



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 lanzadera 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
2. Objetivos y métodos	9
3. Marco teórico	11
4. Cálculo analítico de la fuerza de atracción	17
5. Cálculo por Elementos Finitos de la fuerza de atracción	22
5.1. Geometría	22
5.2. Simulaciones instantáneas	23
5.3. Simulaciones transitorias	25
6. Desarrollo de un prototipo de lanzadera electromagnética	29
6.1. Materiales	30
6.2. Sensores de movimiento	30
6.3. Circuito electrónico	31
6.4. Bobina	35
7. Resultados	37
7.1. Validación de los modelos	37
7.2. Resultados del prototipo	38
8. Práctica propuesta	41
9. Conclusiones	42
10. Referencias	43

Índice de figuras

1.	Cañón de Gauss[1].	8
2.	Ecuaciones de Maxwell[2].	11
3.	Visualización del campo magnético producido alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica.	12
4.	Curva \vec{C} para la cual realizaremos los cálculos [3].	12
5.	Visualización del campo magnético de una bobina energizada [4].	14
6.	Esquema cualitativo de la lanzadera electromagnética.	14
7.	Esquema de una bobina con un núcleo ferromagnético y su circuito magnético equivalente.	16
8.	Esquema geométrico del sistema. Elaboración propia.	17
9.	Secciones del sistema con una vista de planta. Elaboración propia.	18
10.	Círculo magnético del sistema.	19
11.	Aplicación de cálculos de MATLAB.	19
12.	Reluctancias en función de la posición del vástago respecto a la bobina. .	20
13.	Inducción en función de la posición del vástago respecto a la bobina. . .	20
14.	Fuerza en función de la posición del vástago respecto a la bobina.	21
15.	Dato experimental de fuerza con la bobina alimentada.	21
16.	Geometría de la barra y bobina en 2D.	22
17.	Mallado de la barra y bobina en 2D.	23
18.	Detalle del mallado de la barra y bobina en 2D.	23
19.	Visualización de los campos magnéticos con la bobina energizada y $x = 2/10 * h_c$	24
20.	Visualización de los campos magnéticos dentro del solenoide.	24
21.	Fuerza (verde) y corriente (rojo) en función del tiempo de la configuración 1.	25
22.	Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de en la configuración 1.	25
23.	Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 2.	26
24.	Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 2.	26
25.	Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 3.	27
26.	Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 3.	27
27.	Esquema conexiones de los sensores capacitivos.	30
28.	Conexión del interrumpor de disparo.	31
29.	Colocación del sensor.	32
30.	Esquema eléctrico de la conexión del SSR.	32
31.	Imagen del relé de estado sólido [5].	33
32.	Imagen del relé PRMA1A05 [6].	33
33.	Esquema eléctrico de un divisor de tensiones.	33
34.	Esquemático de la PCB del proyecto.	34
35.	Distribución de la placa del proyecto.	34
36.	Sección central del solenoide.	35
37.	Interfaz de la calculadora actualizada.	36
38.	Comparación de las figuras 14 y 25.	37

Índice de tablas

1.	Fuerzas de atracción magnética en los diferentes ejes del espacio.	24
2.	Geometrías a probar.	38
3.	Denominación de las diferentes alimentaciones.	39
4.	Datos tomados con la bobina base y las alimentaciones de la tabla 3.	39
5.	Resultados del disparo con la bobina base y las alimentaciones de la tabla 3.	39

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[7].

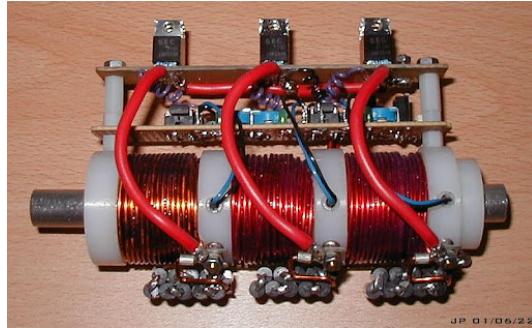


Figura 1: Cañón de Gauss[1].

