



**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	14
3.3. Prototipo	15
4. Resultados	16
5. Discusión y conclusiones	17

Índice de figuras

1. Esquema de la bobina y el vástago con sus dimensiones geométrías. 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 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.

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es diseñar una práctica universitaria centrada en la optimización de los parámetros eléctricos y geométricos de una bobina para maximizar la fuerza y la velocidad de salida del proyectil. Para alcanzar este objetivo, se ha realizado un análisis electromagnético detallado de las ecuaciones que describen los fenómenos eléctricos en la bobina y su relación con los parámetros dinámicos del sistema. Este análisis no solo facilita la comprensión de los fundamentos teóricos del dispositivo, sino que también establece una base sólida para su optimización. Además, se ha desarrollado un prototipo funcional capaz de lanzar el proyectil y medir su velocidad, permitiendo así validar los resultados teóricos y prácticos.

El desarrollo del proyecto se ha estructurado en varias fases. Inicialmente, se realizó un desarrollo analítico de las fórmulas necesarias para describir las interacciones entre los campos electromagnéticos de la bobina y sus efectos en el vástago. Posteriormente, se diseñó una geometría parametrizada utilizando el software ANSYS Maxwell, con el objetivo de llevar a cabo simulaciones transitorias. Estas simulaciones permiten estimar los valores dinámicos experimentados por el proyectil, proporcionando la flexibilidad de ajustar los parámetros geométricos y eléctricos para realizar experimentos virtuales. Finalmente, se construyó un prototipo funcional para validar los resultados teóricos y simulados.

El presente documento se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta una revisión de la literatura existente sobre lanzaderas y sus aplicaciones. A continuación, se describen los métodos y materiales utilizados en el desarrollo del proyecto, incluyendo el análisis teórico, las simulaciones en ANSYS Maxwell y la construcción del prototipo. Posteriormente, se analizan y discuten los resultados obtenidos y se compara la teoría con la práctica. Finalmente, se ofrecen conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos en este campo.

Este trabajo pretende servir como una herramienta educativa. Se espera que tanto el desarrollo teórico como las simulaciones proporcionen al departamento de Ingeniería Eléctrica de Tecnun la capacidad para realizar una práctica en la que los estudiantes puedan utilizar los modelos desarrollados en este trabajo para optimizar los parámetros del dispositivo. Esta práctica permitirá a los estudiantes aplicar conceptos teóricos en un entorno práctico, desarrollando habilidades analíticas y experimentales esenciales. Además, se pretende que los alumnos experimenten con diferentes configuraciones y parámetros, observando directamente cómo estos afectan al rendimiento de la lanzadera. Con este enfoque, se busca fomentar una comprensión más profunda de los principios electromagnéticos, al mismo tiempo que se dota a los estudiantes de las competencias necesarias para abordar problemas complejos en sus futuras carreras profesionales.

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_{cext} y altura h_c sobre el cual enrollaremos un hilo de cobre N veces. 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:

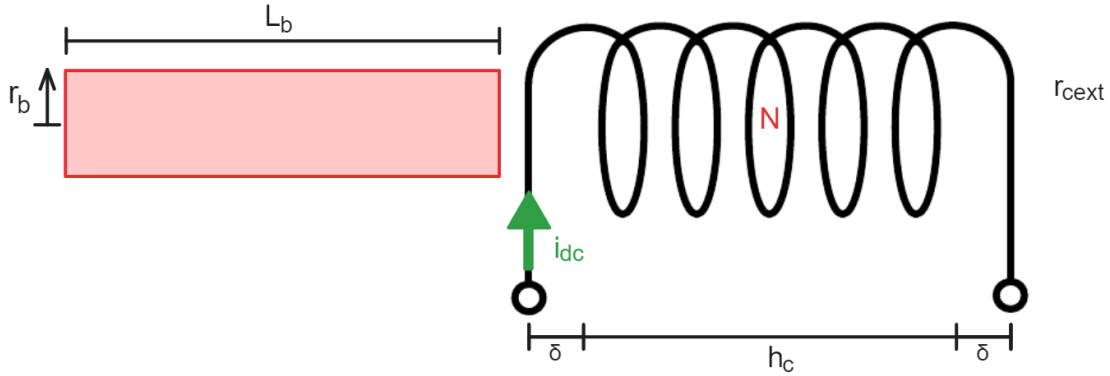


Figura 1: Esquema de la bobina y el vástago con sus dimensiones geométricas. Elaboración propia.

Los valores iniciales de las dimensiones son:

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

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:

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

Por otro lado, sabemos que los dipolos magnéticos de un material sentirán una fuerza al verse sometidos a un campo no uniforme de forma:

$$\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B}) \quad \forall \vec{m} = \chi V_{bar} \vec{B}$$

Debido a la simplificación realizada, el momento de los dipolos magnéticos y el campo estarán alineados y serán uniformes por lo que podríamos decir:

$$F = mB = \chi V_{bar} B^2 = \chi V_{bar} (\mu_0 \mu_r \frac{N i_{dc}}{h_c})^2$$

Vamos a realizar la primera estimación de la fuerza en la barra. Introduciendo los datos:

$$F \approx 53,73 \text{ N}$$

Este valor es demasiado alto, y es debido a que tenemos que tener en cuenta que en los extremos de la barra el campo magnético pierde toda uniformidad. Nos centraremos ahora en la búsqueda de esa variación $(\delta B / \delta x)$, mientras la fuerza no se queda:

$$F = (\mu_0 \mu_r \chi \frac{N i_{dc}}{h_c} V_{bar}) \frac{\delta B}{\delta x}$$

$$F = \chi V_{bar} B^2 \Rightarrow F = (\chi V_{bar} B) \frac{\delta B}{\delta x} \Rightarrow F = (\chi V_{bar} B(x)) \frac{\delta B}{\delta x} \vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B}) \quad \forall \vec{m} = \chi V \vec{B}; \quad B = \mu \frac{N i_{dc}}{h_c}$$

3.2. Simulaciones

3.3. Prototipo

4. Resultados

5. Discusión y conclusiones