

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE LA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA DE VIBRACIÓN
ELECTROMAGNÉTICA EN VÁLVULAS DE CONTROL DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA.**

**COMPONENTE: Análisis y simulación del recolector de
energía vibracional electromagnética en válvulas aplicando
una carga periódica.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

ESTÉVEZ COQUE JAIRO MAURICIO

jairo.estevez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMÁN, PhD.

salvatore.reina@epn.edu.ec

DMQ, Agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, **Jairo Mauricio Estévez Coque** declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Jairo Mauricio Estévez Coque

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por **Jairo Mauricio Estévez Coque**, bajo mi supervisión.

Ing. Washington Salvatore Reina Guzmán, PhD.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Jairo Mauricio Estévez Coque

Ing. Washington Salvatore Reina Guzmán, PhD.

DIRECTOR

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este trabajo a Dios por darme la oportunidad de terminar esta etapa de mi vida, por guiar mis pasos y ser una parte fundamental para convertirme en la persona que soy.

A mis padres Juan y Laura, quienes apoyaron mi trayecto con esfuerzo y dedicación día a día. Por educarme y enseñarme a conseguir las cosas que quiero con dedicación y esfuerzo propio, y sobre todo por instruirme los valores y principios que rigen mi vida cotidiana.

A mi único hermano, Henry, por estar presente en mi vida y siempre apoyarnos en todo momento ya sea en el campo estudiantil o en la vida cotidiana.

En fin, dedico este trabajo a toda mi familia que es mi segundo soporte después de mis padres y mi hermano, sin el apoyo de todo ellos esta travesía hubiese sido mucho más complicada y difícil de cumplir.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por ser una parte fundamental en mi crecimiento como persona y por guiar mis pasos en la vida cotidiana y en mi vida universitaria.

Agradezco a mi familia, padres y hermano, tíos y primos en general por su apoyo en cuanto a mi crianza y en mi vida estudiantil.

Agradezco a todas las personas que conocí y con las cuales compartí dentro de la universidad, siento una gran dicha por haber compartido esta etapa en mi vida, he aprendido de cada uno de ustedes y me ha ayudado a crecer como persona y a desenvolverme mejor en la vida.

Por último, agradezco a todos los profesores con los que pude interactuar y aprender de su conocimiento y experiencia, en particular agradezco al Ingeniero Washington Salvatore por su guía y colaboración a la hora de poder culminar el presente trabajo al compartirme sus conocimientos y apoyo constante.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general:	2
Objetivos específicos:	2
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1 Estado del arte.....	2
Tipos de recolectores de energía vibracional	3
Piezoeléctrico.....	3
Electroestático	3
Electromagnético.....	4
Triboeléctrico.....	4
Tipos de sujeción en válvulas de control	4
1.2 BENCHMARKING.....	6

Disponibilidad de la máquina en el mercado	6
1.3 Diseño mecánico	6
Modo de recolección de energía con electromagnetismo	6
Aplicaciones del recolector electromagnético	8
Ubicación del recolector electromagnético en la válvula de control	8
Bridas	8
Mecanismos de control	9
2. METODOLOGÍA	10
2.1 Determinación de especificaciones	10
Casa de la calidad	10
Conclusiones de la casa de la calidad	11
Especificaciones técnicas	12
2.2 Diseño conceptual del recolector electromagnético	13
Análisis funcional	13
Desarrollo del diagrama funcional	14
Análisis del diagrama funcional	15
Definición de módulos	15
Soluciones para módulo 1	16
Módulo 1	16
Alternativas para la sujeción	17

Evaluación y selección del módulo 1	19
Soluciones módulo 2	21
Módulo 2	21
Alternativas de selección de generación de energía eléctrica	22
Elección y selección del módulo 2	25
2.3 Montaje del generador electromagnético en la válvula de control.	27
2.4 Modelo del sistema válvula de control generador electromagnético	27
Análisis de ecuaciones que rigen el sistema	28
2.5 Parámetros principales del sistema válvula – generador	30
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1 Resultados	31
Respuesta de potencia eléctrica generada, en función del largo de la viga en cantiléver	32
Respuesta de la potencia generada ante la variación de otros parámetros	34
3.2 Validación de resultados	39
4. CONCLUSIONES	39
5. RECOMENDACIONES	40
Bibliografía	40
Anexos	43
Anexo A	43

Anexo B.....	44
Anexo C.....	45
Anexo D.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1, Geometría general de las bridas planas. (Valco industrial, 2023) ..	5
Figura 1.2, Tipos de bridas. (Emerson Automation Solutions, 2019)	9
Figura 1.3, Actuador y válvula de control. (chemical prosessing, 2020).....	9
Figura 2.1, Función principal. (Fuente propia)	14
Figura 2.2, Funciones secundarias (Fuente propia)	14
Figura 2.3, Módulos del diagrama funcional. (Fuente propia).....	16
Figura 2.4, Válvula de control (Rodríguez, 2020)	17
Figura 2.5, Tipos de bridas en tubos (Bolívar & Alfredo, 2015)	18
Figura 2.6, Generador impreso en 3D. (Constantinou & Roy, 2015)	22
Figura 2.7, Generador electromagnético de tubo cilíndrico excitado por un agitador. (Zhenwei, Xu, Ran, & Liuping, 2018).....	23
Figura 2.8, Generador impulsado por una bola esférica. (Halim & Park, 2015)	24
Figura 2.9, Montaje del generador electromagnético en la válvula de control. (Fuente Propia).....	27
Figura 2.10 Fuerza externa aplicada a l generador electromagnético. (Fuente propia)	29
Figura 3.1 Respuesta Potencia eléctrica vs largo de la viga en cantiléver para una frecuencia de 3800 Hz. (Fuente propia)	33
Figura 3.2 Potencia eléctrica generada vs Distancia de la viga en cantiléver para una frecuencia de 2400 Hz. (Fuente propia)	34

Figura 3.3 Potencia generada al variar en ancho de la base de la viga en cantiléver. (a) ancho de 10mm, (b) ancho de 15mm y (c) ancho de 20mm. (Fuente propia)	35
Figura 3.4 Potencia generada variando la amplitud de trabajo. (Fuente propia)	36
Figura 3.5 Potencia generada vs distancia de la viga en cantiléver variando el calibre del alambre esmaltado. (a) calibre 0.4 mm resistencia y del alambre de 0,08796 ohm/m y (b) calibre 0.3 mm resistencia y del alambre de 0,2418 ohm/m. (Fuente propia)	37
Figura 3.6 Potencia generada variando el ancho de la base. (a) base de 10mm, (b) base de 15mm y (c) base de 20mm. (Fuente propia)	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1, Geometría de algunas bridas. (Valco industrial, 2023)	5
Tabla 2.1, Especificaciones técnicas del generador electromagnético. (Fuente propia)	12
Tabla 2.2, Ventajas y desventajas de la alternativa 1. (Fuente propia)	17
Tabla 2.3, Ventajas y desventajas de la alternativa 2. (Fuente propia)	18
Tabla 2.4, Evaluación del peso específico del módulo 1. (Fuente propia).....	20
Tabla 2.5, Evaluación del peso específico del criterio: Fácil instalación. (Fuente propia)	20
Tabla 2.6, Evaluación del peso específico del criterio: Costo. (Fuente propia)	20
Tabla 2.7, Evaluación del peso específico del criterio: Fijación. (Fuente propia)	20
Tabla 2.8, Evaluación del peso específico del criterio: Mantenimiento. (Fuente propia)	20
Tabla 2.9, Evaluación del peso específico del criterio: Mantenimiento. (Fuente propia)	21
Tabla 2.10, Conclusión de las evaluaciones. (Fuente propia)	21
Tabla 2.11, Ventajas y desventajas de la alternativa 1. (Fuente propia)	23
Tabla 2.12, Ventajas y desventajas de la alternativa 2. (Fuente propia)	24
Tabla 2.13, Ventajas y desventajas de la alternativa 3. (Fuente propia)	25
Tabla 2.14, Evaluación del peso específico del módulo 2. (Fuente propia)	25
Tabla 2.15, Evaluación del peso específico del criterio: Generación de energía. (Fuente propia)	26

Tabla 2.16, Evaluación del peso específico del criterio: Implementación. (Fuente propia)	26
Tabla 2.17, Evaluación del peso específico del criterio: Complejidad. (Fuente propia)	26
Tabla 2.18, Conclusiones de las evaluaciones. (Fuente propia)	26
Tabla 2.19, Constantes principales del sistema válvula - generador electromagnético. (Fuente propia)	27
Tabla 2.20, Parámetros iniciales. (Fuente propia)	31

RESUMEN

En este trabajo se investigó de forma analítica la potencia eléctrica que puede llegar a producir un generador electromagnético al ser ensamblado en una válvula de control. El montaje en la válvula de control se lo realizó con la ayuda del software Inventor, se realizó un modelo equivalente a través de un sistema masa resorte amortiguador de un solo grado de libertad, con la finalidad de obtener un modelo matemático del sistema, para poder implementarlo en una simulación en el software Matlab. Para llevar a cabo la simulación es necesario de algunos parámetros, tanto de los materiales para el generador electromagnético como de funcionamiento de la válvula de control, dichos parámetros fueron obtenidos mediante investigación y aplicados a la simulación. Los resultados se muestran en función del largo de la viga en cantiléver entre 1 mm y 5 mm debido a que en ese rango se encuentra la geometría de máxima recolección de energía, se pudo obtener una potencia máxima de 0,359mW cuando está trabajando en una válvula de control de 200 mm de diámetro nominal, frecuencia de 3800 Hz y una amplitud de 0,0005 g, para lograr llegar al máximo resultado se varía la frecuencia y amplitud de entrada, la geometría de la viga en cantiléver y el calibre del alambre esmaltado. Después se procede a validar los resultados comparando con estudios similares de otros autores al implementar generadores electromagnéticos en sistemas con condiciones cercanas a las de este estudio.

Palabras clave: Generador, electromagnético, potencia, válvula de control.

ABSTRACT

In this work, the electrical power that an electromagnetic generator can produce when assembled in a control valve was investigated analytically. The assembly in the control valve was carried out with the help of the Inventor software, an equivalent model was made through a damper spring mass system with a single degree of freedom, in order to obtain a mathematical model of the system, to be able to implement it in a simulation in Matlab software. To carry out the simulation, some parameters are necessary, both for the materials for the electromagnetic generator and for the operation of the control valve; these parameters were obtained through research and applied to the simulation. The results are shown based on the length of the cantilever beam between 1 mm and 5 mm because the geometry of maximum energy collection is in that range, a maximum power of 0.00774 mW could be obtained when working on a valve. control with a nominal diameter of 200 mm, a frequency of 3800 Hz and an amplitude of 0.0005 g. In order to reach the maximum result, the input frequency and amplitude, the geometry of the cantilever beam and the gauge of the enameled wire are varied. Then we proceed to validate the results by comparing with similar studies by other authors when implementing electromagnetic generators in systems with conditions close to those of this study.

Keywords: Generator, electromagnetic, power, control valve.

Análisis y simulación del recolector de energía vibracional electromagnética en válvulas aplicando una carga periódica.

INTRODUCCIÓN

Las válvulas de control son los elementos de control final más usados por la industria. La válvula de control regula el paso del fluido en su interior para mantener dentro del rango operativo alguna variable de proceso. (Emerson Automation Solutions, 2019)

En la industria se tiene varias variables de proceso diferentes, por lo cual se tiene varias válvulas de control para llegar a producir el resultado final, estas válvulas de control desperdician mucha energía en forma de vibraciones, las cuales tienen que ser controladas o estudiadas para comprender si están operando en un rango aceptable o simplemente esta energía vibracional puede ser usada para alguna otra parte del proceso de producción.

La recolección de energía es estudiada cada vez más por su gran importancia en cuanto a la eficiencia energética.

Mediante la recolección de energía vibracional se puede mejorar los sistemas de energización de las plantas industriales ya que se puede obtener unas cantidades necesarias para ser ocupadas en pequeños sensores o hasta para controlar ciertos procesos. La necesidad de obtener menores pérdidas de energía y así maximizar los beneficios es de vital importancia para la industria.

Dentro de la recolección de energía se puede encontrar muchas fuentes y formas de obtener estos resultados, estos abarcan desde obtención de energía a partir de fuentes naturales (sol, viento, agua, etc.) las cuales son muy conocidas y de la obtención a partir de pérdidas de sistemas utilizados por los seres humanos (válvulas, hornos, vías terrestres, etc.), la captación de energía a partir de sistemas humanos instalados es una forma de optimización de los recursos, ya que se requiere de una energía inicial para llevar a cabo la utilización de esos sistemas y si se puede recolectar algo de la energía que simplemente se desperdicia en el sistema se puede lograr grandes beneficios.

Es necesario aplicar la recolección de energía vibracional en válvulas de control de distribución de agua, ya que en ellas se tendrá ese tipo de energía desperdiciada de forma externa, haciéndola una forma fácil de instalar con una aparente facilidad para brindar cualquier tipo de mantenimiento.

Objetivo general:

- Realizar un estudio sobre la recolección de energía vibracional en válvulas de distribución de agua utilizando un recolector electromagnético aplicando una carga no armónica periódica.

Objetivos específicos:

- Estudiar los diferentes tipos de válvulas de control de distribución de agua existentes en el mercado y su posible facilidad para implementar recolectores de energía de vibración electromagnética.
- Comparar diferentes formas de recolección de energía de vibración electromagnética para su implementación en válvulas de control de distribución de agua.
- Simular el comportamiento de recolectores de energía electromagnética sinusoidales en válvulas de control de distribución de agua.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realiza el estudio de las diferentes máquinas que se han construido para recolectar energía vibracional, así como las distintas configuraciones y tipos de válvulas de control existentes en el mercado. También se dispondrá a estudiar las diferentes ecuaciones y parámetros necesarios para llevar un diseño más preciso y una mejor simulación del producto final.

1.1 Estado del arte

En este capítulo podemos encontrar distintos tipos de recolectores de energía vibracional y los tipos de válvulas de control. Con esto se pretende tener en consideración que el recolector sea el más compatible con varios tipos de válvulas existentes en el mercado y sus principales diferencias y usos.

Tipos de recolectores de energía vibracional

Se han estudiado distintas formas de obtener energía eléctrica de las vibraciones, ya sean estas producidas por la naturaleza o por los seres humanos en sus diversas actividades.

En este segmento se pretende abarcar un resumen de algunas formas de recolectar energía de vibración que pueden ser utilizados en válvulas de control de distribución de agua, así como sus materiales y algunos diseños.

Piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos son muy estudiados por su gran versatilidad y facilidad de uso, estos materiales pueden transformar tensión mecánica en una tensión eléctrica, lo que se conoce como efecto piezoeléctrico directo. La tensión mecánica puede ser causada por diferentes fenómenos y se puede ajustar su resonancia a la frecuencia más óptima de forma sencilla.

Para fabricar un recolector piezoeléctrico es necesario un material piezoeléctrico y someterlo a tensión y compresión, por esa razón este método de recolección de energía vibracional es muy fácil de realizar, sin embargo, se requiere que el recolector entre en resonancia con el estímulo por lo que no es muy sugerido cuando no se tiene una carga armónica.

La geometría basada en un voladizo es la forma más común de recolector piezoeléctrico ya que presenta una mayor carga piezoeléctrica media. (Elie, Adrien, Claude, & Daniel, 2005)

Otras formas que se puede usar este tipo de recolección de energía de vibración son tipo de platillo, pila y concha de los cuales ya se tiene modelos estudiados y verificados. (Heung, Joo-Hyong, & Jaehwan, 2011)

Electroestático

Este modelo busca utilizar la Ley de Coulomb para recolectar energía de vibración. Los recolectores electrostáticos buscan utilizar una variación de la capacitancia de condensadores de placas paralelas, los cuales son aislados generalmente por aire, un aislante o el vacío. (López, 2020)

Su funcionamiento consta de tres pasos, primero se requiere una carga inicial en un condensador variable, segundo se requiere cargar el condensador variable a su capacitancia máxima mediante las vibraciones del ambiente y por último se descarga el capacitor variable a su capacitancia mínima. La energía inicia se la puede conseguir de diversas formas, sin embargo, siempre es requerido un sistema diferente y no es autosuficiente por lo que no se lo suele usar como una única medida. Al acoplarlo con otro sistema de generación de energía eléctrica como puede ser el piezoeléctrico o el termoeléctrico se puede generar un sistema autosustentable. (Basset, y otros, 2009)

Electromagnético

Los recolectores de energía electromagnética de vibración electromagnética usan vibraciones para crear un desplazamiento relativo entre imanes y bobinas.