Las principales aplicaciones de las lanzaderas electromagnéticas se encuentran en el ámbito militar[8], 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[8], 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[8].

Para finalizar con la introducción, se presentará 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 de atracción sobre el proyectil, que debe ser de material ferromagnético, al 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.

2. 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 la asignatura de sistemas eléctricos, 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 especificarán las variables que pueden modificar, así como las relaciones entre ellas, definidas a partir de las ecuaciones de electromagnetismo que gobiernan los circuitos magnéticos.

Motivación

Se tratará 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**.

3. 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, su relación con la generación de campos magnéticos y la forma de modelar estos.

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 EFFEC-TUM 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[9].

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[2].

En el caso de este proyecto, la ley de Maxwell 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 se puede 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."

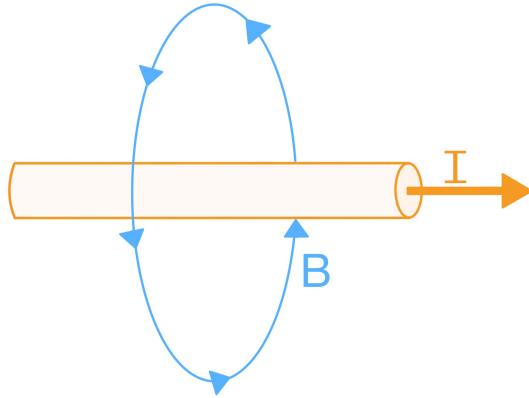


Figura 3: Visualización del campo magnético producido alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica.

Para entender mejor el funcionamiento de la lanzadera electromagnética, es esencial analizar el componente principal: la **bobina**. Una bobina, o solenoide, es un conductor enrollado de manera cilíndrica alrededor de un núcleo de material ferrítico. El número de vueltas que da el conductor alrededor del núcleo se define como espiras y se denota como N . El núcleo posee un parámetro físico llamado permeabilidad relativa μ_r , que indica su capacidad para permitir el paso del flujo magnético. En el caso de que el núcleo sea aire, como se muestra en la figura 4, la permeabilidad relativa tomará el valor de 1.

Para llegar a una expresión del campo magnético alrededor de un solenoide, partiremos de la ley integral de Ampère. Consideraremos un solenoide con N espiras y longitud l , a través del cual pasa una corriente I . Elegimos una trayectoria rectangular \vec{C} que va parcialmente dentro y fuera del solenoide, la cual es conveniente porque simplifica los cálculos del campo magnético.

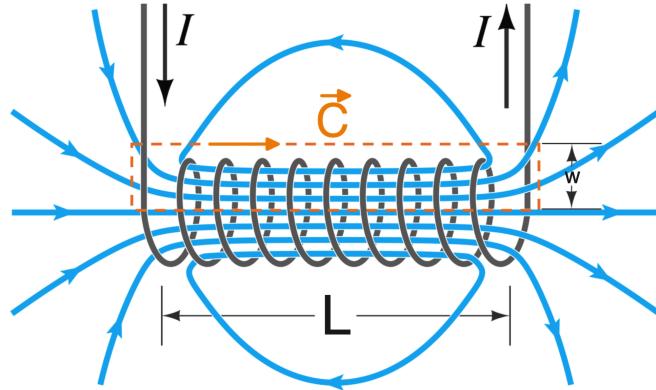


Figura 4: Curva \vec{C} para la cual realizaremos los cálculos [3].

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 la longitud considerable del solenoide, podemos asumir que el campo magnético fuera del solenoide es despreciable. Esta suposición se basa en que, en un solenoide idealmente infinito, la línea que va por fuera del solenoide no interfiere significativamente con ninguna línea de campo magnético, salvo en los extremos, donde la influencia es mínima. Además, los segmentos perpendiculares de la trayectoria elegida sólo interfieren con el campo magnético en los extremos del solenoide, donde su contribución también es insignificante. Por lo tanto, asumimos que el campo magnético dentro del solenoide es uniforme y paralelo a su eje. Así, la integral se simplifica a:

$$\oint_{\vec{C}} \vec{B} d\vec{l} = BL$$

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

$$I_{encerrada} = NI$$

En la trayectoria \vec{C} , podemos definir el parámetro de densidad de espiras, el cual es igual a $n = \frac{N}{L}$, por lo que:

$$I_{encerrada} = nLI$$

Con lo que se obtien los dos términos de la ecuación integral de Ampère, por lo que podemos igualar:

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

Que es la expresión para la inducción electromagnética en una longitud arbitraria L de un solenoide.

