléctrico.



Fuente: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>.

### 3.4.1.1 Aplicaciones a Nivel Mundial

Debido al auge de las energías renovables a nivel mundial ya son muchos los países que se han puesto en la tarea de investigación y generación de nuevas energías a partir de materiales piezoeléctricos que permitan una captación de energía eléctrica a través de estimulaciones de energía mecánica de las vibraciones, entre estos países se encuentra:

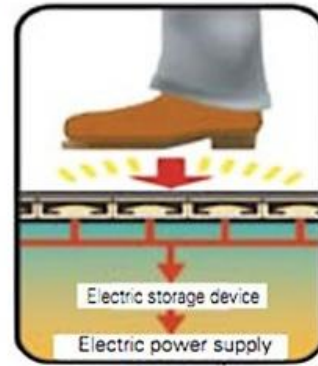
Japón: La East Japan Railway Company ha instalado un pavimento piezoeléctrico para generación de energía eléctrica en el paso de torniquetes y puertas de entrada al metro. La superficie total utilizada en el sistema abarca aproximadamente 25 metros cuadrados y se estima una generación de energía de alrededor de 1400 kW por día.

Figura 7. Generador de Energía en Japón.

<sup>4</sup> Piezoelectricidad. Wikipedia. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricidad>



Demonstration experiment at Tokyo Station



Mechanism of the power generating floor

Fuente: <http://construible.blogspot.com.co/2013/01/la-energia-piezoelctrica-aplicada.html>

Londres: La empresa Pavegen System ha diseñado una baldosa que recoge energía de las pisadas. Cuando se pisa se produce una flexión en su superficie de unos 5 mm, convirtiendo la energía cinética de la pisada en unos 5 o 7 W dependiendo de la deformación producida. La energía generada puede ser utilizada para aplicaciones de baja potencia no conectadas a la red eléctrica como instalaciones de iluminación LED, señalización y publicidad, también puede ser almacenada en las baterías instaladas en el propio elemento. Se estima que la instalación de este tipo de baldosas, fabricadas con caucho 100% reciclado y hormigón polímero, pueden generar unos 20 kWh dependiendo del tránsito.

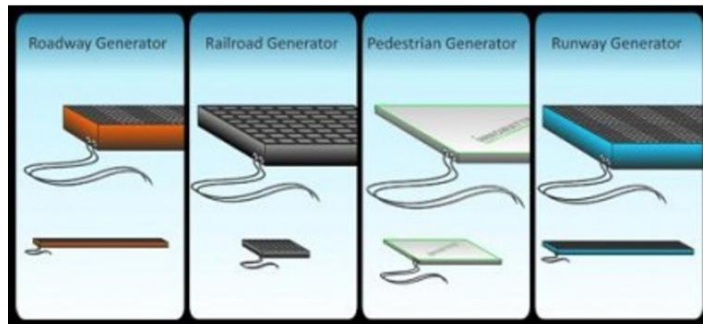
Figura 8. Energía generada a través de pisadas en baldosas en Londres.



Fuente: <http://blog.materfad.com/2012/07/londres-2012-aprovecha-la-energia-de-los-peatones/>

Israel: El Instituto de investigación Technion y posteriormente la empresa Innowatech, ha desarrollado sistemas piezoeléctricos para la obtención de energía tanto en tráfico de personas, como rodado y ferroviario

Figura 9. Sistema piezoeléctrico instalado en las carreteras de Israel.



Fuente:[https://www.idtechex.com/research/articles/energy\\_harvesting\\_roads\\_in\\_israel\\_00001589.jsa.asp?donotredirect=true&setlang=ja](https://www.idtechex.com/research/articles/energy_harvesting_roads_in_israel_00001589.jsa.asp?donotredirect=true&setlang=ja)

El sistema de funcionamiento en tráfico rodado consiste en abrir unas zanjas e introducir una serie de elementos piezoeléctricos quedando su superficie a tres centímetros bajo el asfalto. De los generadores parten unos cables que conectan con unas baterías situadas fuera de la carretera de forma que la energía queda almacenada y puede ser utilizada para las necesidades locales o inyectarse en la red eléctrica. Los resultados de la prueba piloto que se hizo en una carretera Israelí fueron 2000 Wh de promedio por tramo, en cualquier caso suficiente para iluminar la carretera. La ampliación del proyecto a una longitud de un kilómetro a lo largo de un solo carril sería capaz de producir un promedio de 200 kWh por hora, electricidad suficiente para proveer para el consumo medio de entre 200 y 300 hogares en el caso que unos 600 camiones o autobuses viajaran de media a través de este tramo.

### 3.4.2 Energía inductiva (imán-bobina)

Un imán de neodimio (también conocido como imán NdFeB, NIB, o Neo) es el tipo de imán de tierras raras más utilizado, es el resultado de una aleación de

neodimio, hierro y boro, combinados para formar un compuesto con la fórmula empírica  $Nd_2Fe_{14}B$ . Fue desarrollado en 1982 por la General Motors y la división de metales especiales de la Sumitomo Metal Industries. Los imanes de neodimio son los imanes permanentes fabricados con mayor fuerza magnética. Han reemplazado a los demás tipos de imanes permanentes en varias aplicaciones de la industria moderna como la fabricación de motores en herramientas inalámbricas, discos duros, y sellos magnéticos. Los imanes de neodimio se fabrican en forma de barras, circulares, entre otras.

Figura 10. Imanes de Neodimio.



Fuente: Mercado libre.

#### 3.4.2.1 Identificación de polos

La manera más sencilla es usar otro imán de neodimio que ya está marcado. En virtud de las propiedades magnéticas, el Polo Norte del imán marcado atraerá el Polo Norte del imán de neodimio sin marcar y rechazará el Polo Sur.

Otra manera es coger una brújula y acércala al imán de neodimio que se desea marcar. El Polo Norte de la brújula se sentirá atraído por el polo sur del imán de neodimio y repelido por el Polo Norte.

Por último, se puede coger un imán y colgarlo de una cadena para que sea de giro libre. El Polo Norte del imán será el que apunta hacia el norte.

#### 3.4.2.2 Cuidados a tener en cuenta

Su manejo inadecuado presenta riesgos para los usuarios, pues si llegasen a chocar unos con otros con fuerza suficiente podrían ocasionar que se rompan y provocar una gran caída de astillas volando a gran velocidad que pueden causar serias lesiones. Los fuertes campos magnéticos deben ser manipulados o manejados con gran precaución tanto en cercanías de dispositivos mecánicos, eléctricos o electrónicos, como también de elementos que manejen información, pues pueden provocar la pérdida de datos en algunos dispositivos de almacenamiento magnéticos como las tarjetas de crédito, y magnetizar relojes, brújulas y otros artefactos que cuenten con mecanismos con propósitos similares.

Ejemplos de fallas en la manipulación de imanes con campos magnéticos fuertes hay varios; pero de los más preocupantes se en situaciones en las que si accidentalmente una persona queda atrapada entre dos imanes, o entre un imán y una superficie metálica, la reacción natural de tratar de liberar el miembro o la parte corporal atrapada puede provocar alguna fractura. Por tanto, lo que se debe buscar al utilizar estos imanes es trabajar con cuñas que pueden ser de cobre que permitan la separación de los imanes sin causar daño alguno a la persona.

#### 3.4.2.3 Aplicación de los imanes de neodimio.

Los imanes de neodimio han reemplazado a los tradicionales imanes de alnico y ferrita en muchas de las miles de aplicaciones que tienen en la tecnología moderna; principalmente en aquellos lugares en donde se requiera poderosos imanes permanentes para una determinada aplicación. Esto es debido a que su gran fuerza magnética permite el uso de piezas mucho mas pequeñas y livianas<sup>5</sup>.

Algunos ejemplos son:

---

<sup>5</sup> Imanes de neodimio. Disponible en: <http://www.imanesneodimio.com/paginas/aplicaciones>

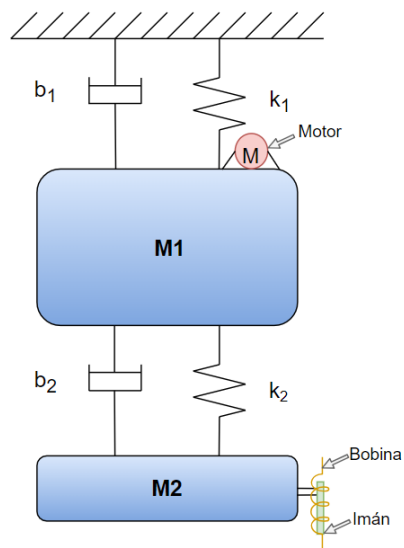
- Actuadores para las cabezas de lectura de discos duros
- Producción de imágenes por resonancia magnética nuclear (MRI)
- Pastillas para guitarras eléctricas.
- Altavoces y auriculares
- Herramientas inalámbricas
- Servomotores
- Motores para automóviles tanto híbridos como eléctricos, por ejemplo, el motor eléctrico del vehículo Toyota Prius requiere de 1 kilogramo de neodimio para su fabricación.

#### 4. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Teniendo en cuenta que es una representación de un sistema real, se plantea que el movimiento de entrada se imparta a partir de las oscilaciones generadas por el funcionamiento de un motor D.C. en cuyo eje se instala una rueda descentrada con la que se consiguen vibraciones mecánicas a una frecuencia determinada por la velocidad de operación del motor.

Adicionalmente, se debe hacer mención del sistema de cosecha de energía, el cual se basa en un mecanismo que generará un voltaje mediante inducción electromagnética, a través un imán de neodimio en movimiento. Dicho movimiento del imán está ligado a  $M_2$  ya que es nuestra masa de interés para realizar el análisis de movimiento y con el cual se inducirá una energía a través de la bobina. En el esquema que se muestra a continuación se observa la forma en que se realiza el montaje para el funcionamiento del sistema[7].

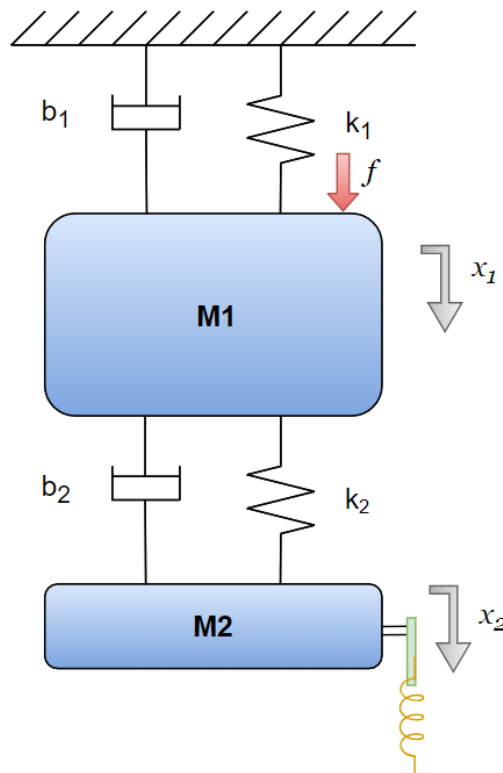
Figura 11. Esquema del sistema dinámico de segundo orden (masa-resorte-amortiguador) con acople de motor (entrada de movimiento) e imán y bobina (sistema de cosecha).



Entendiendo que el mecanismo oscila gracias al sistema implementado para la impresión de vibraciones, se genera el siguiente esquema en el que se observa la fuerza  $f$  como entrada de movimiento,  $x_1$  y  $x_2$  representan el desplazamiento de las masas  $M_1$  y  $M_2$  respectivamente.

Realizando un análisis de sistema dinámico, planteamos el siguiente esquema, siendo éste el diseño más semejante a una situación de amortiguamiento, el cual consta de: un resorte  $k_1$  y un amortiguador  $b_1$  que une a la masa  $M_1$  con la pared y, a ésta última, se añaden un resorte  $k_2$  y un amortiguador  $b_2$  que enlazan a  $M_1$  y  $M_2$ , estableciendo el mecanismo para apreciar el movimiento relativo entre las masas mencionadas[13].

Figura 12. Esquema del sistema masa-resorte-amortiguador.



## 4.1 ECUACIONES DINÁMICAS DE MOVIMIENTO

### 4.1.1 Sistema mecánico

Las ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden de sistemas dinámicos en condiciones constantes están dadas de la siguiente manera, dado que la fuerza del sistema es aplicada a la primera masa, la ecuación diferencial que describe dicho comportamiento es

Para la masa  $M_1$ :

$$m_1\ddot{x}_1 + b_1\dot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = f \quad (4.1)$$

Debido al movimiento producido por la fuerza efectuada en la primera masa se presenta un desplazamiento en la segunda masa debido a la contracción del sistema, es por esto que también se tiene otra ecuación diferencial, la cual es

Para la masa  $M_2$ :

$$m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (4.2)$$

La sumatoria de fuerzas para esta ecuación es igual a cero debido a que no hay ninguna fuerza externa aplicada como en la primera masa, y de igual forma el desplazamiento de la masa se verá afectada por el acople del sistema.

Por el método de variables de estado que se basa en la descripción del sistema mediante  $n$  ecuaciones de diferencias, que se agrupan en una ecuación vectorial matricial en diferencias.

Variables de estado

$x_1 = x_1$  Movimiento masa 1 ( $m_1$ )

$x_2 = x_2$  Movimiento masa 2 ( $m_2$ )

$x_3 = \dot{x}_1$  Velocidad masa 1 ( $m_1$ )

$x_4 = \dot{x}_2$  Velocidad masa 2 ( $m_2$ )

Ecuaciones de estado

$$A = \begin{matrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{(b_1 + b_2)}{m_1} & \frac{b_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} & -\frac{b_2}{m_2} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$B = \begin{matrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.4)$$

$Y(t) = X(t) \rightarrow$  Las salidas son las mismas variables de estado por ende se tiene las ecuaciones de espacio de estados:  $Y(t) = A_x(t) + B_f(t)$ , donde  $A_x(t)$  es la matriz de coeficiente de  $x$  y  $B_f(t)$  es el vector de coeficiente de fuerza.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Siendo A, B, C y D las matrices del modelo de variables de estado, las cuales llevaremos al software MATLAB para realizar la simulación del sistema dinámico.

En el anexo A. Se puede observar el modelado matemático usando la Transformada de Laplace.

#### 4.1.2 Sistema Electromagnético

Por la ley de la inducción de Faraday la cual establece que “La fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético que lo atraviesa, y directamente proporcional al número de espiras del inducido”. Matemáticamente se expresa como [6]:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \quad (4.7)$$

La ecuación de Flujo del campo magnético, es el producto punto del área por el campo, asumiendo que es el campo se comporta constante dentro del área a usar, se tiene

$$\phi_B = A \cdot B = A \cdot n \cdot B(x) \quad (4.8)$$

Ecuación del Campo magnético producido por un imán, donde  $m$  es el momento magnético y  $x$  es la distancia

$$B(x) = \frac{\mu_0 \cdot m}{2\pi \cdot x^3} \quad (4.9)$$

al conocer el campo magnético en cierto punto, en este caso, en el borde del imán que está a cierta distancia, más específicamente en el centro de masa magnético, es decir, en la mitad del imán ya que es un imán simétrico

$$B(l) = B_l = \frac{\mu_0 \cdot m}{2\pi \cdot l^3} \quad (4.10)$$

reescribiendo de esta manera el campo magnético, se tiene  $\frac{\mu_0 \cdot m}{2\pi} = B_l \cdot l^3$

siendo  $B_l$  el campo al borde del imán y  $l$  la distancia del centro al borde conocidas, se obtiene la expresión genérica del campo magnético como

$$B(x) = B_l \frac{l^3}{x^3} \quad (4.11)$$

derivando el Campo en relación a la derivada interna de  $x$ , tenemos

$$B'(x) = \frac{3B_l l^3}{x^4} \cdot \dot{x} \quad (4.12)$$

por la Ley de Faraday, donde el voltaje es la derivada del flujo con respecto al tiempo, se obtiene

$$V = \frac{d\phi}{dt} = \frac{3A \cdot n \cdot B_l \cdot l^3}{x^4} \cdot \dot{x} = \frac{3A \cdot n \cdot B_l \cdot l^3}{(a + \Delta x)^4} dx \quad (4.13)$$

De esta manera obtenemos las ecuaciones finales del modelamiento matemático a utilizar para la simulación en MATLAB que nos permitirá demostrar el concepto de captación de energía a través del sistema dinámico electromagnético.

## 5. MODELADO EN MATLAB

### 5.1 MATLAB<sup>6</sup>

MATLAB es un sistema interactivo con entorno computacional y desarrollo de aplicaciones con fines científicos o de ingeniería, donde integra actividades con un elevado proceso matemático permitiendo realizar soluciones de modelado y simulación, análisis y procesamiento de datos, visualización y representación de gráficos, así como para el desarrollo de algoritmo.

MATLAB cuenta con un amplio portafolio de comandos de áreas específicas llamadas *toolboxes*, que extienden el ambiente de MATLAB para resolver problemas de áreas específicas de la ciencia e ingeniería como Sistemas de Control, Lógica Difusa, Procesamiento Digitales de Señales, etc.

### 5.2 SIMULACIÓN DEL MODELADO EN MATLAB

Con el fin de representar el modelamiento matemático de un sistema electromagnético-MRA de segundo orden, se realizó un desarrollo en el software MATLAB que permite una representación dinámica para demostrar el alcance y comportamiento que puede generar el concepto de captación de energía.

En esta interfaz de MATLAB se pondrá a prueba la veracidad de las ecuaciones planteadas, se introducen en el Software MATLAB las ecuaciones del sistema dinámico obtenidas anteriormente en el capítulo 4, con el fin de realizar pruebas

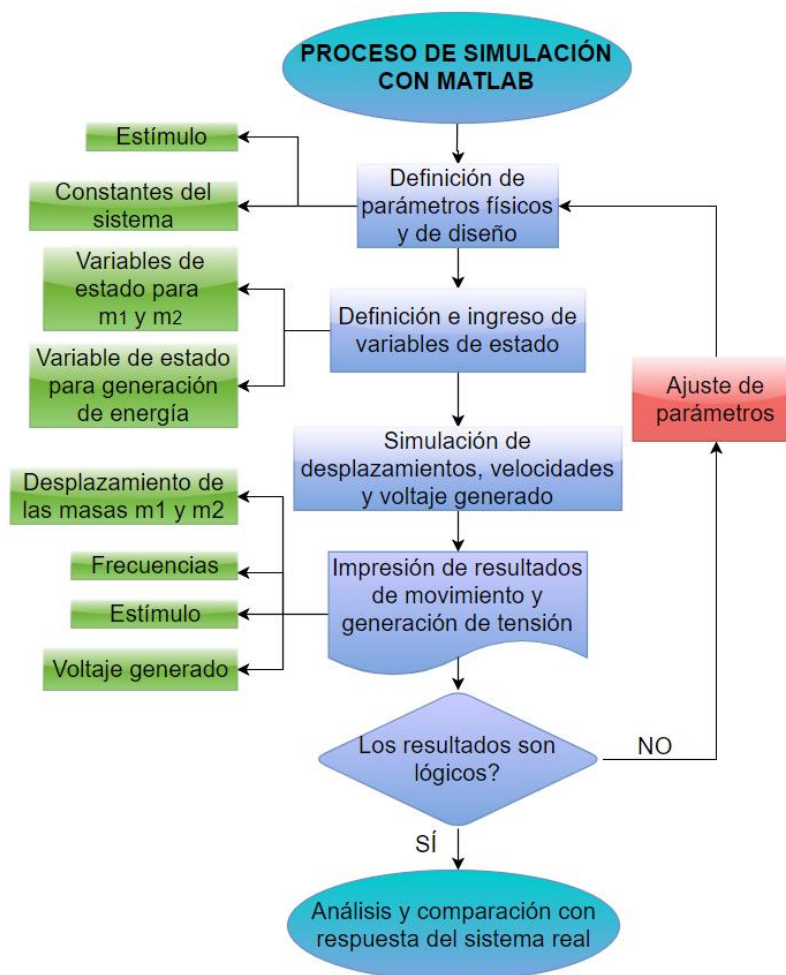
---

<sup>6</sup> ESQUEDA, Jose. Matlab e interfaces gráficas. Instituto Tecnológico de Ciudad de México. Disponible en: [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/matlab\\_seminar/docs/Matlab\\_6xConatec.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/matlab_seminar/docs/Matlab_6xConatec.pdf)

que demuestren la teoría y así poder realizar un comparación con el sistema experimental.

