

# TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS

SUPERIORES DE COACALCO

SIMULACIÓN Y DESARROLLO DE UN CILINDRO DE POTENCIA CON PISTÓN DE NEODIMIO Y FERRITA IMPLEMENTANDO EL PRINCIPIO DEL CAÑÓN DE GAUSS

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

## MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA INDUSTRIAL

PRESENTA:

Martínez Olvera Luis Alberto

Matrícula No. 102220043

Director: Dr. Roberto Ademar Rodríguez Díaz

Coacalco de Berriozábal Estado de México, Agosto, 2024.



Carta Autorización de impresión de Tesis o Tesina FORMATO FO-TESCo-123

Versión: 4 Pág.: 1 de 3



Coacalco, Estado de México a Agosto 22 agosto del 2024

## CARTA AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

Nombre del/de la estudiante: LUIS ALBERTO MARTÍNEZ OLVERA Candidato/a al (posgrado: MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL P R E S E N T E.

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado vigentes en el Tecnológico Nacional de México y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el Comité Tutorial le hizo al respecto de su <u>TESIS</u> titulada:

## "<u>SIMULACIÓN Y DESARROLLO DE UN CILINDRO DE POTENCIA CON PISTONES DE NEODIMIO Y</u> FERRITA IMPLEMENTANDO EL PRINCIPIO DEL CAÑON DE GAUSS"

Comunicó a usted que está Subdirección concede su autorización para que proceda a la impresión de la misma.

UDIOS SUD ATENTAMENTE "Ciencia, Técnica-Progreso" MTRO. LEONCIO DAVID ROSADO CRUZ SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALESCIÓBIDE ESTUDIOS PROFESIONALES "R"

TODA COPIA EN PAPEL ES UN "DOCUMENTO NO CONTROLADO" A EXCEPCIÓN DEL ORIGINAL

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN AV SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN MEDIA SUPERIOR Y NORMAL DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TE TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO ww

AV. 16 DE SEPTIEMBRE No. 54 COACALCO DE BERRIOZÁBAL, MÉXICO TELS. (0155) 2159-4324, 2159-4325, 2159-4468 www.tecnologicodecoacalco.edu.mx

## Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a quienes han formado parte de esta etapa en mi vida y al cumplimiento de este importante objetivo. Primeramente, le agradezco a dios por darme la fuerza, la voluntad y la oportunidad de hacer posible este logro y por conservar a mi lado a mis seres amados pese a las dificultades presentes en el mundo actual, Agradecer a mis Padres que me han aconsejado, apoyado e impulsado y me han dado todo aquello que nadie más podría hacerlo, con todo mi Amor, admiración y agradecimiento, cada logro mío es dedicado siempre a ellos. "Los Amo".

A mis hermanos Alfredo y Aide que respeto, admiro y que me han regalado tantos grandes momentos y enseñanzas a lo largo de mi vida, a mi amada Lili que siempre ha creído en mí, me alienta y me motiva a ser mejor cada día, a mi Hermosa Rafaela que me mira desde el cielo, ha hecho en mi una mejor persona.

Ofrezco un profundo reconocimiento a mi Asesor de tesis, el Dr. Ademar, gracias por su profesionalismo y su gran calidad humana, por asesorarme e impulsarme en todo momento a trabajar duro y esforzarme en el desarrollo de este proyecto, a mis asesores Mtro. Cardona y Mtro. Ricardo por su orientación y apoyo, ha sido un honor y un privilegio trabajar bajo su tutela.

Finalmente le extiendo un enorme agradecimiento al Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco, que ha sido mi hogar por 15 años y me ha permitido desarrollarme como profesional y también como un gran ser humano. Donde quiera que vaya siempre lo llevaré en el corazón.

#### RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó el análisis, modelado, simulación y diseño de un cilindro de potencia electromagnética utilizando el principio del cañón de Gauss, esto con el fin de proponer una alternativa a la generación de movimiento mecánico traslacional empleando la energía que puede almacenar y expulsar de forma inmediata un cañón de Gauss. Por tal motivo se realizaron los modelados en diagramación de bloques en dominio del tiempo de los subsistemas que conforman al prototipo y se evaluaron las simulaciones de las variables más determinantes para el estudio y análisis del sistema, Desplazamiento, Velocidad, Aceleración y corriente eléctrica. Una vez realizadas las simulaciones se presenta la etapa experimental del prototipo inicial para comprender y justificar las curvas de respuesta obtenidas en el proceso de simulación, se trabajó con softwares especializados de ingeniería en el área de simulación y control, así como de diseño de circuitería eléctrica y de diseño de elementos mecánicos. Los resultados obtenidos en dicho prototipo experimental cumplen satisfactoriamente la dinámica de respuesta de las simulaciones dando como resultado un prototipo funcional.

ÍNDICE DE FIGURAS	4
INTRODUCCIÓN	7
ANTECEDENTES	9
I FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
TEORÍA ELECTROMAGNETICA	
Campo Eléctrico	12
Ley de Gauss	13
Campo Magnético	14
Principio de Superposición del Campo magnético	15
Campo Magnético creado por una corriente eléctrica	15
Ley de Ampere	
Campo Magnético generado en el interior de un solenoide	
Corriente eléctrica	17
Bobina o Inductor	
Electroimán	
Capacitancia	19
II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
III OBJETIVOS	23
Objetivo General	23
Objetivos específicos	23
IV JUSTIFICACIÓN	24
V HIPÓTESIS	25
VI METODOLOGÍA	26
Tipo de investigación	26
Alcances de la Investigación	27
Limitaciones de la Investigación	28
Diseño de la investigación	28
Resumen	
VII MODELADO Y SIMULACIÓN	
Circuito de carga y descarga del Cañón de Gauss	
Modelado y simulación del sistema Híbrido (Mecánico – Eléctrico)	40

## <u>ÍNDICE</u>

Acoplamiento Electromecánico	.41
Sistema Mecánico. (Masa-amortiguador)	.41
VIII DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE EXPERIMENTACIÓN	.43
Cálculo de la Masa del pistón y vástago	.43
Cálculo del trabajo mecánico	.45
Cálculo de coeficientes de Fricción	.46
Determinación de la Inductancia	.48
Resistencia de la Bobina	.50
Diseño del prototipo en SolidWorks	51
Materiales necesarios para realizar el prototipo de experimentación	54
IX EXPERIMENTACIÓN	.57
1era etapa de pruebas	57
2da etapa de pruebas	.62
3era etapa de pruebas	64
X RESULTADOS	.67
XI CONCLUSIONES	73
XII TRABAJOS FUTUROS	.74
XII BIBLIOGRAFÍA	.75

## ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS	6
Figura 1. Efectos del campo eléctrico (https://concepto.de/campo-electrico)	12
Figura 2. Densidad de Flujo Ds en P debido a Q (Hayt W. 2006)	13
Figura 3. Sentido del Campo magnético creado por una carga puntual (ttps://www.fisicalab.com/apartado/campo-magnetico-creado-por-carga-puntual)	14
Figura 4. Representación esquemática de la Ley de Bio-Savart	15
Figura 5. Campo magnético en el interior de un solenoide (https://www.fisicalab.com)	17
Figura 6. Símbolo del Inductor (https://www.unicrom.com)	18
Figura 9. Modelo Dinámico General del Sistema Cilindro electromagnético	29
Figura 10. Subsistema 1 Cilindro electromagnético	29
Figura 11. Subsistema 2 Cilindro electromagnético	30
Figura 12. Subsistema 3 Cilindro electromagnético	30
Figura 13. Circuito de Capacitores en Paralelo con fuente de 24 volts (Circuito abierto)	33

Figura 14. Simulación del Circuito de Capacitores en Paralelo con fuente de 24 volts (Carga o los capacitores)	de 34
Figura 15. Circuito de Capacitores en Paralelo con fuente de 24 volts, máximo de corriente	34
Figura 16. Circuito de Capacitores en Paralelo con fuente de 12 volts, máximo de corriente	35
Figura 17. Circuito con Super Capacitores con fuente de 5 volts	35
Figura 18. Simulación de Circuito con Super Capacitores con fuente de 5 volts	36
Figura 19. Simulación de Circuito con Super Capacitores con fuente de 5 volts, descenso de corriente	36
Figura 20. Modelo Sistema R-C	37
Figura 21. Simulación Sistema R-C (Capacitores de 10,000 µF)	37
Figura 22. Gráfica de respuesta i(t) Sistema R-C (Capacitores de 10,000 μF)	38
Figura 23. Simulación Sistema R-C (Super Capacitores de 3F)	39
Figura 24. Gráfica de Respuesta i(t) Sistema R-C (Super Capacitores de 3F)	39
Figura 25.Circuito Eléctrico R-L	40
Figura 26. Diagrama de bloques Sistema Eléctrico en cascada R-C y R-L	41
Figura 27. Diagrama de bloques Sistema Mecánico	42
Figura 28. Diagrama de bloques general del proyecto	43
Figura 29. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas en el pistón	46
Figura 30. Dimensiones del cilindro	48
Figura 31. Cilindro de acrílico	51
Figura 32. Tapas laterales del cilindro	52
Figura 33. Pistón de Neodimio	52
Figura 34. Vástago de acrílico	53
Figura 35. Guías de Plástico ABS	53
Figura 36. Cilindro de acrílico	55
Figura 37. Alambre magneto calibre 23	55
Figura 38. Bobina 1 realizada	56
Figura 39. Bobina 2 realizada	56
Figura 40. Conexión del circuito eléctrico del cañón de Gauss	57
Figura 41. Sensor Ultrasónico HC-SR04 y Controlador Arduino 1	58
Figura 42. Cilindro con pistón y sensor ultrasónico	58
Figura 43. Adquisición de posición y velocidad en tiempo real	59
Figura 44. Posición y velocidad con 5 V de entrada	59
Figura 45. Posición y velocidad con 12 V de entrada	60
Figura 46. Posición y velocidad con 16 V de entrada	60

Figura 47. Posición y velocidad con 24 V de entrada6	30
Figura 48. Posición y velocidad con 30 V de entrada6	31
Figura 49. Experimentación con pistón de doble imán de ferrita6	32
Figura 50. Posición y velocidad con 5 V de entrada6	32
Figura 51. Posición y velocidad con 12 V de entrada6	33
Figura 52. Posición y velocidad con 16 V de entrada6	33
Figura 53. Posición y velocidad con 24 V de entrada6	33
Figura 54. Posición y velocidad con 30 V de entrada6	34
Figura 55. Pistón de doble imán de Neodimio6	34
Figura 56. Experimentación con pistón de doble imán de neodimio6	35
Figura 57. Posición y velocidad con 5 V de entrada6	35
Figura 58. Posición y velocidad con 12 V de entrada6	35
Figura 59. Posición y velocidad con 16 V de entrada6	36
Figura 60. Posición y velocidad con 24 V de entrada6	36
Figura 61. Posición y velocidad con 30 V de entrada6	36
Figura 62. Simulación del desplazamiento del pistón6	37
Figura 63. Simulación de la velocidad del pistón6	37
Figura 64. Simulación de la aceleración del pistón6	38
Figura 65. Simulación de la velocidad del pistón con 5 capacitores en el cañón de Gauss6	38
Figura 66. Simulación de la velocidad del pistón con 5 capacitores en el cañón de Gauss6	39
Figura 67. Comparativa de Voltaje-Velocidad entreel pistón de Neodimio y Ferrita7	′1
Figura 68. Ensamble del Pistón Electromagnético7	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Relación Voltaje – Velocidad del pistón.	61
Tabla 2 Relación Voltaje – Velocidad del pistón (Pistón de ferrita)	64
Tabla 3 Relación Voltaje – Velocidad del pistón (Comparación)	70
Tabla 4 Comparación cantidad de elementos	72

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación hace referencia a la generación de energía mecánica traslacional aprovechando los efectos de acumular y liberar la energía electromagnética producida en un cañón de Gauss.