Para usar recolectores de energía de vibración basados en electromagnetismo se requiere que los imanes y bobinas tengan un desplazamiento relativo entre ellos. Esto se explica por la ley de Faraday, en el cual se requiere que exista un flujo variable de campo magnético que atravesase la bobina, de este modo se producirá una diferencia de tensión alterna en ellos. (Jordan & Balmian, 1968)

Este es el método que se usará en este trabajo ya que es muy práctico y el principio es fácil de entender y aplicar.

Triboeléctrico

Una estructura típica de un generador triboeléctrico basado en polímeros consta de una estructura intercalada con dos láminas de polímeros diferentes apiladas alternativamente sin unión entre capas. (Feng-Ru, Zhong-Qun, & Zhong Lin, 2012)

Tipos de sujeción en válvulas de control

En el uso industrial se puede encontrar una gran variedad de válvulas de control, todo depende de las cualidades necesarias para la industria y de los usos que se requiera de ella.

Las válvulas de control se las puede conectar de diferentes formas, entre las más comunes se tiene el uso de bridas normalizadas, por medio de roscas y por soldadura. Entre estos tres tipos de sujeción de las válvulas de control se puede utilizar las bridas para sujetar el recolector de energía vibracional mediante un perno.

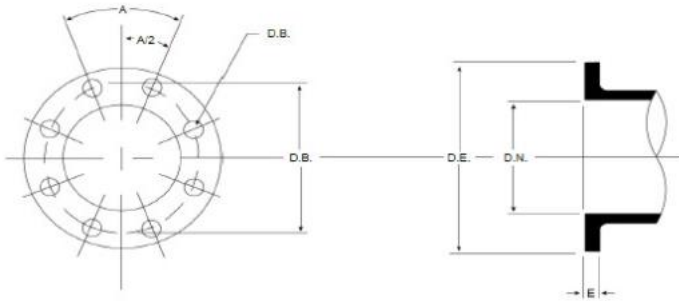


Figura 1.1, Geometría general de las bridas planas. (Valco industrial, 2023)

En la Figura 1.1, se puede observar las principales simbologías de las dimensiones generales en cuanto a las bridas planas.

Tabla 1.1, Geometría de algunas bridas. (Valco industrial, 2023)

Diámetro nominal		Diámetro exterior		Espesor		Círculos de los barrenos	Diámetro de los barrenos	Número de tornillos	Diámetro de tornillos
D.N	D.E	E	C.B	D.E					
Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Pulgadas		Pulgadas
2	51	6	152	0,63	16	1,75	0,75	4	0,63
2 1/2	64	7	178	0,75	16	5,5	0,75	4	0,63
3	76	7,5	190	0,94	19	6	0,75	4	0,63
4	102	9	229	0,94	24	7,5	0,75	8	0,63
6	152	11	279	1	25	9,5	0,88	8	0,75
8	203	13,5	340	1,13	29	11,75	0,88	8	0,75
10	254	16	406	1,19	30	14,25	1	12	0,88
12	305	19	480	1,25	32	17	1	12	0,88
14	356	21	533	1,38	35	18,75	1,13	12	1
16	406	23,5	597	1,44	37	21,25	1,13	16	1
18	457	25	635	1,56	40	22,75	1,25	16	1,13
20	508	27,5	698	1,69	43	25	1,25	20	1,13
24	610	32	813	1,88	48	29,5	1,38	20	1,25
30	762	38,75	984	2,13	54	36	1,38	28	1,25
36	914	46	1168	2,38	60	42,75	1,63	32	1,5
42	1'067	53	1346	2,64	67	49,5	1,63	36	1,5
48	1'219	59,5	1511	2,76	70	56	1,63	44	1,5

En la Tabla 1.1, se puede observar las dimensiones nominales de las bridas, y con ellas se puede comprender el espacio máximo en cuanto al espacio útil para instalar el generador de electromagnético.

1.2 BENCHMARKING

En este apartado se puede encontrar la situación actual en el mercado de los recolectores de energía vibracional, así como sus tamaños típicos y la cantidad de energía que pueden producir.

Disponibilidad de la máquina en el mercado

En Revibe energy se puede encontrar algunos medios para recolectar energía de diversas maquinarias y con diferentes fines, sin embargo, ninguna está especializada en recolectores para válvulas de control. Sus principales funciones son el monitoreo de los diferentes máquinas o sistemas y envío directo a los servidores en línea. Los sistemas de instalación y fabricación se los realiza bajo pedido y su sistema de generación de energía a partir de vibraciones es uno diseñado expresamente para cada caso en particular. (Revibe energy, 2023)

1.3 Diseño mecánico

En este capítulo se encuentra la teoría necesaria para diseñar un recolector electromagnético, sus principales usos y la ubicación del dispositivo en la válvula.

Modo de recolección de energía con electromagnetismo

Los recolectores electromagnéticos funcionan mediante la ley de Faraday, el cual tiene que ver con el desplazamiento de los campos magnéticos a través de un hilo conductor, lo que genera un voltaje. La cantidad de voltaje producida es directamente proporcional al número de bucles en la bobina y la tasa de cambio en el flujo magnético como se lo puede determinar de la ecuación 1.1.

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1.1)$$

En esta ecuación ε representa el voltaje producido, N el número de espiras en la bobina y $\Delta\phi$ es la variación de flujo magnético

La ecuación 1.1, se la puede desglosar en la ecuación 1.2.

$$\varepsilon = \beta l v \quad (1.2)$$

Donde β es la fuerza de campo magnético, l es la longitud del cable y v es la velocidad relativa entre la fuente de campo magnético y el cable.

Con la ecuación 1.2, se puede ajustar los parámetros de longitud de cable y de fuerza de campo magnético simplemente con el tamaño del cable y con las especificaciones del imán a utilizarse y la velocidad relativa entre el cable e imán lo dicta la válvula, los materiales utilizados para la fabricación del recolector y la geometría de este.

Todo recolector electromagnético basado en amortiguador, de masa-resorte, la potencia que puede recolectar es dictada por la ecuación 1.3, sin importar si es el imán el que se mueve o si es la bobina.

$$P_{max} = \frac{m Y_0^2 \omega^3}{4\zeta} \quad (1.3)$$

Donde m es la masa de la estructura móvil del recolector de energía, Y_0 es la amplitud de la vibración de la masa, ω es la frecuencia de vibración y ζ es el factor de amortiguamiento del transductor.

Teniendo en cuenta la ecuación 1.3, se requiere que se tenga una masa, amplitud y frecuencia altos y un factor de amortiguamiento pequeño.

Lo que limita este modelo es que se requiere que se use la frecuencia de resonancia en el modelo y limitar el factor de amortiguamiento lo mejor que se pueda.

Aplicaciones del recolector electromagnético

El recolector electromagnético instalado en las válvulas de control se los puede utilizar de forma en que se pueda presidir de una conexión externa en la planta para procesos que requieran de pequeñas cantidades de energía como puede ser el caso de instrumentos de medición o para el chequeo constante de las señales que proceden del recolector para posteriormente determinar el estado de las tuberías.

Ubicación del recolector electromagnético en la válvula de control

Las válvulas de control presentan varios lugares en los cuales se puede colocar el recolector de energía vibracional.

Bridas

Las bridas son mecanismos de sujeción de las válvulas de control, su construcción está regida por diversas normas, y se puede aprovechar que sobresalen para sujetar de ese sitio al recolector.

Las válvulas con extremos bridados se los ocupa para un gran margen de temperaturas y existen bridas para la gran mayoría de los diámetros requeridos por las válvulas de control, dentro de este método de sujeción se tiene tres tipos primordiales, superficie plana, superficie elevada y de junta anular. (Emerson Automation Solutions, 2019)

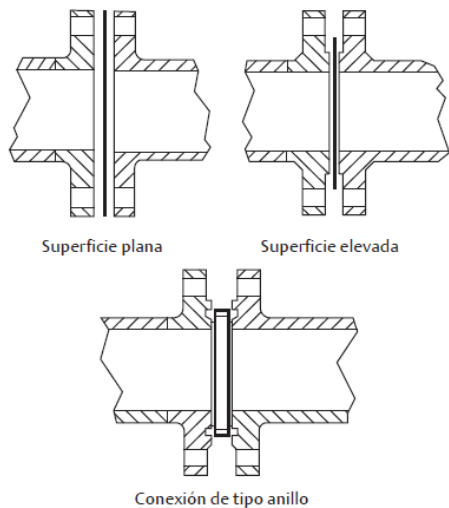


Figura 1.2, Tipos de bridas. (Emerson Automation Solutions, 2019)

En la Figura 1.2, se tiene algunas formas más comunes que tienen las bridas, ya que se puede ocupar algunas zonas libres para poder instalar el generador electromagnético.

Mecanismos de control

En las válvulas de control se suele colocar mecanismos de control, entre los mecanismos de control se puede colocar un sistema de sujeción que no impida el funcionamiento correcto del mecanismo de control y que brinde de sujeción al recolector de energía vibracional.



Figura 1.3, Actuador y válvula de control. (chemical processing, 2020)

Como se puede observar en la Figura 1.3, algunos mecanismos de control poseen varias zonas en las que se puede colocar un generador de tamaño reducido o en el peor de los casos entre los pernos de este.

2. METODOLOGÍA

En este módulo se presenta las diferentes alternativas de solución para lograr cumplir con los objetivos.

En primer lugar, se ocupará la información del marco teórico referente a los recolectores de energía vibracional y a la forma de sujeción de este. Después se tiene que definir las necesidades del usuario y las del ingeniero, como tercer punto se realiza la casa de la calidad para poder observar cuales son las mejores opciones en cuanto a las especificaciones presentadas, luego de tiene que definir especificaciones técnicas, como quinto punto se tiene que determinar las diferentes funciones dentro del proyecto, después se establecerá diferentes soluciones y se escogerá el mejor sistema para implementar en las válvulas de control, este sistema escogido se lo representará en un modelo digital ya montado en una válvula de control, para lograr validar el sistema se tiene que encontrar el modelo matemático que gobierna el sistema y llevarlo a unan simulación para así lograr obtener resultados y se podrá validar si los resultados se encuentran dentro de las condiciones esperadas y estudiadas en otros sistemas similares.

2.1 Determinación de especificaciones

En este apartado se presenta las diferentes especificaciones tanto del usuario y del ingeniero para que el producto pueda funcionar y que sea lo más eficiente posible.

Casa de la calidad

Con esta metodología se puede organizar la opinión y requerimientos del usuario en ámbitos de diseño y desarrollo lo que permite integrar requerimientos técnicos como de uso y costo.

Con la casa de la calidad se puede determinar las principales decisiones del producto a fabricar, tanto en cuanto a las necesidades del cliente como los

requerimientos técnicos del producto para su correcto funcionamiento. La casa de la calidad se la puede encontrar en el Anexo A.

Voz del usuario

Dentro de los parámetros importantes para el usuario a tomar en cuenta en el diseño del recolector de energía de vibración electromagnética se tiene:

- Accesibilidad económica
- Buena conversión de energía
- Alta capacidad de absorción de energía
- De fácil acoplamiento e instalación

Voz del ingeniero

Los parámetros técnicos necesarios para llevar a cabo las necesidades del usuario y poder llevar a la realidad el diseño del prototipo son:

- Disponibilidad de la materia prima
- Buenas características de conducción y de magnetismo
- Alta capacidad de resonancia de excitación (dentro de los límites de operación de las válvulas de control)
- Limitación dimensional dependiendo de la aplicación (tipo de válvula de control)

Conclusiones de la casa de la calidad

Revisando todos los parámetros presentados en la casa de la calidad se puede obtener información más precisa y clara sobre las características primordiales que gobierna el sistema y de las cuales nos apoyaremos para construir el prototipo.

Los parámetros más deseables por parte del usuario son:

- Accesibilidad económica
- Funcionamiento adecuado del sistema implementado
- Fácil acoplamiento e instalación

Para la voz del ingeniero se requiere adoptar los siguientes parámetros para adaptar el modelo a las especificaciones de la casa de la calidad:

- Aprovechar al máximo las vibraciones mecánicas
- Se requiere un volumen máximo de 10x10x6 cm
- Se requiere de un sistema electromagnético con materiales disponibles en el mercado y que brinden los mejores resultados

Especificaciones técnicas

En la Tabla 2.1, se muestran las especificaciones técnicas requeridas para el diseño del producto, mismas que han sido obtenidas a partir de la casa de la calidad.

Tabla 2.1, Especificaciones técnicas del generador electromagnético. (Fuente propia)

Empresa cliente:		Producto:		Fecha inicial:	
N/A		Generación de energía eléctrica mediante electromagnetismo aplicado en válvulas de control		Última revisión:	
Empresa de ingeniería:				Página	
N/A					
Especificaciones					
Concepto	Fecha	Propone	R/H	Concepto	
Función		C	R	Sistema conversor de energía mecánica a eléctrica. Aprovechar al máximo las vibraciones presentes en las válvulas de control	
Dimensiones		C+D+I	R/H	Dimensiones: 50x100 mm ² máx.. En función del espacio máximo que se puede usar en las	

				bridas de para tubería de $\phi 100$ mm
Materiales		C+D	R	Viga en cantiléver con buenas propiedades físicas y mecánicas, alambre de cobre esmaltado con las mejores prestaciones y geometrías para optimizar las dimensiones y el núcleo de la bobina con las mejores prestaciones magnéticas.
Fabricación y montaje		C	R/H	Fácil de acoplar. Disponibilidad en el mercado de las piezas

Propone: M = Marketing, D = Diseño, P = Producción, F = Fabricación, I = Ingeniería, C = Cliente. R/H: R = Requerimiento, D = Deseo, MR = Modificación de requerimiento.

2.2 Diseño conceptual del recolector electromagnético

Análisis funcional

El análisis funcional nos permite abarcar varias alternativas al diseño del recolector de energía electromagnética a partir de vibraciones, teniendo como objetivo final encontrar la mejor solución al problema específico. Se logra encontrar la mejor forma del sistema dividiéndolo en las distintas funciones que este tiene que realizar, con ello se puede realizar una investigación más a detalle de cada parte del mecanismo.

Todo mecanismo tiene una función principal, la cual es la razón del diseño del producto, para lograr cumplir con esta función principal es necesario algunas funciones secundarias en la mayoría de los casos por lo tanto con cada función se puede encontrar diferentes soluciones que cumplan. En la presente investigación se tiene como finalidad convertir energía mecánica proveniente de las vibraciones en una válvula de control a energía eléctrica generada mediante un generador electromagnético.

Se utiliza un diagrama de flujo para poder representar las funciones, donde las funciones son mostradas por rectángulos donde se escribe la función y por fuera de este con flechas hacia la función se representan las entradas de la función, las cuales se escriben sobre las flechas y con flechas que salen del rectángulo

se representan las salidas, las entradas y salidas pueden ser de energía o de materia. Las salidas de una función pueden ser las entradas de otras o simplemente puede ser un desecho de una función que no aporta nada más a la función principal.

Desarrollo del diagrama funcional

Función principal

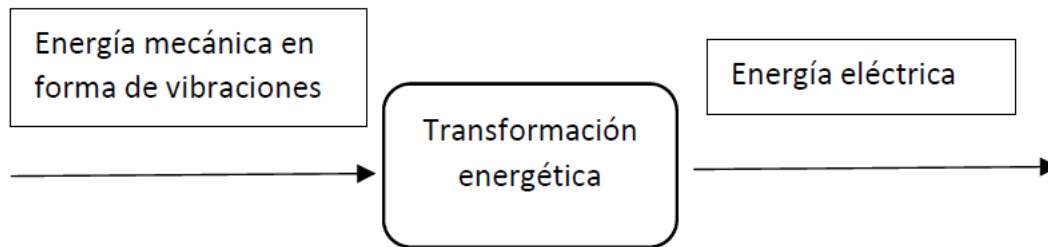


Figura 2.1, Función principal. (Fuente propia)

En la Figura 2.1, se puede observar la función principal del generador eléctrico el cual tiene como entrada la energía mecánica procedente de las vibraciones que se generan en las válvulas de control al pasar fluido por ellas y en la salida se tiene energía eléctrica usable.