En el anexo B. se muestra el código completo de la simulación realizada en MATLAB, donde se presentan las variables y ecuaciones a tener en cuenta en el desarrollo de la simulación del modelo matemático para el sistema dinámico electromagnético de segundo orden, las variables a declarar son valores constantes que representan los diferentes mecanismos que intervinieron en el diseño del prototipo.

Figura 13. Diagrama MATLAB.



## 6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DINÁMICO

Recopilando parte de la investigación realizada, se encontraron empresas dedicadas a la construcción de equipos didácticos de laboratorio y en la descripción de estos bancos de trabajo, se menciona que son usados en prácticas de física mecánica, cinemática, dinámica, conservación de momento, análisis de colisiones, entre otros. Por este motivo se decidió fabricar elementos similares a los existentes para el montaje de nuestro prototipo.

Figura 14. Kit de laboratorio PASCO.



Fuente: <https://www.pasco.com/index.cfm>

Figura 15. Kit de laboratorio VERNIER.



Fuente: <https://www.vernier.com/>

Se debe tener en cuenta que el modelo que se desarrolle debe cumplir ciertos requerimientos básicas con el fin de proporcionar elementos que se comporte de una forma adecuada.

- Baja fricción: el modelo consta de un sistema dinámico masa–resorte–amortiguador doble. Es necesario que al generar el movimiento relativo entre las masas haya el menor efecto de fricción entre las mismas y la superficie de desplazamiento. Teniendo claro lo anterior, se utilizaron materiales que manejan bajos coeficientes de fricción entre sí, teniendo en cuenta que es la manera en que se construyen los bancos de laboratorio a nivel industrial.

Fotografía 1. Diseño de ruedas y riel de baja fricción



- Materiales no magnéticos: el propósito principal del documento es construir un prototipo a través del cual se pueda experimentar la generación de energía. Para esto, es necesario usar una serie de imanes de neodimio y la construcción de una bobina con núcleo de aire y alambre para embobinado esmaltado. Es posible que el uso de materiales magnéticos alteren el desarrollo normal de los campos magnéticos generados por la bobina y los imanes.

Fotografía 2. Perfil de aluminio



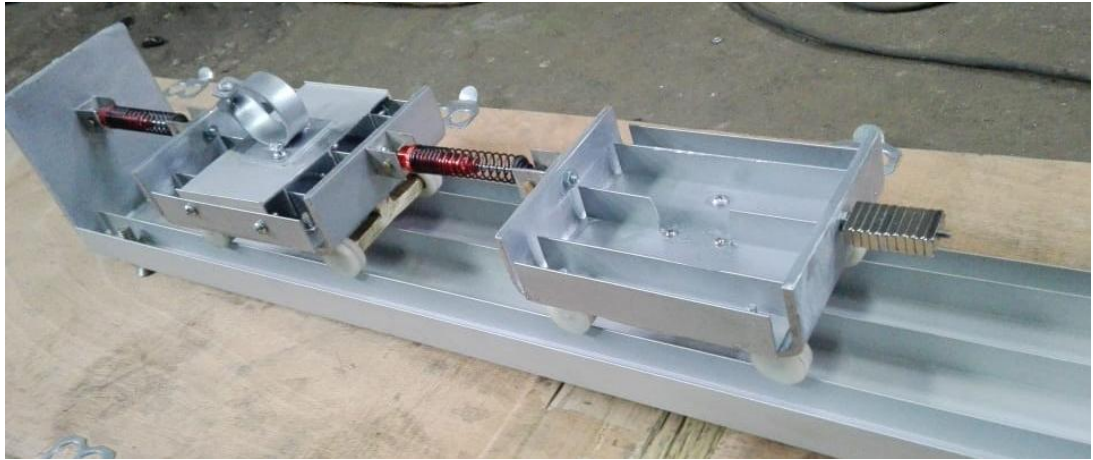
Basados en el diseño y en las estructuras usadas en estos kits de laboratorio, se desarrolló un prototipo haciendo un proceso de ingeniería inversa para simular la baja fricción de los carros utilizados y en general, teniendo en cuenta los materiales usados en dichos kits.

## 6.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

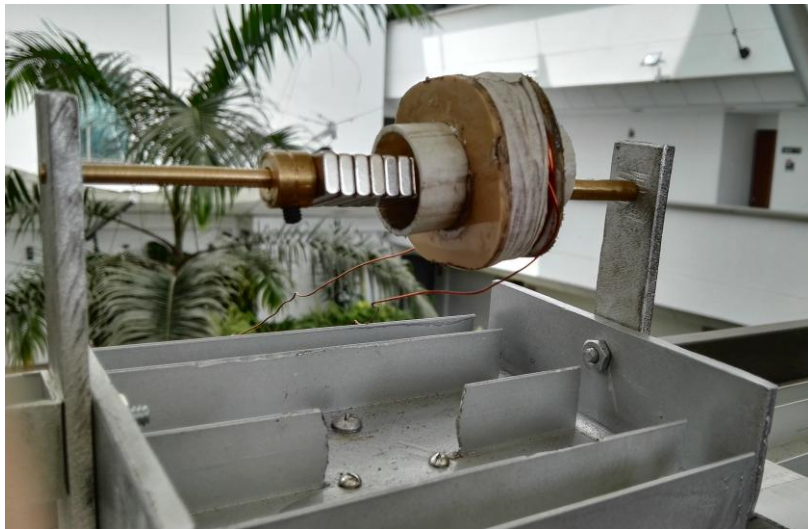
Como se había mencionado anteriormente, el diseño y construcción del prototipo cuenta principalmente con:

Dos masas acopladas en línea,  $M_1$  detrás de  $M_2$  unidas por un amortiguador y un muelle,  $M_1$  está unida a la pared con un mecanismo similar de muelle amortiguador. Al final de  $M_2$  y sobre la misma se instaló una fila de diez (10) imanes de neodimio que oscilan dentro de una bobina de núcleo de aire por acción del movimiento de  $M_2$ ; la bobina es estática y se encuentra ubicada al final de las dos masas.

Fotografía 3. Masa 1 y Masa 2 alineadas.



Fotografía 4. Montaje de bobina.



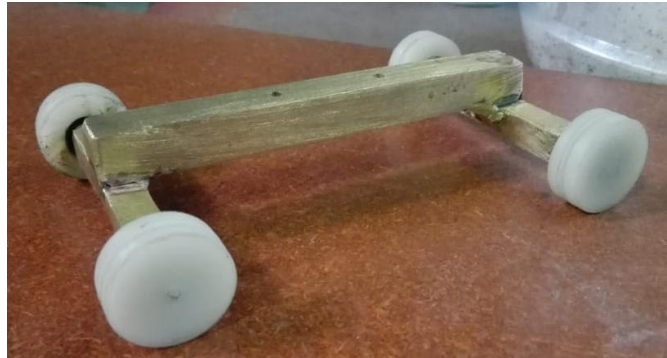
#### 6.1.1 Carro sin fricción

El carro consta de dos partes:

- Chasis y ruedas: Chasis construido en barras de bronce cuadradas de  $3/8$ " y  $1/2$ ", el diseño forma un perfil en I, soldado para dar consistencia a la hora de

alguna vibración fuerte. Las cuatro puntas del eje están torneadas como ejes de 3/16”.

Fotografía 5. Chasis



A las ruedas torneadas de nylon, se le realizan ranuras de 2 mm para ubicarse sobre el riel de aluminio y generar agarre. El montaje de cada una de las ruedas se hace con un rodamiento para eje de 3/16” dispuesto concéntricamente.

- Carrocería: Construida en riel de aluminio y lamina de aluminio doblada a 90° de calibre 3/16”, anclada entre ella y al chasis con tornillos de acero inoxidable de diámetros 1/8” y 3/16”. Anclajes para sujetar el conjunto de resorte amortiguador en aluminio.

Fotografía 6. Carrocería.



- Amortiguadores: La selección de los amortiguadores se realizó buscando un conjunto de piezas proporcionales al tamaño del prototipo (ver Anexo D). Como se puede observar en la Figura 21, se requirió añadir los soportes necesarios para su respectivo anclaje, así como también cambios en los resortes y la calidad del amortiguamiento, siendo B1 mayor que B2 y siendo el resorte 1 más rígido que el segundo[12].

Fotografía 7. Amortiguadores.



### 6.1.2 Mecanismo de oscilación

Para obtener distintos valores de medición a la hora de hacer la práctica, es necesario elaborar un diseño de pruebas en el que se realizan diferentes mediciones de la frecuencia obtenida, mediante la variación la velocidad del motor DC, que a su vez hará que varíe la amplitud de las oscilaciones de las masas, para lograrlo se utilizó un sistema de modulación de voltaje para controlar las revoluciones por minuto del motor. El diseño del montaje de control del motor DC como mecanismo impresor de una fuerza para variar la frecuencia, se explicará en el siguiente a capítulo de este documento.

- Motorreductor con masa excéntrica

Tabla 1. Especificaciones del motor.

<b>Motorreductor de corriente continua (DC)</b>
<b>Rango de voltaje: 0-30 [V]</b>
<b>Corriente sin carga: 100 [mA]</b>
<b>Velocidad máxima en vacío: 200 [rpm]</b>

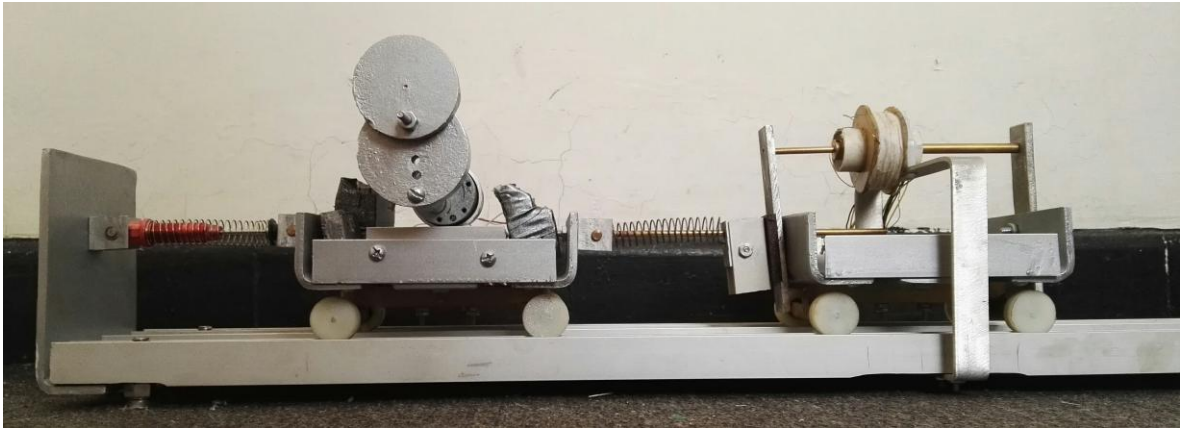
Figura 16. Motorreductor de corriente continua.



Fotografía 8. Masa excéntrica



Fotografía 9. Montaje final.



## 7. SISTEMAS DE CONTROL

El diseño del mecanismo exige tanto una entrada de movimiento, para simular las perturbaciones que desencadenarán las oscilaciones en las masas, así como también un sistema que muestre el aprovechamiento energético. Cada uno de los sistemas mencionados se explicará a continuación.

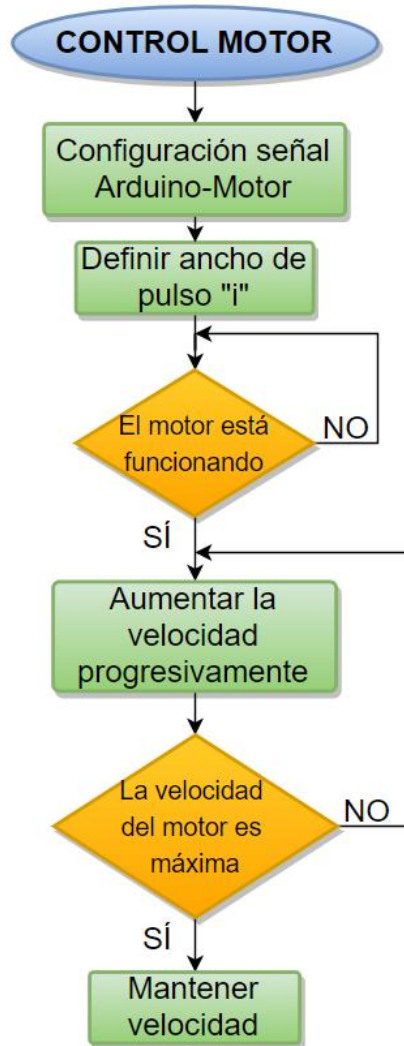
### 7.1 SISTEMA DE CONTROL DEL MOTOR

Con el fin de obtener una frecuencia de oscilación adecuada, se proyecta un programa utilizando una tarjeta programable Arduino y su respectivo software, con el cual se le da la señal al motor para que gire a determinadas revoluciones por minuto (rpm), teniendo claro que es indispensable una conexión electrónica adecuada para generar la respuesta del motor esperada y, de la misma manera, proteger los demás elementos que participan en esta parte de la construcción del dispositivo.

#### 7.1.1 Diseño del programa a través de arduino

Para evitar que el mecanismo tenga comportamientos con picos grandes de movimiento que causen alteraciones indeseadas, se escribe un código de tal manera que el incremento de velocidad del motor se haga progresivamente hasta llegar a su velocidad máxima de operación; de esta manera se logra estabilizar el comportamiento del sistema poco tiempo después, alcanzando un punto de uniformidad en las oscilaciones de las masas. El código dispuesto para este fin se encuentra expuesto en el Anexo C con el fin de mejorar su entendimiento y su proceso de funcionamiento se describe en el siguiente diagrama:

Figura 17. Diagrama de flujo para control de motor.



Como se puede observar, se plantea una programación en la que, a través de la señal enviada por un puerto PWM del Arduino se controla la cantidad de energía que se envía al motor. Esto se realiza aprovechando las características de este tipo de puertos en los que se envían señales con una técnica modulación por ancho de pulsos (PWM), desde cero hasta doscientos cincuenta y seis (que es el máximo ancho de pulso que se puede lograr utilizando la plataforma Arduino), permitiendo que se module la tensión eléctrica hacia el motor.

Con lo anterior se busca que la llegada de voltaje al motor sea progresiva, comenzando en un valor cercano a 0[V] y terminando en 30[V], en donde al alcanzar el pico de voltaje máximo, se moverá a su máxima velocidad. Lo anterior se tiene debido a que el motor seleccionado es un motor que a 30[V] funciona a 900[RPM] y conociendo algunos datos, se puede esperar que:

- Al permitir el flujo de los 30[V], se tiene una velocidad de 200[RPM] (para un motor libre de carga) y un ancho de pulso de 255. Entonces podemos deducir la velocidad inicial y su incremento en cada instante de la siguiente manera:

$$\frac{30[V]}{255} = \frac{V_0}{5} \quad (7.1)$$

$$\therefore V_0 = 0,6 \quad (7.2)$$

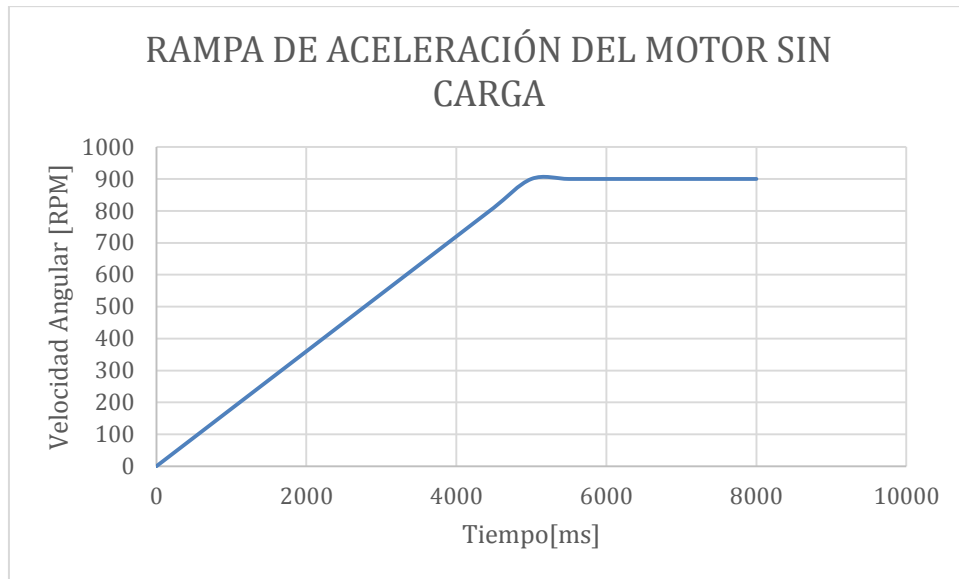
$$\Rightarrow \frac{0,6[V]}{w} = \frac{30[V]}{200[RPM]} \quad (7.3)$$

$$\therefore w_{@v_0} = 4[RPM] \quad (7.4)$$

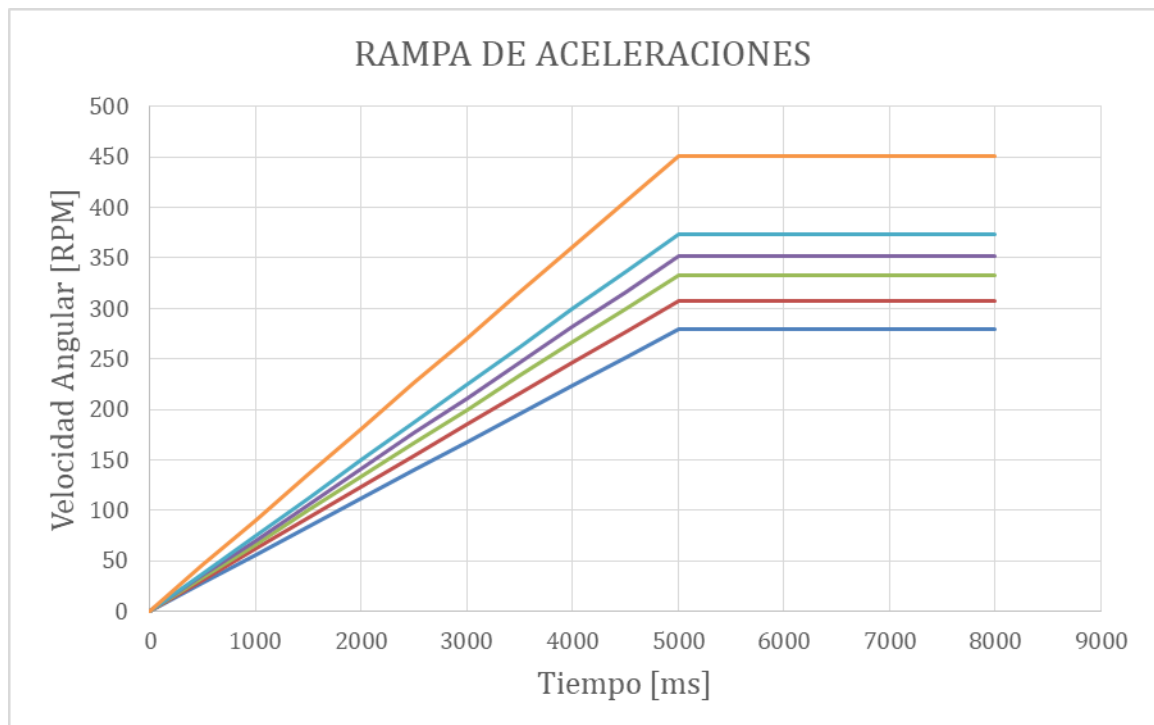
- El delay (tiempo de retardo) para el incremento del ancho del pulso se tomó de medio segundo o 500 milisegundos y éste incrementa de forma tal que se aumenta en 25 cada variación, hasta estabilizarse en 255; es decir que se va teniendo en cuenta el valor inmediatamente anterior y se le suma 25 para incrementar el ancho de pulso y con esto, controlar la apertura de flujo de señal a través del transistor.