El siguiente punto de interés 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 ($\nabla B = 0$). 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.[2] [10][11].

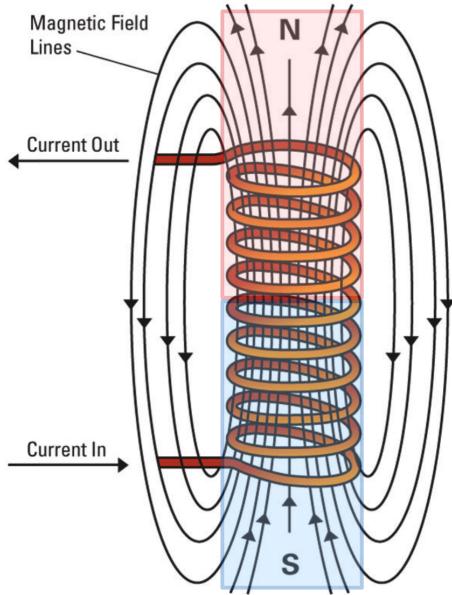


Figura 5: Visualización del campo magnético de una bobina energizada [4].

La forma en que este fenómeno será aprovechado 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 se encuentren alineados, 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 (6).

La figura 7 a continuación es un esquema sencillo en el que se visualizan las partes esenciales de una lanzadera electromagnética:

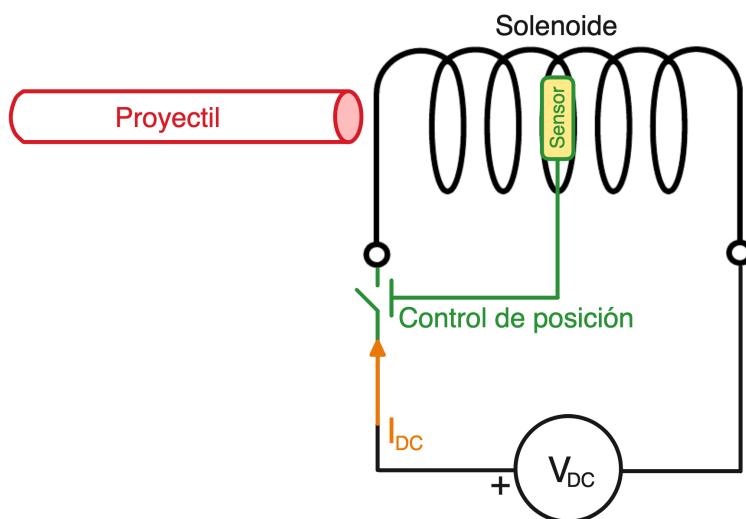


Figura 6: Esquema cualitativo de la lanzadera electromagnética.

Antes de finalizar el marco teórico, es necesario definir la manera en la que se va a representar el sistema de manera computable. Para ello, se utiliza el análisis del circuito magnético del sistema. Un circuito magnético se puede analizar de manera análoga a un circuito eléctrico, utilizando los conceptos de reluctancia, fuerza magnetomotriz (FMM) y flujo magnético. A continuación, se describen estos conceptos y sus relaciones entre sí.

- **Reluctancia** La reluctancia \mathcal{R} es una medida de la oposición que ofrece un material al paso del flujo magnético. Es análoga a la resistencia en un circuito eléctrico y su unidad es $[H^{-1}]$. La fórmula para la reluctancia es:

$$\mathcal{R} = \frac{l_{car}}{\mu_0 \mu_r A}$$

Donde:

μ_0 es la permeabilidad del vacío, con un valor constante igual a $4\pi * 10^{-7} [NA^2]$.