Funciones secundarias

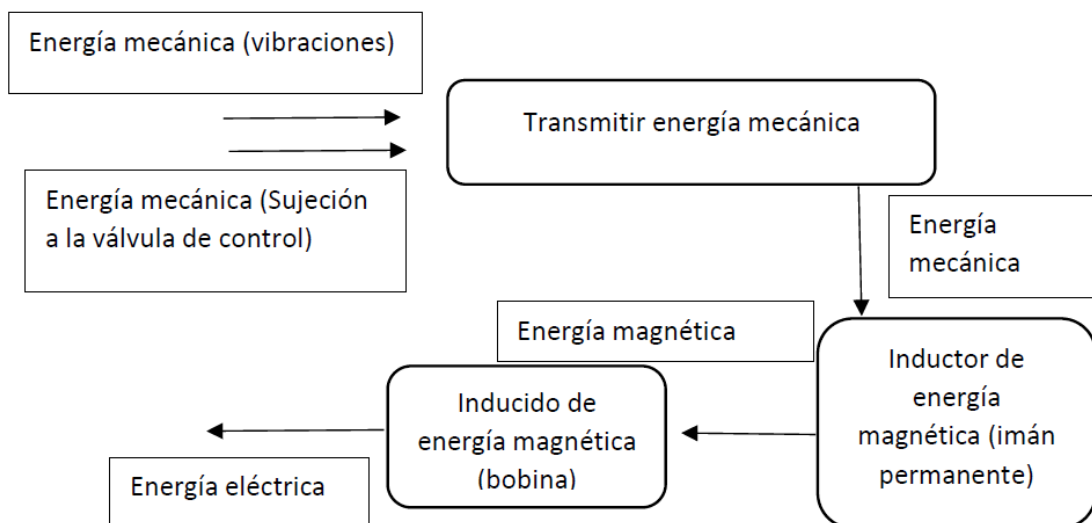


Figura 2.2, Funciones secundarias (Fuente propia)

En la Figura 2.2, se puede observar las diferentes funciones necesarias para llevar a cabo la obtención de energía eléctrica en el generador y sus diferentes entradas y salidas.

Análisis del diagrama funcional

Como se puede observar en la Figura 2.1, se tiene una función principal encargada de transformar la energía mecánica (vibraciones) en energía eléctrica. En la Figura 2.2, se muestra claramente que se requiere de un sistema de sujeción a la válvula de control, el inductor y el inducido, el inductor es el encargado de proporcionar el campo magnético al sistema y el inducido es el encargado de transformar el campo magnético variable en energía eléctrica. En este sistema se tiene claro que el inducido se quedará estático o mejor dicho será unido a la carcasa y el inductor será el encargado de desplazarse para generar el campo magnético variable en la o las bobinas.

Definición de módulos

Los módulos son una parte muy importante en el diseño y desarrollo, los módulos son separaciones y agrupaciones de las funciones secundarias en trabajos en común. La separación por módulos también permite la implementación de diferentes formas de cumplir con la función principal, con lo que se puede llegar a la forma que mejor se adapte a las condiciones del cliente.

Para el presente proyecto se requiere de dos módulos, el módulo 1 abarca la fijación del recolector electromagnético a la carcasa de la válvula de control y el módulo 2 está enfocado en la transformación de la energía eléctrica. En este proyecto se enfoca el hecho que para diferentes tipos de recolectores electromagnéticos se puede tener diferentes formas de sujeción y diferentes formas de recolectores electromagnéticos. Los módulos definidos se pueden observar en la Figura 2.3.

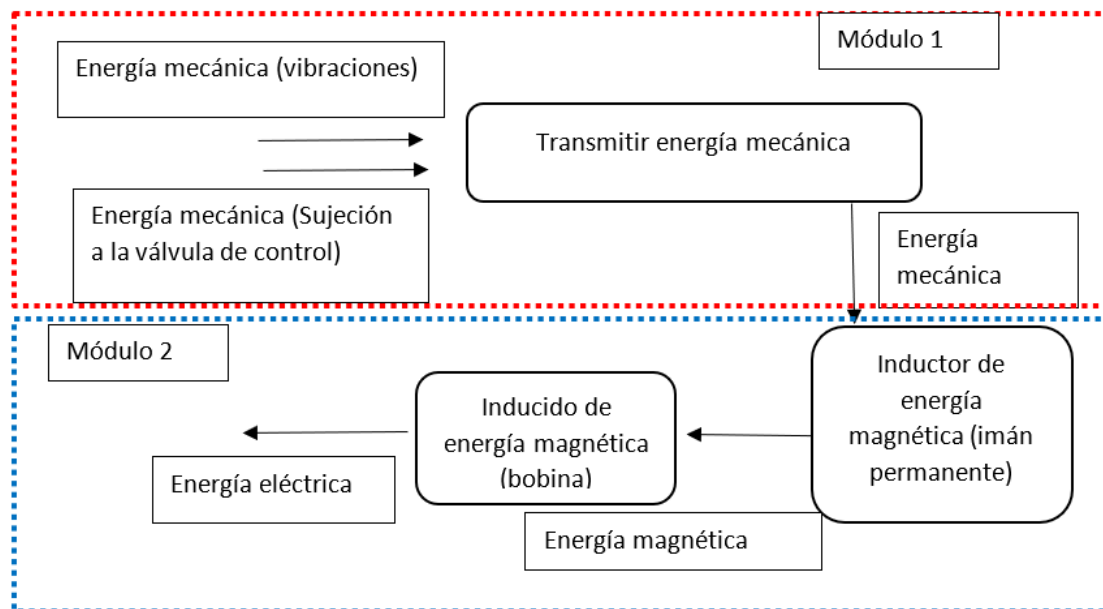


Figura 2.3, Módulos del diagrama funcional. (Fuente propia)

Soluciones para módulo 1

Módulo 1

En este módulo se tiene por objetivo transmitir la energía mecánica de la válvula de control al sistema generador de energía.

Esta función tiene como entradas la energía mecánica producida por la válvula de control y la energía mecánica necesaria para que el mecanismo generador de energía eléctrica se mantenga firme en su lugar. En las válvulas de control existen pocos lugares en los que se pueda implementar un sistema extra, ya que muchas de las válvulas de control requieren de un constante cambio de sus parámetros los cuales son monitoreados y modificados automáticamente y en las válvulas de control más simples un equipo de recolección de energía no tendría el mismo sentido de implementación, es por esta razón que se busca el mejor lugar para colocar el sistema sin que este presente muchas complicaciones de instalar o desinstalar y que no afecte a las funciones propias de la válvula de control.

A continuación, se muestran algunos posibles lugares para la instalación del sistema recolector de energía.

Alternativas para la sujeción

En las válvulas de control se tiene pocos lugares donde se pueda colocar un dispositivo externo, sin embargo, como el dispositivo a colocar es pequeño se puede colocar sin modificar el funcionamiento correcto de la válvula de control.

Alternativa 1: Usando los pernos de las válvulas de control

Las válvulas de control presentan pernos de sujeción, tanto entre las válvulas y los tubos, como en diferentes sistemas de control de flujo de estas. Se puede ocupar los pernos ya presentes en las válvulas de control para allí conectar el generador eléctrico.



Figura 2.4, Válvula de control (Rodríguez, 2020)

En la figura 2.4, se puede observar los diferentes pernos que pueden presentarse en las válvulas de control.

Tabla 2.2, Ventajas y desventajas de la alternativa 1. (Fuente propia)

Ventajas	- Una sola instalación del recolector electromagnético
	- Posibilidad a implementar varios recolectores en una sola válvula
	- Muy buena fijación a la válvula
Desventajas	- Difícil de instalar y desinstalar

	- Puede llegar a ayudar a la corrosión al implementar un nuevo material a la válvula
	- Aumenta el costo ya que se tiene que utilizar materiales más resistentes

En la Tabla 2.2, se muestran las principales ventajas y desventajas presentes al implementar la alternativa 1 como solución para el módulo 1.

Alternativa 2: Fijación en las bridas por medio de un perno extra

Muchas de las válvulas de control se unen a los tubos de transporte de fluido por medio de bridas, las cuales son normalizadas, por lo que las dimensiones y geometrías se las puede encontrar y diseñar sistemas de sujeción adaptadas a sus geometrías.

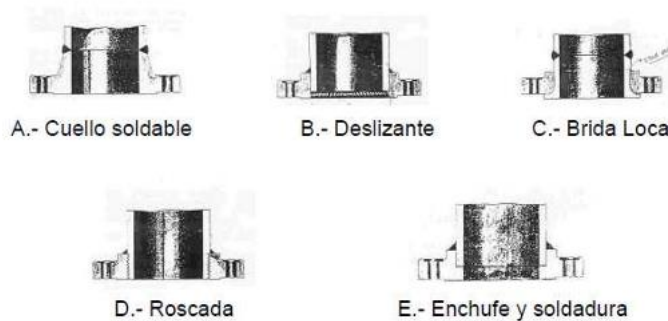


Figura 2.5, Tipos de bridas en tubos (Bolívar & Alfredo, 2015)

En la Figura 2.5, se puede observar las diferentes formas de instalación de las bridas en los tubos, sacando como conclusión que el tipo de instalación en tubos no es un problema a la hora de escoger la alternativa 2.

Tabla 2.3, Ventajas y desventajas de la alternativa 2. (Fuente propia)

Ventajas	- Fácil de instalas y desinstalar
	- Posibilidad a colocar varios recolectores de energía

	- Bajo costo por facilidad de uso de materiales
Desventajas	- Fijación no tan sólida a la válvula.
	- Requiere de chequeo continuo ya que se puede aflojar con las vibraciones
	- Puede generar corrosión debido al contacto entre materiales.

En la Tabla 2.3, se muestran las ventajas y desventajas al implementar la alternativa 2 como solución del módulo 1.

Evaluación y selección del módulo 1

Para determinar la mejor opción en cuanto a la sujeción del recolector de energía se utiliza el método ordinal corregido se criterios ponderados. Para ello se tiene que enlistar los criterios de valoración y se debe determinar una ponderación.

Para este caso se considerará los siguientes criterios de valoración.

- Facilidad de instalación
- Costo
- Fijación
- Mantenimiento
- Baja corrosión

Se ocupará los siguientes valores para la evaluación de las alternativas.

1 Si el criterio de las filas es mejor que las columnas.

0.5 Si el criterio de las filas es igual que el de las columnas.

0 Si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas.

Con estas consideraciones se procederá con la selección de la mejor opción, las cuales se encuentran detalladas desde la Tabla 2.4 hasta la Tabla 2.10.

Tabla 2.4, Evaluación del peso específico del módulo 1. (Fuente propia)

Criterio	Fácil instalación	Costo	Fijación	Mantenimiento	Baja corrosión	E+1	Ponderación
Fácil instalación		1	0	1	1	4	0,26666667
Costo	0		0,5	0	1	2,5	0,16666667
Fijación	1	0,5		0	1	3,5	0,23333333
Mantenimiento	0	1	1		0	3	0,2
Baja corrosión	0	0	0	1		2	0,13333333
					Suma	15	1

Tabla 2.5, Evaluación del peso específico del criterio: Fácil instalación. (Fuente propia)

Fácil instalación	Alternativa 1	Alternativa 2	E+1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33333333
Alternativa 2	1		2	0,66666667
		Suma	3	1

Tabla 2.6, Evaluación del peso específico del criterio: Costo. (Fuente propia)

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	E+1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33333333
Alternativa 2	1		2	0,66666667
		Suma	3	1

Tabla 2.7, Evaluación del peso específico del criterio: Fijación. (Fuente propia)

Fijación	Alternativa 1	Alternativa 2	E+1	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,66666667
Alternativa 2	0		1	0,33333333
		Suma	3	1

Tabla 2.8, Evaluación del peso específico del criterio: Mantenimiento. (Fuente propia)

Mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	E+1	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,66666667
Alternativa 2	0		1	0,33333333
		Suma	3	1

Tabla 2.9, Evaluación del peso específico del criterio: Mantenimiento. (Fuente propia)

Baja corrosión	Alternativa 1	Alternativa 2	E+1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33333333
Alternativa 2	1		2	0,66666667
		Suma	3	1

Tabla 2.10, Conclusión de las evaluaciones. (Fuente propia)

Conclusión	Fácil instalación	Costo	Fijación	Mantenimiento	Baja corrosión	E	Prioridad
Alternativa 1	0,089	0,056	0,156	0,133	0,044	0,478	2
Alternativa 2	0,178	0,111	0,078	0,067	0,089	0,522	1

Teniendo en cuenta con el análisis realizado mediante el método de criterios ponderados se puede llegar a establecer que la mejor alternativa es la segunda, la cual corresponde a la sujeción en las bridas de las válvulas de control.

Soluciones módulo 2

Módulo 2

En este módulo tiene la función de convertir la energía mecánica en energía eléctrica mediante un sistema electromagnético.

En este caso se tiene algunas formas para generar energía y en presente documento se tendrá en cuenta solo tres formas de generar energía eléctrica, donde se tendrá en cuenta solo la cantidad de energía que se puede generar.

En cuanto a los materiales y geometría del generador se realizará el estudio para generar lo máximo posible cambiando esos parámetros.

En cuanto a la geometría del soporte del generador se lo tomará una forma rectangular ya que por sus dimensiones no ejerce una carga excesiva.

Alternativas de selección de generación de energía eléctrica

Existen varias formas de recolectar energía eléctrica a partir de vibraciones, sin embargo, la mayoría de los estudios está relacionada a frecuencias menores a 100 Hz y los estudios hacia frecuencias más altas son realizados para generadores muy pequeños.

En este apartado se va a mostrar formas más clásicas de obtener energía eléctrica dependiendo de dos factores: Forma del generador o parámetro de excitación. Con estas condiciones se tiene un generador con sistema de viga en cantiléver, generador cilíndrico y generador impulsado por una bola esférica.

Alternativa 1: Generador con sistema de viga en cantiléver.

Este es uno de los sistemas más versátiles y más estudiado ya que su principio es muy fácil de comprender, en este sistema se puede tener de dos versiones, la que presenta bobina móvil y la de imán móvil. Para fines prácticos de implementación se escoge la opción de imán móvil ya que al instalar es preferible que la bobina se mantenga quieta y al simular se presentan menos errores de cálculo por los cables de conexión del sistema.

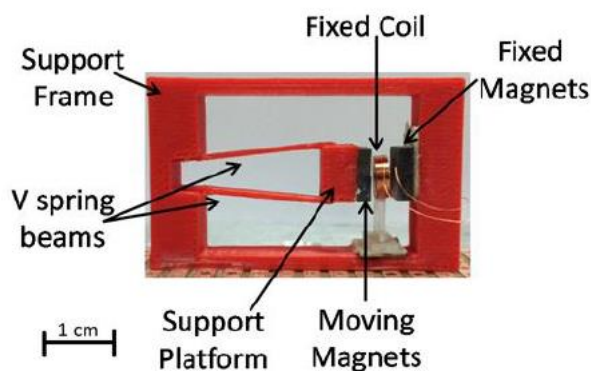


Figura 2.6, Generador impreso en 3D. (Constantinou & Roy, 2015)

En la Figura 2.6, se puede observar los parámetros indispensables en un generador electromagnético y otros parámetros los cuales puede tener para mejorar la obtención de energía.

Tabla 2.11, Ventajas y desventajas de la alternativa 1. (Fuente propia)

Ventajas	- Facilidad de cálculos
	- Buena generación de energía
	- Fácil implementación
Desventajas	- Menor amplitud de trabajo

En la Tabla 2.11, se encuentra las principales ventajas y desventajas de la implementación de la alternativa 1 como solución del módulo 2.

Alternativa 2: Generador cilíndrico

Este generador tiene muchas facilidades, así como maximizar el número de espiras o la cantidad de imanes en un mismo generador, ya que todo el exterior puede ser llenado con la bobina o con imanes.