También es importante mencionar que el tiempo que tarda el motor en alcanzar su velocidad máxima es  $t = 5[s]$ . Después de alcanzada la velocidad deseada, se espera un tiempo de transición para que el sistema se estabilice y se pueda normalizar el comportamiento de este. Analizando lo mencionado anteriormente, se asocia una gráfica que expresa este comportamiento:

Gráfica 1. Rampa de aceleración del motor libre de carga.



Gráfica 2. Rampa de aceleración del motor para los voltajes y cargas usadas.

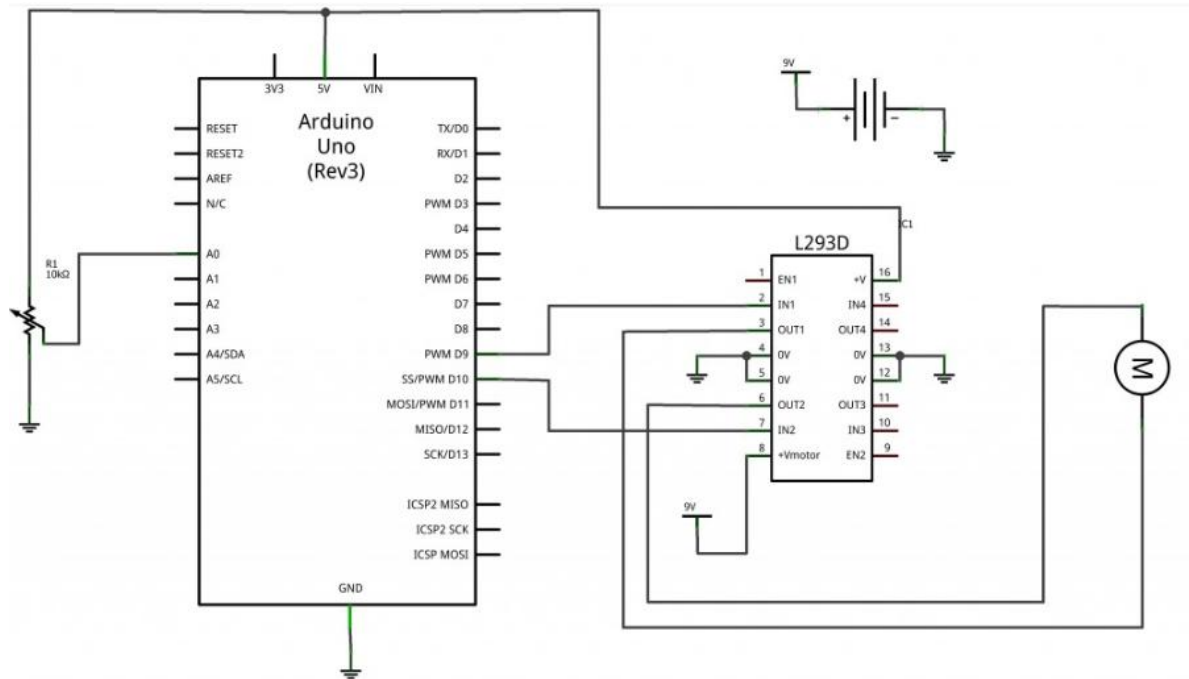


### 7.1.2 Diseño del montaje electrónico

Teniendo la programación para controlar el funcionamiento del motor, se dispone a realizar el montaje del circuito electrónico, revisando cada uno de los datasheet de los elementos requeridos para evitar daños en el motor o la tarjeta Arduino. Entonces, disponiendo de los siguientes elementos:

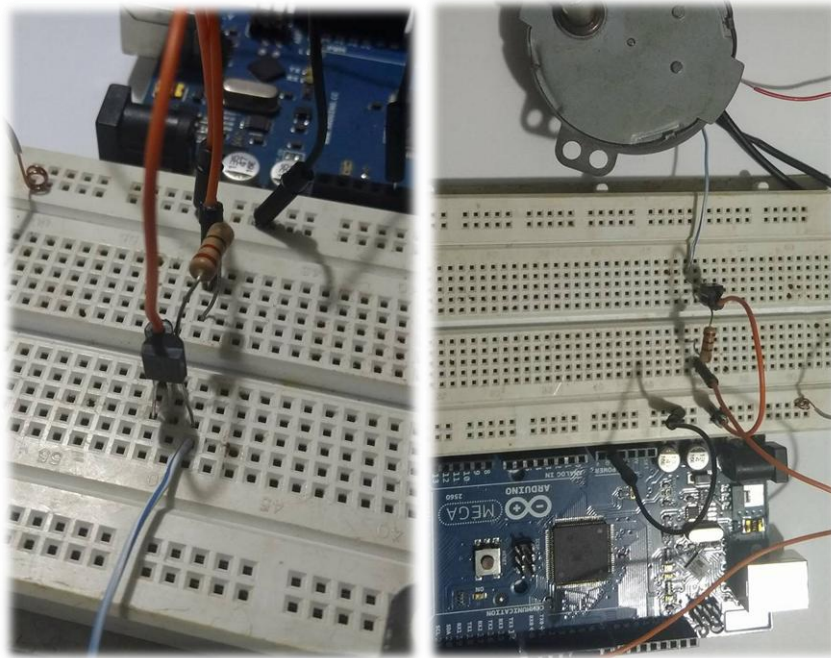
- Resistencia eléctrica: 220[Ω]
- Transistor: NPN 2N2222 (Ver Anexo B)
- Cables
- Fuente regulable
- Arduino

Figura 18. Montaje electrónico esquemático del circuito de control para el motor.



Fuente: <http://diymakers.es/control-velocidad-y-sentido-de-motor-dc/>

Fotografía 10. Montaje real del circuito de control para el motor.



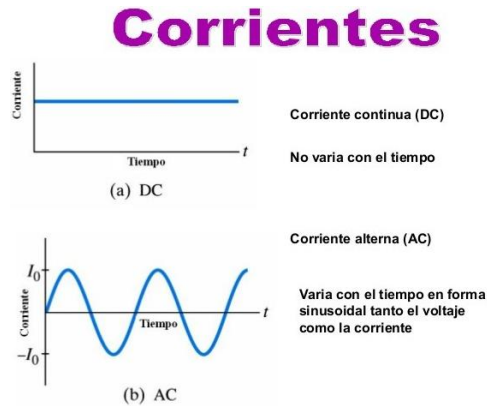
## 7.2 CIRCUITO DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Como ya se ha venido mencionando y siento éste el propósito del proyecto, se dispone a demostrar que se puede obtener energía eléctrica a partir las vibraciones mecánicas que son producto de un sistema masa resorte amortiguador, como los observados en suspensiones vehiculares. Para lograrlo, se hace necesaria la construcción de un circuito para rectificar la corriente alterna proveniente de la bobina, para finalmente obtener un flujo de corriente directa para ser aprovechado. En la construcción de este prototipo se plantearon dos alternativas; la primera se refiere a un circuito para verificar la generación de corriente, alimentando un diodo emisor de luz y, la segunda alternativa, es un circuito diseñado para el almacenamiento de energía en una batería[4].

### 7.2.1 Circuito de instrumentación para amplificar señales

Como es bien sabido, al disponer de una salida de corriente alterna (A.C.), se debe rectificar y filtrar para conseguir un flujo de corriente directa (D.C.).

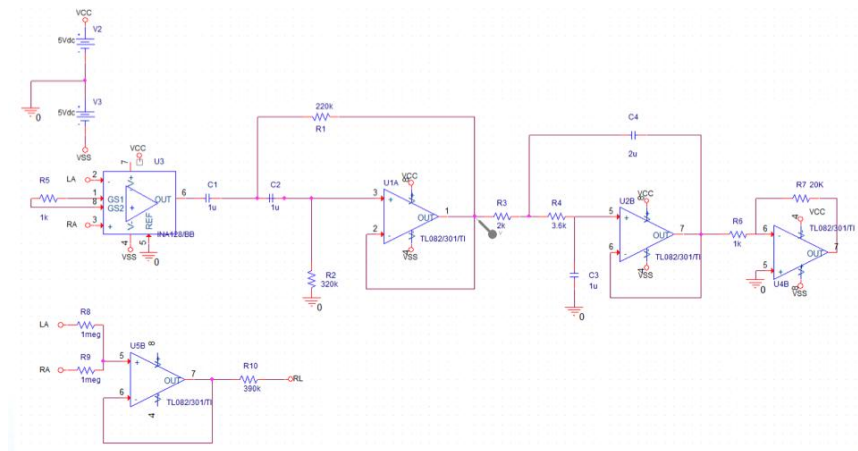
Figura 19. Corriente continua (D.C) y corriente alterna (A.C).



Fuente: La Tecnología <https://sites.google.com/site/escuelasecundariatecnologia/corriente-alterna-y-continua>

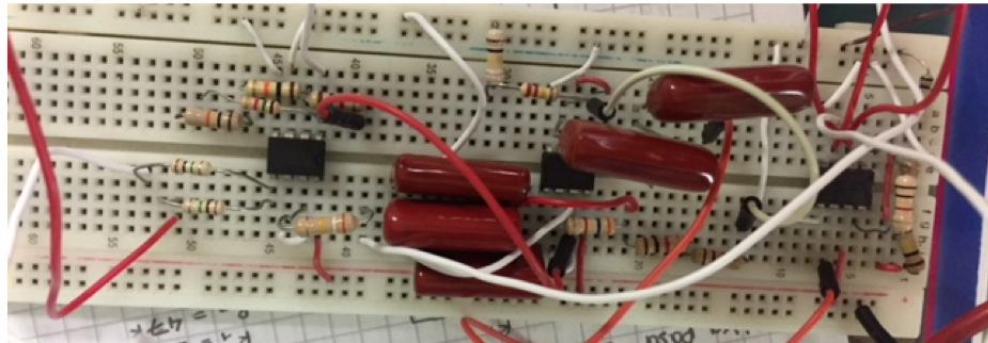
Las señales que se van a ser generadas por la bobina son valores extremadamente bajos, por esto se busca implementar un circuito amplificador de señal, como parte de la instrumentación que permitirá la visualización de estas señales.

Figura 20. Circuito amplificador simulado.



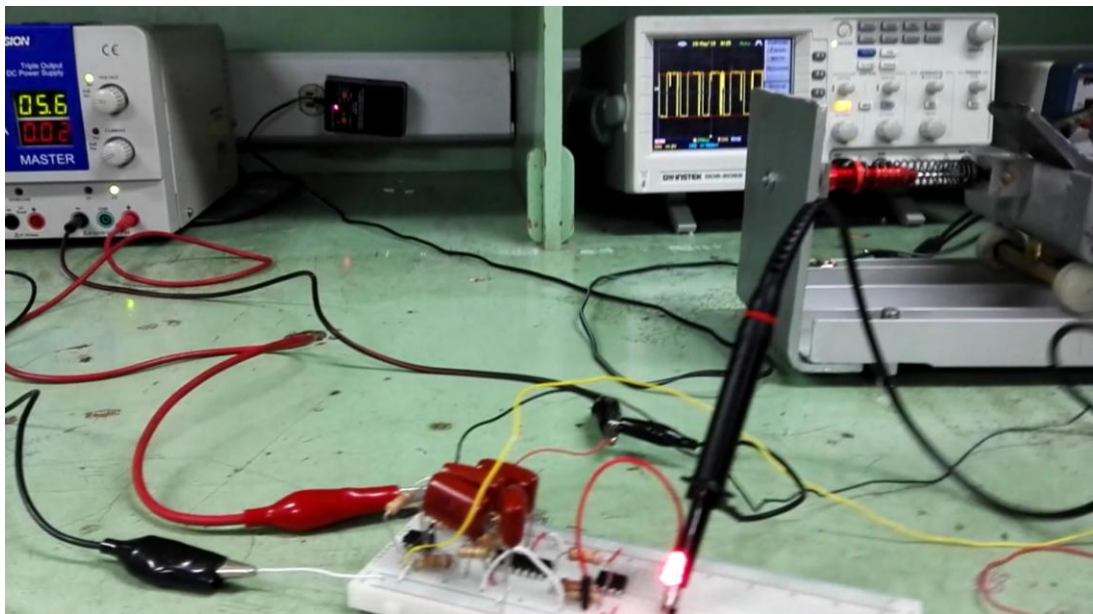
Fuente: Autores

Fotografía 11. Circuito amplificador experimental.



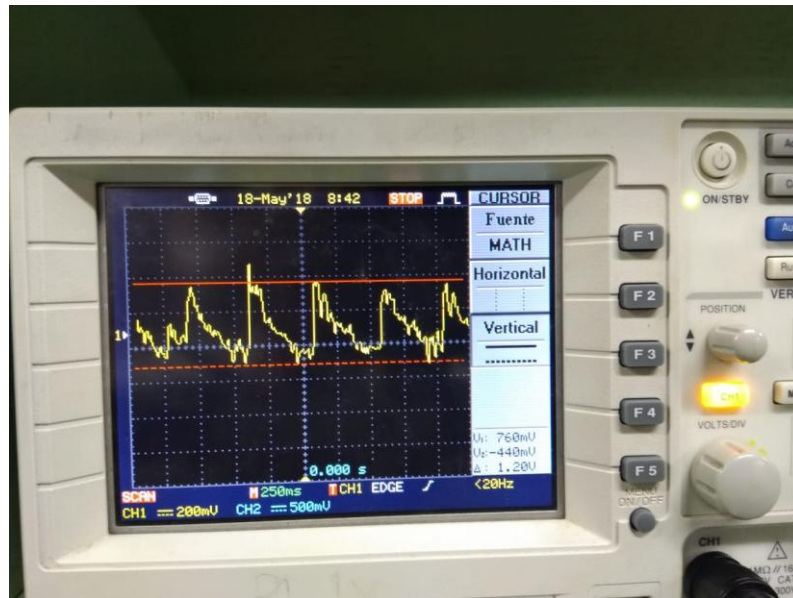
Se logra con este circuito una ganancia de 1000 para las señales generadas por la bobina (voltaje-amperaje); dentro del mismo se hace una filtración de frecuencias para eliminar los ruidos con un filtro pasa bandas. En este circuito también se instaló un diodo led verificando la generación de energía, este se encenderá cada vez que se presente interacción entre campos y se genere algún tipo de señal eléctrica.

Fotografía 12. Generación de señales - encendido Diodo-LED.



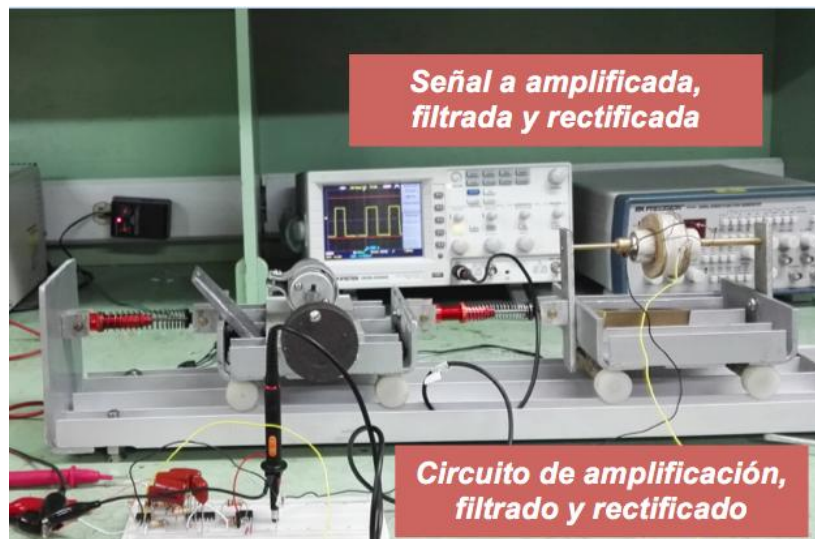
Sin este circuito las señales generadas por la bobina son de difícil lectura.

Fotografía 13. Señales sin filtro y sin rectificación.



Como se muestra en la figura 29, las señales resultantes procesadas por el osciloscopio conectadas de forma directa de la bobina al mismo, se evidencia la dificultad al momento de poder obtener valores de trabajo.

Fotografía 14. Visualización de señal rectificada.



### 7.2.2 Implementación de circuito electrónico para captación y almacenamiento de energía en una batería

Es necesario que al plantear nuevas alternativas para la obtención de energía eléctrica, se estudie la posibilidad de concentrarla y almacenarla, para así ponerla a disposición de los elementos que la puedan aprovechar; por esta razón nos apoyamos en el circuito de recarga para una batería de 12v encontrado en una linterna recargable.

