



Tecnun
Universidad
de Navarra

Proyecto Fin de Grado

INGENIERÍA ELÉCTRICA

Diseño y desarrollo de una lanzadera electromagnética

Pedro José Romero Gombau

Donostia-San Sebastián, mayo 2024

Resumen

Este trabajo de fin de grado trata acerca del diseño y la implementación de una lanzadora electromagnética, centrándose en el uso de ANSYS Maxwell para la simulación y el desarrollo de un prototipo funcional. Si bien el campo de la tecnología de las lanzadoras electromagnéticas está bien establecido, el objetivo principal de este proyecto es el diseño de una práctica universitaria en la que los alumnos dispongan de las fórmulas necesarias para optimizar la geometría y alimentación de la bobina y logren una mayor velocidad y fuerza de lanzamiento del proyectil. Los métodos empleados incluyen la creación de geometría en ANSYS Maxwell y simulaciones transitorias para analizar el comportamiento de la bobina, con énfasis en los parámetros dinámicos del proyectil. Además, se realizarán cálculos analíticos manuales para derivar relaciones electromagnéticas que rigen la interacción entre la bobina y el proyectil. En resumen, esta tesis presenta una exploración exhaustiva de las técnicas de diseño y simulación de una lanzadora electromagnética, con un enfoque en el aprendizaje de ANSYS Maxwell y la optimización de la geometría de la bobina para mejorar el rendimiento del proyectil.

Palabras clave: Lanzadera electromagnética, ANSYS Maxwell, Simulación, Prototipo, Optimización.

Abstract

This undergraduate thesis focuses on the design and implementation of an electromagnetic launcher, emphasizing the use of ANSYS Maxwell for simulation and the development of a functional prototype. Although the field of electromagnetic launcher technology is well-established, the primary objective of this project is to design a university practical exercise in which students have the necessary formulas to optimize the geometry and power supply of the coil, achieving higher speed and force in projectile launch. The methods employed include creating geometry in ANSYS Maxwell and transient simulations to analyze the coil's behavior, with an emphasis on the dynamic parameters of the projectile. Additionally, manual analytical calculations will be conducted to derive electromagnetic relationships governing the interaction between the coil and the projectile. In summary, this thesis presents a comprehensive exploration of the design and simulation techniques for an electromagnetic launcher, focusing on learning ANSYS Maxwell and optimizing coil geometry to improve projectile performance.

Key words:Coilgun, ANSYS Maxwell, Simulation, Prototype, Optimization.

Índice

1. Introducción	8
1.1. Objetivos y métodos	9
1.2. Motivación	10
2. Marco teórico	11
3. Desarrollo	13
3.1. Desarrollo teórico	13
3.2. Simulaciones	14
3.3. Prototipo	15
4. Resultados	16
5. Discusión y conclusiones	17

Índice de figuras

1.	Cañón de Gauss.	8
2.	Ecuaciones de Maxwell.[1]	11
3.	Campo magnético en una bobina. www.lanl.gov	12
4.	Esquema de la geometría de la bobina. Elaboración propia.	13

Índice de cuadros

1. Introducción

En el ámbito de la ingeniería y la física aplicada, las *coilguns*, también conocidas como *lanzaderas electromagnéticas*, representan una tecnología de creciente interés debido a su potencial en aplicaciones tanto industriales como militares. El concepto de las lanzaderas electromagnéticas se origina en el siglo XIX, cuando se empiezan a explorar las propiedades del electromagnetismo y sus potenciales aplicaciones. Uno de los nombres con los que uno se puede referir a esta tecnología es *Cañones de Gauss*, debido a que fue el matemático Carl Friedrich Gauss quién desarrolló en esta época las ecuaciones que regían el comportamiento del dispositivo. Sin embargo, no es hasta los tempranos años del siglo XX cuando se construye la primera lanzadera funcional, producto del ingenio del científico noruego Kristian Birkeland.[2]

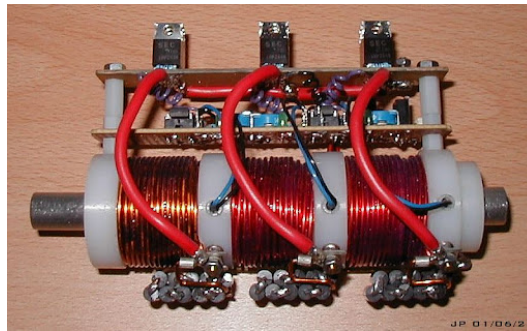


Figura 1: Cañón de Gauss.