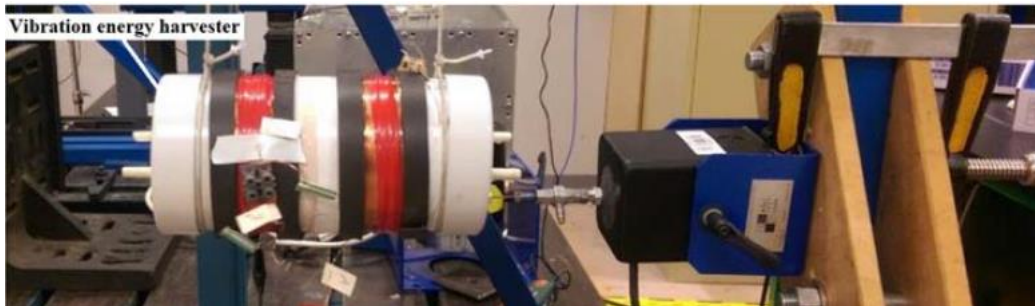


Figura 2.7, Generador electromagnético de tubo cilíndrico excitado por un agitador. (Zhenwei, Xu, Ran, & Liuping, 2018)

En la Figura 2.7, se puede observar un generador electromagnético cilíndrico el cual se encuentra acoplado a un agitador en un laboratorio. El agitador ayuda a verificar los datos obtenidos por medio de una simulación, ya que con ese dispositivo se logra frecuencia y amplitudes de trabajo muy precisas.

Tabla 2.12, Ventajas y desventajas de la alternativa 2. (Fuente propia)

Ventajas	- Muy buena generación de energía
	- Facilidad de cálculos
Desventajas	- Dificultad de instalación
	- Menor amplitud de trabajo

En la Tabla 2.12, se puede observar las ventajas y desventajas que presenta la implementación de la alternativa 2 como solución del módulo 2.

Alternativa 3: Generador impulsado por una bola esférica.

Esta alternativa es muy similar a la de viga en cantiléver sólo que se aumenta la amplitud así puede generar más energía con una dimensión más reducido.

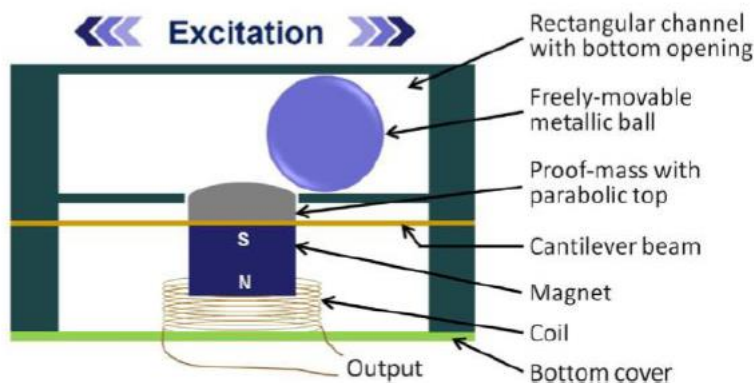


Figura 2.8, Generador impulsado por una bola esférica. (Halim & Park, 2015)

En la Figura 2.8 se muestra los principales elementos presentes en un generador electromagnético impulsado por una bola esférica, el cual ayuda a mejorar la amplitud de la viga en cantiléver.

Tabla 2.13, Ventajas y desventajas de la alternativa 3. (Fuente propia)

Ventajas	- Excelente generación de energía
	- Fácil implementación
	- Gran amplitud
Desventajas	- Cálculos complejos

En la tabla 2.13, se encuentran las ventajas y desventajas a la hora de implementar la alternativa 3 como solución del módulo 2.

Elección y selección del módulo 2

Se ocupará nuevamente el método ordinal corregido se criterios ponderados. Con los siguientes parámetros de valoración.

- Generación de energía
- Implementación
- Complejidad

Se ocupará los siguientes valores para la evaluación de las alternativas.

- 1 Si el criterio de las filas es mejor que las columnas
- 0.5 Si el criterio de las filas es igual que el de las columnas
- 0 Si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas

Con estas consideraciones se procederá con la selección de la mejor opción. Se muestran a detalle la evaluación de las alternativas de solución para el módulo 2 desde la Tabla 2.14 hasta la Tabla 2.18.

Tabla 2.14, Evaluación del peso específico del módulo 2. (Fuente propia)

Criterio	Generación de energía	Implementación	Complejidad	E+1	Ponderación
Generación de energía		1	1	3	0,5

Implementación	0		0	1	0,16666667
Complejidad	0	1		2	0,33333333
			Suma	6	1

Tabla 2.15, Evaluación del peso específico del criterio: Generación de energía. (Fuente propia)

Generación de energía	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	E+1	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	1,5	0,25
Alternativa 2	0,5		0	1,5	0,25
Alternativa 3	1	1		3	0,5
			Suma	6	1

Tabla 2.16, Evaluación del peso específico del criterio: Implementación. (Fuente propia)

Implementación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	E+1	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.5
Alternativa 2	0		0	1	0.16666667
Alternativa 3	0	1		2	0.33333333
			Suma	6	1

Tabla 2.17, Evaluación del peso específico del criterio: Complejidad. (Fuente propia)

Complejidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	E+1	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,5
Alternativa 2	0		1	2	0,33333333
Alternativa 3	0	0		1	0,16666667
			Suma	6	1

Tabla 2.18, Conclusiones de las evaluaciones. (Fuente propia)

Conclusión	Generación de energía	Implementación	Complejidad	E	Ponderación
Alternativa 1	0,125	0,08333333	0,16666667	0,375	1
Alternativa 2	0,125	0,02777778	0,11111111	0,26388889	3
Alternativa 3	0,25	0,05555556	0,05555556	0,36111111	2

De acuerdo con los datos obtenidos de la evaluación del módulo 2 se puede conocer que la mejor opción es la alternativa 1, sin embargo, la alternativa 3 es

muy similar por lo que se podría escoger esa opción, pero se opta por seguir el trabajo con la alternativa 1.

2.3 Montaje del generador electromagnético en la válvula de control.

Con la obtención de las alternativas más eficientes para nuestro sistema se representa un modelo virtual realizado en el software Inventor. Para el montaje se diseñó una especie de mordaza fija, la cual requiere de un apriete determinado para lograr mantener el sistema fijo. En la Figura 2.9, se muestra el modelo virtual.



Figura 2.9, Montaje del generador electromagnético en la válvula de control. (Fuente Propia)

Para mayor detalle del montaje ver Anexo C.

2.4 Modelo del sistema válvula de control generador electromagnético

Como se determinó en la elección de alternativas se va a realizar un generador electromagnético de viga en cantiléver sujeto a las bridas de la válvula de control. Los parámetros constantes en cuanto al generador se pueden mostrar en la Tabla 2.19

Tabla 2.19, Constantes principales del sistema válvula - generador electromagnético. (Fuente propia)

Simbología	Significado	Valores
------------	-------------	---------

ρ_v	<i>densidad de la viga en cantiléver</i>	8800 Kg/m ³
M	<i>masa de un imán</i>	9,8x10 ⁻⁷ Kg
N	<i>número de espiras</i>	500
B	<i>densidad de flujo magnético</i>	264 mT
R_{load}	<i>resistencia de carga</i>	500 ohm
R_{coil}	<i>resistencia del alambre</i>	0,136 ohm/m
L_{coil}	<i>inductancia en el alambre</i>	-----
l_{in}	<i>largo de la bobina</i>	5 mm
D_n	<i>Diámetro del núcleo</i>	2 mm
μ	<i>permeabilidad relativa del núcleo</i>	7000 []
E	<i>módulo de Young de la viga en cantiléver</i>	110 x10 ⁶ Pa
h	<i>altura de la viga en cantiléver</i>	1 mm
A	<i>amplitud en la válvula</i>	0,0005 g
f	<i>frecuencia de entrada de la válvula</i>	3800 Hz
n	<i>número impar</i>	1,3,5 Hz

Análisis de ecuaciones que rigen el sistema

En este documento se tomará una fuerza de forma triangular con un máximo de $m_{eq} \cdot A$ y con una frecuencia f y se estudiará la máxima potencia posible en el generador y no se tendrá en cuenta las pérdidas en el agarre generador-bridas. Como se muestra en la ecuación 2.1.

$$m_{eq}\ddot{x} + C\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.1)$$

En la Figura 2.10, se representa la fuerza en función del tiempo.

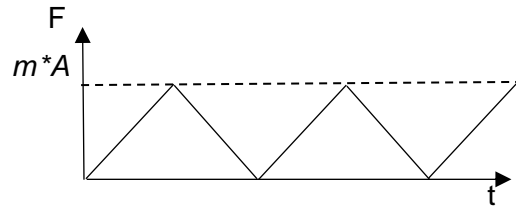


Figura 2.10 Fuerza externa aplicada a l generador electromagnético. (Fuente propia)

En la ecuación 2.2, se muestra la forma que tiene la fuerza en el sistema de análisis válvula – generador electromagnético.

$$F(t) = \begin{cases} m * A * t & \text{si } 0 < t \leq \frac{\tau}{2} \\ m * A * (\tau - t) & \text{si } \frac{\tau}{2} < t \leq \tau \end{cases} \quad (2.2)$$

Serie de Fourier

Se puede representar la ecuación 2.2, que es no armónica como si fuera una, mediante una serie de Fourier. se lo puede representar como la ecuación 2.3.

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n * \cos\left(\frac{2n\pi}{\tau} * t\right) + b_n * \text{sen}\left(\frac{2n\pi}{\tau} * t\right) \quad (2.3)$$

Donde $a_0 = \frac{2}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) dt = \frac{mA}{2f}$, $a_n = \frac{2}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2mA}{n^2 f \pi^2}$ y $b_n = \frac{2}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) \text{sen}(n\omega t) dt = 0$

Con esta consideración se puede llegar a la ecuación 2.4.

$$m_{eq} \ddot{x} + C \dot{x} + kx = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) \quad (2.4)$$

La respuesta estable de la ecuación 2.4, se tiene de la siguiente forma:

$$X_p(t) = \frac{a_0}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{a_n}{k}}{\sqrt{(1-r_r^2)^2 + (2\zeta r_r)^2}} * \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (2.5)$$

Donde $r_r = \frac{\omega}{\omega_n}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{m_{eq}}{k}}$, $C_c = 2m_{eq} * \omega_n$, $\zeta = \frac{C}{C_c}$ y $\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{2n*\zeta*r_r}{1-r_r^2}\right)$.

Dado el caso de que va a ser una viga en cantiléver se determina la constante de elasticidad como la respuesta a la ecuación 2.6.

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (2.6)$$

Donde la inercia al ser una sección rectangular se tendría como la ecuación 2.7.

$$I = \frac{bh^3}{3} \quad (2.7)$$

Según (Beeby & Tundo, 2006) para calcular el amortiguamiento debido a la interacción entre el imán y la bobina se lo puede realizar mediante la ecuación 2.8.

$$C = \sqrt{\left(\frac{(NLB)^2 * (R_{load} + R_{coil})}{(R_{load} + R_{coil})^2 - L_{coil}^2}\right)^2 + \left(\frac{(NLB)^2 * L_{coil}}{(R_{load} + R_{coil})^2 - L_{coil}^2}\right)^2} \quad (2.8)$$

La inductancia en la bobina se puede determinar con la ecuación 2.9.

$$L_{coil} = \frac{N^2 \pi S}{l_{in}} \quad (2.9)$$

Para determinar la masa equivalente se lo realiza con la ecuación 2.10.

$$m_{eq} = M + 0.23m \quad (2.10)$$

Según (Muscat, Battacharya, & Zhu, 2022) la potencia máxima que puede recolectar un generador eléctrico se puede calcular con la siguiente ecuación 2.11.

$$P_{max} = \frac{m_{eq} Y_0^2 \omega^3}{4\zeta} \quad (2.11)$$

Donde Y_0 : amplitud en la viga en cantiléver

2.5 Parámetros principales del sistema válvula – generador

Ya obtenidos las ecuaciones necesarias del sistema, se puede obtener los parámetros necesarios para el generador electromagnético y continuar con la simulación. Los parámetros iniciales son mostrados en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20, Parámetros iniciales. (Fuente propia)

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
PARÁMETROS DE LA VIGA EN CANTILÉVER	
Material	Bronce fosforoso
Densidad	8800 Kg/m ³
Módulo de Young	110 x10 ⁶ Pa
Altura	2mm
Ancho	[10;15;20] mm
Largo	[0,1-5] mm
PARÁMETROS DE LA BOBINA	
Material	Alambre de cobre esmaltado
Número de espiras	500
Calibre	0,3mm; 0,4mm y 0,5mm
Resistencia en el alambre	0,2418 ohm/m; 0,136 ohm/m y 0,08706 ohm/m
Resistencia de carga	500 ohm
Permeabilidad relativa	7000
Ancho de la bobina	5 mm
Diámetro del núcleo	2 mm
Parámetros del imán	
Material	NdFeB
Masa	0,04 Kg
Campo magnético	264 x10 ⁻³ T
Datos de la fuerza exterior	
Frecuencia	3800 Hz y 2400Hz
Amplitud	5x10 ⁻⁴ g y 2,4x10 ⁻⁴ g

Los diferentes materiales utilizados son presentados en el Anexo B.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se encuentra los diferentes resultados que se obtienen al simular los diferentes parámetros y sus análisis. Se espera maximizar la potencia de salida con unos cambios geométricos a la viga en cantiléver y al calibre de la bobina.

3.1 Resultados

En este apartado se muestra los resultados obtenidos del estudio de un sistema válvula de control al cual se le coloca un generador electromagnético. Este dispositivo se lo monta en las bridas de la válvula y la del tubo de transporte de fluido mediante un perno, al cual se le tiene que dar una precarga específica para mantener fijo al sistema. Las vibraciones producidas por el paso del fluido en la válvula de control son transmitidas mediante la sujeción del perno hacia la

viga en cantiléver, el cual producirá energía eléctrica mediante la bobina fija. Con la implementación del generador electromagnético se puede aprovechar la energía vibracional, ya que de otro modo toda esa energía se enviaría al medio ambiente, se modela un sistema donde toda la energía de la válvula se pasa a la viga en cantiléver, de esta manera se puede simplificar los cálculos y no se tiene en cuenta el material ni la sujeción del dispositivo generador de energía, sin embargo, esta manera de realizar los cálculos representaría un error mayor, para realizar estos cálculos se tomará en cuenta los parámetros presentes en el capítulo 2.4 los cuales fueron tomados de catálogos dependiendo de los materiales a utilizar y de dimensiones utilizadas en otros documentos, las dimensiones se las toma como partida para así no tener demasiadas variables las cuales tomar en cuenta.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación, al ser un sistema con un solo grado de libertad se tiene un solo pico resonante, y lo que se busca es llegar a la mejor geometría en cuanto a la viga en cantiléver y en cuanto a la bobina lo que se pretende encontrar es las diferencias existentes al cambiar a una de diferente calibre y con ello cambia el largo total de la bobina y su resistencia interna. La viga en cantiléver se espera que tenga un largo muy reducido, ya que se está trabajando con frecuencias elevadas. La amplitud no es muy regular por lo que se realizó un estudio para comprender de mejor manera el funcionamiento de la viga en cantiléver al variar ese parámetro. Se estudia también tres diferentes estados en cuanto al ancho de la viga en cantiléver y diferentes frecuencias de trabajo.

En el Anexo D se detallan todos los códigos utilizados para realizar el análisis de los datos, en los códigos de simulación se encuentran englobadas y ocupadas las ecuaciones presentadas en el capítulo 2.4.

Respuesta de potencia eléctrica generada, en función del largo de la viga en cantiléver

Para la obtención de los siguientes resultados se utiliza dos frecuencias nominales las cuales son las frecuencias obtenidas por (Ordoñez, Romeu, Liravi, Jiménez, & Arcos, 2019) en válvulas de agua potable para válvulas de tipo jaula de diámetro nominal de 100, 150 y 200 mm, en el cual aplica el

presente estudio se tomó como referencia los diámetros de 150 y 200 mm. Se realiza para largo de la viga en cantiléver desde 0,1mm hasta los 5mm.