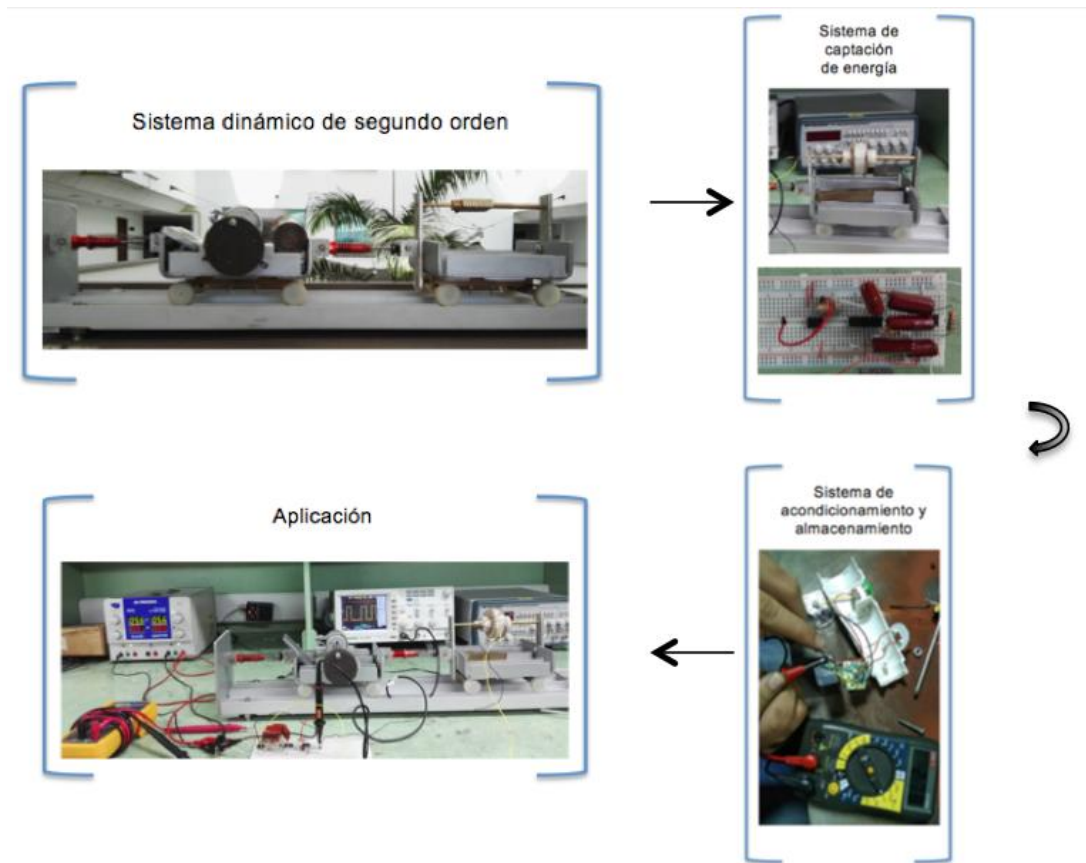
Fotografía 15. Circuito para recarga de batería.



### 7.3 DIAGRAMA GENERAL DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE COSECHA DE ENERGIA

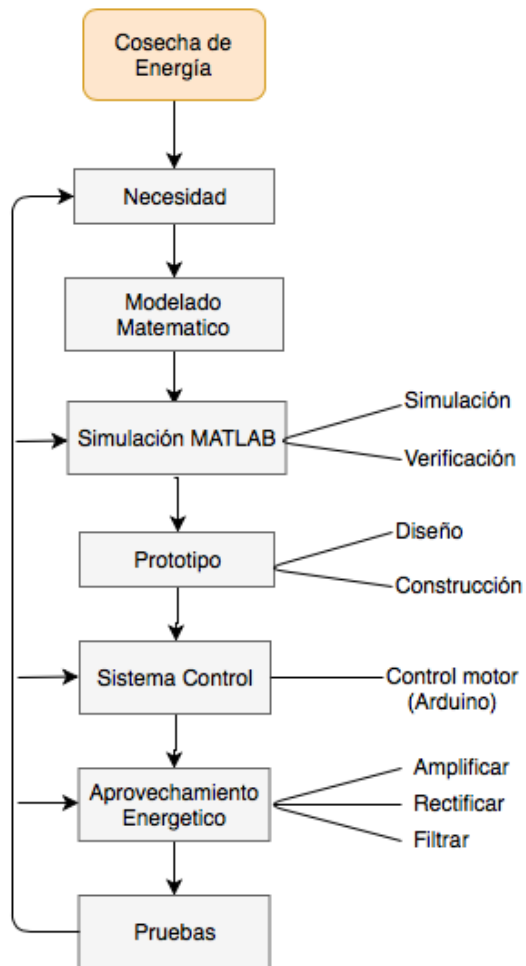
En busca de brindar un grado alto de entendimiento, se presentó la oportunidad de clarificar el proceso que conlleva la producción de un sistema apropiado para la cosecha de energía, mediante la elaboración de una herramienta gráfica en la cual se resumen los sistemas más relevantes que componen el prototipo producto de esta investigación, la cual se añade a continuación para entregar al lector cierto nivel de información en un formato resumido.

Figura 21. Esquema general del sistema de cosecha de energía.



A continuación se presenta un diagrama de flujo donde se explica el proceso de desarrollo de manera global para una mejor interpretación y comprensión de los pasos a realizarse durante la elaboración de este proyecto. El sistema propuesto no es un sistema fijo puesto que se busca la retroalimentación del mismo cuando se realicen pruebas para obtener una mejoría en los resultados y objetivos que se pretenden conseguir con ese sistema captador.

Figura 22. Diagrama de flujo del Desarrollo del proyecto.



## 8. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la necesidad de realizar comprobaciones experimentales, se tomó la iniciativa de diseñar un ensayo de medición teniendo en cuenta los parámetros más importantes que afectarían significativamente el comportamiento del sistema. Teniendo en cuenta lo anterior se analizan tres mediciones diferentes, en las cuales se realizan la toma de datos variando el voltaje aplicado al motor, con la finalidad de modificar su frecuencia de oscilación como consecuencia de los cambios apreciables en su velocidad angular. En cada medición se tuvieron en cuenta parámetros constantes y otros variables, de la siguiente manera:

Tabla 2. Parámetros constantes.

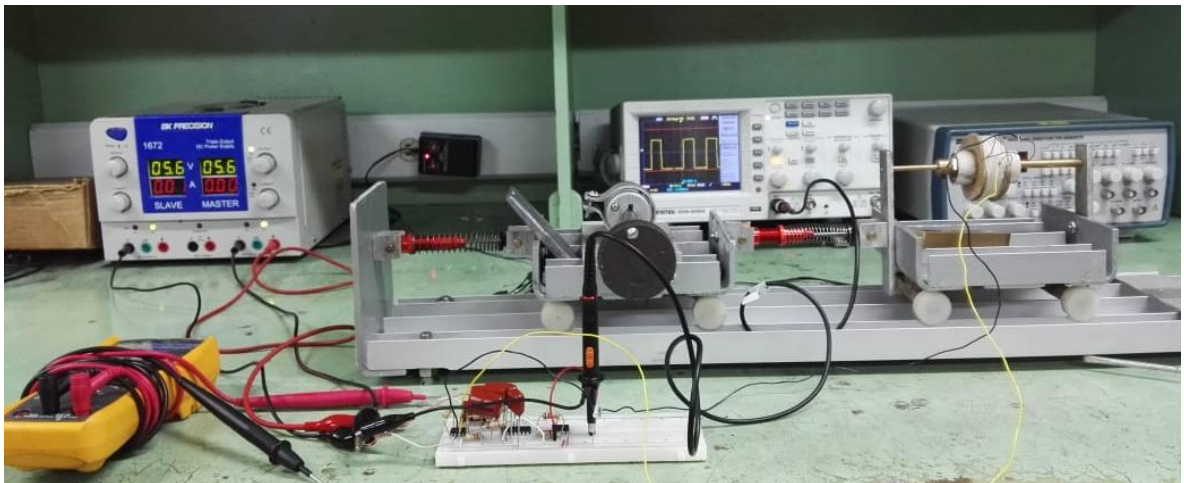
PARÁMETRO	VALOR
Masa Carro 1	$M_1=3000[\text{gr}]$
Masa Carro 2	$M_2=900\text{gr}$
Masa excéntrica en el eje del motor	$M_e=308[\text{gr}]$
Radio de excentricidad	$R_e=40[\text{mm}]$
Radio del eje del motor	$r=1/2''=6.35[\text{mm}]$
Número de vueltas de la bobina	$N_b=675$
Calibre del alambre de la bobina	$Cal=20$
Área de la bobina	$A_b=1.256 [\text{m}^2]$
Campo magnético del imán	$B=1[\text{T}]$
Constante de amortiguamiento 1	$b_1=0.2$
Constante de amortiguamiento 2	$b_2=0$
Longitud del vástago del amortiguador 1	$L_{b1}=27[\text{mm}]$
Longitud del vástago del amortiguador 1	$L_{b1}=27[\text{mm}]$
Constante de resorte 1	$k_1=150$
Constante de resorte 2	$k_2=50$
Longitud del resorte 1	$L_1=65[\text{mm}]$
Longitud del resorte 2	$L_2=70[\text{mm}]$

Tabla 3. Parámetros variables.

PARÁMETRO	VALOR
<b>Voltaje suministrado al motor</b>	V1=8,5[V]
	V2=10,5[V]
	V3=12,2[V]
	V4=13,3[V]
	V5=15,26[V]
	V6=20,2[V]

Adicionalmente, se debe mencionar que, para efectos de simplificación del sistema, se despreciaron los valores de la fuerza de rozamiento entre las ruedas de nylon de cada carro y los rieles de aluminio ya que, como se había mencionado anteriormente en este documento, se realizó la selección de estos materiales con el fin de reducir esos coeficientes de fricción.

Fotografía 16.. Montaje general para mediciones de prototipo.



## 8.1 CÁLCULO TIPO DE VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR

Contamos con un motor con las especificaciones mencionadas en el capítulo 6, pero al ser estos datos tomados de la información prestada por el proveedor, se entiende que dicho desempeño es dado únicamente bajo condiciones libres de carga y al voltaje requerido. Por esto se presenta la necesidad de tomar medidas reales de la velocidad lineal del motor para prueba, sometiéndolo a la carga y al montaje en el que se va a desempeñar durante la evaluación del sistema dinámico.

Para el cálculo tipo, se expondrán los datos obtenidos en la última medición realizada cuando al motor se le induce una tensión de 20[V] para su operación y a continuación, se explica el procedimiento realizado.

- Cálculo de la velocidad: se realizó la medición de tres datos de tiempo en los que se tomó el desplazamiento de un metro y se promedió así:

Tabla 4. Calculo de tiempo promedio para un desplazamiento de 1[m].

MEDICIÓN	TIEMPO [s]
t1	3,45
t2	3,39
t3	3,43
$t_{1prom} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$	3,42

- Se procede a calcular la velocidad angular:

$$v_1 = \frac{l}{t_{1prom}} \quad (8.1)$$

Donde  $v_1$  es la velocidad lineal,  $l$  es la longitud recorrida y  $t_{1prom}$  es el tiempo medido (calculado anteriormente).

$$\Rightarrow v_1 = \frac{1[m]}{3,42[s]} \quad (8.2)$$

$$v_1 = 0.3[s]$$

Sabiendo que:

$$v_1 = w_1 * r \quad (8.3)$$

Donde  $w_1$  es la velocidad angular y  $r$  es el radio del eje. Se despeja  $w_1$  de la ecuación (8.3) y tenemos que:

$$\Rightarrow w_1 = \frac{v_1}{r} \quad (8.4)$$

$$w_1 = \frac{0,3 [m/s]}{6,35 * 10^{-3}[m]} \quad (8.5)$$

$$\therefore w_1 = 47,24[m/s]$$

Finalmente, calculamos las revoluciones por minuto a las que el motor se encuentra moviéndose. Para conseguirlo, se procede de la siguiente forma:

$$N_1 = w_1 * \frac{60[s]}{1[min]} * \frac{1[rev]}{2\pi} \quad (8.6)$$

$$N_1 = 47,24[m/s] * \frac{60[s]}{1[min]} * \frac{1[rev]}{2\pi} \quad (8.7)$$

$$\therefore N_1 = 451[RPM]$$

De la misma manera se procede a realizar los cálculos respectivos para las variaciones de voltaje que se mencionarán en la siguiente tabla, en la cual se estipula un resumen de los datos encontrados.

Tabla 5. Resumen de velocidades del motor sometido a variaciones del voltaje.

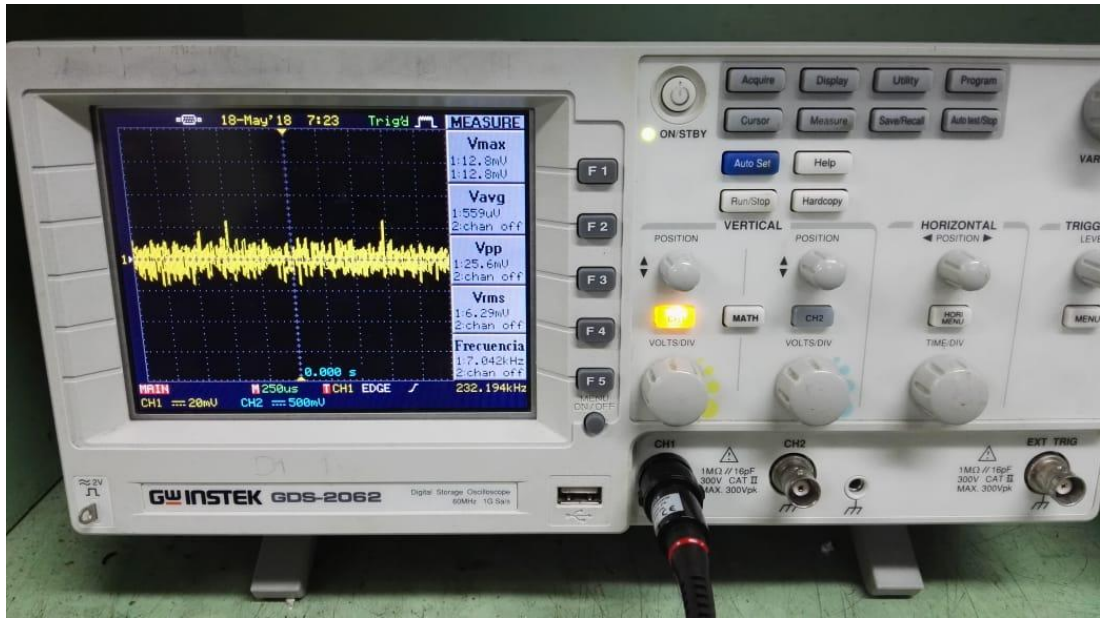
PRUEBA	VOLTAJE DEL MOTOR[V]	TIEMPO PROMEDIO [s]	VELOCIDAD DEL MOTOR [RPM]	CARRERA DEL IMÁN [mm]	FRECUENCIA [Hz]
<b>A</b>	8,5	4,86	279	5	3,24
<b>B</b>	10,5	4,61	308	12	2,40
<b>C</b>	12,2	4,4	333	16	3,26
<b>D</b>	13,3	4,27	352	15	2,8
<b>E</b>	15,26	4,02	374	14	2,76
<b>F</b>	20,2	3,42	451	15	2,71

## 8.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Ahora bien, teniendo claro los componentes constantes y variables de nuestro prototipo, y esclareciendo que la masa excéntrica del motor hace parte del valor dado para la masa del carro 1 ( $M_1$ ), se procede a mostrar los resultados obtenidos en cada prueba.

Para mostrar la respuesta experimental del sistema dinámico, el prototipo fue sometido a las condiciones previamente descritas en éste capítulo y, las mediciones se llevaron a cabo en un laboratorio dispuesto para el desarrollo de montajes electrónicos, en el que se contaba con un osciloscopio, una fuente de voltaje regulable y un multímetro para cubrir las necesidades métricas que se presentan; el primero muestra la forma de la señal de voltaje que se genera por la acción del campo magnético sobre la bobina, la fuente regula la tensión a la que se expone el montaje electrónico que actúa como receptor de la señal producida por la bobina y, finalmente, se hizo uso del multímetro para medir la corriente que pide el circuito para la circulación de la tensión para los casos de mayor importancia.

Fotografía 17. Osciloscopio.



Fotografía 18. Fuente regulada.



Fotografía 19. Multímetro.



### 8.2.1 Registro de datos experimentales

Inicialmente se generó la necesidad de realizar mediciones teniendo como principal dato de entrada el voltaje de alimentación del motor (ver tabla 3). Esto para establecer un paralelo entre las respuestas del sistema ante diferentes estímulos y comprobar que ciertas frecuencias de oscilación son mejores en gran medida en términos de obtención de voltaje generado (ver tabla 12).

#### 8.2.1.1 Prueba experimental A

Se dispone de un voltaje  $V_1=8,5[V]$  suministrado por una fuente regulable, con lo cual se generan una velocidad angular particular en el motor. Los resultados apreciados en los instrumentos de medición en el laboratorio para esta prueba son los mostrados a continuación:

Fotografía 20. Vista de señal para prueba A.

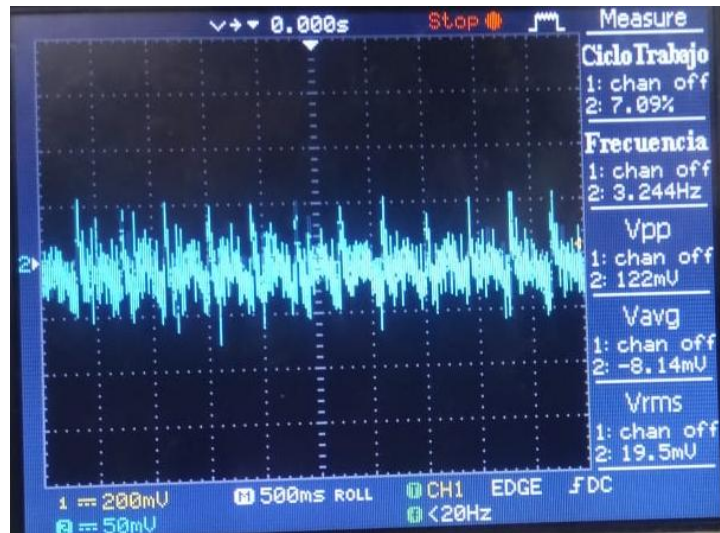


Tabla 6. Resumen de respuesta experimental A.

MEDICIÓN	VALOR
<b>Velocidad del Motor</b>	56.6[RPM]
<b>Carrera del Imán</b>	5[mm]
<b>Frecuencia</b>	3,24[Hz]
<b>Voltaje Generado</b>	8,14[mV]
<b>Valor RMS</b>	19,5[mV]

### 8.2.1.2 Prueba experimental B

Se ajusta el voltaje a 10,5[V] y se repite el método de medición en cada toma de datos.

Fotografía 21. Vista de señal para prueba B.

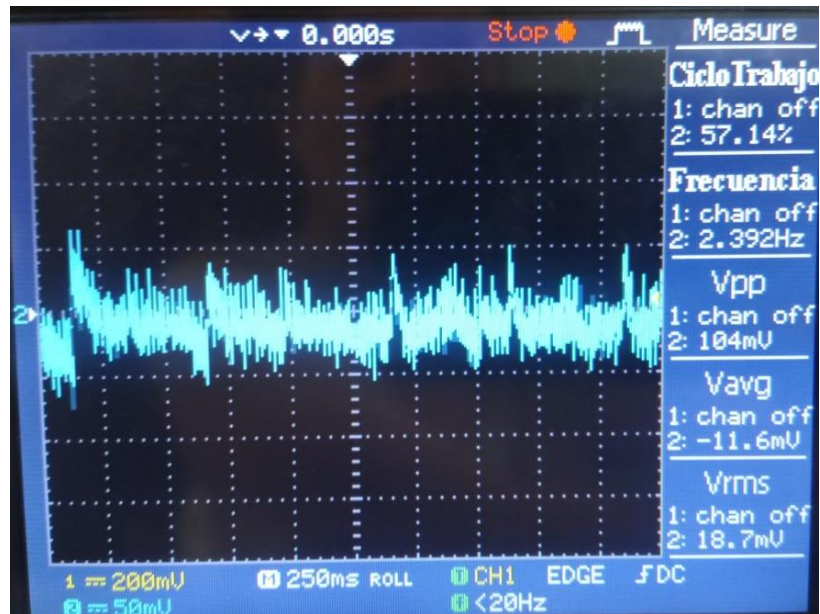


Tabla 7. Resumen de respuesta experimental B.