μ_r es la permeabilidad relativa del material.

l_{car} es la longitud característica del camino magnético [m].

A es el área de la sección transversal del camino magnético [m^2].

- **Fuerza Magnetomotriz (FMM)** La fuerza magnetomotriz \mathcal{F} es la fuerza que impulsa el flujo magnético a través de un circuito magnético. Es análoga a la fuerza electromotriz (*fem*) en un circuito eléctrico y su unidad es $[A \cdot v]$. La FMM se define como:

$$\mathcal{F} = NI$$

Donde:

N es el número de vueltas de la bobina [v].

I es la corriente de alimentación de la bobina [A].

- **Flujo Magnético** El flujo magnético ϕ es la cantidad de campo magnético que pasa a través de una superficie. Es análogo a la corriente eléctrica y su unidad es $[Wb]$. Se define como:

$$\phi = BA$$

Donde:

B es la densidad de flujo magnético [T].

A es el área de la superficie perpendicular al campo magnético [m^2].

- **Ley de Hopkinson** La Ley de Hopkinson establece la relación entre la FMM, el flujo magnético y la reluctancia en un circuito magnético, de manera análoga a la Ley de Ohm en los circuitos eléctricos:

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

Como expresa la ley de Hopkinson, los conceptos de reluctancia, FMM y flujo magnético están interrelacionados en un circuito magnético. La FMM generada por una corriente que pasa a través de un devanado crea un flujo magnético que se opone a la reluctancia del material [10][11].

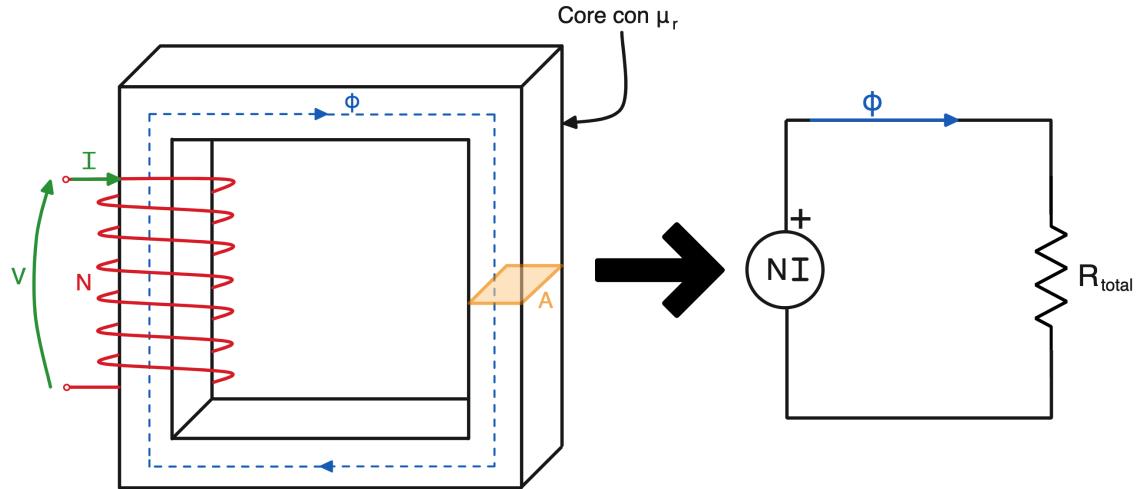


Figura 7: Esquema de una bobina con un núcleo ferromagnético y su circuito magnético equivalente.

4. Cálculo analítico de la fuerza de atracción

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:**

- a. r_{cext} y r_{cint} : radios exterior e interior de la bobina, respectivamente.
- b. l_c : altura de la bobina.
- c. r_{fe} : radio del vástago.
- d. l_{fe} : longitud del vástago.
- e. k_{disp} : parámetro multiplicador para obtener la sección de dispersión. La dispersión es la parte del flujo que abraza a la bobina y a la barra.