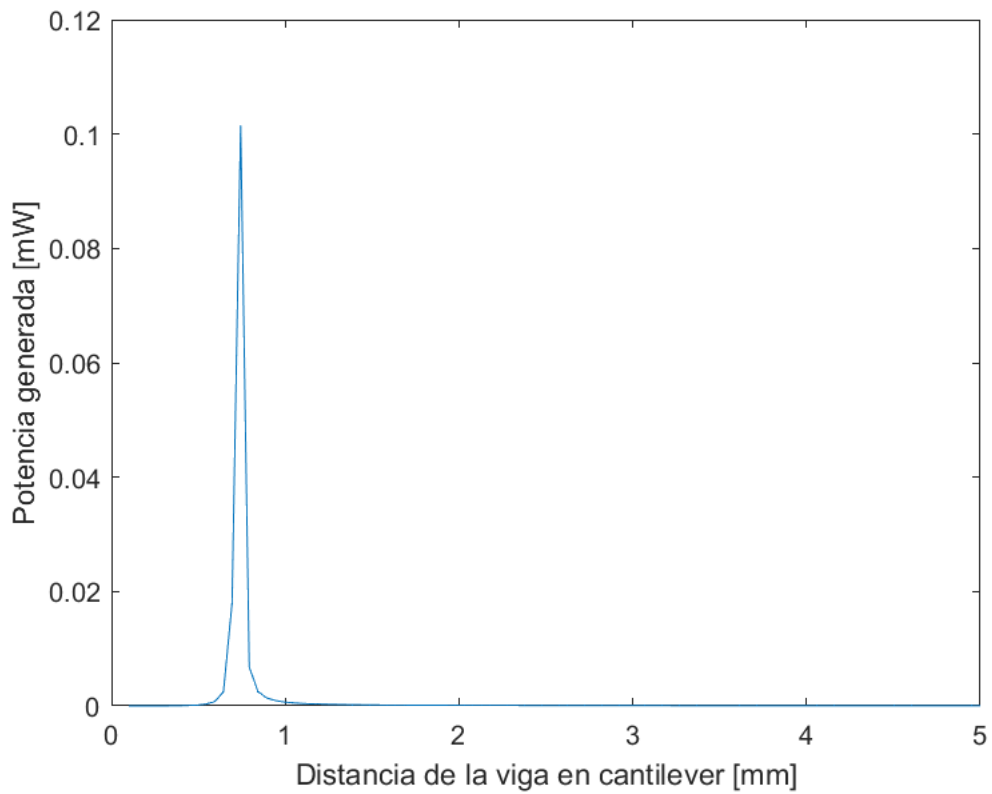


Figura 3.1 Respuesta Potencia eléctrica vs largo de la viga en cantiléver para una frecuencia de 3800 Hz. (Fuente propia)

En la Figura 3.1, se muestra como el largo ideal de la viga en cantiléver para una frecuencia de 3800 Hz, sería alrededor de 0,743 mm, el cual es donde se tiene la resonancia máxima y por ende la máxima generación de energía eléctrica.

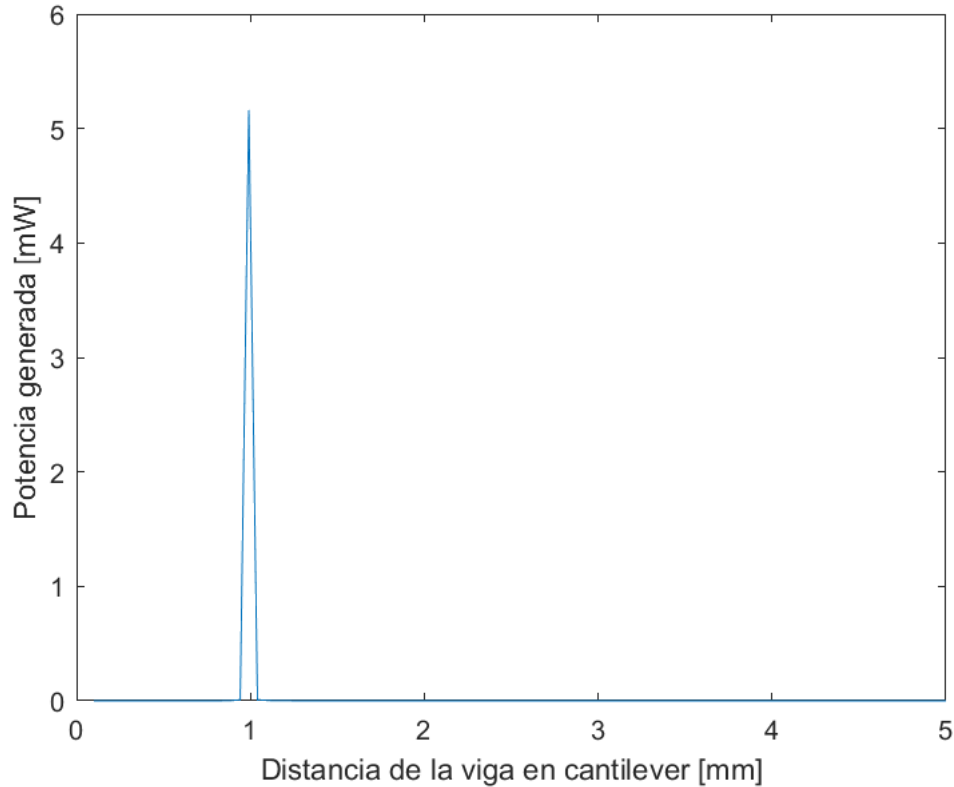


Figura 3.2 Potencia eléctrica generada vs Distancia de la viga en cantiléver para una frecuencia de 2400 Hz. (Fuente propia)

Como se puede observar en la Figura 3.2, al cambiar la amplitud y la frecuencia de trabajo cambió tanto la potencia máxima generada como la distancia de la viga en cantiléver ideal.

Respuesta de la potencia generada ante la variación de otros parámetros

En esta sección se tendrá en cuenta los demás parámetros para lograr encontrar la mejor configuración de la geometría de la viga en cantiléver y del calibre del alambre esmaltado. En este caso se realizará otras simulaciones variando el ancho de la viga en cantiléver, el calibre del alambre esmaltado y la amplitud de trabajo, con la variación de estos parámetros se puede llegar a una respuesta de geometría con la que se pueda llegar a cumplir con los objetivos.

En primer lugar, se trabajará con la frecuencia de 3800 Hz y un calibre de alambre esmaltado de 0,5 mm de diámetro para después variar el ancho de la viga en cantiléver y observar su tendencia.

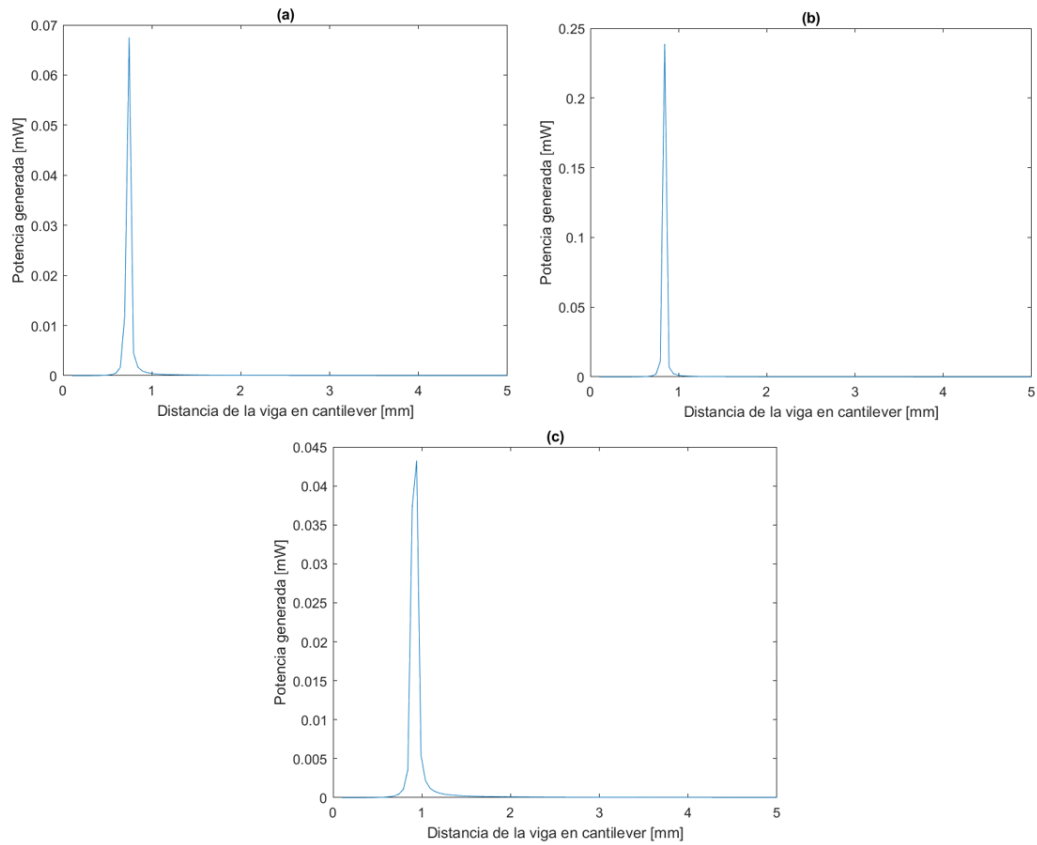


Figura 3.3 Potencia generada al variar en ancho de la base de la viga en cantiléver. (a) ancho de 10mm, (b) ancho de 15mm y (c) ancho de 20mm. (Fuente propia)

En la figura 3.3, se puede observar que la potencia máxima se da alrededor del ancho de 15mm a un largo de viga en cantiléver de 0,842mm. La potencia máxima es de 0,359mW.

Como se puede observar las distancias de longitud de resonancia no son las mismas si se cambia los parámetros de ancho de la viga en cantiléver, sin embargo, su distancia de resonancia no es muy diferente.

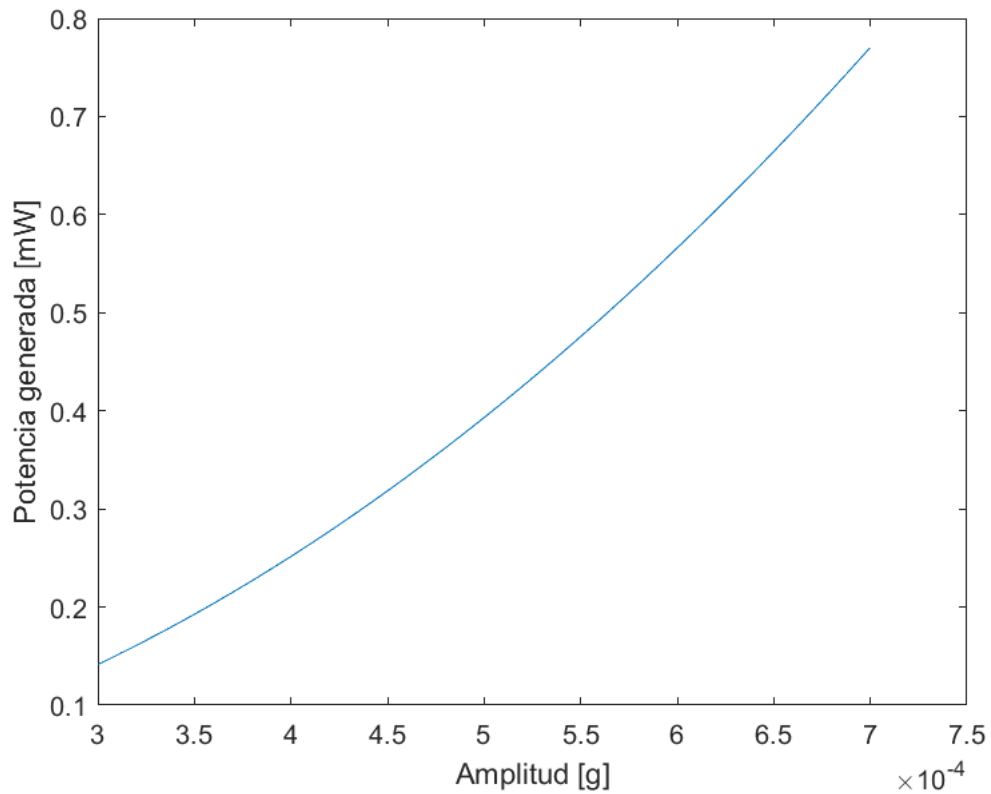


Figura 3.4 Potencia generada variando la amplitud de trabajo. (Fuente propia)

Como se puede observar en la Figura 3.4, mientras más grande sea la amplitud en la válvula de control más energía se podrá captar. Este estudio demuestra que no existen pico en cuanto a la amplitud, por el contrario, se comporta más cercanamente como una función lineal, esto no quiere decir que se pueda instalar cuando se tiene amplitudes excesivamente grandes ya que la frecuencia es grande también y esta interacción podría dañar la válvula de control.

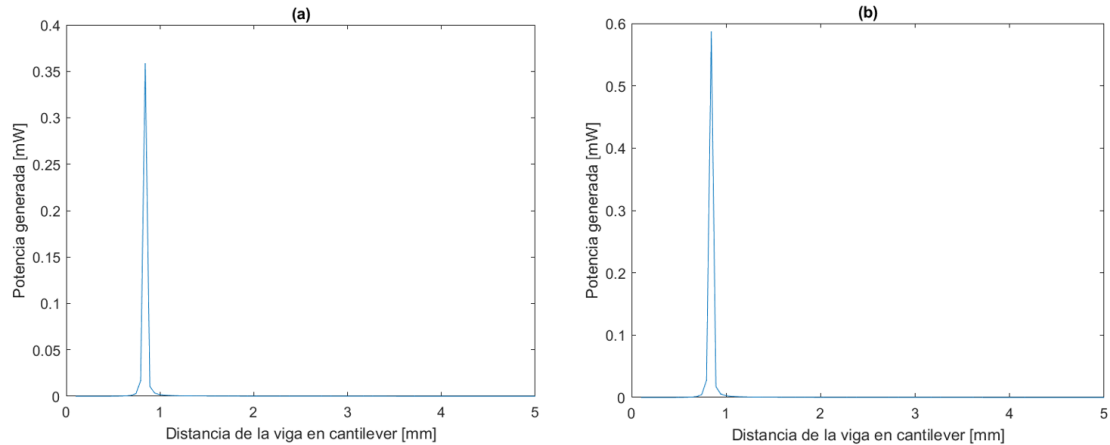


Figura 3.5 Potencia generada vs distancia de la viga en cantiléver variando el calibre del alambre esmaltado. (a) calibre 0.4 mm resistencia y del alambre de 0,08796 ohm/m y (b) calibre 0.3 mm resistencia y del alambre de 0,2418 ohm/m. (Fuente propia)

Al comparar la mejor opción de la Figura 3.3(b) y la Figura 3.5, se estima que al reducir el calibre del alambre esmaltado se sigue aumentando la generación de energía, sin embargo, el precio de fabricación también aumenta y su aumento no es muy representativo, es por ese motivo que se escoge el alambre de calibre 0,4mm, generando de esa forma una potencia máxima de 0,359mW.

Para determinar la mejor geometría para una frecuencia de 2400 Hz se utilizará las conclusiones obtenidas anteriormente y con ello se puede realizar una única simulación variando unos pocos parámetros.

