



**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	16
3.1. Desarrollo teórico	16
3.2. Simulaciones	18
3.3. Prototipo	19
4. Resultados	20
5. Discusión y conclusiones	21

Índice de figuras

1.	Cañón de Gauss. Imagen tomada de http://www.coilgun.eclipse.co.uk/ . .	8
2.	Ecuaciones de Maxwell.[7]	11
3.	Visualización del campo magnético de un conductor. Elaboración propia. .	12
4.	Curva \mathbf{C} para la cual realizaremos los cálculos. Imagen tomada de https://artpictures.club/autumn-2023.html	12
5.	Visualización del campo magnético de una bobina energizada. Imagen tomada de https://ece.northeastern.edu/fac-ece/nian/mom/electromagnets.html . .	14
6.	Esquema cualitativo de la lanzadera electromagnética. Elaboración propia. .	15
7.	Esquema geométrico del sistema. Elaboración propia.	16

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.[6]

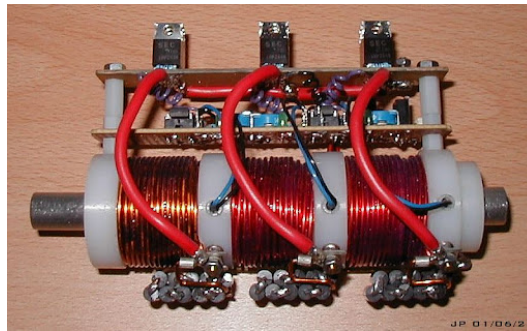


Figura 1: Cañón de Gauss. Imagen tomada de <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/>

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. [5]

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. [3]

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.[7]

En nuestro caso, la ley de Maxwell que nos es de mayor interés es la de Ampère. Esta ley es la que define la relación entre un campo magnético y uno eléctrico, y partir de las ecuaciones anteriores podemos definir la ley integral de Ampère como:

”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.”

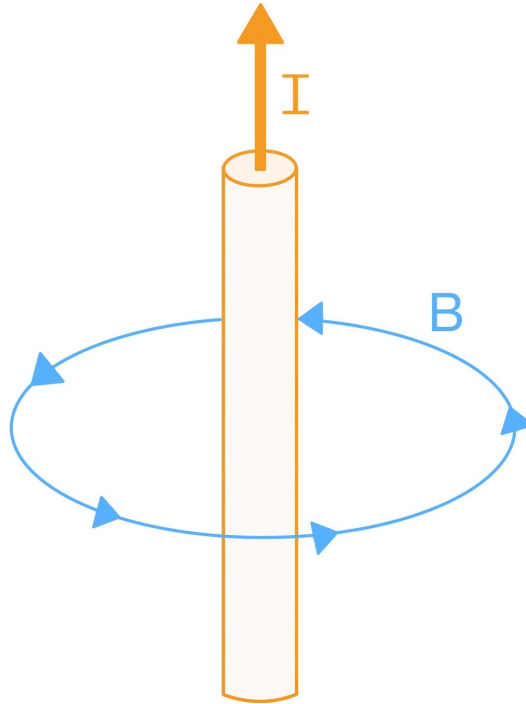


Figura 3: Visualización del campo magnético de un conductor. Elaboración propia.

Una vez entendido el comportamiento en un conductor, el siguiente paso es analizar el componente principal de la lanzadera: la **bobina**. Una bobina, o solenoide, es un conductor enrollado de manera cilíndrica alrededor de un núcleo de algún material. El número de vueltas que da el conductor alrededor del núcleo se define como espiras y se denota como N , y el núcleo posee un parámetro físico llamado permeabilidad relativa μ_r , que indica su capacidad para permitir el paso del flujo magnético. El siguiente paso por tanto es llegar a una expresión para el campo magnético alrededor de un solenoide. Para ello, partiremos de la ley integral de Ampère y consideraremos un solenoide con N espiras y longitud L , por el cual pasa una corriente I . Elegimos una trayectoria rectangular C que va parcialmente dentro y fuera del solenoide, la cual es conveniente porque simplifica los cálculos del campo magnético.