Según Cheng (1998) cuando una carga eléctrica se encuentra en movimiento se crea un campo eléctrico y magnético a su alrededor, dicho campo ejerce una fuerza sobre cualquier otra carga que se encuentre en su radio, a esta fuerza se le denomina fuerza electromagnética, por tanto es evidente que para generar este tipo de energía se requiere de una circulación de corriente sobre un conductor, mientras está sea más grande la fuerza generada será mayor. Si se almacenan grades cantidades de esta fuerza para posteriormente liberarse puede ser aprovechada para impulsar un pistón y crear el efecto de movimiento lineal de vaivén indispensable para proporcionar energía mecánica en diversos mecanismos utilizados en el sector industrial y aeroespacial.

La finalidad de esta investigación es comprender la relación de la fuerza electromagnética producida con la cantidad de corriente suministrada, de modo que se pueda determinar la forma adecuada de producir grandes cantidades de energía electromagnética con pequeñas cantidades de corriente eléctrica suficiente para desplazar una carga de manera ágil y eficiente, combinando fuerza y velocidad en la salida de un cilindro de potencia.

Se pretende realizar una metodología de investigación, documentación de las teorías que incursionan en este efecto, así como modelado con ecuaciones diferenciales y simulaciones del comportamiento de las variables de interés (Fuerza electromagnética, Corriente suministrada) y experimentación, así como registro de resultados, se debe abordar de esta forma ya que es necesario modelar el sistema para determinar la respuesta de comportamiento del sistema y la relación de variables para determinar las técnicas de control a emplear antes de la construcción del sistema.

Los objetivos principales de esta investigación se basan en fusionar la velocidad de salida que proporcionan los sistemas neumáticos y la fuerza que producen los sistemas hidráulicos, ambos en un solo dispositivo (Cilindro de potencia electromagnética) que genere energía mecánica aprovechable en diversos procesos industriales y aeroespaciales. De igual forma se pretende con esto reducir los componentes que influyen en la generación de movimiento lineal presentes en los sistemas neumáticos e hidráulicos, simplificando la instalación, mantenimiento y costes de

implementación, así como el eliminar todo uso de fluidos de potencia (aceites) que se convierten en agentes potenciales de contaminación al medio ambiente una vez que son desechados.

#### ANTECEDENTES

#### Antecedentes Históricos

A lo largo de la historia, el ser humano ha estado constantemente en la búsqueda de soluciones a distintos problemas en el ámbito social e industrial, incorporando innovaciones y descubrimientos que faciliten los procesos de manufactura y mejoren la calidad de vida de la sociedad. Unos de estos descubrimientos revolucionarios ha sido el Electromagnetismo, desde la época antigua los chinos comenzaron a utilizar el magnetismo aplicado en la brújula y este tomó gran relevancia a inicios del año 1100 en las embarcaciones europeas. Los primeros trabajos relacionados al electromagnetismo fueron realizados por Oersted en 1820, el cual descubrió como una aguja magnética sufría cambios en su posición al incidir una corriente eléctrica cercana, de esta forma estableció la relación que mantiene la electricidad y el magnetismo, más tarde gracias a este descubrimiento, se inventó el electroimán que hoy en día es ampliamente utilizado en los procesos industriales para controlar apertura y cierre de válvulas. En ese mismo año, Ampere al enterarse del descubrimiento de Oersted establece la teoría de la electroinámica, útil para el análisis de circuitos eléctricos hoy en día.

En el mismo año de 1820, el científico Johann S. C, Schewigger inventó el galvanómetro, posteriormente para 1821 Faraday crea el primer motor eléctrico apoyándose de los trabajos experimentales de Ampere y La Rive. En cuanto al principio del cañón de Gauss, este fue inventado y patentando por Kristian Birkeland en 1904, y para 1933 se realizaron modificaciones para ser utilizado en aplicaciones bélicas sin tener el éxito deseado por su alta inestabilidad. En la actualidad se investiga para ser aplicado en aceleradores de partículas e incluso en sistemas de propulsión de transbordadores espaciales, siendo un prototipo en desarrollo aún.

#### Antecedentes Investigativos

#### Antecedentes de Campo

Jiménez García (2015) en su trabajo titulado Principios del Pistón Electromagnético, se pretende aplicar a la industria automotriz, principalmente en los automotores, tiene como objetivo a futuro que sea implementado a motores y maquinaria, de modo que reemplace los émbolos de combustión por émbolos electromagnéticos, de esta forma se reduce el índice emisiones de CO2. Se realizó un estudio sobre la estadística de la población de Vehículos en México, determinado que el parque vehicular de autos inservibles será 39.72 millones presupuestado para el 2020, por tanto, se propuso la reutilización de estos modificando el motor de combustión interna de modo que sea remplazado por un motor impulsado con energía electromagnética. Se reporta que el proyecto está en fase de desarrollo, por lo cual no se tienen resultados precisos de la implementación y el impacto generado. Este antecedente es considerado para la presente investigación ya que pretende generar energía mecánica eficiente aplicado a un automotor usando electromagnetismo, por tanto, los objetivos son similares.

Flores Bernal y García Cova (2018), en su trabajo Pistón de Control Electromagnético tiene el objetivo de aplicarse a las máquinas de combustión interna, mediante el acoplamiento de dos campos electromagnéticos artificiales a un sistema biela-manivela, de modo que al implementarse se reduzca la emisión de gases contaminantes al ambiente emitidos por máquinas de combustión interna. Se diseñó y construyó el sistema de embobinado, modificando la forma del cuerpo del émbolo del cilindro y los pernos para generar mayor fuerza de atracción. Se aplicó un campo magnético a un cilindro hecho de bronce para generar la fuerza necesaria para accionar el sistema biela-manivela. Como resultado se obtuvo el torque deseado para accionar el sistema biela-manivela. Este antecedente fue considerado en la presente investigación ya que el objetivo es similar pero el método y la forma de generación de energía y potencia en el movimiento del émbolo será por otros medios.

Alarcón (2002) en su tesis de grado titulada Diseño y Construcción de un dispositivo para convertir Motor de Combustión interna en un motor electromagnético, que tiene como objetivo el modificar un motor de combustión interna de 3 cilindros apoyado de un proceso electromagnético que produzca trabajo mecánico hacia los pistones, esto gracias a la implementación de electroimanes que se activan de manera sincronizada mediante un circuito modulador compuesto por un temporizador 555 en operación monoestable, como resultado se obtuvo que al probar el motor con arranque inicial con dos baterías en serie este alcanzó una distancia de 40 metros con carga de 100 libras, desgraciadamente la corriente excedió el límite de los relés provocando que uno de ellos se dañara. Este antecedente es tomado en cuenta para este proyecto ya que los objetivos son similares pero la aplicación en el presente proyecto no está enfocada en motores de combustión interna y el proceso de generación de energía será de otro tipo.

## I FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos más relevantes en la investigación y que proporcionan herramientas necesarias para desarrollar el proyecto de investigación planteado.

## TEORÍA ELECTROMAGNETICA

### Campo Eléctrico

De acuerdo con Arenas G (2008). en la teoría del electromagnetismo existen dos tipos de campo, el eléctrico y el magnético, estos pueden transmitir energía y cantidad de movimiento que aunque las acciones y reacciones actúan sobre dos cuerpos no sean, en todo momento, exactamente iguales y opuestas, no hay violación de la conservación de la cantidad de movimiento.

Un campo eléctrico es una región en el espacio que determina la interacción con cargas eléctricas o cuerpos que están cargados mediante una fuerza eléctrica. Si se tienen cargas positivas se generan líneas de campo eléctrico que nacen de la propia carga y se distribuyen y extienden hacia fuera, en tanto si la carga es negativa las líneas de campo terminan en la propia carga, tal como se muestra en la figura 1. Si se induce una carga a dicha región del campo eléctrico está terminará experimentando una fuerza eléctrica con dirección y sentido.



Figura 1. Efectos del campo eléctrico (https://concepto.de/campo-electrico)

La intensidad de campo eléctrico se define como la fuerza que experimenta una carga de prueba estacionaria muy pequeña al colocarse en una región donde existe un campo eléctrico, su modelo matemático es el que se muestra en la fórmula 1:

$$E = F/q \tag{1}$$

Sus unidades en el sistema internacional están dadas en Volt sobre metro (V/m)

Ley de Gauss

La ley de Gauss establece que "el flujo de salida total del campo E a través de cualquier superficie cerrada en el espacio libre es igual a la carga total encerrada en la superficie, dividida por E0".

"La ley de Gauss es muy útil para determinar el campo E de distribuciones de carga con ciertas condiciones de simetría, tal como que la componente normal de la intensidad de campo eléctrico sea constante sobre una superficie cerrada." (Cheng D. 1998, p. 85)

La ley de Gauss en pocas palabras establece que el flujo eléctrico que circula a través de alguna superficie cerrada es proporcional a la carga encerrada por esa misma superficie como se aprecia en la figura 2. La expresión matemática es la siguiente:

$$\Psi = \oint Dsds \tag{2}$$



Figura 2. Densidad de Flujo Ds en P debido a Q (Hayt W. 2006)

Campo Magnético

Siempre que exista una carga en movimiento o una corriente eléctrica existirá un campo magnético a su alrededor, su principal característica es que posee dos polos, Norte y Sur, y sus líneas de campo siempre son cerradas ya que se desplazan de un polo a otro. En otras palabras, un campo magnético son cargas eléctricas en movimiento.

La capacidad que tiene un campo magnético en almacenar energía es mucho mayor que el campo eléctrico. Si una carga q se desplaza con una velocidad v está generará un campo magnético B cuya intensidad en un punto definido P se determina mediante la ecuación 3.

$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \left( \frac{(\vec{q} \times \vec{r})}{r^3} \right) \tag{3}$$

Donde µ es la permeabilidad magnética y depende del medio en el que se encuentre la carga. El sentido se puede determinar a través de la regla de la mano derecha, como se puede apreciar en la figura 3.



Figura 3. Sentido del Campo magnético creado por una carga puntual (ttps://www.fisicalab.com/apartado/campo-magnetico-creado-por-carga-puntual)

Principio de Superposición del Campo magnético.

"El campo magnético B producido por distintos medios en un punto en el espacio, es la suma vectorial de los campos magnéticos producidos por cada uno de ellos de manera individual", es decir:

$$\overrightarrow{B} = \overrightarrow{B} \ 1 + \overrightarrow{B} \ 2 + \overrightarrow{B} \ 3 + \dots + \overrightarrow{Bn}$$
<sup>(4)</sup>

Campo Magnético creado por una corriente eléctrica

Del mismo modo como una carga crea un campo eléctrico o una masa un campo gravitatorio, un elemento de corriente genera un campo magnético, de acuerdo con la ley de Bio-Savart que establece que "en cualquier punto P la magnitud de la intensidad de campo magnético que produce el elemento diferencial es proporcional al producto de la corriente, la magnitud del diferencial de longitud y el seno del ángulo formado entre el filamento y la línea que lo conecta con el punto P en donde se busca el campo. (Ver figura 4). La magnitud de la intensidad de campo magnético es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde el elemento diferencial al punto P. La dirección de la intensidad de campo magnético es normal al plano que contiene el filamento diferencial y a la línea dibujada desde el filamento hasta el punto P".

$$dH = \frac{(IdL)R}{4\pi R^3} \tag{5}$$

Las unidades de la intensidad de campo magnético H son A/m (Ampere/metro)



Figura 4. Representación esquemática de la Ley de Bio-Savart (Hayt W. 2006)

#### Ley de Ampere

La ley de Ampere determina que "la circulación del campo magnético a lo largo de una línea cerrada es equivalente a la suma algebraica de las intensidades de las corrientes que atraviesan la superficie delimitada por la línea cerrada, multiplicada por la permitividad del medio", tal como se define en la ecuación 6.