Las principales aplicaciones de las lanzaderas electromagnéticas se encuentran en el ámbito militar, donde se utilizan para el lanzamiento de proyectiles a alta velocidad sin la necesidad de explosivos químicos. Esta tecnología ofrece ventajas significativas, como la reducción del desgaste mecánico y la capacidad de ajustar la fuerza de lanzamiento con precisión. Además, en el sector aeroespacial, las lanzaderas electromagnéticas se consideran una alternativa prometedora para el lanzamiento de satélites y otros objetos al espacio, debido a su eficiencia energética y menor impacto ambiental en comparación con los cohetes tradicionales. También encontramos varias aplicaciones en la industria, como por ejemplo en procesos de manufactura que requieren la propulsión de materiales a altas velocidades. También se están explorando aplicaciones en el campo de la medicina, como en dispositivos de resonancia magnética y aceleradores de partículas para tratamientos médicos avanzados.[3]

Para finalizar con la introducción, quiero presentar brevemente el funcionamiento básico de estos cañones. El objetivo físico de una lanzadera electromagnética es la creación de un campo magnético mediante el paso de una corriente eléctrica a través de una bobina de cobre. Cuando se aplica corriente a la bobina, se genera un campo magnético que ejerce una fuerza sobre el proyectil, generalmente una barra de material ferromagnético, a la que me referiré durante este proyecto como **vástago**. El proceso de aceleración comienza cuando la corriente eléctrica, controlada por un circuito electrónico, fluye a través de la bobina, creando un campo magnético que atrae el proyectil hacia el centro de la bobina. Antes de que los centros de la bobina y el vástago estén alineados, la corriente se corta, provocando que este último continúe su movimiento hacia adelante debido a su inercia. A lo largo de este documento, se desarrollarán con detalle los diferentes aspectos teóricos y constructivos de una lanzadera electromagnética, llegando a desarrollar un prototipo con el objetivo de preparar una práctica universitaria para el departamento de Ingeniería Eléctrica de Tecnum.

1.1. Objetivos y métodos

Exploraremos ahora los principales objetivos del proyecto, desglosando cada parte constituyente y su resultado esperado. El principal propósito de este trabajo es el diseño de una práctica universitaria que se pueda realizar durante el primer o segundo curso, con la idea de atraer a nuevos ingenieros hacia el campo de la electricidad. Para lograr este objetivo principal, el trabajo se dividirá en cuatro partes: desarrollo teórico, simulaciones, desarrollo de un prototipo y desarrollo de la práctica. Los objetivos y resultados esperados de cada parte son:

1. **Desarrollo teórico:** Este apartado tiene como objetivo explorar las fórmulas que describen el comportamiento del vástago dentro de la bobina cuando es alimentada con corriente continua. El desarrollo resultará en una serie de fórmulas que constituirán un modelo del sistema, así como un programa que las implemente en una aplicación de *MatLAB®*.
2. **Simulaciones:** Las simulaciones tienen como objetivo obtener otro modelo físico del sistema, utilizando el método de los elementos finitos a través del software *ANSYS Maxwell®*. El resultado esperado es un modelo paramétrico que permita introducir los valores de la geometría de la bobina y su alimentación, y devuelva los valores dinámicos del vástago. Se espera que estos resultados sean más precisos que los obtenidos mediante el desarrollo teórico y se pretende probar diferentes configuraciones hasta llegar a la más óptima.
3. **Prototipo:** Esta parte tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un prototipo funcional de lanzadera que permita comparar los resultados teóricos con los físicos. Será necesario diseñar un circuito electrónico de control con *Arduino®* y un medio físico para sujetar y alimentar la bobina. El resultado esperado es un prototipo manejable y modular, con el cual se puedan probar diferentes configuraciones.
4. **Desarrollo de la práctica:** Con los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se desarrollará un documento que presente un problema de optimización a resolver por los alumnos que realicen la práctica. Se fijarán los parámetros objetivos y se especificará los valores que pueden modificar, así como las relaciones entre ellos, definidas por las ecuaciones obtenidas en el desarrollo teórico (3.1).