MEDICIÓN	VALOR
<b>Velocidad del Motor</b>	70[RPM]
<b>Carrera del Imán</b>	12[mm]
<b>Frecuencia</b>	2,40[Hz]
<b>Voltaje Generado</b>	11,6[mV]
<b>Valor RMS</b>	18,7[mV]

Fuente. Autores

### 8.2.1.3 Prueba experimental C

Se varía el voltaje de alimentación del motor a 12,2[V] y se logra obtener la siguiente información:

Fotografía 22. Vista de señal para prueba C.

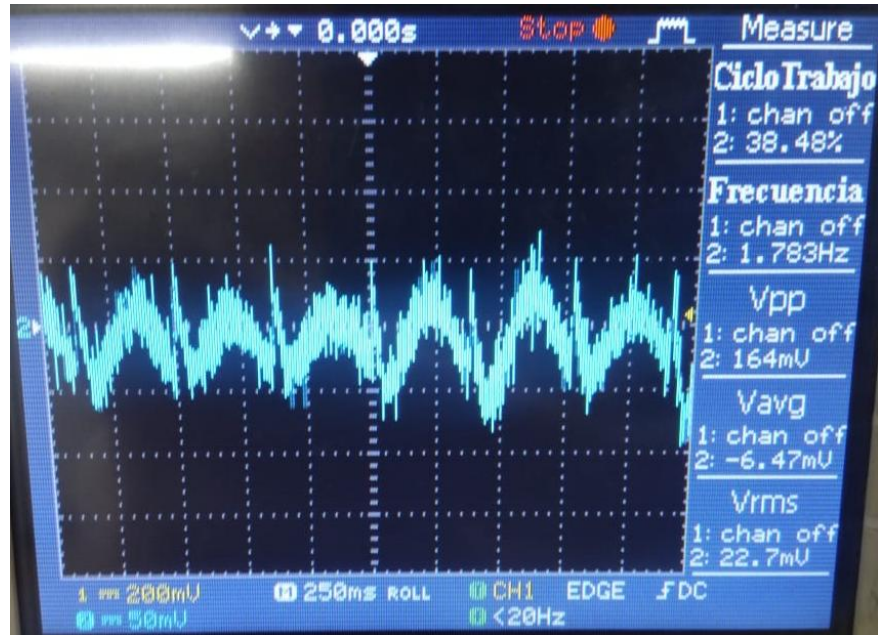


Tabla 8. Resumen de respuesta experimental C.

MEDICIÓN	VALOR
Velocidad del Motor	81.33[RPM]
Carrera del Imán	16[mm]
Frecuencia	3,26[Hz]
Voltaje Generado	6,47[mV]
Valor RMS	22,7[mV]

#### 8.2.1.4 Prueba experimental D

Aumentamos el voltaje de alimentación del motor a 13,3[V] y se obtenemos la siguiente medición:

Fotografía 23. Vista de señal para prueba D.



Tabla 9. Resumen de respuesta experimental D.

MEDICIÓN	VALOR
<b>Velocidad del Motor</b>	88.66[RPM]
<b>Carrera del Imán</b>	17[mm]
<b>Frecuencia</b>	3,26[Hz]
<b>Voltaje Generado</b>	15[mV]
<b>Valor RMS</b>	29,6[mV]

#### 8.2.1.5 Prueba experimental E

Ajustando el voltaje de alimentación del motor a 15,26[V] y se extrae la siguiente información:

Fotografía 24. Vista de señal para prueba E.

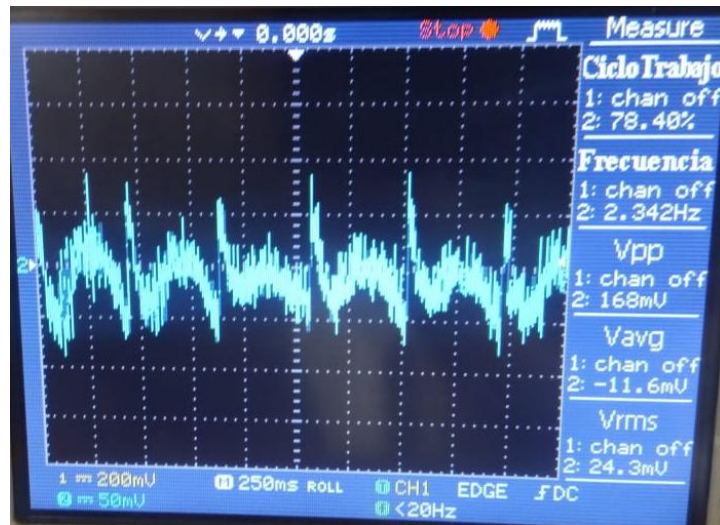


Tabla 10. Resumen de respuesta experimental E.

MEDICIÓN	VALOR
<b>Velocidad del Motor</b>	101.73[RPM]
<b>Carrera del Imán</b>	15[mm]
<b>Frecuencia</b>	1,34[Hz]
<b>Voltaje Generado</b>	11,6[mV]
<b>Valor RMS</b>	24,3[mV]

### 8.2.1.6 Prueba experimental F

Para la medición final, se gradúa el voltaje de la fuente en 20,2[V], con lo que se aprecia lo siguiente:

Fotografía 25. Vista de señal para prueba F.

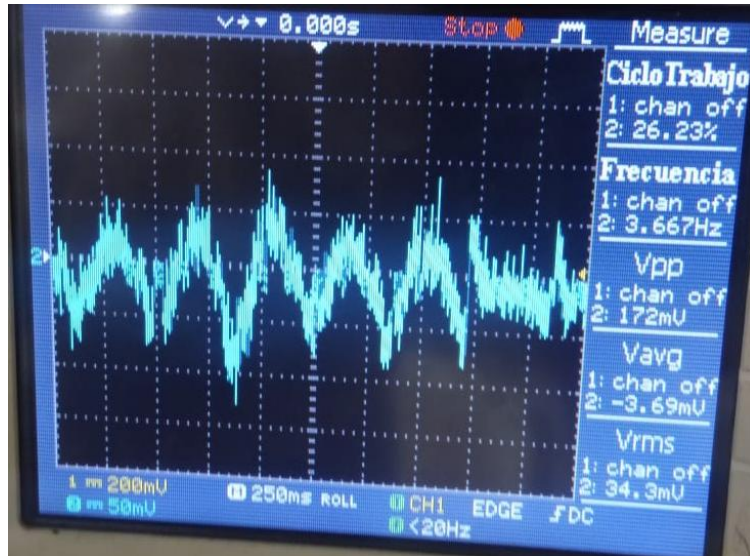


Tabla 11. Resumen de respuesta experimental F.

MEDICIÓN	VALOR
<b>Velocidad del Motor</b>	134.66[RPM]
<b>Carrera del Imán</b>	14[mm]
<b>Frecuencia</b>	3,67[Hz]
<b>Voltaje Generado</b>	3,69[mV]
<b>Valor RMS</b>	34,3[mV]

### 8.2.2 Análisis de experimentos

La medición de voltaje obtenido, amplitud, frecuencia y demás valores, se realizó con el objetivo de relacionar los factores que afectan directamente la cosecha de energía y establecer acciones que permitan aprovechar estas características para así obtener valores acertados de generación de energía. Entonces, en la búsqueda de la relación de resultados, se requirió establecer un paralelo con los

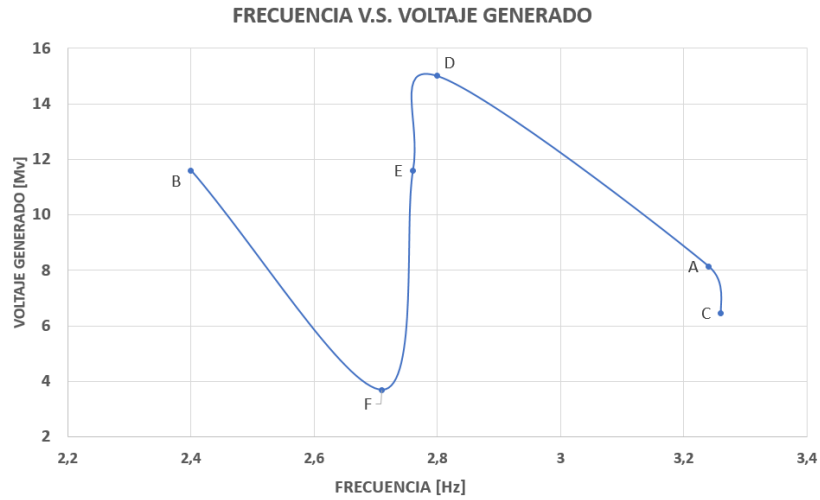
datos obtenidos, para identificar los valores que me proporcionan un aumento en la eficiencia del sistema; para conseguirlo se elaboró la siguiente tabla:

Tabla 12. Resumen de datos experimentales.

PRUEBA	VELOCIDAD DEL MOTOR [RPM]	CARRERA DEL IMÁN [mm]	FRECUENCIA [Hz]	VOLTAJE GENERADO [mV]	VALOR RMS [mV]
<b>A</b>	56.6	5	3,24	8,14	19,5
<b>B</b>	70	12	2,40	11,6	18,7
<b>C</b>	81.33	16	3,26	6,47	22,7
<b>D</b>	88.66	15	2,8	15	29,6
<b>E</b>	101.73	14	2,76	11,6	24,3
<b>F</b>	134.66	15	2,71	3,69	24,3

Si nos detenemos a observar las resultantes de cada experimento, se puede ver que tenemos el pico máximo de voltaje generado cuando el voltaje de alimentación del motor equivale a 13,3[V]. A esto podemos agregar que el sistema crece o decrece en términos de generación de energía cuando el motor oscila con una frecuencia cercana a la frecuencia natural de oscilación de las masas M1 y M2, por lo cual se puede afirmar que la frecuencia resonancia se obtiene al imprimir un movimiento oscilatorio en el motor con una frecuencia igual a la del carro 2.

Gráfica 3. Frecuencia vs Voltaje.



### 8.2.3 Pruebas finales

Como resultado de un análisis de las respuestas del sistema a las estimulaciones mencionadas en la tabla 3, se establece la necesidad de realizar mediciones más responsables eliminando el ruido de la señal de la bobina. Para lograrlo, como se mencionó en el capítulo 7, requirió del uso de un amplificador de señal ya que, al ser un prototipo, los campos magnéticos manejados son relativamente bajos y el tamaño de la bobina no es considerable, lo cual impedía una medición adecuada para la obtención de datos finales. Por eso, al considerar el uso del amplificador y mediante el uso del osciloscopio (ver Anexo G) como instrumento de medida, se observaron claramente los pulsos producidos por inducción del campo magnético de los imanes sobre la bobina, no sin antes pasar por los demás componentes del circuito dedicados a la filtración y rectificación de la señal.

Cabe resaltar que al aceptar a contribución del circuito amplificador de señal, se hace indispensable pensar en la forma en que éste afecta las mediciones del sistema; es decir, no se debe olvidar que, tanto para la corriente como para el voltaje, se está imprimiendo una ganancia de mil, con lo cual se ve afectada la escala de la medición y sus resultados serán analizados al final del test.

Se seleccionaron las tres pruebas que mostraron mayor estabilidad durante la operación del sistema, ya que establecen una aceptación más confiable al reducir considerablemente el ruido causado por los saltos del carro 1 como consecuencia de las fuerzas proporcionadas por el motor en direcciones diferentes a la horizontal; las pruebas mencionadas y sus resultados obtenidos son los siguientes:

### 8.2.3.1 Prueba final A

Con un suministro de voltaje igual a 13,3[V] en el motor, se obtiene una señal generada a continuación

Fotografía 26. Vista de señal prueba A y medición de tensión pico a pico.

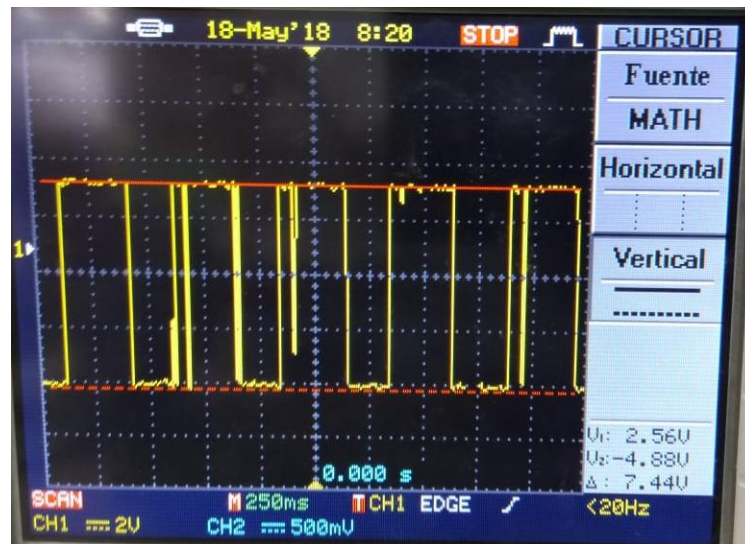


Tabla 13. Respuesta prueba final A.

MEDICIÓN	VALOR
Voltaje pico superior	$v_1 = 2,56$ [V]
Voltaje pico inferior	$v_2 = -4,88$ [V]
Voltaje pico a pico	$\Delta v_1 = 7,44$ [V]
Corriente	$I = 45$ [mA]

### 8.2.3.2 Prueba final B

Con una impresión de voltaje igual a 15,26[V] en el motor, suministrado por una fuente regulable, con lo cual se generan una velocidad angular en el motor, la cual calculamos anteriormente ( $N_2=101.73[\text{RPM}]$ ). El sistema expone el comportamiento que se muestra a continuación:

Fotografía 27. Vista de señal generada prueba B y medición de tensión pico a pico.

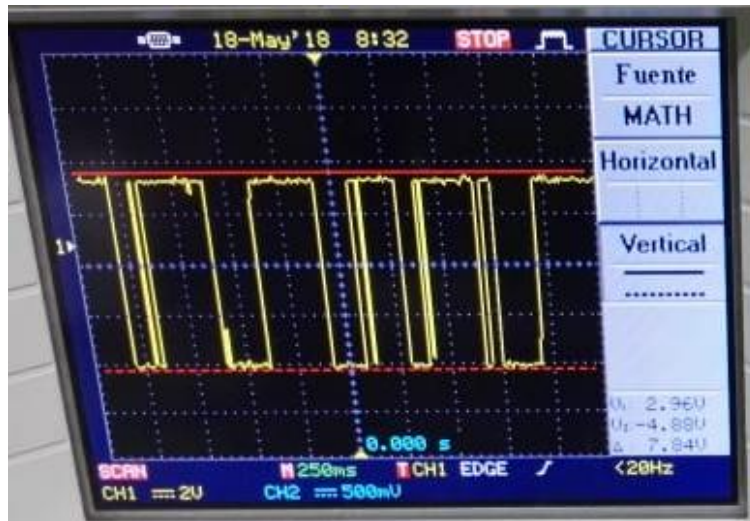


Tabla 14. Respuesta prueba final B.

MEDICIÓN	VALOR
<b>Voltaje pico superior</b>	$v_1 = 2,96 [\text{V}]$
<b>Voltaje pico inferior</b>	$v_2 = -4,88[\text{V}]$
<b>Voltaje pico a pico</b>	$\Delta v_1 = 7,84[\text{V}]$
<b>Corriente</b>	$I = 47[\text{mA}]$

### 8.2.3.3 Prueba final C

Se dispone de un voltaje  $V_1=20,2[\text{V}]$  suministrado por una fuente regulable, con lo cual se generan una velocidad angular en el motor, la cual calculamos

anteriormente en este capítulo ( $N_1=134.66[\text{RPM}]$ ). Los resultados apreciados en los instrumentos de medición en el laboratorio para la prueba C son los mostrados a continuación:

Fotografía 28. Vista de señal generada prueba C y medición de tensión pico a pico.



Fotografía 29. Medición de corriente con multímetro en la prueba C.

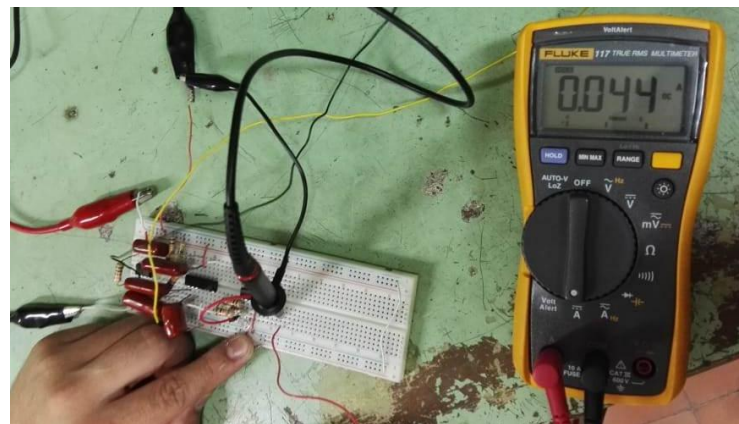


Tabla 15. Respuesta prueba final C.

MEDICIÓN	VALOR
<b>Voltaje pico superior</b>	$v_1 = 2,72$ [V]
<b>Voltaje pico inferior</b>	$v_2 = -4,88$ [V]
<b>Voltaje pico a pico</b>	$\Delta v_1 = 7,60$ [V]
<b>Corriente</b>	$I = 45$ [mA]

#### 8.2.4 Resultados de pruebas finales

Como ya se había hecho en la tabla 12, se hace necesario elaborar una tabla para recopilar y establecer el paralelo de los datos obtenidos mediante las diferentes mediciones finales para sacar conclusiones. Ahora, en este caso se hace necesario mencionar que los datos de voltajes obtenidos se escribirán en las unidades que corresponden, haciendo la respectiva conversión.