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = (\mu 0) (\sum I) \tag{6}$$

Mediante la ley de Ampere es posible determinar el campo magnético que generan las corrientes eléctricas cuando se producen ciertas condiciones y se elige una línea cerrada adecuada.

Campo Magnético generado en el interior de un solenoide

Se sabe que un solenoide es está conformado por un embobinado hueco que se encuentra dentro de un contenedor rectangular o cilíndrico, formando un bucle definido por un cierto número de espiras muy cercanas una de la otra. Cuando se hace circular una corriente eléctrica por dicho solenoide este crea un campo magnético que se determina por la suma individual de los campos magnéticos que generan cada una de las espiras del embobinado. En el interior del solenoide el campo magnético es muy intenso y constante en su módulo, dirección y sentido. (Ver figura 5).

La Magnitud del campo magnético que se genera en el interior de un solenoide por el que circula una corriente eléctrica se obtiene mediante la ecuación 7.

$$B = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{L} \tag{7}$$



#### Figura 5. Campo magnético en el interior de un solenoide (https://www.fisicalab.com)

#### Corriente eléctrica

La corriente eléctrica es el "movimiento o flujo libre de electrones a través de un conductor, debido a la presencia de un campo eléctrico que a su vez es originado por una diferencia de potencial" (Orellana y Nélida, 2017). De una forma más simple de comprender, la corriente eléctrica es arrastrar una carga de un punto a otro como lo haría normalmente una corriente agua arrastrando pequeñas partículas, para poder crear esta corriente de arrastre es necesario una diferencia de potencial eléctrico, es decir, someter a la carga a una fuerza que la impulse para desplazarse con libertad, por tanto, a mayor diferencia de potencial, mayor fuerza de circulación de los electrones.

De acuerdo con (Marín O. y Ortiz R. 2014). Si se tiene un campo eléctrico que es estable dentro de un conductor, en este caso, la carga se mueve en el vacío, la fuerza será estable y producirá una aceleración de la carga en dirección de la fuerza, caso contrario con los conductores metálicos que no están hechos de vacío, sino que internamente están compuestos de redes cristalinas con las cuales los electrones chocan perdiendo el rumbo estable y provocando desplazamientos cortos y lentos.

La corriente que circula a través de una sección transversal es la carga neta que fluye a través de un área por unidad de tiempo como se aprecia en la fórmula 8.

$$I = \frac{dQ}{dt} \tag{8}$$

Bobina o Inductor

Una bobina es un elemento pasivo de dos terminales que generan un flujo magnético cuando circula una corriente eléctrica, tiene la propiedad de almacenar energía en forma de campo magnético, se oponen a cambios bruscos de corriente entre sus terminales, de tal forma, las fluctuaciones de corriente se pueden manipular y evitar que un cambio repentino de la intensidad de corriente ocasione daños o desperfectos. Constan de un enrollado de hilo conductor sobre un núcleo de material ferromagnético. Todo cable por el cuál circula una corriente tiene a su alrededor un campo magnético, el sentido del flujo del campo magnético es determinado por la regla de la mano derecha. El símbolo de dicho elemento se presenta en la figura 6.



Figura 6. Símbolo del Inductor (https://www.unicrom.com)

La inductancia es el valor de la oposición de la bobina al paso de la corriente y se mide en Henrios (H), este valor depende de 3 condiciones fundamentales:

1.- A mayor número de vueltas de espira, mayor será la inductancia

2.- A mayor diámetro de las espiras mayor inductancia

3.- La Inductancia depende directamente de la longitud del cable de la bobina y del tipo de material del núcleo

#### Electroimán

De acuerdo con Álvarez Pulido (2010) en su trabajo Electroimanes, establece que un electroimán es un dispositivo electromecánico que tiene la peculiaridad de adquirir propiedades de tipo magnéticas cuando su bobina es atravesada por una corriente eléctrica. "Los imanes Permanentes sin generadores de energía y los electroimanes son transformadores de energía".

Su campo magnético no es natural, es producido por la circulación de corriente eléctrica sobre un embobinado enrollado a un material ferromagnético que forman el núcleo magnético. Al retirar la fuente eléctrica, desaparece el campo magnético inducido. Mientras más corriente se suministre, se incrementa la fuerza del electroimán, si esta corriente es muy elevada ocurre una saturación y es en el momento que el electroimán ya no puede aportar más potencia. Los tipos de bobina se presentan en la figura 7.



Fig. 7 Bobina con núcleo recto y circular (Álvarez Pulido, 2010)

## Capacitancia

La capacitancia se define como la relación entre la magnitud de la carga eléctrica almacenada en un objeto y el voltaje que lo causa. De forma resumida, la capacitancia está relacionada con la capacidad de un elemento para almacenar energía eléctrica en forma de campo eléctrico, sus unidades están dadas en Faradios en honor a Michael Faraday.

Los elementos que usan el principio de la capacitancia se conocen como Capacitores, fundamentales en distintos circuitos eléctricos y electrónicos aplicados. Existen distintos tipos, para fines de este proyecto se exponen los Electrolíticos que son los utilizados en el prototipo del sistema.

## Capacitores electrolíticos.

Son de alta capacidad, por tanto, son utilizados en aplicaciones donde es indispensable almacenar grandes cantidades de energía, tienen la capacidad de cargar y descargar rápidamente. Están compuestos de dos placas conductoras que tienen una separación entre sí por material aislante y dos electrodos, generalmente hechos con aluminio o cobre, al ser conectados a un circuito, los electrodos comienzan a recibir carga eléctrica, ya sea positiva o negativa, esta carga es la encargada de atraer o repeler las partículas cargadas eléctricamente, logrando así un campo eléctrico entre los polos del capacitor. El símbolo del capacitor electrolítico se muestra en la figura 8.



Fig. 8 Capacitor electrolítico (www.capacitores.net/capacitor-electrolitico/)

### **II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### Delimitación del Tema

El diseño y construcción de un acelerador electromagnético (Adaptación del Cañón de Gauss) que sea aplicado como una nueva forma de producir movimiento lineal eficiente a mecanismos y maquinaria utilizada en la industria manufacturera y aeroespacial, fundamentado en las teorías electromagnéticas y de los primeros diseños del Cañón de Gauss a inicios de 1900 como una forma alterna de generación de energía mecánica.

#### Planteamiento del problema

Los sistemas neumáticos e hidráulicos son ampliamente utilizados en el sector industrial, aeroespacial, médico y naval, por sus grandes ventajas que proporcionan en cuanto a velocidad de trabajo, potencia, simplicidad y eficiencia. De acuerdo con "Creus S. Antonio, Neumática e Hidráulica" (2007), un sistema neumático ofrece principalmente mayor velocidad de trabajo en su salida y simplicidad en su instalación comparado con un sistema hidráulico, pero puede presentar desventajas como fluctuaciones de presión en el circuito que generan pérdidas de presión por la comprensibilidad del aire, ocasionando variaciones de velocidad en el émbolo, por tanto, no permite una velocidad constante de trabajo a menos que se suministre una presión constante en el sistema lo cual puede traducirse en altos costes de consumo de energía.

Por otro lado, de acuerdo con "Mateos Felipe, Automatismos e informática industrial, Universidad de Oviedo" un sistema hidráulico aporta mayor fuerza en la salida del cilindro, así como un mayor control en su velocidad que a comparación con un sistema neumático es más lento.

Del mismo modo, el aceite que utiliza necesita ser reemplazado periódicamente para evitar impurezas que puedan provocar atascos en los elementos de trabajo, regularmente este fluido es desechado una vez finalizado su ciclo de vida y es un agente potencial contaminante al medio ambiente, de igual forma representa un riesgo latente para los operadores ya que se operan con presiones excesivas. No se debe excluir que este tipo de sistema requiere de mantenimiento periódico que se traduce en mayores costos tanto de instalación y mantenimiento.

Las desventajas anteriormente descritas aunadas a malas prácticas de mantenimiento en los sistemas hidráulicos, así como fugas o variaciones de presión en ambos sistemas (fugas de aceite y aire) suelen afectar negativamente a los sistemas neumáticos o hidráulicos y a sus procesos

dependientes, haciéndolos ineficientes, costosos, riesgosos, menos precisos y menormente ágiles.

De no atenderse estas desventajas, los procesos que no cuentan con un riguroso sistema de mantenimiento perderían eficiencia y vida útil, lo que se puede traducir en altos costes y retrasos en la producción, de igual forma el problema de la generación de aditivos contaminantes como el aceite empleado en los sistemas hidráulicos se acrecienta y genera grandes problemas ecológicos tal como lo afirma "Mondragón Téllez, Víctor Manuel, La contaminación industrial en México, UAEM (2016)" La contaminación química es provocada por sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, y es provocada por el rápido crecimiento industrial, misma que en sus procesos productivos presenta la producción de residuos con características tóxicas, corrosivas, reactivas y explosivas. Estos agentes son liberados al ambiente contaminándolo.

El proyecto de investigación que a continuación se propone tiene el objetivo de fusionar la Potencia, Fuerza, Velocidad y simplicidad que presentan los sistemas tanto neumáticos como hidráulicos en un solo dispositivo (cilindro), eliminando las desventajas de dichos sistemas ya que se reducirían los componentes necesarios para generar energía y potencia de movimiento lineal, todo esto gracias a la adecuación del principio del cañón de Gauss donde se pretende almacenar grandes cantidades de energía electromagnética y liberarla de manera controlada para acelerar el pistón a velocidades y potencias altas, capaces de desplazar una carga ligera inicial y de manera constante, de esta forma se pretende reducir los costes de implementación, instalación y mantenimiento de estos sistemas ya que se eliminarían elementos como unidades FRL, compresor o bomba, válvulas, reguladores de caudal, mangueras, entre otros, de igual modo se excluiría el fluido de potencia (aceite) que una vez terminada su vida útil es desechado y se convierte en un agente potencial contaminante al ambiente. Se propone entonces desarrollar un cilindro de potencia electromagnética utilizando el principio del cañón de Gauss que cumpla con los requerimientos y demanda de los procesos industriales.

Las variables para considerarse en este análisis son la Corriente eléctrica necesaria para generar un campo magnético poderoso y constante que debe ser proporcional a la aceleración magnética del émbolo del pistón.

Otras variables para estudiar es la fuerza mecánica generada y la potencia de salida producida.

21

Actualmente los cañones de Gauss son utilizados para investigaciones en el diseño y construcción de aceleradores de partículas, así como para el desarrollo de armas alternativas que actualmente se desarrollan en Rusia, pero no se enfocan investigaciones en el aprovechamiento de esta energía acumulada y liberada para producir fuentes de energía mecánica diferentes a las conocidas como la que se propone en este proyecto de investigación. En el proceso de investigación surgen algunas interrogantes para este proyecto,

¿Cómo se relaciona la cantidad de campo magnético generado con la corriente eléctrica suministrada al circuito y la potencia de salida?

¿De qué manera se puede controlar la energía liberada para regular la velocidad y potencia de salida del émbolo?

¿Cómo generar un campo de fuerza magnética que favorezca el deslizamiento sin esfuerzo de los elementos mecánicos móviles?

¿Cuánta energía se requiere para desplazar cargas más pesadas?