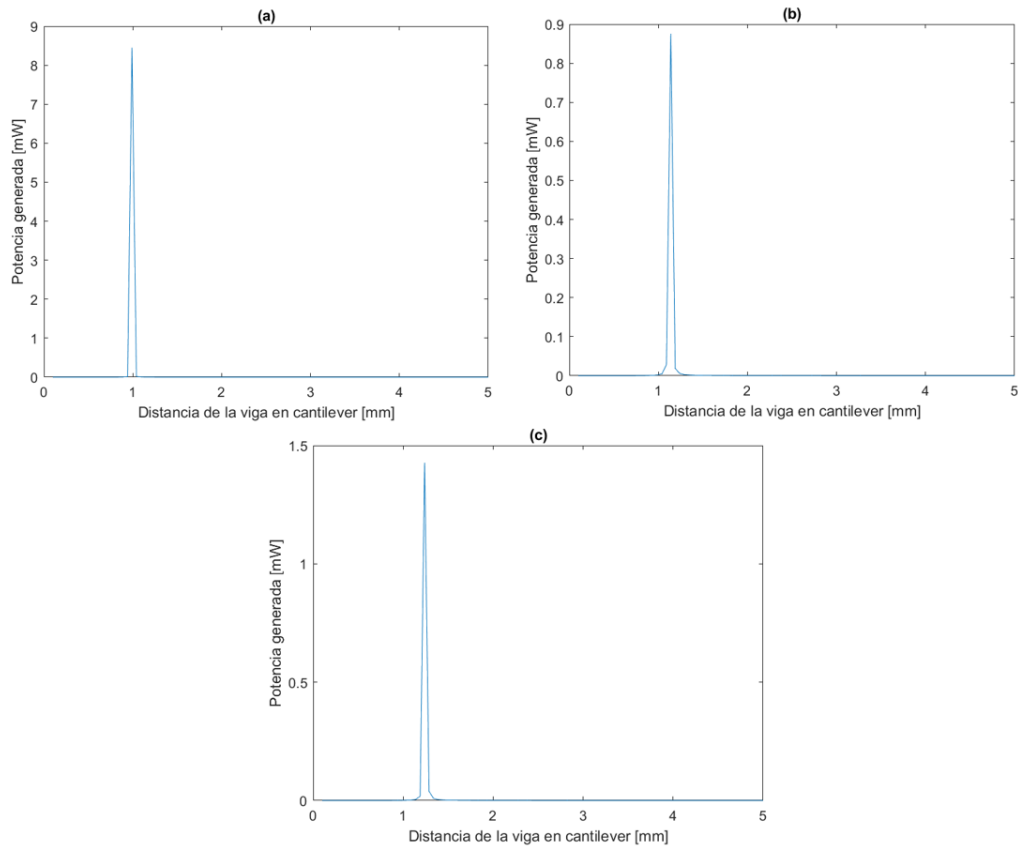


Figura 3.6 Potencia generada variando el ancho de la base. (a) base de 10mm, (b) base de 15mm y (c) base de 20mm. (Fuente propia)

En estudio realizado para la Figura 3.6, se tiene en cuenta la amplitud de $2,4 \times 10^{-4}$ g, ya que es la media de la amplitud a la que trabaja, una frecuencia de 2400 Hz y un calibre de alambre esmaltado de 0,4 mm de diámetro. Con estas consideraciones se obtiene que con una base de 10 mm da la máxima potencia de generación.

Entre las dos válvulas que se realizó el estudio, se puede decir que es preferible instalar un sistema de recolección de energía vibracional electromagnético en una válvula de diámetro nominal de 150 mm, ya que en esa válvula tendremos una mayor generación que en una más grande y que la geometría preferible sería de 1mm de largo con un ancho de 10mm y un calibre de alambre esmaltado de 0,4 mm, aunque es preferible un alambre más pequeño si se tiene las posibilidades económicas. En el caso de instalar el generador electromagnético en una válvula de 200mm se debe tener un largo de 0,842mm y 15mm de ancho en la viga en cantiléver y un calibre de 0,4mm o mayor en el alambre esmaltado.

3.2 Validación de resultados

En la validación de resultados se tiene en consideración los datos recopilados por (Muscat, Battacharya, & Zhu, 2022), en su investigación relaciona varios tipos de generadores electromagnéticos diseñados por varias fuentes y muestras las ventajas y desventajas en la fabricación e implementación de cada uno de los tipos de generadores. Con esta recopilación se tiene recolectores con imanes en la parte móvil y de fabricación tradicional los cuales tienen una potencia de salida alrededor de 0,00172mW con una frecuencia de 2,1 Hz y amplitud de 0,008 g. En el caso de la presente investigación se realizó una formulación analítica de la viga en cantiléver teniendo resultados de potencia máxima de 0,359mW cuando está trabajando en una válvula de control de 200 mm de diámetro nominal, frecuencia de 3800 Hz y una amplitud de 0,0005 g mostrados en la Figura 3.5(a).

4. CONCLUSIONES

- Se tiene mucha información sobre los generadores electromagnéticos y sus diferentes formas de fabricación, sin embargo, no existe mucha información sobre la implementación práctica de estos modelos de recolectar energía vibracional y mucho menos en cuanto a la implementación externa en válvulas de control, por lo cual no se tiene registros de formas de sujetar a un dispositivo de estos en las válvulas de control y mucho menos información de ecuaciones para simular el sistema generador – válvula.
- Los parámetros determinantes para generar energía mediante el electromagnetismo es el tipo de alambre a usar, amplitud y la geometría tanto de la viga en cantiléver como la bobina.
- El uso de generadores electromagnéticos en válvulas de control resultó ser un reto muy grande, ya que los parámetros de entrada y la simulación del contacto válvula – generador no existe en investigaciones previas.
- Los resultados de la simulación no son tan cercanos como se esperaría, en gran medida puede deberse a las grandes diferencias en cuanto a los parámetros de entrada ya que no existe mucha bibliografía de generadores los cuales trabajen a frecuencias mayores a los 1000 Hz y a una amplitud inferior a 0,0007 g.

- Este trabajo de simulación es un precedente ya que se puede tomar como referencia para ampliar el conocimiento en cuanto a la implementación de los generadores electromagnéticos en las válvulas de control y a estudios posteriores sobre generadores utilizados en frecuencias altas y en amplitudes bajas.

5. RECOMENDACIONES

- En trabajos posteriores se puede utilizar distintas formas de generar energía eléctrica o simplemente diferentes formas de construcción del generador electromagnético.
- Se puede utilizar diferentes ecuaciones para determinar los parámetros de entrada como la fuerza de excitación o el amortiguamiento del sistema.
- Se puede determinar el sistema de una forma no lineal para generar más potencia de salida a diferentes frecuencias, amplitudes y condiciones geométricas del generador.
- Para ampliar el conocimiento se puede realizar estudios de simulación de válvulas de control en cuanto a la respuesta vibratoria de ese sistema o en su defecto realizar estudios del comportamiento de las válvulas en campo para tener más datos de entrada para posteriores estudios.

Bibliografía

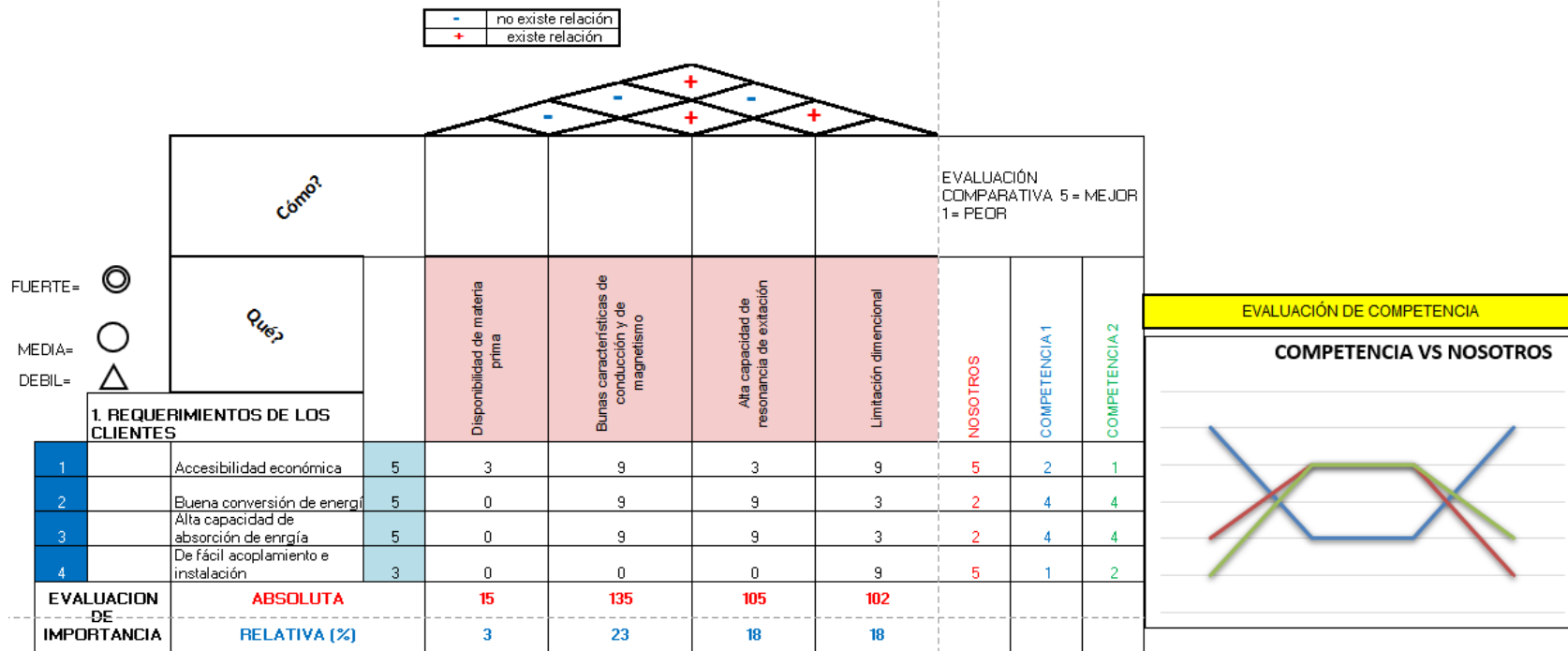
- Basset, P., Galayko, D., Mahmood, A., Marty, F., Dudka, A., & Bourouina, T. (12 de Octubre de 2009). A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(11). doi:10.1088/0960-1317/19/11/115025
- Beeby, S. p., & Tuto, M. J. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *REVIEW ARTICLE*, 175-195.
- Bolívar, C., & Alfredo, H. (2015). *DESARROLLO Y CÁLCULO DE ÍNDICES EN PROYECTOS IPC PARA LA ESTIMACIÓN Y DISEÑO DE TUBERÍAS, VÁLVULAS Y ACCESORIOS* . Caracas: Universidad Central de Venezuela.

- chemical processing. (29 de Abril de 2020). *Deftly Deal With Control Valve Problems*. Recuperado el 04 de Julio de 2023, de Deftly Deal With Control Valve Problems: <https://www.chemicalprocessing.com/processing-equipment/fluid-handling/article/11300894/deftly-deal-with-control-valve-problems>
- Constantinou, P., & Roy, S. (2015). A non-linear 3D printed electromagnetic vibration energy harvester. . *J. Phys. Conf. Ser.*, 660, 012092.
- Elie, L., Adrien, B., Claude, R., & Daniel, G. (2005). Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10), 865-876.
- Emerson Automation Solutions. (2019). *GUÍA DE VÁLVULAS DE CONTROL*. Marshalltown: Emerson Automation Solutions.
- Feng-Ru, F., Zhong-Qun, T., & Zhong Lin, W. (2012). Flexible triboelectric generator! *Nano energy*, 1(2), 328-334.
- Halim, M., & Park, J. (2015). Modeling and experiment of a handy motion driven, frequency up-converting electromagnetic energy. *Sens. Actuators A Phys.*, 50-58.
- Heung, S. K., Joo-Hyong, K., & Jaehwan, K. (2011). A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING*, 12(6), 1129-1141 .
- Jordan, E., & Balmain, K. (1968). *Electromagnetic waves and radiating systems*. New Jersey: Prentice-Hall, INC.
- López, M. (2020). *Dispositivos de obtención de energía a*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Muscat, A., Battacharya, S., & Zhu, Y. (2022). Electromagnetic Vibrational Energy Harvesters: A Review. *Sensors*, 1-17.

- Ordoñez, V., Romeu, J., Liravi, H., Jiménez, S., & Arcos, R. (2019). Análisis experimental de las vibraciones inducidas por flujo en válvulas de control de agua potable. *Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 1-8.
- Revibe energy. (04 de Julio de 2023). *Revibe Energy*. Obtenido de Revibe Energy: <https://revibeenergy.com/>
- Rodríguez, C. (Junio de 2020). *CARACTERIZACIÓN DE UNA VÁLVULA HIDRÁULICA DE DN50 (2") SEGÚN NORMA UNE-EN 1074-5 "Válvulas de control"*. Valencia, España: Universidad politécnica de Valencia.
- Valco industrial. (04 de Julio de 2023). *Valco industrial*. Obtenido de Valco industrial: <http://valcoindustrial.com.mx/2017/05/19/caracteristicas-bridas-ansi-150-libras/>
- Zhenwei, L., Xu, W., Ran, Z., & Liuping, W. (25 de Junio de 2018). A Dimensionless Parameter Analysis of a Cylindrical. *energies*, 1-21.

ANEXOS

Anexo A



Anexo B

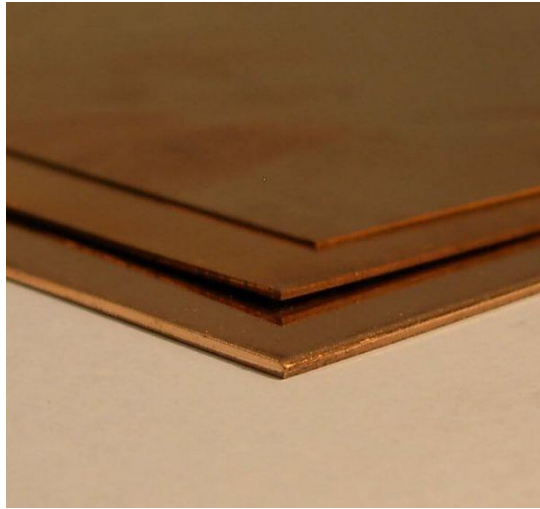


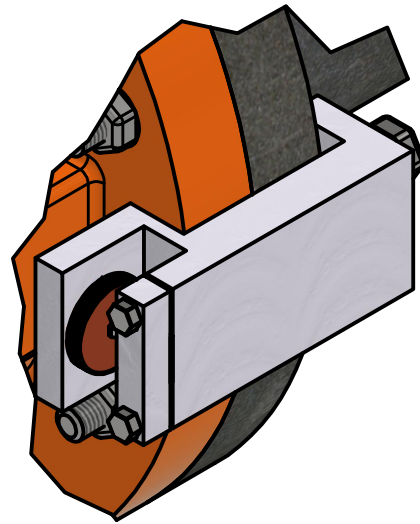
Figura B-1 Lámina de bronce fosforoso. (Fuente: Fechtner modellbau, 2023)