1.2. Motivación

Trataré en este subapartado las motivaciones que han impulsado este proyecto y justifican el área de estudio del mismo. El desarrollo de este proyecto está justificado por los siguientes puntos, que van a ser las principales áreas de influencia de este trabajo de final de grado:

1. **Vanguardia Tecnológica:** La investigación y desarrollo en tecnologías como la tratada en este trabajo representan una oportunidad para estar a la vanguardia en el campo de la ingeniería electromagnética. Este proyecto permite explorar y comprender los principios fundamentales del electromagnetismo aplicados a un sistema real y funcional.
2. **Aplicación de Conocimientos Teóricos:** La creación de una *lanzadera electromagnética* requiere la aplicación de conocimientos avanzados en física, matemáticas e ingeniería eléctrica. Este proyecto proporciona un contexto práctico en el que tanto yo como alumno, como los futuros estudiantes que lo utilicen, emplearán teorías y conceptos aprendidos en las aulas para fortalecer su entendimiento de los fenómenos electromagnéticos a un nivel visual y palpable.
3. **Desarrollo de Competencias Técnicas:** La construcción de la *lanzadera* involucra diversas habilidades técnicas, desde el diseño y simulación en software especializado hasta la fabricación y prueba de placas electrónicas y prototipos funcionales. Este proceso mejora significativamente las competencias prácticas en el laboratorio, una habilidad esencial para cualquier ingeniero eléctrico.
4. **Fomento de la Innovación Educativa:** El desarrollo de este proyecto no solo busca aportar al conocimiento técnico, sino también servir como una herramienta educativa innovadora. La práctica universitaria diseñada a partir de este proyecto permitirá a los estudiantes experimentar directamente con la optimización de parámetros electromagnéticos, desarrollando habilidades críticas y fomentando una mentalidad innovadora.

Con esto queda justificada la realización de este proyecto de fin de grado, y podemos empezar a desarrollar el proceso de creación de la **lanzadera electromagnética**.

2. Marco teórico

En esta sección se desarrollarán los principios teóricos que permiten el funcionamiento de las lanzaderas electromagnéticas. Para entender estos principios, es esencial comprender los fundamentos del electromagnetismo, el concepto de bobina y su relación con la generación de campos magnéticos.

El electromagnetismo es una rama fundamental de la física que estudia las interacciones entre los campos eléctricos y magnéticos. Su desarrollo ha sido crucial para el avance de la tecnología, desde la generación y transmisión de electricidad hasta las comunicaciones inalámbricas. Aunque la raza humana conoce los fenómenos eléctricos y magnéticos desde la historia antigua, estos no fueron estudiados hasta el siglo XVII, y se consideraban fenómenos independientes hasta que Hans Christian Ørsted descubrió en 1820 que una corriente eléctrica puede generar un campo magnético. Mientras el físico danés preparaba los equipos para dar una conferencia en la Universidad de Copenhague, observó que la aguja de una brújula cercana se desviaba cuando la corriente fluía a través de un alambre conductor. Este accidental descubrimiento le llevó a publicar el artículo *CIRCA EFFECTUM CONFLICTUS ELECTRICI IN ACUM MAGNETICAM*, en el que se describieron los fenómenos electromagnéticos por primera vez, aunque de manera cualitativa. En la siguiente década, Ampère y Faraday describirían matemáticamente el descubrimiento de Ørsted, dando lugar al electromagnetismo como lo conocemos hoy en día. [4]

El trabajo de James Clerk Maxwell en la década de 1860 unificó estos descubrimientos en un marco teórico coherente. Maxwell formuló un conjunto de ecuaciones que describen cómo los campos eléctricos y magnéticos interactúan y se propagan. Estas ecuaciones, conocidas como las ecuaciones de Maxwell, son la base del electromagnetismo clásico.

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

Figura 2: Ecuaciones de Maxwell.[1]