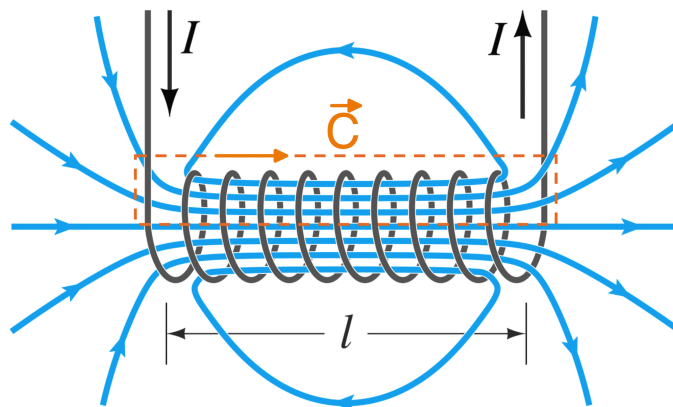


Figura 4: Curva C para la cual realizaremos los cálculos. Imagen tomada de <https://artpictures.club/autumn-2023.html>.

La integral de línea del campo magnético B en la trayectoria rectangular \vec{C} se puede

dividir en cuatro segmentos:

- Dentro del solenoide, paralelo al eje del solenoide, longitud l .
- Fuera del solenoide, paralelo al eje del solenoide, longitud l .
- Dos segmentos perpendiculares al eje del solenoide, cada uno de longitud w .

Debido a la simetría y a que el solenoide es muy largo, asumimos que el campo magnético fuera del solenoide es despreciable, y el campo dentro es uniforme y paralelo al eje del solenoide. Así, la integral se simplifica a:

$$\oint_c \vec{B} d\vec{l} = Bl$$

Analizaremos ahora la corriente encerrada total, que será igual a la corriente que fluye por las N espiras:

$$I_{encerrada} = NI$$

En una longitud cualquiera, L , podemos hablar de una densidad de espiras igual a $n = \frac{N}{L}$, por lo que en la curva C tendremos:

$$I_{encerrada} = nIl$$

Ya tenemos los dos términos de la ecuación integral de Ampère, por lo que podemos igualar:

$$Bl = \mu_0 nIl \rightarrow B = \mu_0 nI \quad \forall n = \frac{N}{L} \rightarrow B = \mu_0 \frac{NI}{L}$$

Que es la expresión para la inducción electromagnética en un solenoide.

El siguiente punto de interés, con el cual además terminaré el marco teórico, es la forma del campo magnético del solenoide. La geometría del mismo juega un papel crucial en la distribución del campo magnético. Debido a su forma cilíndrica y a la disposición de las espiras, el campo magnético generado en el interior del solenoide es casi uniforme y paralelo al eje del cilindro, variando solo en los extremos donde se curva hacia el núcleo para cumplir la ley de Gauss para el campo magnético ($\nabla \cdot \vec{B} = 0$). Esta uniformidad del campo magnético es una característica deseable en muchas aplicaciones, como en el diseño de inductores o transformadores. En nuestro caso, la uniformidad del campo nos va a permitir acelerar el proyectil de la lanzadera de manera rectilínea hacia el centro de la bobina.[7] [1][8].

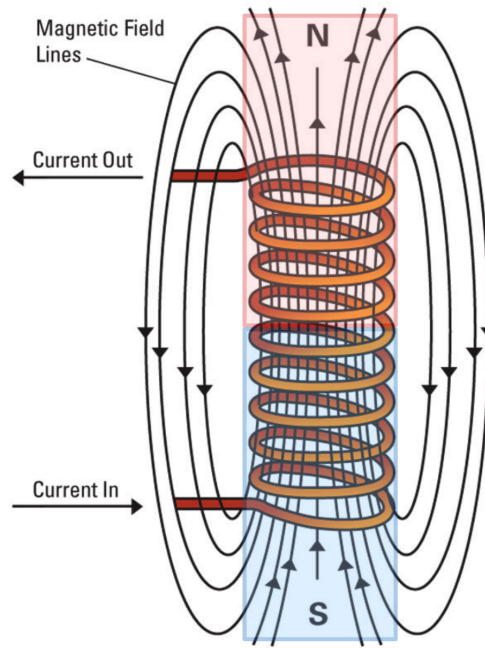


Figura 5: Visualización del campo magnético de una bobina energizada. Imagen tomada de <https://ece.northeastern.edu/fac-ece/nian/mom/electromagnets.html>.