## **III OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Diseñar un cilindro de potencia electromagnética mediante la adecuación del principio del cañón de Gauss, modelando, asociando y controlando variables (corriente – campo electromagnético – fuerza), para simplificar, agilizar y economizar los sistemas de generación de movimiento mecánico traslacional utilizados en el sector industrial.

### Objetivos específicos

- ✓ Analizar la relación corriente de entrada contra cantidad de energía electromagnética generada.
- Demostrar mediante Modelado y simulación la dinámica de comportamiento de las variables y su relación.
- Calcular los parámetros más importantes para el diseño y adecuación del cañón de Gauss al cilindro.
- Comparar y establecer los materiales adecuados para la construcción del cilindro de modo que cumplan las características de respuesta necesarias.
- Demostrar y comprobar la relación de variables mediante la experimentación con el prototipo físico del sistema

### **IV JUSTIFICACIÓN**

Mediante la presente propuesta del diseño de un cilindro de potencia electromagnética, se pretende aprovechar al máximo la energía acumulada en un cañón de Gauss con la menor corriente de entrada, esto para convertir toda la energía acumulada en energía mecánica capaz de desplazar cargas ligeras y semipesadas con una mayor agilidad, velocidad y potencia, simplificando los procesos industriales que comúnmente utilizan neumática e hidráulica y todos sus componentes secundarios de los que dependen y que regularmente requieren de mayor mantenimiento (válvulas, reguladores, unidad de mantenimiento, bomba, compresor, mangueras, entre otros), así como dar solución al problema de pérdidas de presión ocasionados en sistemas neumáticos debido a la longitud del circuito o fugas que se llegaran a presentar por falta de mantenimiento, además de eliminar los fluidos de potencia utilizados comúnmente en cilindros hidráulicos, de esta forma se beneficia al sector industrial y sus procesos productivos al introducir este sistema más simple, sustentable, eficiente y seguro (El emplear aceites como fluidos de potencia en la hidráulica, estos se someten a grandes presiones que podría ocasionar accidentes a los operadores de estos equipos), así como también se beneficia el medio ambiente al reducir el consumo y desecho de fluidos de potencia (aceites que una vez desechados contaminan gravemente el ambiente).

La presente investigación además de lo ya mencionado aporta nuevas formas de utilizar y aprovechar la energía electromagnética proveniente de un cañón de Gauss, describiendo una alternativa de solución al problema de estabilidad en este sistema que aún no se ha solucionado, además de un método para controlar la aceleración en la expulsión de un elemento magnético, ya que anteriormente solo se ha utilizado en investigaciones asociadas a aplicaciones militares y desarrollo de armas e incluso en aceleradores de partículas donde no se requiere una regulación en su velocidad.

## **V HIPÓTESIS**

*H1:* La energía electromagnética generada dentro del cilindro depende de la cantidad de corriente suministrada al circuito eléctrico y la capacidad de almacenamiento de energía del capacitor de potencia.

*H2:* La inserción de 2 solenoides independientes dentro del cilindro duplicará la energía experimentada por el pistón ocasionando una aceración mayor una vez que inicie su recorrido el émbolo.

*H3:* A mayor tensión de entrada en el circuito eléctrico, mayor será la fuerza de salida en el émbolo debido al aumento de energía en el embobinado.

*H4:* La inversión de la polaridad de un embobinado creará líneas de campo opuestas que disiparán la energía y velocidad del pistón proveniente de un solenoide anterior, generando una forma de control de velocidad de salida.

*H5:* La implementación del cilindro de potencia electromagnética simplificará en operación y mantenimiento a los sistemas de generación de movimiento lineal, proporcionando una mayor rentabilidad que los sistemas tradicionales que utilizan neumática e hidráulica.

## **VI METODOLOGÍA**

#### Tipo de investigación

El presente Proyecto se enmarca dentro una investigación de tipo cuantitativa. La investigación cuantitativa tiene como objetivo principal el analizar variables para construir modelos y teorías a partir de ellas, se basa en la recopilación e interpretación de datos para analizar y estudiar los efectos y causas de los diversos fenómenos. En el desarrollo de este proyecto, se analizarán y estudiarán las principales variables asociadas (Fuerza, Corriente, energía) para la generación de modelos y simulaciones que describan la dinámica de respuesta y ayuden a comprender su respuesta.

De acuerdo con el propósito de la investigación, ésta se define como Aplicada, la cual consiste en aplicar los conocimientos que se han adquirido y se vale de los descubrimientos de la investigación pura para situaciones prácticas y solucionar problemas reales. En esta investigación se recurrirá a todas aquellas teorías electromagnéticas para ser aplicadas al desarrollo del cilindro de potencia electromagnético que tiene como finalidad eficientizar los procesos que dependen de energía neumática e incluso hidráulica, dando solución a un problema real como lo es la pérdida de presión en sistemas neumáticos.

En términos del lugar donde se realiza la investigación, este estudio se encuadra en el marco de la investigación Experimental, la cual tiene como objetivo principal conocer las causas de los fenómenos, busca establecer relaciones de causa-efecto entre variables que pueden controlarse, en este proyecto se deben medir las variables más importantes del sistema, determinar su relación y la causa-efecto para comprender profundamente los efectos de acumular energía electromagnética para ser liberada y aprovechada en algún mecanismo.

#### Alcances de la Investigación

La presente investigación involucra los 4 alcances de investigación, entre los que figura el alcance Exploratorio, ya que aportará nuevos conocimientos en las aplicaciones de las teorías electromagnéticas y el principio del cañón de Gauss orientados principalmente en sistemas de generación de movimiento traslacional donde aún no se han aplicado ni realizado algún estudio.

De igual forma, figuran los alcances Descriptivos, ya que en este proyecto el estudio y análisis de variables (Fuerza, Corriente, Energía, Velocidad, entre otras), generación de modelos y simulaciones es imprescindible, mediante las ecuaciones diferenciales que rigen la dinámica del sistema se pretende comprender los efectos y relación de variables así como su manipulación para efectos de control, de esta manera es posible detallar la respuesta de comportamiento de los variables anteriormente mencionadas para la construcción del prototipo y su correcto funcionamiento.

También asocia los Alcances Correlacionales, debido a que es necesario comprender la relación de corriente de entrada-Energía-Fuerza mecánica-Velocidad, mediante un análisis de regresión multivariable es posible establecer las relaciones entre estas variables y definir el grado de relación e influencia que poseen, de esta forma es posible definir un modelo de predicción.

En cuanto a los alcances Explicativos, en este estudio se pretende definir la relación Causa-Efecto que guardan las variables dominantes en el sistema, es decir, la relación de suministrar mayor o menor corriente eléctrica para producir mayor cantidad de energía y por ende aumentar la fuerza y velocidad en el pistón, al comprender estas asociaciones de causa-efecto es posible establecer con mayor precisión el cálculo y diseño del prototipo.

#### Limitaciones de la Investigación

Las limitantes presentes en el desarrollo de esta investigación están relacionadas con la cantidad de carga en el émbolo, ya que al no hallarse estudios o prototipos previos a este proyecto que determinen si la cantidad de energía generada por un cañón de gauss sea eficiente para desplazar cargas muy pesadas comparadas a las utilizados en aplicaciones hidráulicas, el prototipo sólo se centrará en el desplazamiento de cargas ligeras.

Diseño de la investigación.

Con el objetivo de probar las hipótesis antes descritas y decidir posteriormente si son aceptadas o rechazadas se define el diseño de la investigación definiendo los instrumentos, técnicas y análisis a emplear.

La investigación es de tipo cuantitativa ya que es indispensable medir y analizar el comportamiento de variables que se asocian para este sistema de propulsión electromagnética, misma que será experimental pura ya que se debe manipular la corriente en el circuito eléctrico para observar y registrar las variaciones de energía electromagnética, fuerza y velocidad del émbolo, éstas últimas variables serán medidas y registradas para crear una tabla de relación de variables.

Del mismo modo se tomará como base los modelos matemáticos con ecuaciones diferenciales de un sistema híbrido (solenoide), ya que la base de este proyecto radica en los principios de funcionamiento de una solenoide, se simulará con diagramación de bloques en un software de modelado para una simulación más práctica y efectiva, de esta forma será posible analizar las curvas de respuesta de comportamiento dinámico de la fuerza, velocidad y energía electromagnética debido a alguna variación en la corriente en el embobinado, de esta forma es posible comprender la respuesta del sistema ante cambios en la corriente de entrada estableciendo las bases del control para este proyecto, ya que los 2 embobinados internos del cilindro deben activarse y desactivarse coordinadamente para cumplir la función de desplazamiento lineal, del mismo modo los niveles de corriente deben cumplir valores precisos para obtener la energía, velocidad y potencia deseados en la salida del cilindro, por tanto, un control de tipo ON-OFF asociado a un control PID será esencial para cumplir estas tareas en el cilindro electromagnético.

Un primer modelo dinámico asociado a las variables anteriormente descritas resulta como se aprecia en la figura 9.



## Figura 9. Modelo Dinámico General del Sistema Cilindro electromagnético

La forma en cómo se modifiquen la intensidad de corriente y la capacidad de almacenar energía del capacitor de potencia en el circuito eléctrico determinarán la respuesta en la cantidad de energía electromagnética en cada embobinado, la velocidad y fuerza que puede experimentar el pistón al desplazarse en el interior del cilindro, por ende, es recomendable un análisis de regresión múltiple para determinar la relación y el porcentaje de asociación de las variables, así como establecer las formas de las curvas de respuesta de las variables dependientes para diseñar la etapa de control en el sistema.

De acuerdo con la bibliografía consultada en diferentes fuentes se puede realizar la conjetura que, al incrementar la capacidad del Capacitor de potencia, este podrá almacenar más energía, en cuanto sea descargado por el control ON-OFF esta energía llegará directamente al embobinado como intensidad de corriente eléctrica, formando un primer subsistema como se muestra en la figura 10.



A mayor capacidad del capacitor mayor será el almacenamiento de energía y se tendrá un retardo en la descarga de este.

Para el segundo subsistema, este consta de la intensidad de corriente como entrada y salida la energía electromagnética generada como se muestra en el subsistema 2. (Ver figura 11).



Figura 11. Subsistema 2 Cilindro electromagnético

Se asume que a mayor intensidad de corriente mayor será la energía electromagnética generada dentro del embobinado.

Finalmente, el 3er subsistema consta de la relación Energía electromagnética, la fuerza mecánica y la velocidad del pistón lo muestra el siguiente modelo de la figura 12.



Figura 12. Subsistema 3 Cilindro electromagnético

Entre más energía electromagnética se tenga en cada embobinado mayor debe ser la fuerza y la velocidad del movimiento del pistón.

Al anidar los 3 subsistemas en cascada se obtiene el sistema general mostrado en la figura 9, de esta forma será posible determinar la función de transferencia general del sistema, misma que será utilizada para el diseño del controlador.

## Resumen

El desarrollo del proyecto "Diseño de un Cilindro de potencia electromagnética mediante el cañón de Gauss" consta de las siguientes 3 etapas que a continuación se describen:

- 1.- Modelado y simulación del prototipo
- 2.- Experimentación y diseño
- 3.- Construcción del prototipo

En la etapa de Modelado y Simulación se realizarán modelos matemáticos que describan la dinámica de respuesta de las variables más trascendentes apoyándose de los modelos de un sistema Híbrido (Mecánico – Eléctrico) utilizados para solenoides. En dicho modelo se fusionan las ecuaciones diferenciales que describen el circuito eléctrico (Inductancia – Resistencia) del embobinado, y el sistema mecánico (Masa – Rigidez – Amortiguamiento) de la masa que debe deslizarse en el interior del cilindro, apoyados de la ecuación del acoplamiento mecánico.

