



**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

Po Manuel Lardizabal, 13. 20018 Donostia-San Sebastián, Gipuzkoa Tel. 943 219
877 · Fax 943 311 442 · www.tecnun.es

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. Motivación	9
1.2. Objetivos y métodos	10
2. Marco teórico	11
3. Desarrollo	12
3.1. Desarrollo teórico	12
3.2. Simulaciones	13
3.3. Prototipo	14
4. Resultados	15
5. Discusión y conclusiones	16
6. Referencias	17

Índice de figuras

1. Esquema de la bobina y el vástago con sus dimensiones geometrías. Elaboración propia. 12

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 originó en el siglo XIX, cuando se empezaron a explorar las propiedades del electromagnetismo y sus aplicaciones potenciales. De hecho, de esta época viene uno de los nombres de. Sin embargo, fue en el siglo XX cuando estas ideas comenzaron a materializarse de manera más concreta, gracias a los avances en la tecnología de materiales y la electrónica. La necesidad de métodos de lanzamiento no explosivos en aplicaciones militares y aeroespaciales impulsó la investigación y el desarrollo de las lanzaderas electromagnéticas.

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.

En la industria, las lanzaderas electromagnéticas se utilizan 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.

La investigación en lanzaderas electromagnéticas continúa evolucionando, con esfuerzos centrados en mejorar la eficiencia, la precisión y la viabilidad económica de estos dispositivos. A medida que la tecnología avanza, se espera que las lanzaderas electromagnéticas jueguen un papel cada vez más importante en diversas industrias, ofreciendo soluciones innovadoras y sostenibles para una amplia gama de aplicaciones.

El funcionamiento básico de una coilgun se basa en 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.

1.1. Motivación

Trataré en este subapartado las motivaciones que han impulsado este proyecto y justifican el área de estudio del mismo. Tras haber llevado a cabo el desarrollo de la lanzadera electromagnética, he concluido que las motivaciones de este trabajo de final de grado son las siguientes:

1. **Innovación 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* 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 el aula 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**.

1.2. Objetivos y métodos

Exploraremos ahora los principales objetivos del proyecto, desglosando cada parte constituyente y su resultado. Como ya se ha dicho en la introducción, el principal propósito es la creación 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 tres partes: desarrollo teórico, simulaciones y desarrollo de un prototipo. 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.

2. Marco teórico

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:

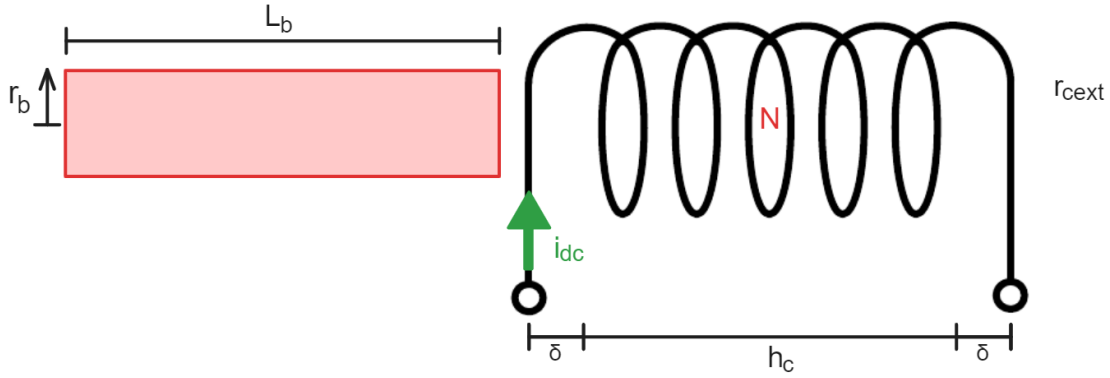


Figura 1: Esquema de la bobina y el vástago con sus dimensiones geométricas. Elaboración propia.

Para poder obtener valores numéricos, vamos a considerar los siguientes datos geométricos de una bobina física con la que serán realizadas las pruebas y validaciones.

$$L_b = 0,096m \quad r_b = 0,003045m \quad h_c = 0,05321m \quad \delta = 0,15 * h_c \quad r_{cext} = 0,01064m \quad i_{dc} = 3,5A \quad N = 500$$

Para empezar el desarrollo, partiremos de la ley integral de Àmpere:

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

Asumiendo un flujo uniforme en la bobina, podemos reescribir:

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

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

6. Referencias