Entonces, la información de las mediciones experimentales se dispone de la siguiente manera:

Tabla 16. Paralelo mediciones en pruebas finales

PRUEBA	VOLTAJE GENERADO [mV]	CORRIENTE GENERADA [mA]	POTENCIA [ $\mu$ W]
<b>A</b>	2,56	45	115.2
<b>B</b>	2,96	47	139.12
<b>C</b>	2,72	45	122.4

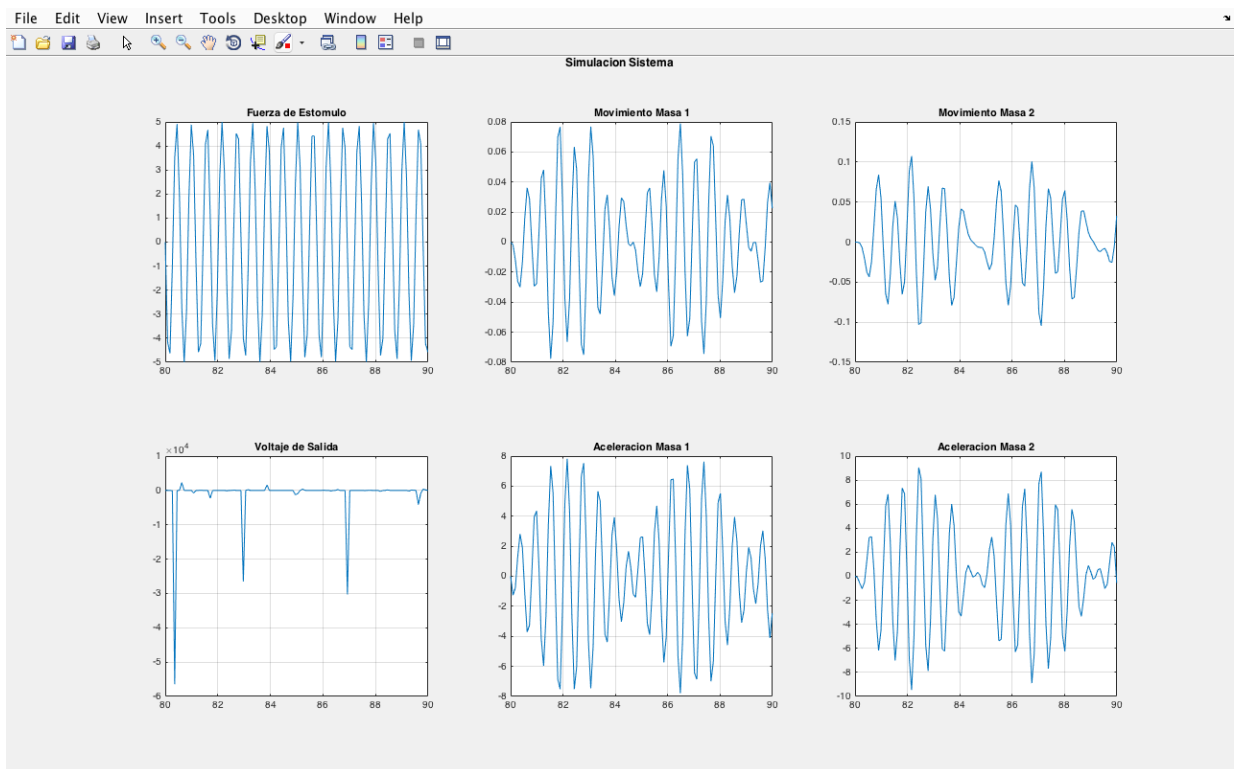
Podemos ver que solamente se tuvo en cuenta los valores de voltaje positivo; se realizó de esta manera ya que la señal que podemos apreciar en cada una de mediciones (figuras 51, 52 y 53) es una señal de pulsos y, en estos casos, solo es aprovechable el pico de voltaje positivo ya que es el que lleva la energía en

condiciones aptas para ser almacenada o utilizada de forma inmediata, como se puede ver en la figura 34.

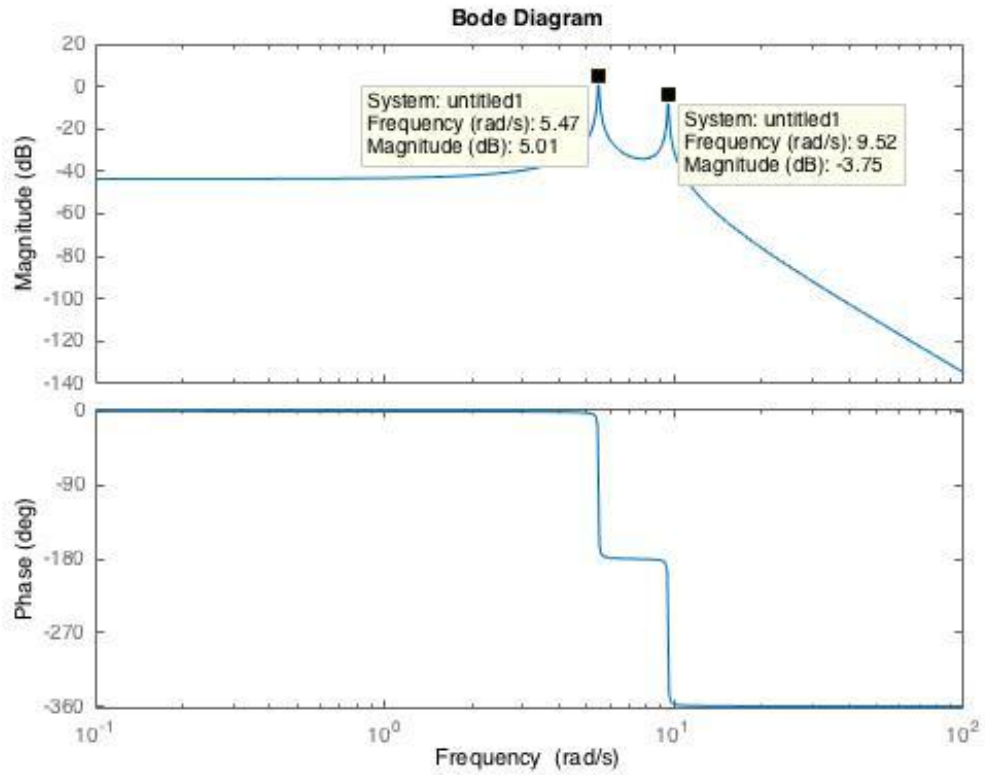
### 8.3 RESULTADOS MODELADO EN MATLAB

A continuación se presentan las gráficas arrojadas por el software MATLAB; en ellos se aprecia el comportamiento de las masas M1 y M2 ante una estimulación externa sobre la primera masa y cómo es la respuesta de la generación de energía que se puede obtener a partir de la operación de este sistema, para tener una estimación del alcance del prototipo.

Gráfica 4. Movimiento de las masas y Voltaje generado.



Grafica 5. Frecuencia



### 8.3.1 Análisis de resultados

Según las mediciones experimentales realizadas, se puede decir que al contrastarlas con los datos arrojados por la simulación en MATLAB, se obtienen comparaciones importantes de la siguiente manera:

- La frecuencia simulada está en un valor cercano a 9[rad/s], lo cual equivale a:

$$f = 9 \left[ \frac{rad}{s} \right] * \frac{1[Hz]}{6,283[rad/s]} \quad (8.1)$$

$$\therefore f = 1,43[Hz]$$

La simulación arrojó valores en los que la frecuencia de movimiento de las masas es menor que la que se obtuvo experimentalmente. Lo anterior puede ser considerado como un defecto en la construcción del prototipo, ya que los valores se ven afectados por saltos indeseados en la M1. Si seguimos con esta comparación, se puede concluir partiendo del hecho que indica que en la construcción real, el sistema muestra una frecuencia de 2,8[Hz], doblando el valor del sistema simulado.

- Comparando el comportamiento de las masas, tanto en la simulación (figura 55) como durante la operación del prototipo, la relación de las amplitudes de las masas M1 y M2 se comporta de manera similar, siendo la carrera de la segunda masa de aproximadamente el doble de la carrera de la masa 1 y es lo que esperábamos obtener bajo condiciones de funcionamiento aceptables.
- Comparando la resonancia del sistema tanto experimental como teórica a una tensión de 20.2[v] el sistema muestra su mejor amplitud y por ende el mejor aprovechamiento del mismo con un porcentaje de error del 8.6%

$$\%Error = \frac{Valor\ Teorico - Valor\ Experimental}{Valor\ Teorico}$$

$$\%Error = \frac{1.43 - 1.34}{1.43}$$

$$Error = 6.29\%$$

## 9. CONCLUSIONES

- Se desarrolló un modelo matemático capaz de componer una representación del comportamiento de un sistema dinámico de segundo orden, en el cual se tiene en cuenta la generación de energía eléctrica a través de oscilaciones mecánicas a determinada frecuencia para generar una tensión que va a ser de inmediato aprovechamiento en función de alimentación de pequeños componentes como diodos emisores de luz y almacenamiento de energía en baterías. Explícitamente, para este caso, se encontró que para una relación de masas de 3 a 1, siendo  $M_1$  mayor que  $M_2$ , y con una excitación uniforme dada por un estímulo sinusoidal, se generan picos de voltaje positivos de entre 2,5 y 3 [mV].
- Se construyó un prototipo con el que, mediante experimentación, se puede determinar bajo qué variaciones físicas y/o mecánicas puede el sistema aumentar o disminuir su eficiente, es decir, si hay incremento o disminución en la capacidad de cosecha de energía. Particularmente, a las condiciones de operación descritas en el capítulo 8, se pudo encontrar que se genera un voltaje de 2,72[mV] el cual se aproxima al valor obtenido en la simulación, así como también se logró obtener una potencia máxima de 139[ $\mu$ W] para ser usada como alimentación de pequeños elementos electrónicos.
- Se desarrolló un sistema de control para el estímulo de las masas, con el fin de evitar sacudones fuertes en el sistema que pudieran causar que las masas se descentren o salgan de los rieles. Esto se logró a través del desarrollo de un programa que hace que el aumento de la velocidad del motor sea progresiva, como se aprecia en la figura 28. Por otra parte, dentro del sistema de control se adaptó el sistema de captación de energía (ver figura 37).

- Se comprobó el principio de cosecha de energía a través del aprovechamiento de la energía “desperdiciada” como producto de oscilaciones mecánicas cuyas vibraciones generan un movimiento oscilatorio capaz de generar tensión eléctrica con un imán y una bobina que se encuentra unida a un transductor para su inmediata utilización o, almacenamiento.

- Los sistemas de cosecha de energía requieren tanto de un sistema de generación energética como de un transductor adecuado para su aprovechamiento. A estos dos sistemas está ligada la eficiencia de la captación de energía y, depende de la configuración y definición de algunos parámetros físicos importantes, así como también de las condiciones de operación del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] BEEBY, S.P; TUDOR, M.J and WHITE, N.M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. School of Electronics and Computer Science, University of Southampton. Southampton. UK. 2006.

[2] CASANOVA GÓMEZ, Miguel. Sistemas de cosecha de energía para sistemas electrónicos autónomos. Trabajo de grado en ingeniería de la energía. Escuela superior de ciencias Experimentales y Tecnología.

[3] FANG, Zhi-Wei; ZHANG, Ye-Wei; LI Xiang; DING, Hu and CHEN, Li-Qun. Integration of a nonlinear energy sink and a giant magnetostrictive energy harvester. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University. Shanghai, China. 2016.

[4] HASSAN, Ali; TORRES, Angel; KACZMARCZYK, Stefan and PICTON, Phill. Vibration control of a Stirling engine with an electromagnetic active tuned mass damper. Control Engineering Practice. The University of Northampton. United Kingdom. 2016.

[5] HILL, Frances A; HAVEL, Timothy F; LASHMORE. David; SCHAUER, Mark and LIVERMORE, Carol. Storing energy and powering small systems with mechanical springs made of carbón nanotube yarn. Energy. USA. 2014.

[6] MENDOZA MEJÍA, Samuel Andrés, ARENAS MEJÍA, Jesús Eulides y CHACÓN VELASCO, Julio Cesar. Estudio de máquinas eléctricas traslacionales. Escuela Universidad Industrial de Santander Publicado por Revista de la faculta de ingenierías físico-mecánicas, Bucaramanga. 2009.

[7] OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. Prentice hall, México, 4 edition 2002

[8] OLARU, Radu; ARCIRE, Alexandru; PETRESCU, Camelia; MIHAI, Marius and GIRTAN, Bogdan. A novel vibration actuator base don active magnetic spring. Sensors and Actuators A: Physical. Faculty of Electrical Engineering Technical University of Iasi. Romania, 2017.

[9] LI, Yunjia; ZHANG, Wei; ZHANG, Yong and CAO, Jianan. A batch-fabricated electromagnetic energy harvester based on flex-rigid structures. Sensor and Actuators A: Physical. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University. China. 2017.

[10] STAROSTA, Roman; SYPNIEWSKA-KAMINSKA, Grazyna and AWREJCEWICS, Jan. Quantifying non-linear dynamics of mass-springs in series oscillators via asymptotic approach. Mechanical Systems and Signal Processing. Poland. 2016.

[11] WANG, Wei; CAO, Junyi; ZHANG, Nan; LIN, Jing; LIAO, Wei-Hsin. Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: Design, modeling and experiments. *Energy Conversion and Management*. 2016.

[12] ZALEWSKI, R; CHODKIEWICZ, P and SHILLOR, M. Vibrations of mass-spring using a granular-material damper. *Applied Mathematical Modelling*. Institute of Machine Design Fundamentals, Warsaw University of Technology, Poland. 2016.

[13] ZUO, Lei; CUI, WenDual-Functional energy-harvesting and vibration control: Electromagnetic resonant shunt series tuned mass dampers. Department of Mechanical Engineering. State University of New York at Stony Brook. New York. 2013.

## **ANEXOS**

## ANEXO A. MODELADO MATEMATICO USANDO LAPLACE

Partiendo de las ecuaciones diferenciales obtenidas por el sistema dinámico de segundo orden, se tiene:

Para la masa  $M_1$ :

$$m_1\ddot{x}_1 + b_1\dot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = f \quad (4.1)$$

Para la masa  $M_2$ :

$$m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (4.2)$$

Aplicando la transformada de Laplace para las ecuaciones (4.1) y (4.2) se obtiene,

Para la masa  $M_1$ :

$$m_1X_1s^2 + b_1X_1s + (k_1 + k_2)X_1 - k_2X_2 + b_2X_1s - b_2X_2s = F \quad (4.3a)$$

Para la masa  $M_2$ :

$$m_2X_2s^2 + k_2X_2 - k_2X_1 + b_2X_2s - b_2X_1s = 0 \quad (4.4a)$$

Realizando el despeje y sustitución de ecuaciones se puede obtener la función de transferencia de la posición de la primera masa

$$\frac{X_1(s)}{F(s)} = \frac{m_2s^2 + k_2 + b_2s}{p(s)} \quad (4.5a)$$

donde,

$$p(s) = m_1m_2s^4 + (b_1m_2 + (m_1 + m_2)b_2)s^3 + (k_1m_2 + (m_1 + m_2)k_2 + b_1b_2)s^2 + (k_2b_1 + k_1b_2)s + k_1k_2 \quad (4.6a)$$

Y de la misma manera se obtiene la función de transferencia de la posición de la segunda masa

$$\frac{X_2(s)}{F(s)} = \frac{k_2 + b_2s}{p(s)} \quad (4.7a)$$

## ANEXO B. CÓDIGO FUENTE DE LA INTERFAZ DE MATLAB

```
%% Variable declaration

F=10;    %%Maximum force applied to system
f=231.6;  %%Stimulus Frecuency
k1=49;
k2=120;  %%String Constant
c1=1.2;
c2=0.2;  %%Mechanic Friction/Damper
m1=2.7;  %%Bigger Mass
m2=0.8;  %%Lower Mass

a=0.001256;  %%Coil Area
n=675;  %%Coil turns
Bmax=0.8;  %%Magnetic Field at the edge
l=0.018;  %%Magnet half longitude

%% Dynamyc system definition
s

%%Transfer Function

%%s=tf('s');

%%A=[m1*s*s+(c1+c2)*s+k1+k2 -c2*s-k2; -c2*s-k2
m2*s*s+c2*s+k2];

%%X=A\[1; 0];

%%State-Space

A=[0 0 1 0; 0 0 0 1; (-k1-k2)/m1 k2/m1 (-c1-c2)/m1 c2/m1;
k2/m2 -k2/m2 c2/m2 -c2/m2];
B=[0 0 1/m1 0]';
C=eye(4);
D=0;

sys=ss(A,B,C,D);

%% Simulation
```

```

t=80:0.001:81; %%Simulation time init:step:finish
w=f*2*pi;
u=F*sin(w*t); %%Stimulus

X=lsim(sys,u,t);
x1=X(:,1)';      %Mass 1 movement
x2=X(:,2)';      %Mass 2 movement
v2=X(:,4)';      %Mass 2 velocity
%a1=lsim(X(1)*s*s,u,t); %Mass 1 acceleration
%a2=lsim(X(2)*s*s,u,t); %Mass 2 acceleration

v=(3*a*n*Bmax*1^3)*v2./((1+x2).^4); %Voltage
%}

%% Graphics

bode(sys(4))

fig = figure;
p = uipanel('Parent',fig,'BorderType','none');
p.Title = 'Simulaci?n Sistema';
p.TitlePosition = 'centertop';
p.FontSize = 12;
p.FontWeight = 'bold';

subplot(2,2,1,'Parent',p)
plot(t,u)
title('Fuerza de Est?mulo')
grid on

subplot(2,2,2,'Parent',p)
plot(t,x1)
title('Movimiento Masa 1')
grid on

subplot(2,2,3,'Parent',p)
plot(t,x2)
title('Movimiento Masa 2')
grid on

subplot(2,2,4,'Parent',p)
plot(t,v)
title('Voltaje de Salida')
grid on
%{

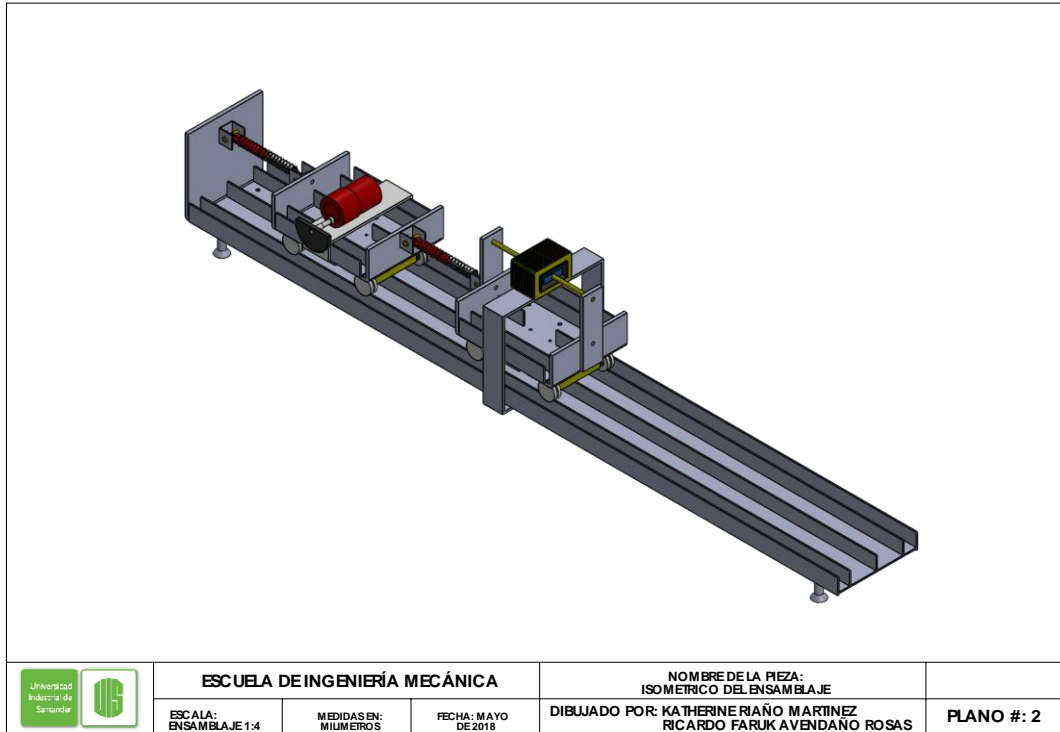
```