Una vez definidos los modelos, se procederá a realizar las simulaciones en el programa de Matlab – Simulink (Cleve, 2017), ya que esta herramienta de Matlab permite realizar de manera más práctica las programaciones gráficas mediante bloques. Se analizarán las curvas de respuesta de las variables de corriente y desplazamiento para determinar la cantidad de corriente necesaria en el embobinado para desplazar la masa a una determinada velocidad, de esta forma es posible comprender los efectos de aumentar y disminuir la corriente y el impacto que se tiene sobre la velocidad de la masa.

De igual forma se realizará la simulación del circuito de carga y descarga del cañón de Gauss que tendrá la función de actuar como elemento de generación de energía, apoyándose del software de Proteus (Jameson, 2012) se podrá definir la capacitancia necesaria para producir una determinada cantidad de energía a la salida del circuito y pueda ser aprovechada por el embobinado.

En la etapa de Experimentación y diseño se pretende apoyarse de las simulaciones previamente realizadas para la compra de materiales necesarios, en este caso se iniciará con la adquisición de los elementos electrónicos para la construcción del circuito de carga y descarga, aquí se deben realizar pruebas de funcionamiento apoyándose con elementos de medición (Amperímetro, sensores) para medir las corrientes de salida en el circuito, la posición y velocidad. Una vez establecido el correcto funcionamiento del circuito de carga y descarga, se procederá a realizar la adquisición de los materiales faltantes en la construcción del cañón de Gauss (Alambre magneto) para realizar las 3 bobinas de acuerdo con los cálculos y análisis previamente hechos.

De igual modo se deben adquirir los materiales necesarios para realizar un prototipo de experimentación, es decir, donde será enrollado el alambre magneto para crear una bobina con núcleo de aire, el material y las dimensiones de este. Con este prototipo de experimentación se pretende realizar una serie de pruebas que permitan construir una tabla de datos que favorezcan la comprensión de la dinámica de respuesta del sistema cuando se presenten diversos escenarios.

En la tercera etapa "Construcción del prototipo" se realizará la construcción definitiva del sistema con los materiales analizados, las dimensiones y el diseño definido en la etapa anterior. Se realizarán pruebas de funcionamiento y se realizarán los ajustes necesarios para un óptimo funcionamiento.

### VII MODELADO Y SIMULACIÓN

En este caso se comenzará con la etapa de Modelado y simulación del prototipo, la cual para poderse llevar a cabo será necesario el apoyo del software Matlab-Simulink (Simulación del sistema eléctrico-mecánico) y Proteus (Simulación del circuito del cañón de Gauss).

### Circuito de carga y descarga del Cañón de Gauss

El circuito de carga y descarga del cañón de Gauss, consta de una serie de capacitores conectados en paralelo que tienen la función de recibir la energía proveniente de una fuente de poder y almacenar la carga entre sus placas para posteriormente liberarla en un tiempo definido, es de suma importancia definir la cantidad de corriente obtenida al momento de la descarga, ya que ésta será suministrada al embobinado que efectuará la inducción electromagnética y desplazará la carga. Entre más corriente de descarga se tenga mayor será la cantidad de energía electromagnética que se generé en el interior del embobinado.

Antes de iniciar con la experimentación física del circuito es necesario realizar una simulación previa que permita determinar los niveles máximos de corriente con la variación de capacitancia en el circuito.

En primer lugar, se realiza la simulación con capacitores de valores muy grandes de capacitancia, es decir, 10,000 micro Faradios, se realiza la simulación con 3 capacitores en paralelo. La capacitancia total en paralelo será:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 \tag{9}$$



Por tanto, el resultado de la suma de los 3 capacitores será de 30,000 micro Faradios. La simulación se presenta en la figura 13 (circuito) y figura 14 (carga de los capacitores).

Figura 13. Circuito de Capacitores en Paralelo con fuente de 24 volts (Circuito abierto)

En la anterior simulación se pueden destacar el siguiente comportamiento:

Utilizando 3 capacitores de 10,000 micro Faradios en paralelo, se obtiene un valor máximo de cerca de 7 Amperes de corriente con una fuente de voltaje de 24 volts de corriente directa.





Al suministrar los 24 volts de corriente directa al circuito cerrando el interruptor SW1, los capacitores almacenan la carga, cuando ya no pueden almacenar más energía, están listos para entregar dicha energía a la carga, por lo que al cerrar el interruptor SW2 se puede observar en el amperímetro un valor cercano a los 7 Amperes de corriente que serán entregados a la carga, en este caso se observa el encendido del LED. Este valor máximo de corriente sólo dura pocos milisegundos. (Ver figura 15).



Figura 15. Circuito de Capacitores en Paralelo con fuente de 24 volts, máximo de corriente

Se modifica la fuente de voltaje ahora con 12 volts y se puede observar un máximo de corriente de 1.87 Amperes. Ver figura 16.


Figura 16. Circuito de Capacitores en Paralelo con fuente de 12 volts, máximo de corriente

Se presenta a continuación la simulación con "Súper capacitores", elementos que pueden almacenar una gran cantidad de carga con valores de 3 Faradios y que trabajan con voltajes no mayores a 5 volts de corriente directa. En este caso se tiene la restricción de utilizar una fuente de voltaje no mayor a 5 Volts ya que los super capacitores no toleran voltajes mayores a 5 volts. En la figura 17 se puede observar el circuito con super capacitores.



Figura 17. Circuito con Super Capacitores con fuente de 5 volts

Al cerrar el interruptor SW1 se puede observar una máxima de corriente de 0.9 Amperes, mucho menor que los capacitores de 10,000 micro Faradios, pero es notable la descarga de forma más lenta y progresiva que en el circuito de capacitores de 10,000  $\mu$ F anterior donde la descarga es violenta e instantánea. (Ver figura 18 y figura 19).



Figura 18. Simulación de Circuito con Super Capacitores con fuente de 5 volts



Figura 19. Simulación de Circuito con Super Capacitores con fuente de 5 volts, descenso de corriente

De acuerdo con las simulaciones anteriores es evidente concluir lo siguiente: Una mayor cantidad de capacitancia en los capacitores proporciona un incremento en el tiempo de descarga de la energía, mientras que para obtener mayor corriente de salida se necesita aumentar el voltaje considerablemente.

Para analizar el tiempo de descarga del circuito de capacitores se emplea el modelo de un sistema R-C en serie.

$$E(t) = Ri(t) + \int i(t) dt \tag{10}$$

Donde:

E(t) = Voltaje de entrada

R = Resistencia

i(t) = Corriente del circuito

Para simular este sistema, se utilizará una programación por bloques. Por tanto se seguirá el el objetivo mostrado en la figura 20:



Se obtiene la ecuación gráfica.

$$i(t) = \frac{1}{R} \Big( E(t) - \int i(t) \, dt \Big)$$
(11)

La Diagramación en bloques en el software Matlab-Simulink se presenta a continuación en la figura 21.





Figura 21. Simulación Sistema R-C (Capacitores de 10,000 µF)

En el anterior diagrama de bloques se definen los valores de la Capacitancia y la resistencia de la siguiente forma:

Capacitancia = 30,000 µF

Resistencia: De acuerdo con la simulación en Proteus del circuito de 3 capacitores de 10,000  $\mu$ F con una fuente de 12 volts, la corriente máxima fue de 1.87 Amp, por tanto, la resistencia se calcula:

$$I = \frac{E}{R} \tag{12}$$

Despejando la Resistencia

$$R = \frac{E}{I} \tag{13}$$

Sustituyendo valores

$$R = \frac{12 \ volts}{1.87 \ Amp} = 6.41 \ \Omega \tag{14}$$

Resistencia =  $6.41 \Omega$ 

La simulación para definir el tiempo de convergencia de la corriente y su máximo se determina en la figura 22.



Figura 22. Gráfica de respuesta i(t) Sistema R-C (Capacitores de 10,000 µF)

Se puede visualizar un tiempo de descarga muy rápido alrededor de entre 1 a 1.2 segundos, con un máximo de corriente aproximado a 1.87 Amperes.

En la simulación con el circuito de super capacitores se cambian los parámetros en el diagrama de bloques de la figura 23.



Figura 23. Simulación Sistema R-C (Super Capacitores de 3F)

Capacitancia = 3 F

Resistencia = 5.37  $\Omega$ 

Fuente de voltaje = 5 volts

La simulación se muestra en la figura 24.



Figura 24. Gráfica de Respuesta i(t) Sistema R-C (Super Capacitores de 3F)

Se observa en la figura 24, como la corriente efectivamente inicia en el valor de 0.90 A y su tiempo de convergencia a cero es muy lento tal y como se observó en el software de Proteus, llegando a más de 100 segundos para una descarga total.

"Para el cañón de Gauss se optará por un circuito de carga y descarga (Capacitores) de 10,000 μF por su amplia aceptación de mayor voltaje de entrada y su descarga rápida a la carga."

# Modelado y simulación del sistema Híbrido (Mecánico – Eléctrico)

Para el modelo del sistema Híbrido (Sistema Mecánico – Eléctrico) se toma como base el modelado de un solenoide, ya que en términos prácticos el sistema principal del presente proyecto cumple la función principal de un solenoide.

El sistema de solenoide se define en 3 partes fundamentales, la parte eléctrica, el acoplamiento electromecánico y el sistema mecánico.

Sistema Eléctrico R-L

El sistema eléctrico consta de un embobinado con una inductancia L y una resistencia R (Ver figura 25), lo cual, la siguiente ecuación diferencial 15 modela su comportamiento dinámico.



Figura 25.Circuito Eléctrico R-L

$$L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = E(t)$$
(15)

Modelando mediante diagrama de bloques, se tiene la siguiente ecuación gráfica.

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} (E(t) - Ri(t)) \tag{16}$$

El diagrama de bloques del sistema eléctrico se presenta en la figura 26.



Figura 26. Diagrama de bloques Sistema Eléctrico en cascada R-C y R-L

En la figura 26 se puede observar que la etapa de carga y descarga del circuito R-C alimenta directamente al sistema R-L, por tanto, se obtendrá una corriente definida en el embobinado que tendrá una pequeña duración para posteriormente converger a cero.

### Acoplamiento Electromecánico

De acuerdo con Hernández G. (2010), Un solenoide polarizado produce una fuerza electromotriz proporcional a la corriente en la bobina, por tanto, la siguiente ecuación indica la conversión de energía eléctrica a energía mecánica.

$$f_s = K_s i \tag{17}$$

Donde Ks tiene las unidades de Newton/Ampere

#### Sistema Mecánico. (Masa-amortiguador)

En el sistema mecánico se toma en cuenta la masa del Pistón y el amortiguamiento que genera el rozamiento del pistón sobre la superficie de deslizamiento, produciendo una cierta disipación de energía.

Mediante la segunda Ley de Newton se modela este sistema.

$$F = ma \tag{18}$$

La ecuación diferencial que modela el sistema mecánico es:

$$m\frac{d^2x}{dt} + b\frac{dx}{dt} = F_s \tag{19}$$

Para el diseño del diagrama de bloques, se utiliza la ecuación gráfica siguiente:

$$\frac{d^2x}{dt} = \frac{1}{m} \left( F_s - b \frac{dx}{dt} \right) \tag{20}$$

Su respectivo en programación gráfica se presenta en la figura 27.



Figura 27. Diagrama de bloques Sistema Mecánico

Se puede observar en la figura 28 el diagrama de bloques del sistema de carga descarga de los capacitores (R-C), sistema eléctrico (R-L), el acoplamiento electromecánico (Transductor) y el sistema mecánico (Masa-amortiguador).