- **Parámetros eléctricos:**

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

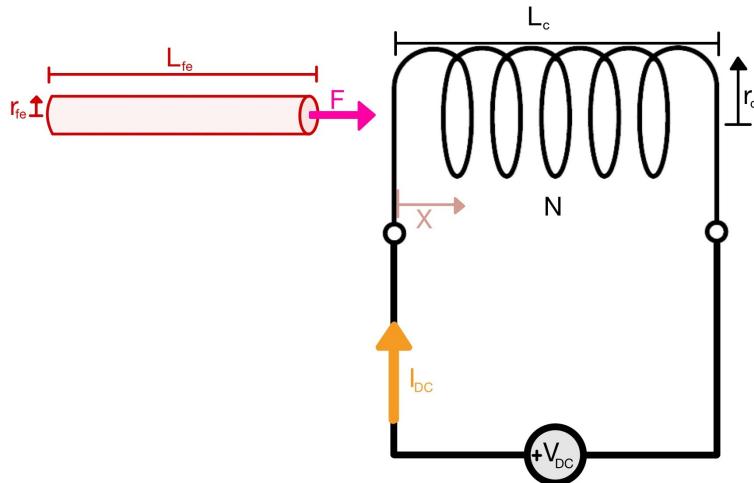


Figura 8: Esquema geométrico del sistema. Elaboración propia.

El objetivo de este desarrollo es crear un programa en MATLAB al que se le proporcionen estos datos, y con ellos calcule automáticamente la fuerza que experimentará el proyectil a través del circuito magnético del sistema. Como se muestra en la figura 5 el valor de B varía a lo largo del solenoide, por lo tanto, además de los parámetros constantes dados, será necesario parametrizar también la posición del vástago en cada momento (x en la figura 8) y calcular la fuerza que experimenta en cada una de esas posiciones.

El primer paso será partir de las fórmulas del circuito magnético definidas en el 3 marco teórico y para ello la primera tarea es realizar un análisis de las diferentes reluctancias del sistema, con el objetivo de computar así la inducción magnética, la cual nos

permitirá obtener la fuerza de atracción que experimenta el vástago, que según Nicolás Jerez [12] viene dada por la expresión:

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

Teniendo clara la relación entre inducción y fuerza, el siguiente paso es definir claramente las diferentes áreas efectivas de los componentes del sistema para calcular las reluctancias, las cuales son:

- $S_c = \pi * r_{cext}^2$: Esta superficie se corresponde con la sección delimitada por el radio exterior de la bobina, y es el área efectiva del flujo encerrado en su interior.
- $S_{fe} = \pi * r_{fe}^2$: Esta superficie se corresponde con la sección delimitada por el radio del vástago.
- $S_{disp} = \pi * r_{disp}$ $\forall r_{disp} = k_{disp}r_c$: Esta superficie se corresponde con el área de dispersión de flujo.

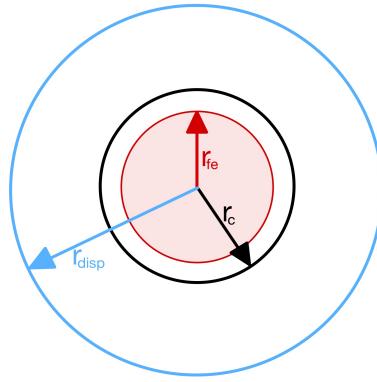


Figura 9: Secciones del sistema con una vista de planta. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las fórmulas en la sección del marco teórico (3) y lo expuesto en la figura 9, podemos concluir que existen cuatro principales reluctancias en el sistema de la figura 8:

- $\mathcal{R}_{disp\ c} = \frac{h_c}{\mu_0 * S_{disp}}$: Se corresponde a la reluctancia del aire que abraza la bobina. Esta reluctancia es fija ya que las dimensiones del solenoide son constantes.
- $\mathcal{R}_{fe} = \frac{l_{fe}}{\mu_0 * \mu_{fe} * S_{fe}}$: Se corresponde a la reluctancia de la barra. Esta reluctancia es fija ya que las dimensiones del vástago son constantes.
- $\mathcal{R}_\phi = \frac{(h_c + l_{fe}) - x}{\mu_0 * S_{disp}}$: Se corresponde a la reluctancia del aire del camino más largo del flujo magnético, y es la que provoca que el campo del electroimán interactúe con el vástago. Es variable ya que la posición del vástago es variable y el camino se reduce con el tiempo.
- $\mathcal{R}_{aire\ c} = \frac{h_c - x}{\mu_0 * S_c}$: Se corresponde a la reluctancia del aire en el interior de la bobina. Es variable ya que la cantidad de aire disminuye con la posición del vástago.