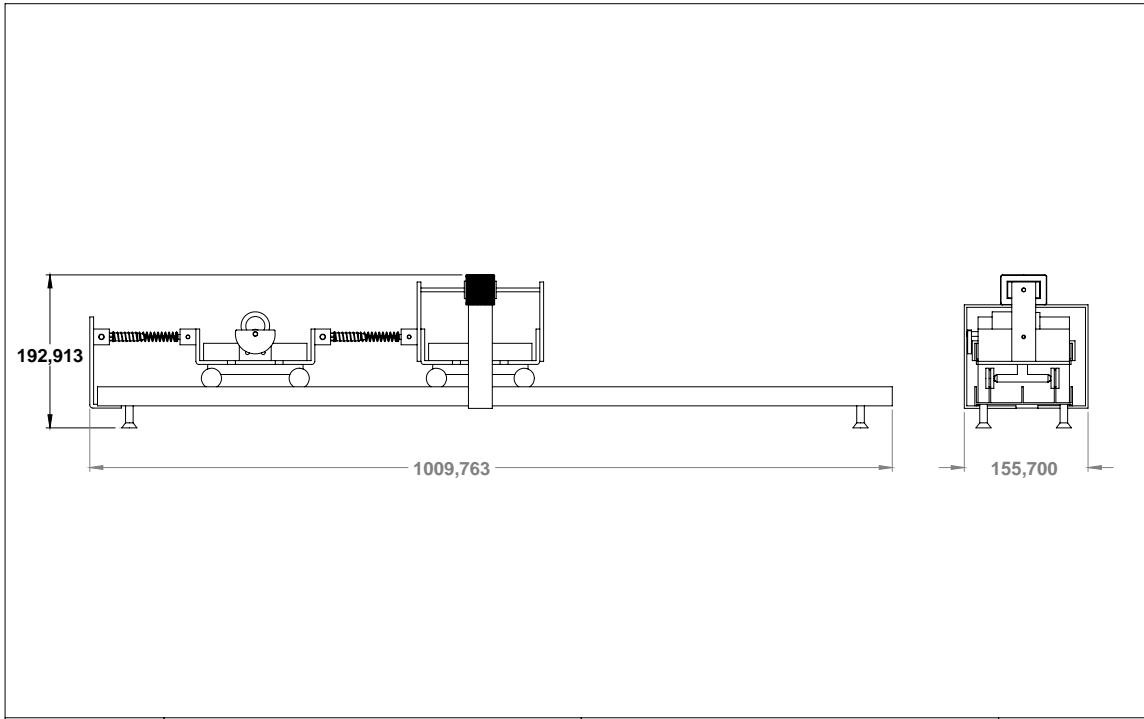
```
subplot(2,3,5,'Parent',p)
plot(t,a1)
title('Aceleraci?n Masa 1')
grid on
```


```
subplot(2,3,6,'Parent',p)
plot(t,a2)
title('Aceleraci?n Masa 2')
grid on
```

```
%}
```

## ANEXO C. PLANOS PROTOTIPO





	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>			NOMBRE DE LA PIEZA: DIMENSIONES MAXIMAS DEL ENSAMBLAJE	<b>PLANO #: 1</b>
	ESCALA: ENSAMBLAJE 1:5	MEDIDAS EN: MILIMETROS	FECHA: MAYO DE 2018	DIBUJADO POR: KATHERINE RIAÑO MARTINEZ RICARDO FARUK AVENDAÑO ROSAS	

## ANEXO D. CÓDIGO FUENTE ARDUINO

```
int pin2=9; //Entrada 2 del L293D
int pin7=10; //Entrada 7 del L293D
int pote=A0; //Potenciómetro

int valorpote; //Variable que recoge el valor del potenciómetro
int pwm1; //Variable del PWM 1
int pwm2; //Variable del PWM 2

void setup()
{
  //Inicializamos los pins de salida
  pinMode(pin2,OUTPUT);
  pinMode(pin7, OUTPUT);
}

void loop()
{
  //Almacenamos el valor del potenciómetro en la variable
  valorpote=analogRead(pote);

  pwm1 = map(valorpote, 0, 1023, 0, 255);
  pwm2 = map(valorpote, 0, 1023, 255, 0);

  //Sacamos el PWM de las dos salidas usando analogWrite(pin,valor)
  analogWrite(pin2,pwm1);
  analogWrite(pin7,pwm2);
}
```

## ANEXO E. INFORMACIÓN DE AMORTIGUADORES SELECCIONADOS



Información del proveedor:

Amortiguador 08041 coche RC 1/10 108004 actualizado partes

Descripción del producto: Aceite tipo ajustable 108 mm

Aleación aluminio S corvejón de amortiguador


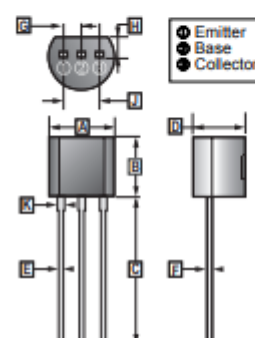
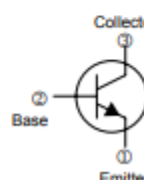
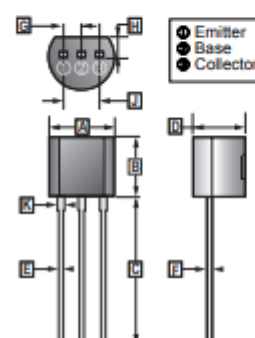
Amortiguadores para el coche RC 1/10 Buggy carro

actualizar partes de Hop-up HSP HPI Traxxas Axial Tamiya Redcat Himoto

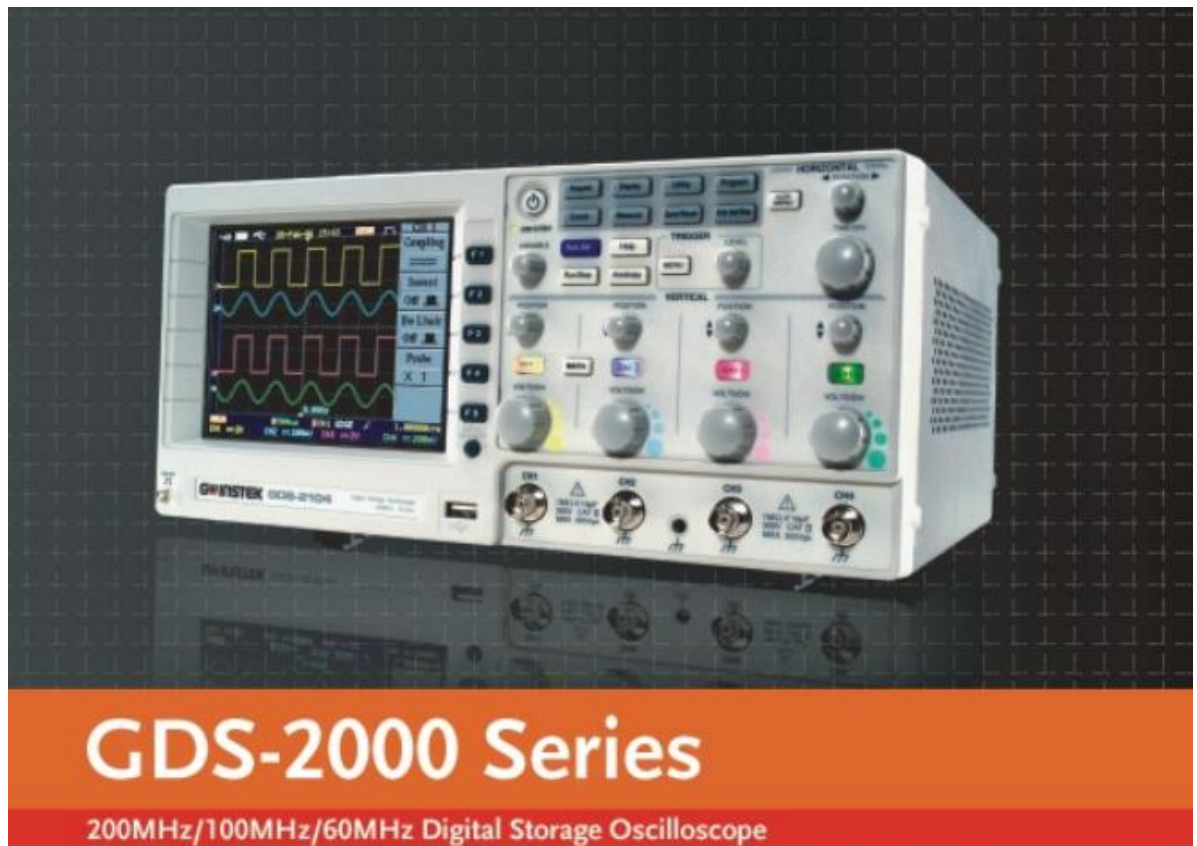
Nombre de producto: amortiguador de choque Nuevo: sí Cantidad del paquete:

2pcs Color: azul / rojo / plata Peso: 58g

## ANEXO F. DATASHEET TRANSISTOR NPN 2N2222

 <p><b>SECOs</b> Elektronische Bauelemente</p>	<h3 style="margin: 0;">2N2222A</h3> <p style="margin: 0;">NPN Plastic Encapsulated Transistor</p>																																																																																																																											
RoHS Compliant Product A suffix of "-C" specifies halogen & lead-free																																																																																																																												
<p><b>FEATURE</b></p> <p>Complementary PNP type available 2N2907A</p>	<p><b>TO-92</b></p>  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px 0;">                 ● Emitter                  ● Base                  ● Collector             </div>																																																																																																																											
<p><b>PACKAGING INFORMATION</b></p> <p>Weight: 0.2056 g</p>	  <table border="1" style="font-size: x-small; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>REF.</th> <th colspan="2">Millimeter</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Min.</th> <th>Max.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>4.40</td><td>4.70</td></tr> <tr><td>B</td><td>4.30</td><td>4.70</td></tr> <tr><td>C</td><td>12.70</td><td>-</td></tr> <tr><td>D</td><td>3.30</td><td>3.81</td></tr> <tr><td>E</td><td>0.38</td><td>0.58</td></tr> <tr><td>F</td><td>0.38</td><td>0.51</td></tr> <tr><td>G</td><td>1.27</td><td>TYP</td></tr> <tr><td>H</td><td>1.10</td><td>-</td></tr> <tr><td>J</td><td>2.42</td><td>2.68</td></tr> <tr><td>K</td><td>0.38</td><td>0.76</td></tr> </tbody> </table>	REF.	Millimeter			Min.	Max.	A	4.40	4.70	B	4.30	4.70	C	12.70	-	D	3.30	3.81	E	0.38	0.58	F	0.38	0.51	G	1.27	TYP	H	1.10	-	J	2.42	2.68	K	0.38	0.76																																																																																							
REF.	Millimeter																																																																																																																											
	Min.	Max.																																																																																																																										
A	4.40	4.70																																																																																																																										
B	4.30	4.70																																																																																																																										
C	12.70	-																																																																																																																										
D	3.30	3.81																																																																																																																										
E	0.38	0.58																																																																																																																										
F	0.38	0.51																																																																																																																										
G	1.27	TYP																																																																																																																										
H	1.10	-																																																																																																																										
J	2.42	2.68																																																																																																																										
K	0.38	0.76																																																																																																																										
<p><b>ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS</b> (at <math>T_A = 25^\circ\text{C}</math> unless otherwise specified)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Parameter</th> <th>Symbol</th> <th>Ratings</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Collector to Base Voltage</td> <td><math>V_{CB0}</math></td> <td>75</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>Collector to Emitter Voltage</td> <td><math>V_{CE0}</math></td> <td>40</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>Emitter to Base Voltage</td> <td><math>V_{EB0}</math></td> <td>6</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>Collector Current – Continuous</td> <td><math>I_C</math></td> <td>600</td> <td>mA</td> </tr> <tr> <td>Collector Power Dissipation</td> <td><math>P_C</math></td> <td>625</td> <td>mW</td> </tr> <tr> <td>Junction, Storage Temperature</td> <td><math>T_J, T_{STG}</math></td> <td>+150, -55 ~ +150</td> <td><math>^\circ\text{C}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Parameter	Symbol	Ratings	Unit	Collector to Base Voltage	$V_{CB0}$	75	V	Collector to Emitter Voltage	$V_{CE0}$	40	V	Emitter to Base Voltage	$V_{EB0}$	6	V	Collector Current – Continuous	$I_C$	600	mA	Collector Power Dissipation	$P_C$	625	mW	Junction, Storage Temperature	$T_J, T_{STG}$	+150, -55 ~ +150	$^\circ\text{C}$																																																																																															
Parameter	Symbol	Ratings	Unit																																																																																																																									
Collector to Base Voltage	$V_{CB0}$	75	V																																																																																																																									
Collector to Emitter Voltage	$V_{CE0}$	40	V																																																																																																																									
Emitter to Base Voltage	$V_{EB0}$	6	V																																																																																																																									
Collector Current – Continuous	$I_C$	600	mA																																																																																																																									
Collector Power Dissipation	$P_C$	625	mW																																																																																																																									
Junction, Storage Temperature	$T_J, T_{STG}$	+150, -55 ~ +150	$^\circ\text{C}$																																																																																																																									
<p><b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS</b> (at <math>T_A = 25^\circ\text{C}</math> unless otherwise specified)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Parameter</th> <th>Symbol</th> <th>Min.</th> <th>Typ.</th> <th>Max.</th> <th>Unit</th> <th>Test Conditions</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Collector-Base Breakdown Voltage</td> <td><math>V_{BR(CB0)}</math></td> <td>75</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>V</td> <td><math>I_C = 10\mu\text{A}, I_B = 0</math></td> </tr> <tr> <td>Collector-Emitter Breakdown Voltage</td> <td><math>V_{BR(CEO)}</math></td> <td>40</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>V</td> <td><math>I_C = 10\text{mA}, I_B = 0</math></td> </tr> <tr> <td>Emitter-Base Breakdown Voltage</td> <td><math>V_{BR(EB0)}</math></td> <td>6</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>V</td> <td><math>I_C = 10\mu\text{A}, I_C = 0</math></td> </tr> <tr> <td>Collector Cut-off Current</td> <td><math>I_{C0}</math></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>10</td> <td>nA</td> <td><math>V_{CB} = 60\text{V}, I_C = 0</math></td> </tr> <tr> <td>Collector Cut-off Current</td> <td><math>I_{CX}</math></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>10</td> <td>nA</td> <td><math>V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB(ON)} = 3\text{V}</math></td> </tr> <tr> <td>Emitter Cut-off Current</td> <td><math>I_{E0}</math></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>100</td> <td>nA</td> <td><math>V_{EB} = 3\text{V}, I_C = 0</math></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">DC Current Gain</td> <td><math>h_{FE(1)}</math></td> <td>100</td> <td>-</td> <td>300</td> <td></td> <td><math>V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 150\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td><math>h_{FE(2)}</math></td> <td>40</td> <td>-</td> <td>-</td> <td></td> <td><math>V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 0.1\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td><math>h_{FE(3)}</math></td> <td>42</td> <td>-</td> <td>-</td> <td></td> <td><math>V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 500\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Collector-Emitter Saturation Voltage</td> <td><math>V_{CE(sat)(1)}</math>*</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0.6</td> <td>V</td> <td><math>I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td><math>V_{CE(sat)(2)}</math>*</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0.3</td> <td>V</td> <td><math>I_C = 150\text{mA}, I_B = 15\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td>Base-Emitter Saturation Voltage</td> <td><math>V_{BE(sat)}</math>*</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>1.2</td> <td>V</td> <td><math>I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td>Delay Time</td> <td><math>t_d</math></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>10</td> <td>nS</td> <td><math>V_{CC} = 30\text{V}, V_{EB(ON)} = -0.5\text{V}, I_C = 150\text{mA}, I_{B1} = 15\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td>Rise Time</td> <td><math>t_r</math></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>25</td> <td>nS</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Storage Time</td> <td><math>t_s</math></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>225</td> <td>nS</td> <td><math>V_{CC} = 30\text{V}, I_C = 150\text{mA}, I_{B1} = I_{B2} = 15\text{mA}</math></td> </tr> <tr> <td>Fall Time</td> <td><math>t_f</math></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>60</td> <td>nS</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Transition Frequency</td> <td><math>f_T</math></td> <td>300</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>MHz</td> <td><math>V_{CE} = 20\text{V}, I_C = 20\text{mA}, f = 100\text{MHz}</math></td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; font-size: x-small;">* Pulse Test</p>		Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions	Collector-Base Breakdown Voltage	$V_{BR(CB0)}$	75	-	-	V	$I_C = 10\mu\text{A}, I_B = 0$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{BR(CEO)}$	40	-	-	V	$I_C = 10\text{mA}, I_B = 0$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$V_{BR(EB0)}$	6	-	-	V	$I_C = 10\mu\text{A}, I_C = 0$	Collector Cut-off Current	$I_{C0}$	-	-	10	nA	$V_{CB} = 60\text{V}, I_C = 0$	Collector Cut-off Current	$I_{CX}$	-	-	10	nA	$V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB(ON)} = 3\text{V}$	Emitter Cut-off Current	$I_{E0}$	-	-	100	nA	$V_{EB} = 3\text{V}, I_C = 0$	DC Current Gain	$h_{FE(1)}$	100	-	300		$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 150\text{mA}$	$h_{FE(2)}$	40	-	-		$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 0.1\text{mA}$	$h_{FE(3)}$	42	-	-		$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 500\text{mA}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)(1)}$ *	-	-	0.6	V	$I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$	$V_{CE(sat)(2)}$ *	-	-	0.3	V	$I_C = 150\text{mA}, I_B = 15\text{mA}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$V_{BE(sat)}$ *	-	-	1.2	V	$I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$	Delay Time	$t_d$	-	-	10	nS	$V_{CC} = 30\text{V}, V_{EB(ON)} = -0.5\text{V}, I_C = 150\text{mA}, I_{B1} = 15\text{mA}$	Rise Time	$t_r$	-	-	25	nS		Storage Time	$t_s$	-	-	225	nS	$V_{CC} = 30\text{V}, I_C = 150\text{mA}, I_{B1} = I_{B2} = 15\text{mA}$	Fall Time	$t_f$	-	-	60	nS		Transition Frequency	$f_T$	300	-	-	MHz	$V_{CE} = 20\text{V}, I_C = 20\text{mA}, f = 100\text{MHz}$
Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions																																																																																																																						
Collector-Base Breakdown Voltage	$V_{BR(CB0)}$	75	-	-	V	$I_C = 10\mu\text{A}, I_B = 0$																																																																																																																						
Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{BR(CEO)}$	40	-	-	V	$I_C = 10\text{mA}, I_B = 0$																																																																																																																						
Emitter-Base Breakdown Voltage	$V_{BR(EB0)}$	6	-	-	V	$I_C = 10\mu\text{A}, I_C = 0$																																																																																																																						
Collector Cut-off Current	$I_{C0}$	-	-	10	nA	$V_{CB} = 60\text{V}, I_C = 0$																																																																																																																						
Collector Cut-off Current	$I_{CX}$	-	-	10	nA	$V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB(ON)} = 3\text{V}$																																																																																																																						
Emitter Cut-off Current	$I_{E0}$	-	-	100	nA	$V_{EB} = 3\text{V}, I_C = 0$																																																																																																																						
DC Current Gain	$h_{FE(1)}$	100	-	300		$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 150\text{mA}$																																																																																																																						
	$h_{FE(2)}$	40	-	-		$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 0.1\text{mA}$																																																																																																																						
	$h_{FE(3)}$	42	-	-		$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 500\text{mA}$																																																																																																																						
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)(1)}$ *	-	-	0.6	V	$I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$																																																																																																																						
	$V_{CE(sat)(2)}$ *	-	-	0.3	V	$I_C = 150\text{mA}, I_B = 15\text{mA}$																																																																																																																						
Base-Emitter Saturation Voltage	$V_{BE(sat)}$ *	-	-	1.2	V	$I_C = 500\text{mA}, I_B = 50\text{mA}$																																																																																																																						
Delay Time	$t_d$	-	-	10	nS	$V_{CC} = 30\text{V}, V_{EB(ON)} = -0.5\text{V}, I_C = 150\text{mA}, I_{B1} = 15\text{mA}$																																																																																																																						
Rise Time	$t_r$	-	-	25	nS																																																																																																																							
Storage Time	$t_s$	-	-	225	nS	$V_{CC} = 30\text{V}, I_C = 150\text{mA}, I_{B1} = I_{B2} = 15\text{mA}$																																																																																																																						
Fall Time	$t_f$	-	-	60	nS																																																																																																																							
Transition Frequency	$f_T$	300	-	-	MHz	$V_{CE} = 20\text{V}, I_C = 20\text{mA}, f = 100\text{MHz}$																																																																																																																						
<p><b>CLASSIFICATION OF <math>h_{FE(1)}</math></b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rank</th> <th>L</th> <th>H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Range</td> <td>100 - 200</td> <td>200 - 300</td> </tr> </tbody> </table>		Rank	L	H	Range	100 - 200	200 - 300																																																																																																																					
Rank	L	H																																																																																																																										
Range	100 - 200	200 - 300																																																																																																																										