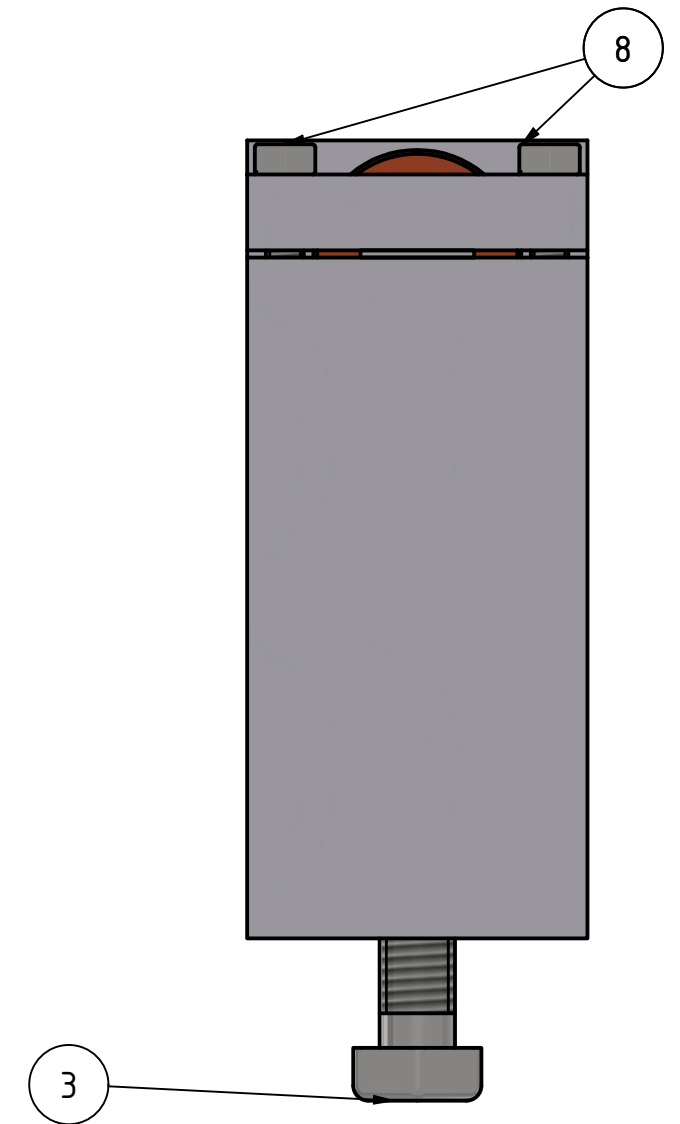
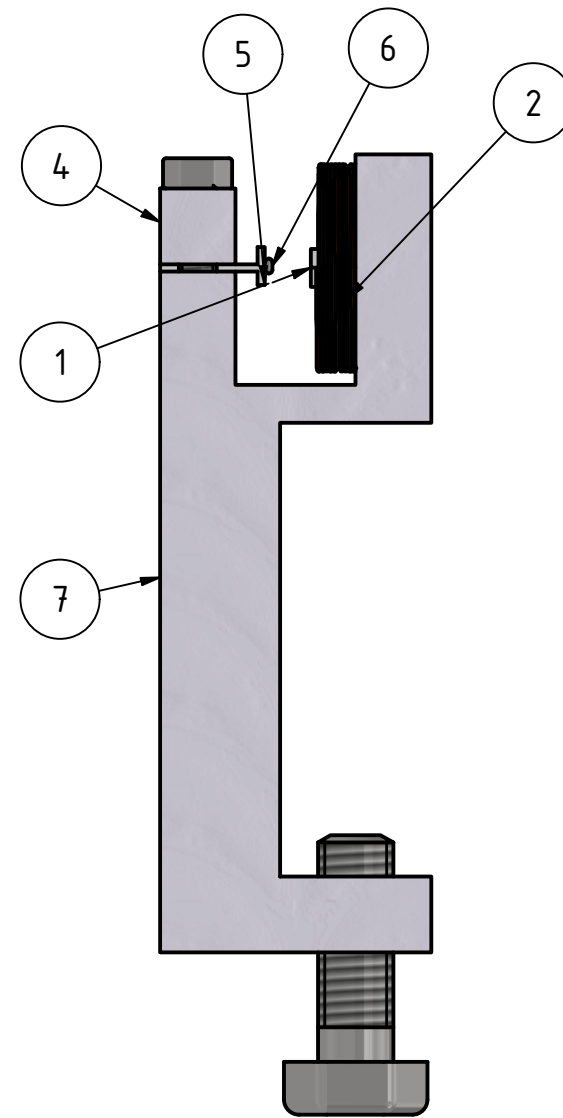
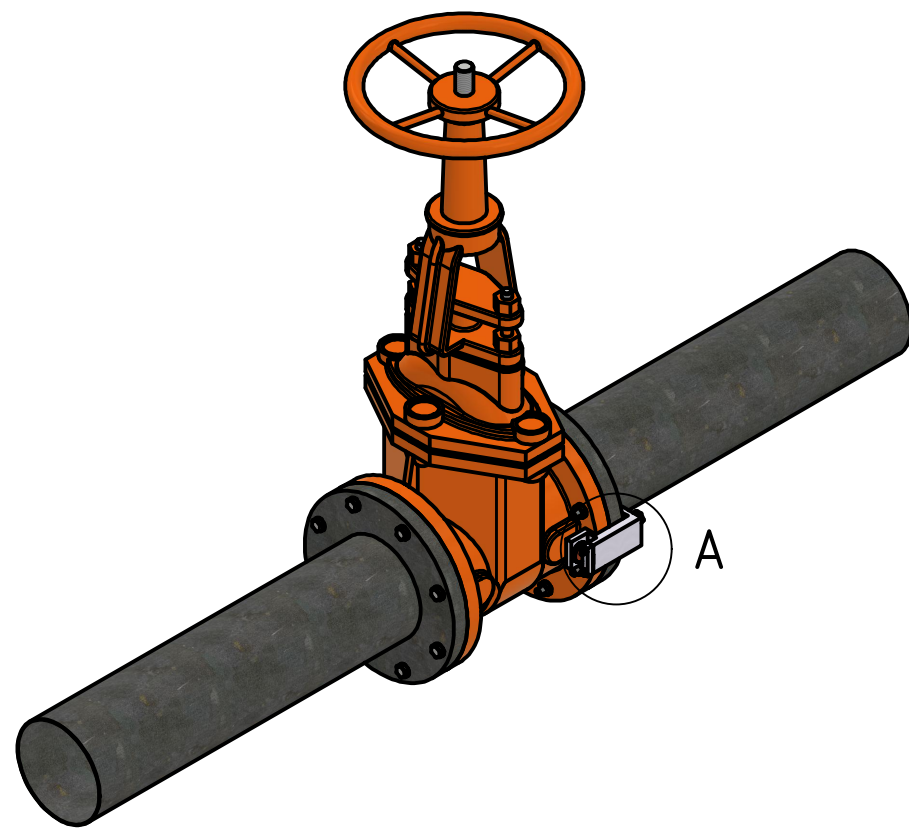
Figura B-2 Carrete de alambre de cobre esmaltado: (Fuente: Racores motores y repuestos, 2023)

Anexo C (Planos)

A (1 : 2)

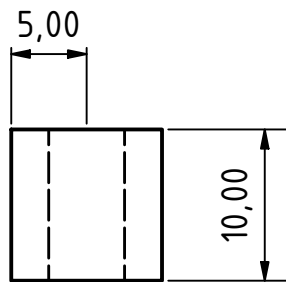
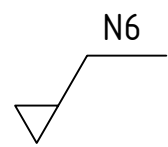
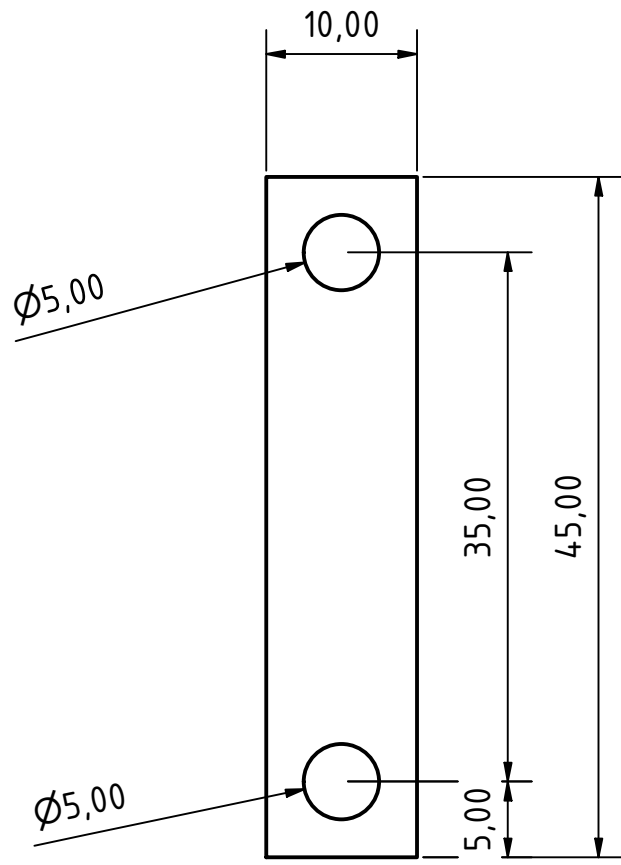


Montaje (1 : 10)

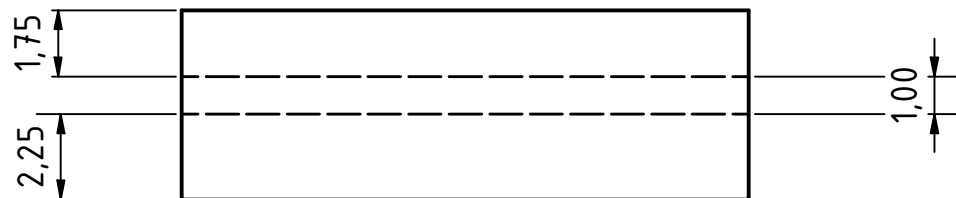
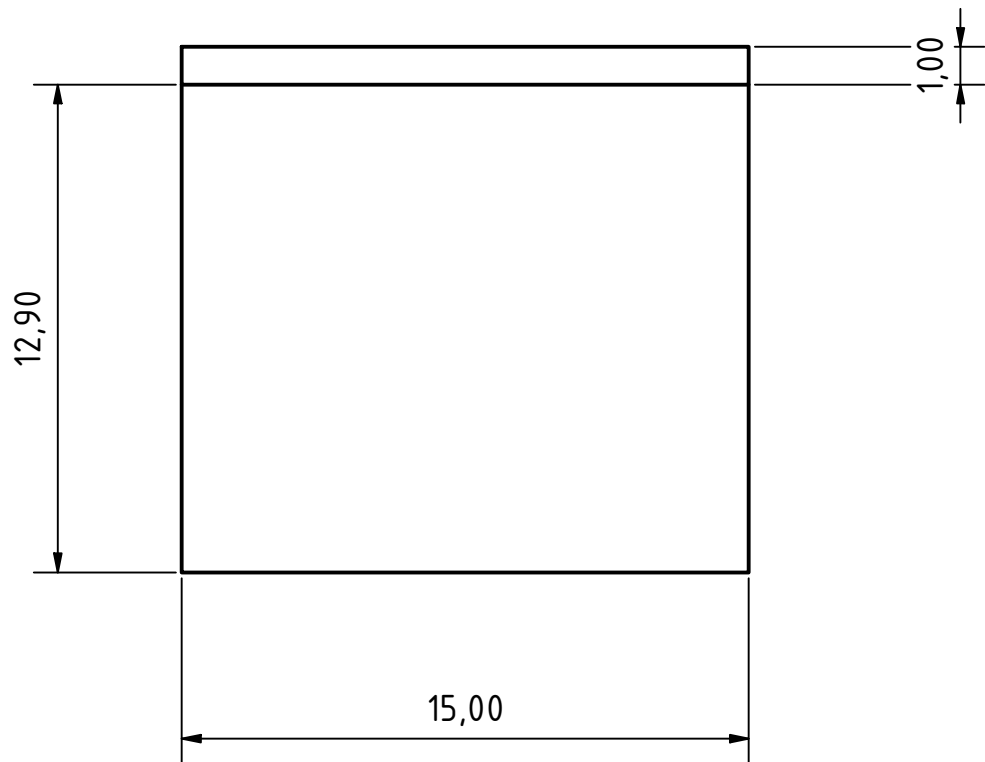
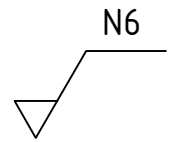


LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL	OBSERVACIONES
1	1	Nucleo bobina	Silicio laminado	
2	1	Bobina	Cobre esmaltado	500 espiras, 5mm de espesor y calibre 0,4
3	1	Sujetador	Acero	M10x1,5
4	1	Sujetador viga	Aluminio	
5	1	Viga en cantilever	Bronce fosforoso	
6	1	Iman	NdFeb	3x2x1 mm
7	1	Estructura	Aluminio	
8	2	Perno	Acero	M5x0,8

EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib.	Estévez Jairo	Escala: 1 : 1
		Dis.		
		Rev.	Dr. Solavatore Reina	
Generador electromagnético para ensamblar en una válvula de control		DIM: 01		Fecha: 19/08/2013

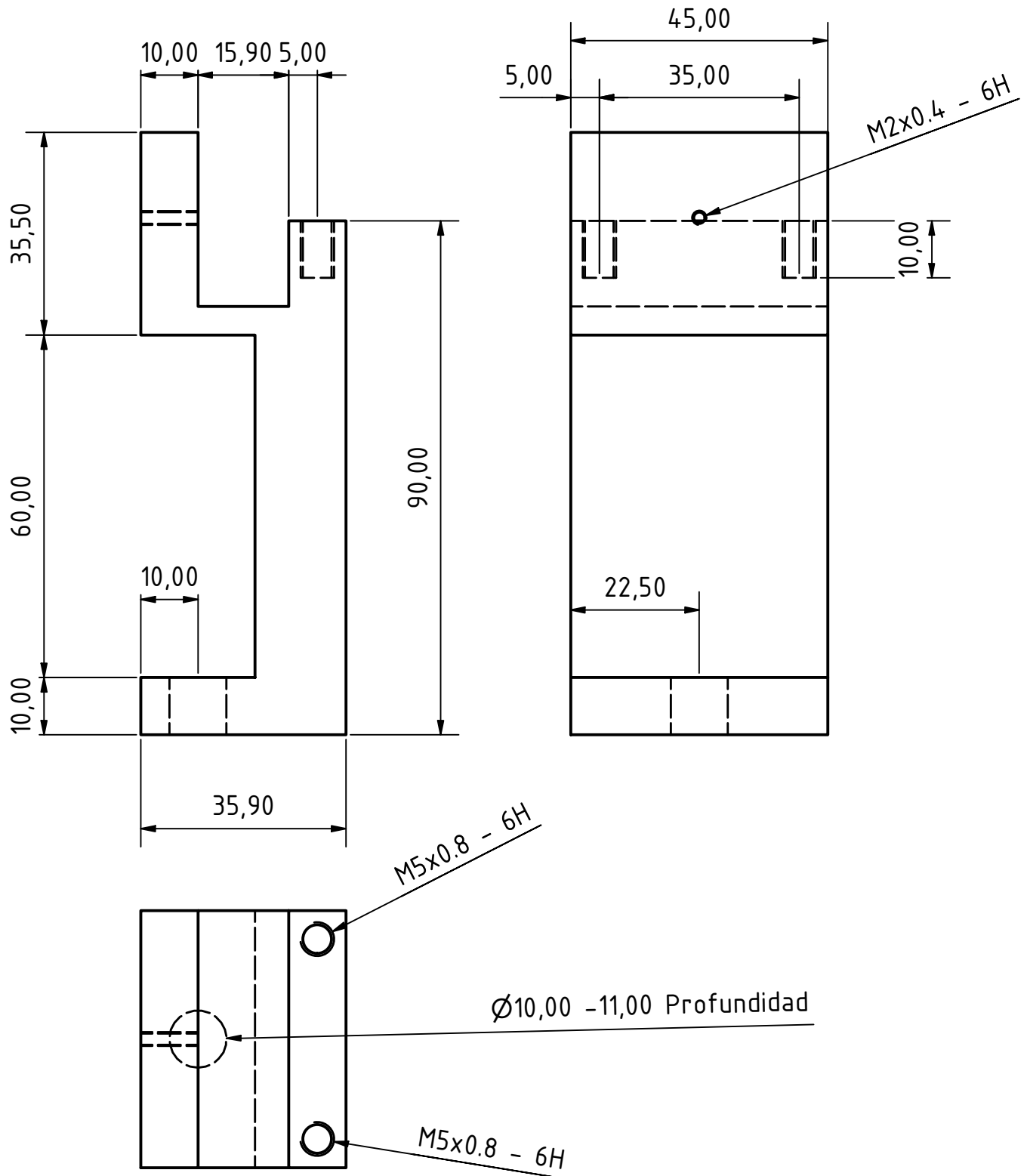


EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib.	Jairo Estévez	Escala: 2 : 1
		Dis.		
		Rev.	Dr. Salvatore Reina	
Sujetador de la viga en cantiléver		DIM: 01 - 101		Fecha: 19/08/2023