Figura 28. Diagrama de bloques general del proyecto

# VIII DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE EXPERIMENTACIÓN

## Cálculo de la Masa del pistón y vástago.

Las dimensiones para el pistón y vástago se toman como base de un cilindro neumático común con las siguientes especificaciones de diseño.

Diámetro = 40 mm, 10 mm de espesor

Vástago = 200 mm longitud, 6.35 mm de diámetro.

Para calcular la masa que se debe desplazar dentro del cilindro, se determinan las masas individuales, del pistón y del vástago.

## Masa del Pistón

Para calcular la masa del pistón se tiene la siguiente expresión matemática:

$$Masa = (Densidad)(Longitud)(Sección)$$
(21)

Calculando la sección:

Sección circular = 
$$\frac{\pi d^2}{4}$$
 (22)

Sección circular pistón = 
$$\frac{\pi (0.04m)^2}{4} = 1.2566 \times 10^{-3} m^2$$
 (23)

Determinando la masa del pistón mediante la ecuación 21.

Densidad del Neodimio =  $6800 \frac{kg}{m^3}$ 

Masa del pistón = 
$$\left(6800\frac{kg}{m^3}\right)(0.010m)(1.2566x10^{-3}) = 0.0854 kg$$
 (24)

Para la masa del vástago se repite el mismo procedimiento ahora con material de acrílico. Densidad del acrílico =  $1190 \frac{kg}{m^3}$ 

Sección circular vástago = 
$$\frac{\pi (6.4mx 10^{-3}m)^2}{4} = 3.2169x 10^{-5}m^2$$
 (25)

Masa del vástago = 
$$\left(1190\frac{kg}{m^3}\right)(0.20m)(3.2169x10^{-5}m^2) = 7.6562x10^{-3}kg$$
 (26)

Determinando la masa total

$$Masa \ total = m_p + m_v = 0.0854 \ kg + 7.6562 x 10^{-3} \ kg = 0.0930 \ kg$$
(27)

Aclaraciones: Se utiliza el material de Neodimio en el pistón ya que este material es altamente magnético y favorece en gran medida a la reacción del campo magnético generado dentro del cilindro.

Para el vástago se utiliza acrílico como prototipo de experimentación, esto para reducir la masa del elemento y obtener una mayor velocidad en el émbolo. Posteriormente y de acuerdo con las observaciones realizadas durante la experimentación, estos materiales serán reemplazados por materiales más adecuados para fines industriales.

#### Cálculo del trabajo mecánico

La velocidad promedio de un cilindro neumático depende de diferentes factores, como la carga que se debe desplazar, la presión del aire aplicada y el área de la superficie del pistón, dicha velocidad oscila entre 0.1 a 1.5 m/s.

Tomando una velocidad ideal de 1 m/s para el movimiento del pistón del cilindro electromagnético y definiendo el trabajo producido por el sistema mecánico se recurre a la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \tag{28}$$

$$U = \frac{1}{2} (0.0930 \ kg) (1\frac{m}{s})^2 - \frac{1}{2} (0.0930 \ kg) (0\frac{m}{s})^2$$
(29)

$$U = 0.0465 N - m \tag{30}$$

El trabajo mecánico también puede determinarse mediante:

$$U = Fd \tag{31}$$

Sustituyendo el trabajo anteriormente calculado en la fórmula 31, se determina la fuerza necesaria ante un recorrido del pistón de 0.14 m.

$$F = \frac{U}{d} \tag{32}$$

$$F = \frac{0.0465 \ N - m}{0.14 \ m} = \mathbf{0.3321} \ N \tag{33}$$

De acuerdo con la ecuación 33, se requiere un mínimo de fuerza mecánicas de 0.33 Newtons para desplazar el cilindro 0.14 metros que es la longitud aproximada que debe recorrer dentro del cilindro propuesto.

### Cálculo de coeficientes de Fricción.

De acuerdo con Vera M. 2018 en su Ensayo de "Medición de los Coeficientes de Fricción estático y cinético para 3 superficies distintas sobre metal" el Coeficiente de fricción entre Acero y Acrílico es:

Estático: 0.15

Dinámico: 0.10

La fuerza de fricción estática se define mediante:

$$F_m = \mu_s N \tag{34}$$

La fuerza de fricción dinámica se define mediante:

$$F_k = \mu_k N \tag{35}$$

Analizando el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la masa que se debe desplazar sobre el cilindro se tiene la representación esquemática que se muestra en la figura 29.



Figura 29. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas en el pistón

Donde:

W = Peso de pistón.

N = Fuerza normal al peso

Fe = Fuerza electromagnética

Ff = Fuerza de fricción entre la masa del pistón y la superficie de deslizamiento

( **a -**)

Se sabe que la sumatoria de fuerzas en el eje y debe ser 0, entonces:

$$\Sigma F_{\mathcal{Y}} = 0 \tag{36}$$

$$W - N = 0 \tag{37}$$

( **a** - **)** 

. . . .

Calculando el peso, se toma la aceleración de la gravedad en el sistema Internacional de 9.81 m/s<sup>2</sup>, se multiplica por la masa del pistón y se tiene un peso de 0.9123 N.

$$0.9123 - N = 0 \tag{38}$$

$$N = 0.9123 N$$
 (39)

Una vez determinada la Fuerza Normal, se sustituye este valor en la ecuación 35 para determinar la fuerza de fricción dinámica.

$$F_k = (0.10)(0.9123 N) = 0.0912 N$$
(40)

Comparado con la fuerza necesaria para desplazar la masa, se predice un movimiento uniforme.

Analizando ahora la fuerza de fricción producida al inicio del desplazamiento de la masa del pistón, se recurre a la ecuación 34.

$$F_m = (0.15)(0.9123 N) = 0.1368 N \tag{41}$$

Por tanto:

#### "Movimiento Inminente"

. . . .

### Determinación de la Inductancia.

Para determinar la inductancia del embobinado del cilindro electromagnético, se toman los siguientes criterios de diseño.

Se utilizará un cilindro de acrílico de 0.25 m de longitud con un diámetro de 0.0405 m tal como se muestra en la figura 30.



Figura 30. Dimensiones del cilindro

Sabiendo que el perímetro es igual a:

$$P = 2\pi r \tag{42}$$

Entonces sustituyendo el radio del cilindro de acrílico se tiene

$$P = 2\pi (20.95mm) = 131.63mm = 0.1316m$$
(43)

Calculando el número de vueltas necesarias para formar una bobina de 8 cm de longitud con alambre magneto calibre 23 de 0.573 mm de diámetro se tiene la siguiente expresión.

$$No. de Vueltas = \frac{Longitud de la bobina}{Diámetro del alambre}$$
(44)

Sustituyendo los valores se tiene:

$$No. \, de \, Vueltas = \frac{80mm}{0.573mm} = 139.61 \, Vuletas \tag{45}$$

Se necesitan Aproximadamente 140 vueltas para formar la bobina de 80 mm.

Finalmente se determina la cantidad de alambre magneto a utilizar. Mediante la siguiente expresión se calcula la Longitud de alambre asociando el perímetro y el número de vueltas.

$$Longitud = (No. de Vueltas)(Perímetro)$$
(46)

$$Longitud = (140)(131.63mm) = 18428.2 mm = 18.42 m$$
(47)

Se necesitan aproximadamente 19 metros de alambre magneto de calibre 23 para una sola bobina, el cilindro constará de 2 bobinas, por tanto se necesitan 38 metros de alambre magneto de calibre 23.

El cálculo de la inductancia, se utiliza la siguiente ecuación 49.

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

Donde:

N = Número de vueltas de la bobina
 µ = Permeabilidad Magnética del núcleo
 A = Área de la sección transversal del núcleo
 I = Longitud de la bobina

Calculando el área de la sección transversal de la bobina, se utiliza la ecuación 22.

$$A = \frac{\pi (0.0419m)^2}{4} = 1.3788x 10^{-3}m^2$$

El núcleo de la bobina será aire, por lo que permeabilidad magnética será:

$$\mu = 4\pi x 10^{-7} H/m$$

(48)

Por tanto:

$$L = \frac{(140)^2 (4\pi x 10^{-7} H/m) (1.3788 x 10^{-3} m^2)}{0.08m} = 4.2449 x 10^{-4} H$$
(49)

### Resistencia de la Bobina.

Para un diámetro de alambre magneto de 0.573 (Calibre 23) se tiene una resistencia eléctrica nominal de 8.706  $\Omega/m$  (Elementos Magnéticos Navarra). Por tanto, se calcula la resistencia total de la bobina mediante el siguiente razonamiento.

$$R = \left(0.0838 \frac{\Omega}{m}\right) (19 m) = \mathbf{1.5922} \,\mathbf{\Omega} \tag{50}$$

Inducción Magnética en el interior de la bobina.

Para calcular el campo magnético generado dentro de la bobina que se ha diseñado, se toma la siguiente ecuación.

$$B = \frac{N\mu I}{l} \tag{51}$$

Donde:

N = Número de vueltas (Para este caso se tienen 196 vueltas)

 $\mu$  = Permeabilidad en el interior del solenoide (Al ser una bobina de núcleo de aire se tomará el valor de 4 $\pi$ x10<sup>(-7)</sup> H/m

I = Intensidad de corriente eléctrica (Se recurre a las simulaciones en el software de Simulink para determinar la corriente que circulará por la bobina)

I = Longitud del solenoide

Se sustituyen los valores, de modo que el campo magnético generado en el interior de la bobina será de:

$$B = \frac{(140)(4\pi x 10^{-7} \frac{H}{m})(1.869A)}{(0.08m)} = 4.1101x 10^{-3} Teslas$$
(52)

# Diseño del prototipo en SolidWorks.

Previo al proceso de experimentación se realizó el diseño del prototipo que será base del proceso de experimentación, para esto se utilizó como base la estructura de un cilindro neumático. A continuación, se muestra el diseño de cada una de las partes que integran el prototipo.

## 1.- Cilindro:

El material empleado para este elemento es Acrílico, con una longitud de 250 mm, 41.10 mm de diámetro interno y 45.20 mm de diámetro externo. (Ver figura 31).



Figura 31. Cilindro de acrílico

Tapas laterales (delantera y trasera):

Se utilizará Plástico ABS para ambos elementos, ya que forman parte de la estructura del cilindro y estas deben ser de material no magnético, cuentan con cuatro barrenos en las esquinas de las caras frontales y posteriores donde se introducirán las guías, de modo que la estructura obtenga mayor soporte y estabilidad. (Ver figura 32).



Figura 32. Tapas laterales del cilindro

### Pistón

Para este elemento es indispensable que este elaborado de algún material magnético, el Neodimio es el material elegido ya que responde mejor a los campos magnéticos, tiene un diámetro de 40 mm con un pequeño barreno de 6.32 mm de diámetro donde será introducido el vástago. (Ver figura 33).



Figura 33. Pistón de Neodimio

Vástago

El material empleado para el vástago será Acrílico ya que es un material ligero y adaptable. (Ver figura 34).



Figura 34. Vástago de acrílico

# Guías

Las guías serán realizadas con Plástico ABS, ya que este tipo de material no interfiere en el campo magnético. (Ver figura 35).

Figura 35. Guías de Plástico ABS

Materiales necesarios para realizar el prototipo de experimentación.

Para el cilindro se propone utilizar acrílico, que es un material no magnético, por lo tanto, no interfiere ni perturba el campo magnético generado, este constará de una longitud de 0.25 m y un diámetro de 0.0405 m tal como se muestra en la figura 31.