## ANEXO G. OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-2062



### FEATURES

- 200/100/60 MHz Bandwidth
- 2 or 4 Input Channels
- 1GSa/s Real-Time and 25GS/s Equivalent-Time Sampling
- 25k Points Record Length Maximum
- Large 5.6-in TFT Color Display
- 27 Automatic Measurements
- Three Math Functions Including "+", "-", and "FFT"
- Multi-Language Support
- USB Host : Flash Drive Storage and Color Printout with Grayscale
- USB Device : PC Remote Control
- Battery Power Operation (Optional)
- GPIB & RS-232C Interface

**GW INSTEK**  
Made to Measure

# A Value-Priced DSO with High Performance & Reliability

Whether you are designing new products in the lab or giving lessons in the classroom or performing testing projects in the factory, you are fully aware that success starts with the right equipment. The GDS-2000 Series comes along with All-In-One design, including 1GSa/s sampling rate, 25k record length, 2 and 4 channel selection, TFT color LCD display, USB support on flash drive storage, color printout, and remote control, Battery power operation and all the powerful Auto-Measurement functions. With GDS-2000 Series digital storage oscilloscope, you could easily make your job done.

The GDS-2000 Series, carrying bandwidths of 200MHz, 100MHz and 60MHz and inputs of 2 and 4 channels, makes up a family of 6 members in total. The combination of 1GSa/s sampling rate (25GSa/s for ET sampling) and 25k points record length of GDS-2000 Series provides the highest value platform among all equivalent products available in the market today.

The 27 Auto Measurement functions, FFT measurement, Advanced Triggering, 12 Division Horizontal Display, Time Clock, Frequency Counter, Go/NoGo, Multi-Language Screen Menu, On-Line Help, and Setup Sequence are all standard features of GDS-2000 Series.

The 1GSa/s sampling , the 2CH and 4CH selection with TFT color display , the USB mass storage and programmability , the RS-232C and USB interface included as standard features , and the battery power operation(optional) available for field applications all together make GDS-2000 Series a new standard for the main stream DSO market.

SELECTION GUIDE						
MODEL	GDS-2062	GDS-2064	GDS-2102	GDS-2104	GDS-2202	GDS-2204
BANDWIDTH	60MHz	60MHz	100MHz	100MHz	200MHz	200MHz
CHANNELS	2	4	2	4	2	4
DISPLAY DEVICE	5.6" TFT Color LCD					
SAMPLE RATE	1GSa/s					
RECORD LENGTH	25k pts					
ADVANCED TRIGGER	Pulse Width ,TV Line , Event Delay , Time Delay					
VALUED FEATURE PLUS	Multi-Language , FFT , Go/NoGo , Auto Setup Sequence , 27 Auto-Measurements					
INTERFACE	USB Host / USB Device RS-232C Go/NoGo Output GPIB (opt.)					

## ORDERING INFORMATION

GDS-2062 60MHz, 2-channel, Color LCD Display DSO  
 GDS-2064 60MHz, 4-channel, Color LCD Display DSO  
 GDS-2102 100MHz, 2-channel, Color LCD Display DSO  
 GDS-2104 100MHz, 4-channel, Color LCD Display DSO  
 GDS-2202 200MHz, 2-channel, Color LCD Display DSO  
 GDS-2204 200MHz, 4-channel, Color LCD Display DSO

## OPTION

Opt. 01: GPIB Interface  
 Opt. 02: Battery Power Operation  
 ( Factory installed, include additional DC Power & Battery charger circuits and Li-Ion Battery pack x 2 )

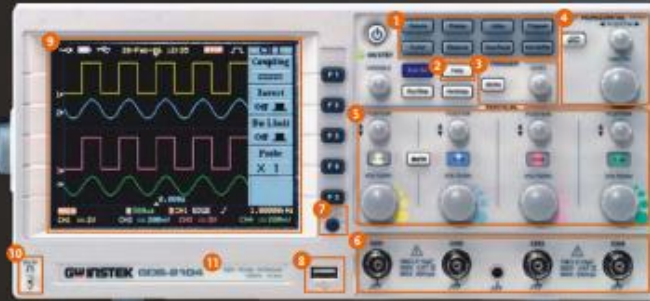
## OPTIONAL ACCESSORIES

GTL-232: RS-232C Cable, 9-pin Female to 9-pin Female, Null Modem for Computer, 2000mm  
 GTL-242: USB Cable, USB 1.1 A-B TYPE CABLE, 4P, 1800mm  
 GSC-005: Soft Carrying Case  
 GRA-405: Rack Mounting, 19" 4U Type

## STANDARD ACCESSORIES

Probe-GTP-060A:60MHz x10/x1 Switchable Passive Probe x 2 for GDS-2062  
 Probe-GTP-060A:60MHz x10/x1 Switchable Passive Probe x 4 for GDS-2064  
 Probe-GTP-100A:100MHz x10/x1 Switchable Passive Probe x 2 for GDS-2102  
 Probe-GTP-100A:100MHz x10/x1 Switchable Passive Probe x 4 for GDS-2104  
 Probe-GTP-250A:250MHz x10/x1 Switchable Passive Probe x 2 for GDS-2202  
 Probe-GTP-250A:250MHz x10/x1 Switchable Passive Probe x 4 for GDS-2204  
 User Manual  
 Power cord

## PANEL INTRODUCTION



1. Function Keys
2. Online Help Function
3. Trigger System
4. Horizontal System
5. Vertical System
6. 4 Channel Inputs
7. 12 div Screen
8. USB Host
9. TFT Color LCD
10. Enhance CAL Signal Output
11. 1GSa/s Real Time Sample Rate & 25G Equivalent Time Sample Rate
12. RS-232C
13. GPIB
14. Go/NoGo Output
15. USB Host/Device
16. Battery Power Operation (Li-Ion Battery)

## FEATURES

- 200/100/60 MHz Bandwidth
- 2 or 4 Input Channels
- 1GSa/s Real-Time Sampling Rate
- Large 5.6-in TFT Color Display
- 25k Points Record Length Maximum
- 27 Automatic Measurements
- Advanced Triggering Including Edge, Pulse Width, Video, Time-Delay, and Event-Delay
- Three Math Functions Including " + ", " - " and " FFT "
- USB Host : Flash Drive Storage and Color Printout with Grayscale
- USB Device : PC Remote Control
- GPIB and RS-232C Interface
- Battery Power Operation (optional)
- Multi-Language Support
- Automatic Sequence & Go/NoGo Testing
- PC Remote Control Software for USB, RS-232C, and GPIB

## 200 MHz



GDS-2202/2204

## 100 MHz



GDS-2102/2104

## 60 MHz



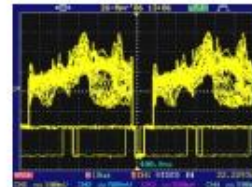
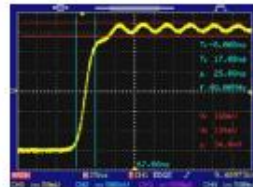
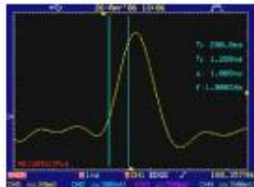
GDS-2062/2064



4-channel models have joined the product lineup in addition to the traditional 2-channel models, doubling the spot range. All vertical scales of each channel carry a full bandwidth among the selection of 200MHz, 100MHz and 60MHz, depending on the model. The flexible solution of channel and bandwidth combination extends the GDS-2000 Series application range

into various market sectors. The 4 channel applications for the tests of switching power supply and automotive are typical examples.

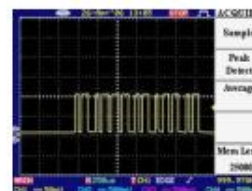
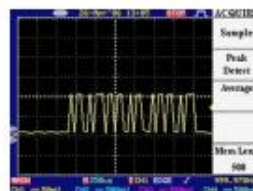
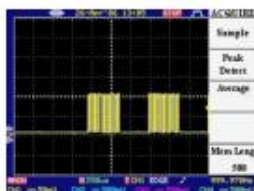
### B. 1GSa/s REAL-TIME SAMPLING & 25GSa/s EQUIVALENT-TIME SAMPLING



1GSa/s Real-Time Sampling allows you to deal with high frequency waveform capture in an accurate way. A higher sampling rate help acquire more waveform data in a short period of time. It is especially useful for the single-shot waveform capture and observation, as the more the waveform data can be acquired the better the waveform reconstruction can be done for a non-repetitive signal. When it comes to the repetitive waveform

capture, the Equivalent-Time Sampling, however, becomes a better tool than Real-Time Sampling. By acquiring data from repetitive waveform cycles, the ET Sampling Technology accurately reconstructs the waveform at the resolution of only 40ps. GDS-2000 Series performs 25GSa/s sampling rate for the repetitive waveform acquisition and reconstruction besides its Real-Time Sampling capability at 1GSa/s rate.

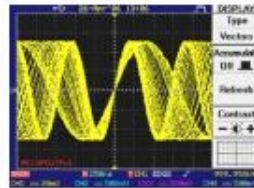
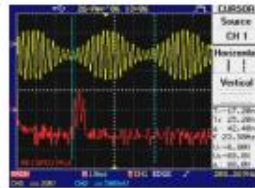
### C. 25000 POINTS OF WAVEFORM MEMORY



Longer memory helps the waveform acquisition system get more data in a certain period of time. The 25k memory length of GDS-2000 Series lets users view more signal details on the screen. The above left figure shows a serial digital signal transferred in a system. When using a short memory of 500 points, the DSO displays only a very rough and distorted

waveform for this signal due to the inadequate details being captured (above center figure). When using 25k point memory, GDS-2000 Series captures and rebuilds the signal waveform in an accurate way (above right figure).

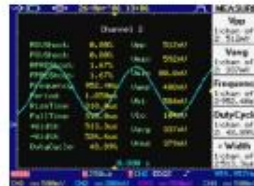
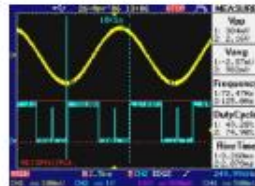
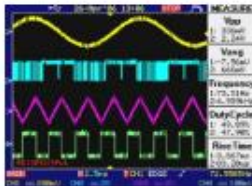
**D. TFT COLOR LCD DISPLAY**



In order to guarantee a crisp and clear view in any situation , GDS-2000 Series adopts a TFT Color LCD display. With faster frame update rate compared to STN type of display, TFT panel reduces the flicker and gives a smooth signal view. In addition, the 45 degrees wide view angle of TFT LCD facilitates the team work and group discussion in front of the DSO screen. The

bright and colorful display is extremely necessary when dealing with signal analysis and comparison of multiple waveforms shown on the screen at the same time . The TFT Color LCD display of GDS-2000 Series makes the 4 Channel inputs more meaningful.

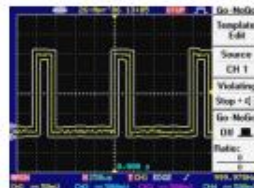
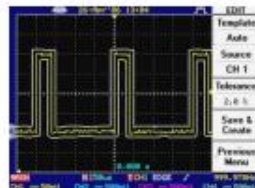
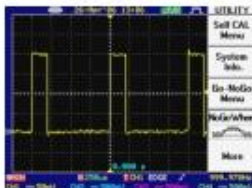
**E. 27 AUTOMATIC MEASUREMENTS**



The automatic waveform measurement feature includes 27 frequently used measurement items in three groups: Voltage, Time ( Frequency ) , and Delay . 10 measurement results maximum with their continuous updates can be shown on the screen menu area simultaneously. A snapshot of all time & voltage related Auto Measurement readings of a designated

input signal can be displayed on the screen as a very effective way to get a real-time and overall monitoring on the characteristics of a signal.

**F. Go/NoGo TESTING**



Go/NoGo testing function checks whether the incoming signal violates the user-defined template. Setting the template is simply a two-step process. Pick up the reference waveform from input signal or waveform file and configure the violation tolerance in reference to the waveform, the Go/NoGo testing is ready to go. GDS-2000 Series compares the input signal with

template in real time and shows the test result on the screen. Both the type of violation and the DSO reaction toward violation can be selected to meet the requirements of various applications. The violation is indicated either giving a buzzer sound or sending a control signal to the external device via a BNC terminal on the rear of the DSO.

## G. ON-LINE HELP AND MULTI-LANGUAGE SUPPORT



To provide a friendly operation environment, GDS-2000 Series Offers On-Line Help through the on-screen manual. Press "Help" button to get into the On-Line Help mode, then press any other button to get its instructions on the screen. GDS-2000 Series screen menu and the On-Line Help Manual can be switched among the selections of multiple languages such

as English, Traditional Chinese, Simplified Chinese etc. This gives a localized help to the users and offers an easy environment for multicultural joint-projects.

## H. DATA STORAGE & TRANSFER AND USB PRINTING SUPPORT



20 sets of waveform data, 20 sets of panel setup and 4 sets of reference waveform data can be saved into GDS-2000 Series internal memory for later recall and display. All the waveform data, panel setup and the screen image can be saved into or recalled from a popular Flash Drive via USB Host Port. With a PC software offered by Good Will Instrument, the GDS-2000

Series waveform data, screen image and the screen record over a period of time can be transferred to the PC for further utilization. GDS-2000 Series offers the USB direct printing support. The color printout of screen image with grayscale can be done via USB connection to a color printer directly.

## I. BATTERY POWER OPERATION



The battery power operation feature (optional) extends GDS-2000 Series market coverage to the field application areas where AC power is not available. After full charge, the two light-weight battery packs keep GDS-2000 Series running under normal operation for over 3 hours. The built-in battery charger automatically recharges the battery packs whenever

the AC power is connected to the oscilloscope. A soft carrying case of GDS-2000 Series is available (optional) to accommodate the field applications.

## KEY FEATURES

### Summary of features

Rich selections of bandwidth and channel, 200/100/60MHz and 2/4ch, cover major applications in laboratories, production lines, or field services. 1GSa/s high sampling rate and 25k point deep memory give much detailed view into the target waveforms, keeping high sampling rate. USB host and slave connection allows data save and recall, screen image printout, and remote control. TFT color LCD display with wide viewing angle eliminates obscurity in any situation. Battery operation option gives a Much-desired mobility in rapidly changeable environments.

### Signal Detection

GDS-2000 Series pick up signals even in the most extreme cases, powered by 1GSa/s real time and 25GSa/s equivalent time sampling rate combined with 3 types of acquisition modes: sample, peak detect, and average. 25k points of deep memory collects more information of a given waveform, guiding us into further signal details. 4 types of flexible triggers add another signal capturing flexibility: edge, video (NTSC, PAL, SECAM) with line selection, pulse-width, and delay/event using external trigger signal (for 2CH models).

### Measurement Functions

A variety of measurement shortcuts reduce repetitive manual operations and save your precious time. Autoset automatically configures the horizontal scale, the vertical scale, and the trigger, giving an instant view of almost any signal. 27 types of automatic measurements include voltage, frequency (time), and delay. GDS-2000 Series run and update results of all the relevant measurements in real time. You can view the results independently, or together in a single display view. Add and subtract math operation, with 4 types of FFT are also provided: flattop, blackman, hanning, and rectangular. Go/NoGo test function detects a user-defined incoming waveform shape, and can also send a signal to external devices in case of detection. Program and play feature automatically runs predefined sequence and setup, boosting productivity in routine measurements like production line inspection.

### Data Transfer and Printout

USB host connector transfers data quickly and easily between USB flash drive, which guarantees almost unlimited amount of memory. Internal storage includes 4 sets of reference waveform and 20 sets of general-use memory area. GDS-2000 Series handle three types of data: display image (\*.bmp) for viewing waveform shape and pasting into documents and presentations, panel setting for saving and restoring system setup, and waveform configuration (\*.csv) for further analysis of signal information. Printout of display image, color with grayscale, is available through the printer connected to the USB host port. You can set the printout or data saving preference to allow a single-press operation for consecutive works.

### Setup Recovery and Transfer

The last panel setting is internally stored in nonvolatile memory, ready to be recovered on the next power up. When the measurement environment frequently changes, or if you want to transfer the setup to another GDS-2000 Series, switching between multiple system settings is done by saving and recalling setup files using USB flash drive. When the setup gets complicated, you can always recover the default system setting in a simple two-step operation.

### Remote Access

IEEE based remote control commands include most of the panel operations and the syntax conforms to universally accepted IEEE 488.2 standard. Proprietary PC software with GUI operation, downloadable from GW Instek website, allows you to use your familiar mouse & keyboard, utilizing the larger PC screen. Three types of remote control interface with flexible connection settings are provided: USB device, RS-232C, and GPIB (optional).

### Portability & Friendly User Interface

Battery power operation option with typical 3 hours of running time gives a much-desired mobility. built-in self-calibration and probe compensation help maintaining maximum accuracy even when environment or testing accessories changes. Language support helps you collaborating in multicultural working environments.