La forma en que aprovecharé este fenómeno para construir la lanzadera consiste en colocar un proyectil de material ferromagnético en el extremo de una bobina energizada, el cual será atraído hacia el centro debido al campo magnético. Justo cuando los centros del proyectil y la bobina coincidan, la corriente se interrumpirá, evitando que el proyectil siga siendo atraído por el electroimán y permitiéndole avanzar por inercia. Esto se logrará mediante un circuito electrónico que energizará la bobina durante el tiempo necesario para que el proyectil alcance la máxima velocidad posible. Este circuito será desarrollado en la sección de prototipo (3.3).

Para finalizar el marco teórico, presentaré un esquema básico de montaje que servirá como preámbulo al desarrollo de las siguientes partes:

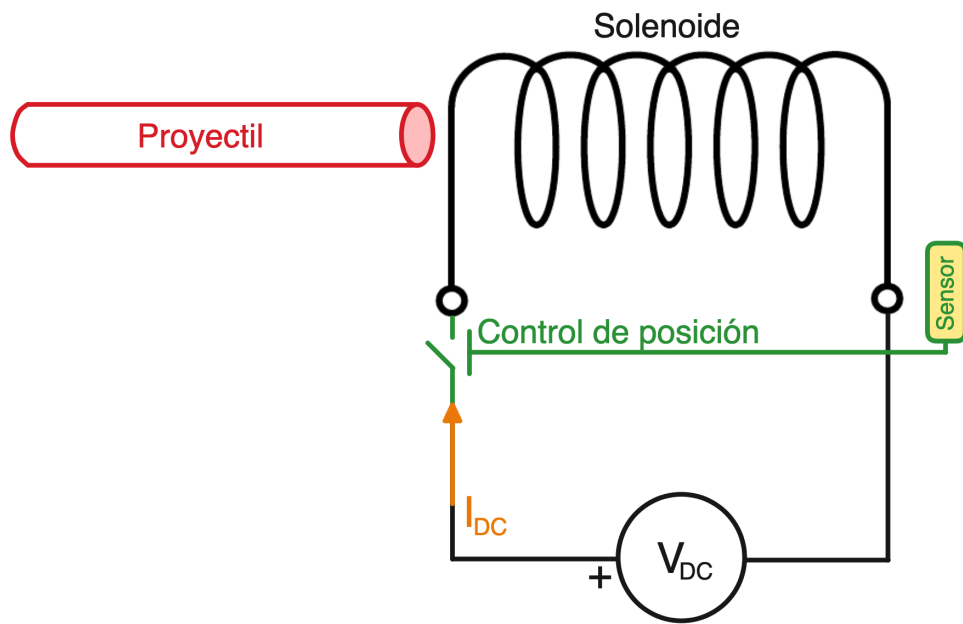


Figura 6: Esquema cualitativo de la lanzadera electromagnética. Elaboración propia.

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

En la sección de desarrollo teórico trataré de proporcionar un procedimiento mediante el cual los alumnos que realicen la práctica sean capaces de optimizar la velocidad y fuerza del proyectil a partir de los parámetros eléctricos y geométricos que definen el sistema. Estos parámetros de entrada serán:

- **Parámetros geométricos:**

- r_{cext} y r_{cint} : radios exterior e interior de la bobina, respectivamente.
- l_c : altura de la bobina.
- r_{fe} : radio del vástago.
- l_{fe} : longitud del vástago.

- **Parámetros eléctricos:**

- N : número de espiras.
- I_{cc} : corriente de alimentación del solenoide.
- μ_{fe} : permeabilidad relativa del vástago ferromagnético.

El objetivo de este desarrollo es crear un programa en MATLAB al que se le proporcionen estos datos, y que calcule automáticamente la fuerza que experimentará el proyectil. Como se muestra en la figura 5 el valor de B varía a lo largo del solenoide. Por lo tanto, además de los parámetros dados (que son constantes), será necesario parametrizar también la posición del vástago en cada momento y calcular la fuerza que experimenta en cada una de esas posiciones. Con todo esto, he desarrollado el siguiente esquema que muestra las variables del sistema:

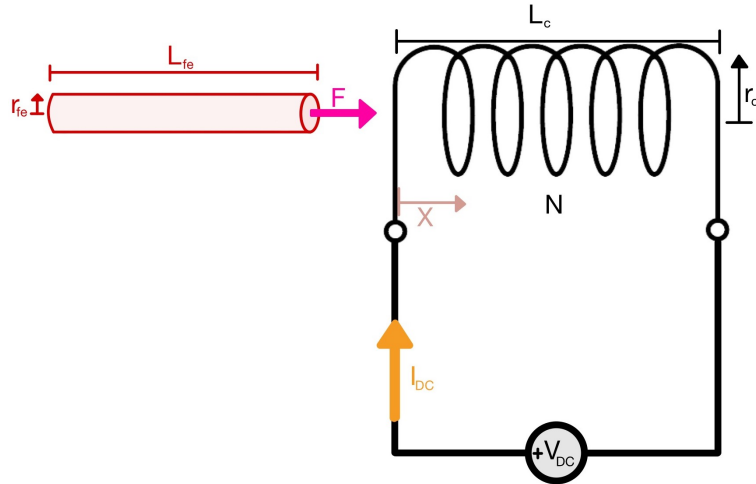


Figura 7: Esquema geométrico del sistema. Elaboración propia.

Antes de empezar a escribir el código, tenemos que realizar un desarrollo analítico partiendo de las fórmulas del marco teórico. Mi idea para conseguir un valor de la fuerza que se pueda calcular y programar fácilmente es conseguir un circuito magnético equivalente que exprese las principales reluctancias del sistema. La reluctancia es un concepto análogo a la resistencia eléctrica, solo que para el flujo magnético [2]. Todos los materiales tienen reluctancia magnética y su expresión es:

$$\mathcal{R} = \frac{l_{caract}}{\mu_0 * \mu_r * S_{effect}}$$

Como se puede observar, el valor de la reluctancia depende de la geometría del cuerpo del que se esté calculando, por lo que este será el parámetro que nos relacione los valores métricos del sistema con los eléctricos.

Además de este valor, también podemos definir la *Fuerza Electromotriz* o *FFM*, un parámetro análogo a la tensión en un circuito eléctrico, que en un solenoide es el resultado de multiplicar el número de espiras por su corriente de alimentación:

$$\mathcal{F} = NI$$

Combinando estas dos ecuaciones obtenemos la expresión del flujo en un solenoide, que consecuentemente es el análogo a la corriente en un circuito eléctrico:

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{NI}{\mathcal{R}}$$

Y para terminar, la inducción magnética B se corresponde con el flujo magnético que fluye a través de un área del espacio, por lo que podemos escribir:

$$B = \phi S \rightarrow B = \frac{NIS}{\mathcal{R}}$$

Al tener una expresión de la inducción en función de la reluctancia, ya hemos conseguido una fórmula que nos proporciona la cantidad de campo generado a partir de las diferentes variables de entrada. Solo necesitamos otra expresión que nos devuelva la fuerza dinámica a partir de la inducción. Según Nicolás Jerez [4] la fuerza de atracción para un flujo constante y un circuito magnético lineal es:

$$F = \frac{1}{2} \frac{B^2 * S}{\mu_0}$$

Por lo que la relación queda definida. Con las fórmulas generales obtenidas, solo nos quedaría definir las reluctancias que van a representar el sistema. Para esto, tenemos que analizar el conjunto proyectil-bobina, e intentar visualizar el camino del flujo magnético.

3.2. Simulaciones

3.3. Prototipo

4. Resultados

5. Discusión y conclusiones

Referencias

- [1] D. J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*, 2005.
- [2] E. Hughes, I. McKenzie-Smith, J. Hiley, and K. Brown. *Electrical and Electronic Technology*. Pearson Education, 10th edition, 2005.
- [3] IEEE Spain. *Doscientos aniversario de Oersted y el descubrimiento del electromagnetismo*. URL <https://ieeespain.org/doscientos-aniversario-oersted-y-el-descubrimiento-del-electromagnetismo/>. Accedido: 24-06-2024.
- [4] N. Jerez. *Problemas de Máquinas Eléctricas*, 2016. URL <https://www.researchgate.net/profile/Nicolas-Jerez-3/>. Accedido: 2024-06-04.
- [5] R. Kaye, B. Turman, and S. Shope. *Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology*, 08 2002. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1189573>. Accedido: 05-06-2024.
- [6] V. K. Sai Chaithanya. *A Review on Technological Advancement in Electromagnetic Coil Gun System*, 2018. URL <https://www.ijert.org/>. Accedido: 05-06-2024.
- [7] Purcell, Edward M. and Morin, David J. *Electricidad y magnetismo*, 2013.
- [8] P. A. Tipler and G. Mosca. *Physics for Scientists and Engineers*. W. H. Freeman, New York, NY, 6th edition, 2008.