Se utilizarán dos imanes de Neodimio para formar el pistón, con un espesor total de 10 mm y 40 mm de diámetro (Ver figura 33). De igual modo se utilizarán imanes de ferrita para realizar la comparativa.

Para el vástago del cilindro, se utilizará un cilindro de acrílico, se elige este material por su ligereza y adaptabilidad en el proceso de experimentación. (Ver figura 34).

40 metros de alambre magneto calibre 23 para dos bobinas de 8 cm de longitud, que de acuerdo con los cálculos hechos en las secciones anteriores es el ideal para la generación del campo magnético.

5 capacitores de 10,000 microfaradios a 80 volts. (Entre mayor voltaje soporten es mucho mejor)

1 fuente de alimentación regulable

Sensor ultrasónico HC-SR04

Controlador Arduino 1

Protoboard y cables para conexiones.

Para comenzar a construir el prototipo de experimentación se inicia con enrollar el alambre magneto en el cilindro de acrílico (Ver figura 38). De acuerdo con los cálculos en la sección de Modelado y simulación, se realizarán 2 bobinas de 80 mm con 140 vueltas de alambre magneto en los extremos de dicho cilindro.

El resultado final de la elaboración de ambas bobinas se muestra en la figura 39. La primera bobina será utilizada para acelerar el pistón y la segunda bobina tendrá fines de frenar el pistón, de esta forma será posible controlar la velocidad de llegada al otro extremo.



Figura 36. Cilindro de acrílico



Figura 37. Alambre magneto calibre 23



Figura 38. Bobina 1 realizada.



Figura 39. Bobina 2 realizada.

# IX EXPERIMENTACIÓN

### 1era etapa de pruebas

Para la primera sesión experimental se utilizó un imán de neodimio de 40 mm de diámetro y 5 mm de espesor, con una forma de dona que posee un valor de 13,500 Gauss (Medida de la fuerza del campo magnético).

Se utilizaron 3 capacitores de 10,000 micro Faradios en el circuito del cañón de Gauss, es decir, se tiene una capacitancia fija de 30,000 micro Faradios, el parámetro que se varia es el del voltaje de entrada en el circuito del cañón de Gauss, esto para comprender la respuesta de velocidad del pistón cuando el voltaje aumenta gradualmente.

En la figura 40 se muestra la elaboración de las primeras pruebas.



Figura 40. Conexión del circuito eléctrico del cañón de Gauss

Para la medición de la distancia y velocidad experimentada por el pistón al liberar la energía del cañón de Gauss, se utilizó un sensor ultrasónico HC-SR04 que permite enviar señales ultrasónicas y recibirlas, de esta forma es posible definir la distancia recorrida y calcular la velocidad. De igual forma se utilizó un controlador Arduino 1 para adquirir las señales del sensor en tiempo real y visualizar los valores en el monitor serial del software de Arduino, tal como se muestra en la figura 41.



Figura 41. Sensor Ultrasónico HC-SR04 y Controlador Arduino 1

Se colocó el sensor ultrasónico a una distancia considerable del pistón para registrar los datos de velocidad y posición del pistón en el monitor serial, tal como se muestran en la figura 42.



Figura 42. Cilindro con pistón y sensor ultrasónico

En la figura 43 se muestra el proceso de adquisición de datos con el sensor.



Figura 43. Adquisición de posición y velocidad en tiempo real

De acuerdo con las lecturas del sensor, se tienen los siguientes datos.

Entrada de 5 V en la fuente de alimentación.

En la figura 44 se puede observar como el sensor registra una distancia de posición inicial de 14 cm con respecto al pistón, cuando se activa el cañón de Gauss se libera la energía y el pistón se desplaza como indican los datos a un valor de 11 cm, esto lo realiza en 1 segundo. La velocidad del pistón con 5 V de entrada es de 3 cm/s.

ge (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM3')			
		• • •	
in	cm/s	:0.00	
ce	in cm	: 14	
ce	in cm	: 14	
in	cm/s	:0.00	
ce	in cm	: 14	
.ce	in cm	: 11	
in	cm/s	:-3.00	
ce	in cm	: 11	

# Figura 44. Posición y velocidad con 5 V de entrada

Con 12 V en la fuente de alimentación se obtiene una velocidad de 10 cm/s. (ver figura 45)

```
Distance in cm : 41
Distance in cm : 41
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 41
Distance in cm : 31
Speed in cm/s :-10.00
Distance in cm : 31
Distance in cm : 32
```

Figura 45. Posición y velocidad con 12 V de entrada

Con 16 V en la fuente de alimentación se obtiene una velocidad de 13 cm/s. (ver figura 46).

```
Distance in cm : 41
Distance in cm : 41
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 41
Distance in cm : 28
Speed in cm/s :-13.00
Distance in cm : 28
Distance in cm : 28
Speed in cm/s :0.00
```

Figura 46. Posición y velocidad con 16 V de entrada

Con 24 V en la fuente de alimentación se obtiene una velocidad = 23 cm/s. (ver figura 47)

```
Distance in cm : 23
Distance in cm : 22
Speed in cm/s :-1.00
Distance in cm : 23
Distance in cm : 0
Speed in cm/s :-23.00
Distance in cm : 0
Distance in cm : 0
Speed in cm/s :0.00
```

### Figura 47. Posición y velocidad con 24 V de entrada

Con 30 V en la fuente de alimentación se obtiene una velocidad = 29 cm/s. (ver figura 48)

```
Distance in cm : 46
Distance in cm : 47
Speed in cm/s :1.00
Distance in cm : 46
Distance in cm : 75
Speed in cm/s :29.00
Distance in cm : 25
```

### Figura 48. Posición y velocidad con 30 V de entrada

Los datos anteriores se ordenan en la tabla I.

Voltaje DC (Volts)	Velocidad (m/s)
5	0.03
12	0.10
16	0.13
24	0.23
30	0.29
24 30	0.23 0.29

Tabla I Relación Voltaje – Velocidad del pistón.

De acuerdo con los datos de la tabla 1, se puede concluir que, a mayor voltaje de entrada en el circuito eléctrico del cañón de Gauss, se obtiene mayor velocidad en el pistón.

### 2da etapa de pruebas

Se utiliza la unión de dos imanes de ferrita con una fuerza de campo magnético de 3000 Gauss, un diámetro de 40 mm de diámetro, y un espesor de 16 mm como se aprecia en la figura 49. De igual modo que en la 1er etapa de pruebas, se hace variar el voltaje de entrada al circuito del cañón del Gauss.



Figura 49. Experimentación con pistón de doble imán de ferrita

Con 5 V en la fuente de alimentación se obtuvo una Velocidad = 1 cm/s. (ver figura 50)

Distance	in cm	: 12
Distance	in cm	: 11
Speed in	cm/s	:-1.00
Distance	in cm	: 11
Distance	in cm	: 11
Speed in	cm/s	:0.00
Distance	in cm	: 12
Distance	in cm	: 12
Speed in	cm/s	:0.00

Figura 50. Posición y velocidad con 5 V de entrada

Con 12 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 2 cm/s. (ver figura 51)

```
Distance in cm : 11
Distance in cm : 11
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 11
Distance in cm : 9
Speed in cm/s :-2.00
Distance in cm : 9
Distance in cm : 9
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 9
```

### Figura 51. Posición y velocidad con 12 V de entrada

Con 16 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 4 cm/s. (ver figura 52)

	Distance	in cm	: 12
	Distance	in cm	: 12
	Speed in	cm/s	:0.00
	Distance	in cm	: 12
	Distance	in cm	: 8
Г	- · ·	,	
	Speed in	cm/s	:-4.00
L	Distance	cm/s in cm	: 8
L	Distance Distance	in cm in cm	:-4.00 : 8 : 8
	Distance Distance Speed in	cm/s in cm in cm cm/s	:-4.00 : 8 : 8 :0.00
	Distance Distance Speed in Distance	cm/s in cm in cm cm/s in cm	: -4.00 : 8 : 8 :0.00 : 8

### Figura 52. Posición y velocidad con 16 V de entrada

Con 24 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 6 cm/s. (ver figura 53)

```
Distance in cm : 12
Distance in cm : 12
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 11
Distance in cm : 5
Speed in cm/s :-6.00
Distance in cm : 5
Distance in cm : 5
Speed in cm/s :0.00
```

Figura 53. Posición y velocidad con 24 V de entrada

Con 30 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 10 cm/s. (ver figura 54)

```
Distance in cm : 11
Distance in cm : 11
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 11
Distance in cm : 1
Speed in cm/s :-10.00
Distance in cm : 3
```

# Figura 54. Posición y velocidad con 30 V de entrada

Los datos anteriores se ordenan en la tabla II.

Voltaje DC (Volts)	Velocidad (m/s)
5	0.01
12	0.02
16	0.04
24	0.06
30	0.10

Tabla II Relación Voltaje – Velocidad del pistón (Pistón de ferrita)

## 3era etapa de pruebas

Se utiliza la unión de dos imanes de Neodimio de fuerza de campo magnético de 13,500 Gauss, con un diámetro de 40 mm de diámetro, y un espesor de 10 mm. (Ver figura 55). De igual modo que en la 1er y 2da etapa de pruebas, se hace variar el voltaje de entrada al circuito del cañón del Gauss.



Figura 55. Pistón de doble imán de Neodimio



Figura 56. Experimentación con pistón de doble imán de neodimio

Con 5 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 3 cm/s. (ver figura 57).



Figura 57. Posición y velocidad con 5 V de entrada

Con 12 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 9 cm/s. (ver figura 58).

Distance	in cm	: 12
Distance	in cm	: 12
Speed in	cm/s	:0.00
Distance	in cm	: 12
Distance	in cm	: 3
Distance Speed in	in cm cm/s	: 3 :-9.00
Distance Speed in Distance	in cm cm/s in cm	: 3 :-9.00 : 3

Figura 58. Posición y velocidad con 12 V de entrada

Con 16 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 11 cm/s. (ver figura 59)

```
Distance in cm : 16
Distance in cm : 16
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 16
Distance in cm : 5
Speed in cm/s :-11.00
Distance in cm : 5
Distance in cm : 5
```

#### Figura 59. Posición y velocidad con 16 V de entrada

Con 24 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 17 cm/s. (ver figura 60)

Distance in cm : 18 Distance in cm : 18 Speed in cm/s :0.00 Distance in cm : 18 Distance in cm : 1 Speed in cm/s :-17.00 Distance in cm : 1 Distance in cm : 1

Figura 60. Posición y velocidad con 24 V de entrada

Con 30 V en la fuente de alimentación se obtuvo una velocidad = 20 cm/s. (ver figura 61)

```
Distance in cm : 35
Distance in cm : 35
Speed in cm/s :0.00
Distance in cm : 35
Distance in cm : 15
Speed in cm/s :-20.00
Distance in cm : 14
Distance in cm : 14
```

Figura 61. Posición y velocidad con 30 V de entrada

# **X RESULTADOS**

Una vez realizados los cálculos de los parámetros del sistema, se insertan en la diagramación de bloques y se simulan. Los resultados de las simulaciones son las siguientes.

Se elige un voltaje arbitrario, en este caso 12 volts para las simulaciones de posición, velocidad y aceleración.

Con un Voltaje de 12 volts en la fuente de poder, se puede apreciar un desplazamiento máximo de 0.43 m como se indica en la figura 62.



Figura 62. Simulación del desplazamiento del pistón

En la figura 63 se aprecia como la velocidad tiene un valor máximo de 0.40 m/s, se observa que el pistón alcanza una velocidad máxima antes de los 0.5 segundos y la curva de velocidad desciende suavemente.