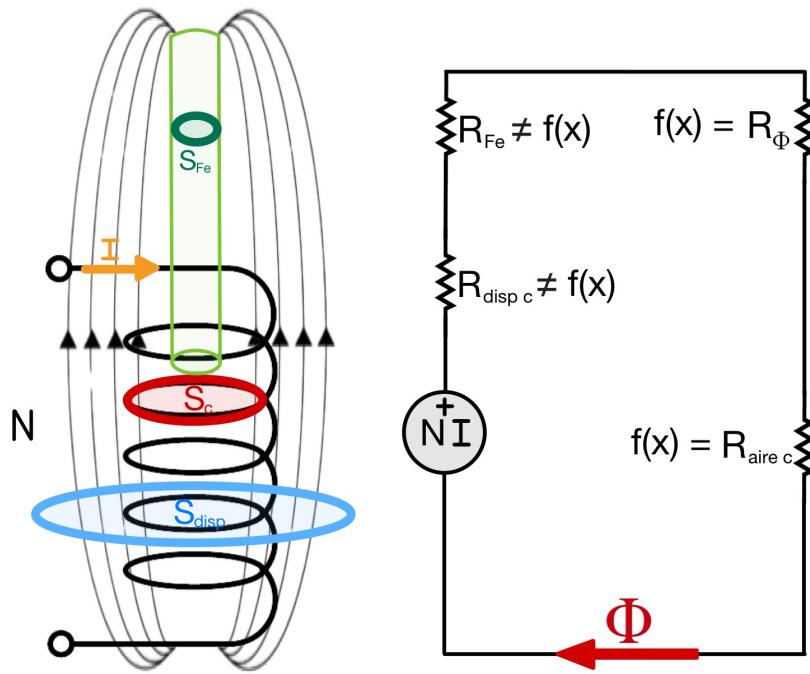


Figura 10: Circuito magnético del sistema.

Con el circuito magnético definido, el siguiente paso es programar las relaciones presentadas en esta sección en MATLAB y graficar los resultados en función de la posición. El programa en MATLAB constará de tres secciones: definición, cálculos y graficación. El código se puede encontrar en el anexo 1 9. El producto de este código es una "calculadora" que devuelve la evolución de la fuerza con el parámetro x , y queda así:

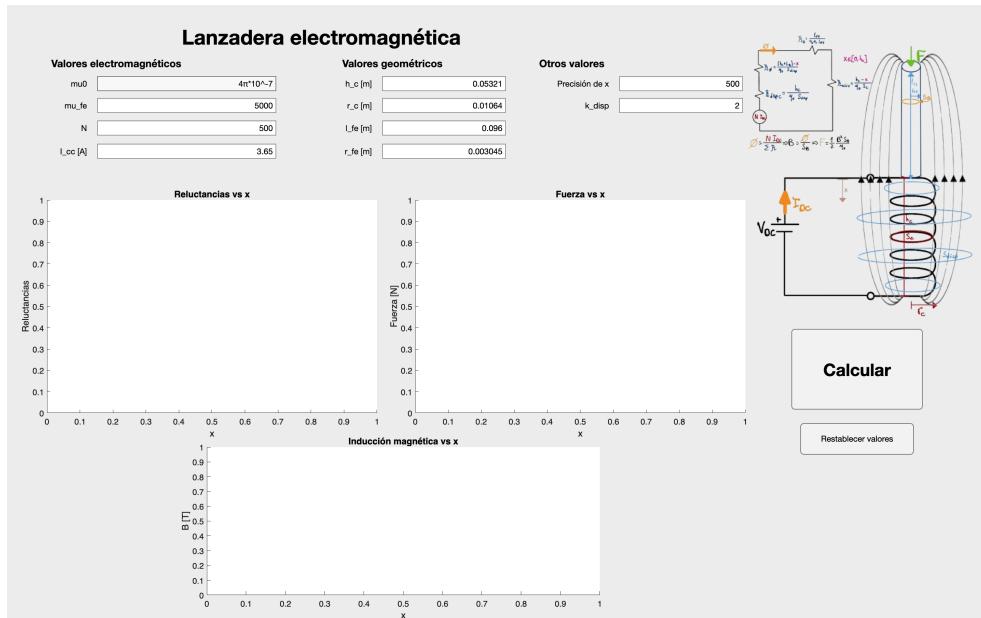


Figura 11: Aplicación de cálculos de MATLAB.

Los valores escritos en las variables del sistema que se pueden ver en la figura 11 se corresponden con la bobina de ejemplo que se ha utilizado para crear el proyecto. Dicha bobina tiene la siguiente geometría:

$$\begin{aligned}
\mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} & \mu_{fe} &= 5000 & N &= 500 \\
l_{fe} &= 0.096m & r_{fe} &= 0.003045m \\
h_c &= 0.05321m & r_c &= 0.01064m & r_{disp} &= k_{disp} r_c = 2 r_c
\end{aligned}$$

Con esta configuración, la forma de las gráficas obtenidas es:

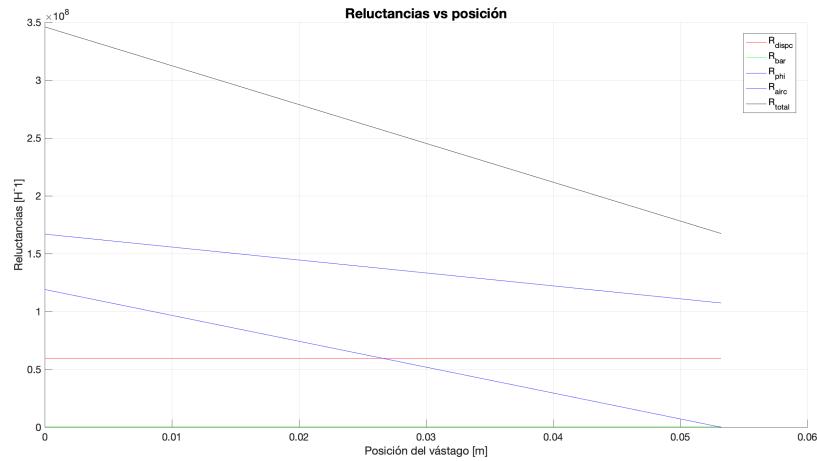


Figura 12: Reluctancias en función de la posición del vástago respecto a la bobina.

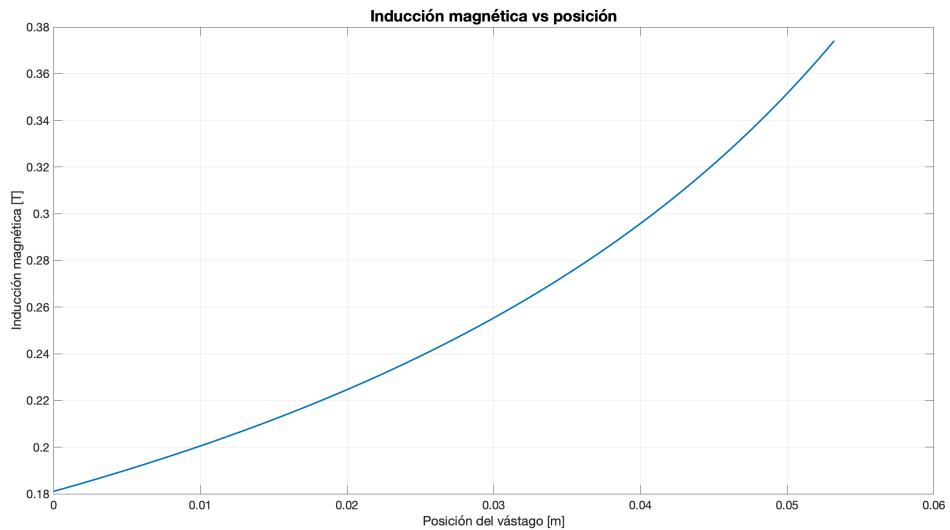


Figura 13: Inducción en función de la posición del vástago respecto a la bobina.