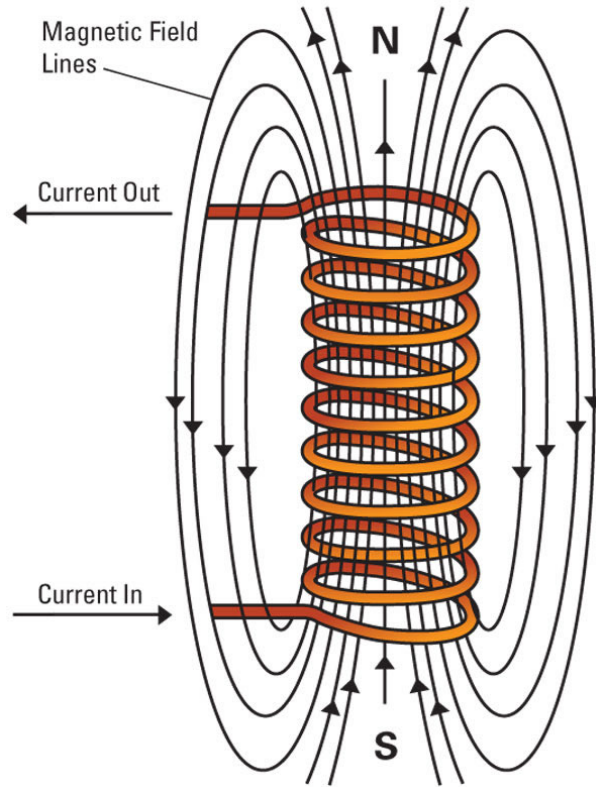


Figura 3: Campo magnético en una bobina. www.lanl.gov

Como se ha mencionado en la introducción, el funcionamiento de una lanzadera electromagnética se basa en la capacidad de las bobinas de generar un flujo magnético cuando se les aplica una corriente, como se puede ver en la. Esto es debido a la ley de Àmpere, que enuncia lo siguiente:

Según la ley de Ampère, la integral de línea del campo magnético \mathbf{B} alrededor de un lazo cerrado es igual a μ_0 multiplicado por la corriente total I_{enc} que pasa a través de cualquier superficie delimitada por el lazo. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{enc}$$

donde μ_0 es la permeabilidad del vacío.

La manera más básica de representar una lanzadera es un simple circuito con una fuente de alimentación, un interruptor controlado por un circuito electrónico y una bobina, que es la encargada de generar el campo.

3. Desarrollo

En esta sección se detallarán los pasos llevados a cabo para la consecución del objetivo principal de este proyecto: el diseño y construcción de una *lanzadera electromagnética*. En los siguientes apartados, se describirán concisamente los procedimientos, herramientas y resultados obtenidos en cada una de estas fases del desarrollo.

3.1. Desarrollo teórico

Para comenzar el desarrollo teórico, primero definiremos la geometría de la bobina de manera esquemática para entender bien el sistema con el que trabajamos. De manera descriptiva, lo que tenemos es un cilindro hueco de radio r_{cint} y altura h_c sobre el cual enrollaremos un hilo de cobre N veces, resultando en un radio exterior r_{cext} . Ligeramente introducido en el cilindro hueco, se encuentra el vástago, que es un cilindro de acero (REFERENCIAR EL ACERO BIEN) de radio r_b y longitud L_b . La corriente de alimentación será i_{dc} . En la siguiente figura se resume todo en un esquema:

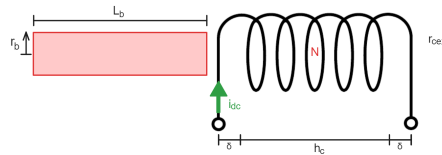


Figura 4: Esquema de la geometría de la bobina. Elaboración propia.

Antes de empezar con el desarrollo, hay que aclarar que cuando se empezó este proyecto, se partió de una bobina ya hecha, con la que se han realizado todas las pruebas que se pueden ver en los siguientes apartados. Con el propósito de obtener valores numéricos en esta sección para comprobar de manera cualitativa si el modelo tiene sentido, utilizaremos también los datos de la geometría de la bobina de pruebas para calcular el resultado de las ecuaciones obtenidas. Dichos datos son:

$$L_b = 0,096m \quad r_b = 0,003045mh_c = 0,05321m \quad r_{cext} = 0,01064m i_{dc} = 3,5A \quad N = 500$$

El desarrollo teórico empezará por buscar el valor de la inducción electromagnética en la barra, ya que con su valor podremos calcular la fuerza utilizando Lorentz (**COMPROBAR ESTO IGUAL HAY QUE PONER OTRA COSA**). Para ello, aplicaremos la **ley integral de Àmpere**:

$$Ni = \oint \vec{H} d\vec{l}$$

Para simplificar los cálculos, vamos a asumir un flujo uniforme en la bobina ya que tan solo en los extremos (δ) el flujo magnético se curvará. Con esto, podemos escribir:

$$Ni = Hh_c \rightarrow H = \frac{Ni_{dc}}{h_c}$$

Buscamos ahora una expresión para la densidad de flujo:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r \frac{Ni_{dc}}{h_c}$$

3.2. Simulaciones

3.3. Prototipo

4. Resultados

5. Discusión y conclusiones

Referencias

- [1] Edward M. Purcell and David J. Morin. Electricidad y magnetismo, 2013.
- [2] Vineeth Kumar Sai Chaithanya. A review on technological advancement in electromagnetic coil gun system. 2018. Accedido: 05-06-2024.
- [3] R.J. Kaye, B.N. Turman, and S.L. Shope. Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology, 08 2002. Accedido: 05-06-2024.
- [4] IEEE Spain. Doscientos aniversario de oersted y el descubrimiento del electromagnetismo. Accedido: 24-06-2024.