Para la aceleración se tiene un valor máximo de 3.5 m/s<sup>2</sup> (ver figura 64). Se puede apreciar de acuerdo con la curva de respuesta que antes de los 0.5 segundos el sistema comienza a desacelerar por efectos de la fricción entre el pistón y la superficie de deslizamiento, así como la pérdida de energía que entregan los capacitores.



Figura 64. Simulación de la aceleración del pistón

Simulación del circuito eléctrico del Cañón de Gauss con 5 Capacitores, pistón de Neodimio y 12 volts en la fuente de poder.

Respecto a el circuito eléctrico de impulso del cañón de Gauss, se simuló el sistema con 5 capacitores de 10,000 micro Faradios y la respuesta fue la mostrada en la figura 65.





Se aprecia un ligero incremento en el máximo de velocidad, además se observa un descenso más lento y suave en la curva de velocidad a comparación del circuito con 3 capacitores. La comparación se muestra en la figura 66.



Figura 66. Simulación de la velocidad del pistón con 5 capacitores en el cañón de Gauss

La curva de color rojo representa la velocidad con un circuito eléctrico del cañón de Gauss con 5 capacitores, mientras que en la curva de color azul se utilizan sólo 3 capacitores, se puede observar como utilizando más capacitores en el circuito del cañón de Gauss se obtiene una velocidad máxima más grande y un descenso de velocidad más lento en comparativa con un circuito de 3 capacitores.

La respuesta mostrada en las curvas de comportamiento del pistón, tienen una respuesta similar a los efectos que se notaron en el proceso de experimentación, es decir, en la experimentación se pudo notar en t=0 una aceleración del pistón de neodimio muy alta, pero muy corta en duración, suficiente para desplazar el pistón una cierta distancia a una velocidad especifica.

En la tabla III se muestra una comparación de las 3 etapas de experimentación, además se agrega una etapa más que se realizó con 5 capacitores en lugar de 3 con el pistón de doble imán de neodimio.

Variación de voltaje	Pistón con 1 sólo imane de Neodimio	Pistón con doble imán de ferrita	Pistón con doble imán neodimio	Pistón con doble imán neodimio y 5
-	"Velocidad m/s"	"Velocidad m/s"	"Velocidad m/s"	capacitores
				"Velocidad m/s"
5	0.03	0.01	0.03	0.03
12	0.10	0.02	0.09	0.08
16	0.13	0.04	0.11	0.12
24	0.23	0.06	0.17	0.17
30	0.29	0.10	0.2	0.24

Tabla III Relación Voltaje – Velocidad del pistón (Comparación)

La tabla III proporciona información muy valiosa sobre la respuesta de velocidad que experimenta el pistón tanto de ferrita como de neodimio, se puede apreciar que el voltaje conforme tiende a un valor más elevado, es decir, entre más fuerza electromotriz se agregue al cañón de Gauss, el pistón de ambos materiales mantiene una tendencia a la alza en la velocidad, ya que la concentración de campo magnético en el embobinado es mayor y la fuerza de repulsión del pistón también lo será, lo interesante aquí es la reacción de ambos materiales, en primer lugar se hicieron las pruebas con acero, mismo que no respondió al campo magnético generado como se esperaba, por lo que se optó por materiales con mayor capacidad magnética como la ferrita y el Neodimio. La ferrita responde ya que se observan velocidades incrementales en cuanto el voltaje es mayor, pero el Neodimio tiene respuestas de velocidad más eficientes, superando a la ferrita casi 2 o 3 veces más en su desempeño.

Finalmente, la prueba con 5 capacitores en el cañón de Gauss implementado al pistón de doble imán de Neodimio, responde muy similar en sus datos de velocidad a la velocidad que experimenta el pistón de 1 solo imán de neodimio, es decir, el aumento de masa se compensa con la adición de un par de capacitores más que almacenan un poco más de energía para posteriormente ser liberada y realizar una descarga más lenta y suave.

## Pistón de Imán de Neodimio vs Imán de Ferrita

Se realiza la comparativa de ambos materiales para el pistón. Es indispensable que ambos materiales cuenten con propiedades magnéticas para generar el efecto deseado dentro del cilindro de potencia electromagnética. (Ver figura 67).


Figura 67. Comparativa de Voltaje-Velocidad entreel pistón de Neodimio y Ferrita

En la figura 67 es posible observar una diferencia muy marcada de la respuesta magnética del Neodimio y la Ferrita, la Ferrita tendrá una menor respuesta de velocidad, mientras que el Neodimio responde mucho mejor a el campo magnético que se generará dentro del cilindro, experimentando una velocidad máxima de 20 cm/s con 30 volts de excitación y 1 ampere.

En conclusión, de acuerdo con la gráfica el Neodimio será 2 veces más eficiente para responder al campo magnético generado que la Ferrita, por tanto se opta por utilizar este material para el pistón.

El prototipo de experimentación del cilindro de potencia electromagnético por el principio del cañón de Gauss queda definido en solid Works como se muestra en la figura 68.



Figura 68. Ensamble del Pistón Electromagnético

Con este prototipo se pretende proporcionar una alternativa de generación de movimiento mecánico traslacional siendo independiente de la energía neumática e hidráulica, se busca de igual modo simplificar la generación de dicho movimiento utilizando únicamente una fuente de poder y un circuito de capacitores, es decir, no sería necesario una bomba o un compresor que son utilizados como fuente de energía en los sistemas neumáticos e hidráulicos.

En la tabla IV se detallan los elementos utilizados con la implementación de este proyecto y los circuitos básicos de los sistemas neumáticos e hidráulicos.

Tipo de Sistema	Componentes
Pistón electromagnético bajo el principio del Cañón de Gauss	Fuente de poder, cilindro, circuito de capacitores.
Circuitos Neumáticos	Compresor neumático, depósito, unidad de mantenimiento FRL, Válvulas, mangueras, reguladores de caudal, manómetro, cilindro.
Circuitos Hidráulicos	Motor, bomba, depósito, tuberías y mangueras, manómetro, válvulas, cilindro, reguladores de caudal.

Tabla IV Comparación cantidad de elementos

## **XI CONCLUSIONES**

El presente proyecto busca generar una alternativa para producir movimiento mecánico traslacional de forma eficiente, simplificando y ofreciendo algunas ventajas que no se encuentran en los sistemas de generación de movimiento lineal como los sistemas neumáticos e hidráulicos. La implementación de un Cañón de Gauss que a lo largo de la historia de su invención ha sido utilizado para fines bélicos, se implementa a un sistema de generación de movimiento gracias a las cantidades de energía que puede almacenar y expulsar de forma inmediata con el fin de impulsar un elemento mecánico (pistón).

A lo largo del proceso de experimentación se logró comprobar que al incrementar la diferencia de potencial de forma gradual en el circuito del cañón de Gauss, el campo magnético generado en el embobinado era mayor, la respuesta de la velocidad y aceleración del pistón de neodimio reaccionaron como se esperaba y conforme a las gráficas de respuesta de ambas variables.

Las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de respuesta de este sistema híbrido se toman en dominio del tiempo para construir la programación gráfica (Bloques), de modo que para la simulación fue necesario el cálculo individual de las masas, el amortiguamiento, la corriente, la inductancia, capacitancia, resistencia entre otras. De esta forma, los cálculos realizados aproximaron correctamente la dinámica de comportamiento del sistema corroborándolo con lo observado en el proceso de experimentación.

Para el proceso de construcción del sistema, fue necesaria la comparación de materiales del pistón, primero se realizó la prueba con acero de bajo carbono, obteniendo resultados de desplazamiento, velocidad y aceleración nulos, por lo que se optó por algún material magnético puro, por lo que se probó el sistema con imán de ferrita y se obtuvieron resultados aceptables en las variables mencionadas, pero se pudo observar que este material de ferrita es muy frágil a los impactos por lo que se optó finalmente por un material más resistente y con mayor fuerza de campo magnético, es decir, Neodimio, este al realizar el proceso de experimentación arrojó valores más convenientes y más apegado a las simulaciones realizadas en las 3 variables antes mencionadas.

De igual forma se pudo observar que la cantidad de voltaje de entrada en el circuito eléctrico del Cañón de Gauss es fundamental, ya que la velocidad y desplazamiento del pistón depende directamente de la energía suministrada por el conjunto de capacitores que a su vez depende de cuanto voltaje se les haga llegar para almacenar. Se realizaron las pruebas con un máximo de 30 volts de entrada en el circuito eléctrico del cañón de Gauss, observando una aceleración inicial muy grande y desplazamientos y velocidades progresivamente más altos conforme el voltaje se aumentaba entre 5, 12, 16, 24 y 30 Volts. En este caso la fuente de poder utilizada fue con una corriente máxima de 1 Ampere, por lo que si se incrementa la cantidad de esta variable el pistón tendrá una respuesta de velocidad, desplazamiento, aceleración y potencia mucho mayor.

## XII TRABAJOS FUTUROS

El proyecto presente sólo ha sido el inicio para comprender la dinámica de respuesta del sistema y comprobar las hipótesis hechas al inicio de esta investigación, por lo que se debe trabajar y perfeccionar el sistema añadiendo la etapa de control y generando una propuesta de materiales para un prototipo industrial.

El presente prototipo podría ser implementado en los sistemas industriales donde se utilicen cilindros neumáticos para clasificar, compactar, estampar y desplazar elementos dentro de un proceso industrial.

El cañón de gauss podría ser aplicado también para acelerar cuerpos más grandes como algún vagón de pasajeros, aunque se requiere de un proceso de investigación extenso para ser implementado.

## **XII BIBLIOGRAFÍA**

1.- Cheng, D. (1993). *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*. Estados Unidos de América: Addison-Wesley

2.- Jiménez García, J. A. (2015). Principio del pistón electromagnético. Nextia, (2), 23-31. UVP

3.- Flores Bernal y García Cova (2018). Pistón de Control Electromagnético, revista Tecno Cultura.

4.- Alarcón Julián, (2002). Diseño y construcción de un dispositivo para convertir un motor de combustión interna en un motor electromagnético. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

5.- Arenas G. (2008). Electricidad y Magnetismo. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

6.- Hayt, W. (2006). Teoría Electromagnética: Mc Graw Hill

7.- FísicaLab, Campo Magnético creado por una carga puntual. <u>https://www.fisicalab.com/tema/campo-magnetico</u>

8.- Orellana Q. y Nélida M. Corriente eléctrica. Universidad Mayor de San Simón. 2017

9.- Marín O. y Ortiz R. Enseñanza y Aprendizaje del concepto de corriente eléctrica basada en analogías y metáforas, Universidad Sur Colombiana, 2014.

10.- Álvarez Pulido Manuel (2010). Electroimanes, Ed. Club Universitario.

11.- Creus, A. (2007). Neumática e Hidráulica. España: MARCOMBO

12.- Mateos Felipe, Automatismos e informática industrial, Universidad de Oviedo.

13.- Mondragón Téllez Víctor Manuel (2016), La contaminación industrial en México, UAEM

14.- Hernández G. (2010). Introducción a los sistemas de control, conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Ed. Pearson.

15.- Hernández Sampieri Roberto (2014). Metodología de la Investigación. 6ta Edición, McGrawHill

16.- Conde Fátima (2008). Corriente Eléctrica, Universidad de Sevilla, Depto. De Física, 2008

17.- Jameson, J. (2012). Proteus 8 Professional (Nº de versión 8). Windows. Reino Unido: Labcenter Electronics Ltd.

18.- Cleve, M. (2017). Matlab 2017 (Nº de versión R2017b). Windows. Nuevo México: Math Works Inc.

19.- Vera M. (2018). Ensayo de "Medición de los Coeficientes de Fricción estático y cinético para 3 superficies distintas sobre metal.

## ANEXOS