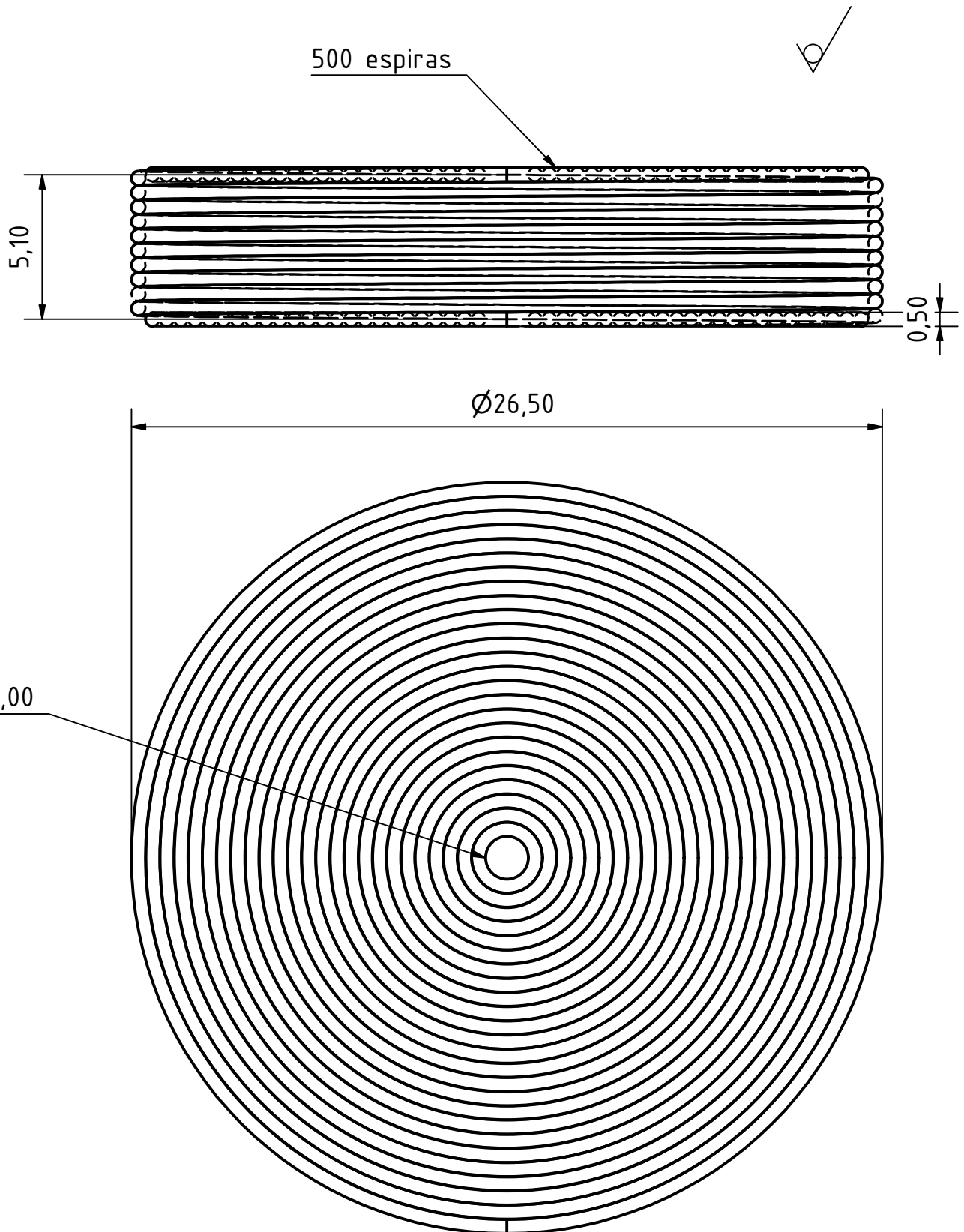


EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib.	Jairo Estévez	Escala: 5 : 1
		Dis.		
		Rev.	Dr. Salvatore Reina	
Viga en cantiléver		DIM: 01 - 102		Fecha: 19/08/2023

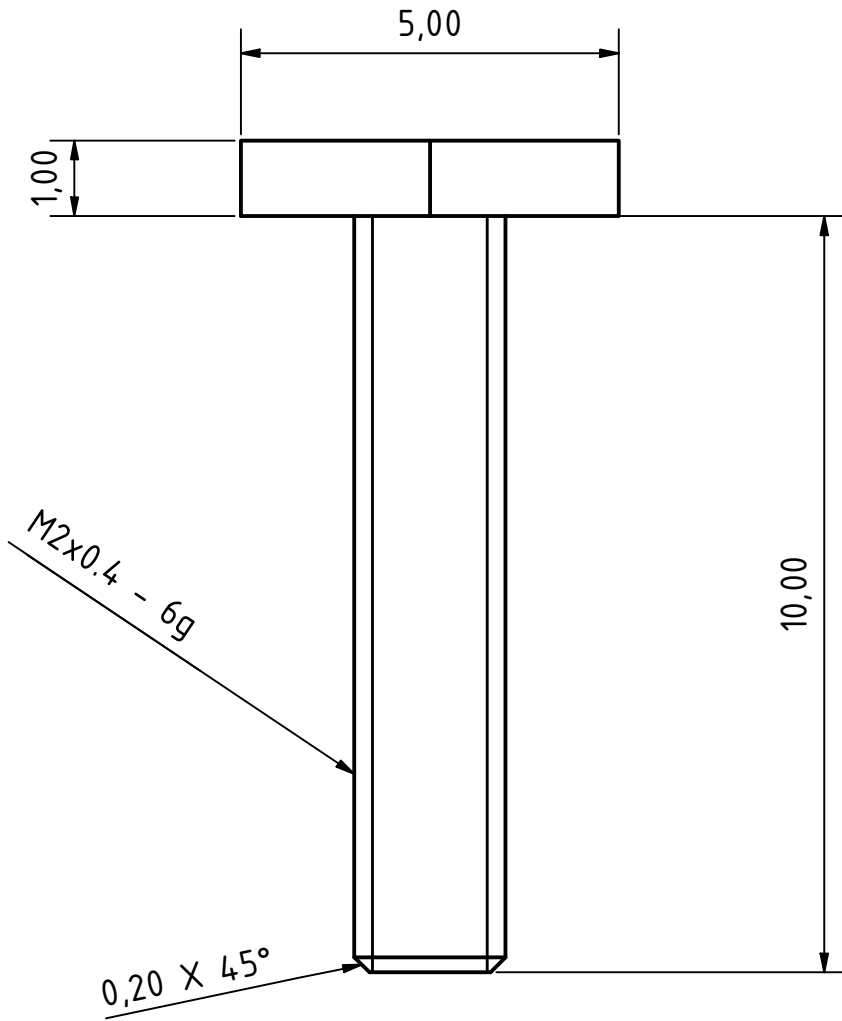
N6



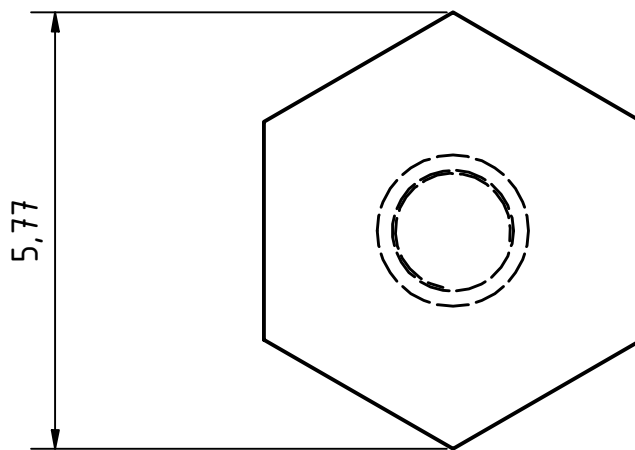
EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib: Jairo Estévez	Escala:
		Dis:	1 : 1
		Rev: Dr. Salvatore Reina	Fecha:
Estructura		DIM: 01 - 103	19/08/2023



EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib.	Jairo Estévez	Escala: 2 : 1
		Dis.		
		Rev.	Dr. Salvatore Reina	
Bobina		DIM: 01 - 104		Fecha: 19/08/2023



N 7



EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib.	Jairo Estévez	Escala: 10 : 1
		Dis.		
		Rev.	Dr. Salvatore Reina	
Núcleo de la bobina		DIM: 001 - 105		Fecha: 14/08/2023

ANEXO D

Código de programación en Matlab

```
clear,clc
%Generador de energia electrica a partir de vibraciones no senosoidales
%variacion del largo de la viga en cantiléver
%Datos
%Constantes de la bobina
N=500;%[] % Numero de espiras
%
Ca=0.4e-3;%[m] %Calibre del alambre
De=2e-3;%[m] % Diametro para de la espira
%
lin=5e-3;%[m] % largo del bobinado
nv=lin/Ca;%[] %Numero de espiras en la vuelta
v=N/nv;%[] % Vueltas en la espira
L=pi()*(De+Ca+(v-1)*2*Ca)*nv;%[m] % Longitud del alambre
S=pi()*(De/2)^2;%[m2] % Area de la bobina
B=(264e-3);%[T] % Campo magnético
R_load=500;%[ohm] % Resistencia de carga
%
R_coil=0.136*L;% [ohm] % Resistencia del alambre
miu=7000*pi()*4e-7;%[H/m] % Permeabilidad relativa del núcleo
%Constantes de la viga en cantilever
ro=8800;%[Kg/m3] % Densidad
E=110e6;%[Pa] % Elasticidad
%
b=10e-3;%[m] % Ancho
h=2e-3;%[m] % Alto
%
l=linspace(0.1e-3,5e-3);%[m] % Largo
%Constantes de trabajo de la fuerza vibracional
%
f=3800;%[Hz] % Fecuencia
A=0.0005;
A1=A*9.81;% [m/s2] % Acelación máxima del sistema
%
M=0.04;% [Kg] % Masa de un iman NdFeB
m=ro*l*b*h;% [Kg] % Masa de la viga en cantilever
%Calculos
%Masa equibalente del sistema
meq=M+0.23*m;% [Kg] % Masa equivalente del sistema
%Elasticidad de la viga en cantilever
I=b*h^3/3;% Inercia del sistema
K=[];
for i=1:length(l)
    K(i)=3*E*I/l(i)^3;%Elasticidad del sistema
end
i=0;
%Amortiguamiento
phi=B*S;%Flujo magnetico
Lcoil=N^2*miu*S/lin;%Inductancia en el alambre
```

```

C=sqrt(((N*phi*L)^2*(R_load+R_coil)/((R_load+R_coil)^2-
Lcoil^2))^2+((N*phi*L)^2*Lcoil/((R_load+R_coil)^2-
Lcoil^2))^2);%Amortiguamiento del sistema
%Igualdades para la solucion
omega=2*pi()*f; %Frecuencia del sistema
omega_n=[]; %Frecuencia natural
r_r=[];
C_c=[];
dseta=[];
for i=1:length(K)
    omega_n(i)=sqrt(K(i)/meq(i)); %Frecuencia natural
    r_r(i)=omega/omega_n(i);
    C_c(i)=2*meq(i)*omega_n(i);
    dseta(i)=C/C_c(i);
end
i=0;
%Resultado del sistema
n1=[1,3,5,7];
t=linspace(0,1.3e-3);
a0=meq*A1/(2*f);
a=[];
fi=[];
for j=1:length(K)
    for i=1:length(n1)
        a(j,i)=2*meq(j)*A1/(n1(i)^2*f*pi()^2);
        fi(j,i)=atan(2*n1(i)*dseta(j)*r_r(j)/(1-r_r(j)^2));
    end
end
Xp=[];
for j=1:length(K)
    for i=1:length(t)
        Xp(j,i)=a0(j)/2-a(j,1)*cos(n1(1)*omega*t(i)-
fi(j,1))/(K(j)*sqrt((1-r_r(j)^2)^2+(2*dseta(j)*r_r(j)^2))-
a(j,2)*cos(n1(2)*omega*t(i)-fi(j,2))/(K(j)*sqrt((1-
r_r(j)^2)^2+(2*dseta(j)*r_r(j))^2))-a(j,3)*cos(n1(3)*omega*t(i)-
fi(j,3))/(K(j)*sqrt((1-r_r(j)^2)^2+(2*dseta(j)*r_r(j))^2));
    end
end
i=0;
%Potencia maxima del sistema
for i=1:length(K)
    Yo(i)=max(Xp(i,:))-min(Xp(i,:));
    Pmax(i)=meq(i)*Yo(i)^2*omega^3/(4*dseta(i));
end
plot(1*1e3,Pmax*1e3)
xlabel('Distancia de la viga en cantilever [mm]')
ylabel('Potencia generada [mW]')
%title('(c)')%Colocar la variable alterada

```

Código para la variación de la amplitud

```
clear,clc
%Generador de energia electrica a partir de vibraciones no senosoidales
%Datos
%Constantes de la bobina
N=500;%[] % Numero de espiras
%
Ca=0.4e-3;%[m] %Calibre del alambre
De=2e-3;%[m] % Diametro para de la espira
%
lin=5e-3;%[m] % largo del bobinado
nv=lin/Ca;%[] %Numero de espiras en la vuelta
v=N/nv;%[] % Vueltas en la espira
L=pi()*(De+Ca+(v-1)*2*Ca)*nv;%[m] % Longitud del alambre
S=pi()*(De/2)^2;%[m2] % Area de la bobina
B=264e-3;%[T] % Campo magnético
R_load=500;%[ohm] % Resistencia de carga
%
R_coil=0.136*L;% [ohm] % Resistencia del alambre
miu=8.8e-3;%[H/m] % Permeabilidad del aire
%Constantes de la viga en cantilever
ro=8800;%[Kg/m3] % Densidad
E=110e6;%[Pa] % Elasticidad
%
b=15e-3;%[m] % Ancho
h=2e-3;%[m] % Alto
%
l=0.842e-3;%[m] % Largo
%Constantes de trabajo de la fuerza vibracional
%
f=3800;%[Hz] % Fecuencia
A=linspace(0.0003,0.0007);% [m/s2] % Aceleración máxima del sistema
A1=A*9.81;
%
M=0.04;% [Kg] % Masa de un iman NdFeB
m=ro*l*b*h;% [Kg] % Masa de la viga en cantilever
%Calculos
%Masa equivalente del sistema
meq=M+0.23*m;% [Kg] % Masa equivalente del sistema
%Elasticidad de la viga en cantilever
I=b*h^3/3;% Inercia del sistema
K=3*E*I/l^3;%Elasticidad del sistema
%Amortiguamiento
phi=B*S;%Flujo magnetico
Lcoil=N^2*miu*S/lin;%Inductancia en el alambre
C=sqrt(((N*phi*L)^2*(R_load+R_coil)/((R_load+R_coil)^2-
Lcoil^2))^2+((N*phi*L)^2*Lcoil/((R_load+R_coil)^2-
Lcoil^2))^2);%Amortiguamiento del sistema
%Igualdades para la solucion
omega=2*pi()*f;%Ffrecuencia del sistema
omega_n=sqrt(K/meq); %Frecuencia natural
r_r=omega/omega_n;
C_c=2*meq*omega_n;
```

```

dseta=C/C_c;
%Resultado del sistema
n1=[1,3,5];
t=linspace(0,1.3e-3);
a0=meq*A1/(2*f);
a=[];
fi=[];
for j=1:length(A1)
    for i=1:length(n1)
        a(j,i)=2*meq*A1(j)/(n1(i)^2*f*pi()^2);
    end
end
for i=1:length(n1)
    fi(i)=atan(2*n1(i)*dseta*r_r/(1-r_r^2));
end

Xp=[];
for j=1:length(A1)
    for i=1:length(t)
        Xp(j,i)=a0(j)/2-a(j,1)*cos(n1(1)*omega*t(i)-fi(1))/(K*sqrt((1-
r_r^2)^2+(2*dseta*r_r^2))-a(j,2)*cos(n1(2)*omega*t(i)-fi(2))/(K*sqrt((1-
r_r^2)^2+(2*dseta*r_r)^2))-a(j,3)*cos(n1(3)*omega*t(i)-
fi(3))/(K*sqrt((1-r_r^2)^2+(2*dseta*r_r)^2));
    end
end
i=0;
%Potencia maxima del sistema
for i=1:length(A1)
    Yo(i)=max(Xp(i,:))-min(Xp(i,:));
    Pmax(i)=meq*Yo(i)^2*omega^3/(4*dseta);
end
plot(A,Pmax*1e3)
xlabel('Amplitud [g]')
ylabel('Potencia generada [mW]')
%title('Potencia vs Amplitud')

```