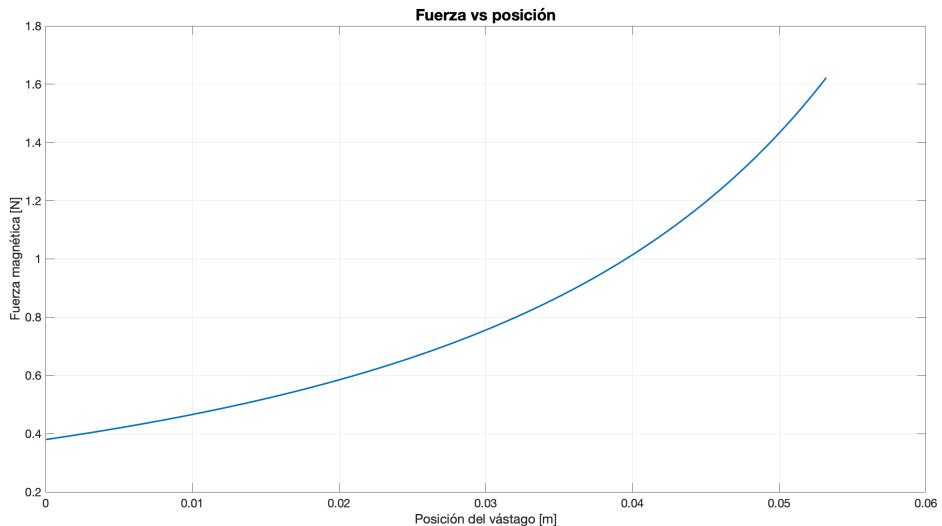


Figura 14: Fuerza en función de la posición del vástago respecto a la bobina.

Estas figuras serán discutidas en el apartado de análisis de resultados 7.

Prueba inicial

Antes de continuar con el desarrollo, se ha realizado una prueba con un dinamómetro sobre la bobina de prueba especificada anteriormente, para verificar los resultados de la figura 14 y poder continuar con las simulaciones y prototipo con una referencia. Se ha obtenido el siguiente resultado:

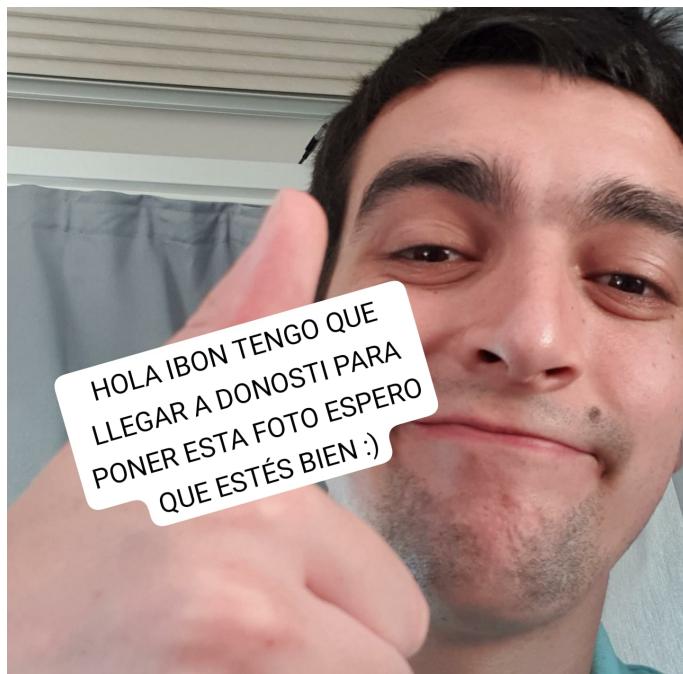


Figura 15: Dato experimental de fuerza con la bobina alimentada.

$$F_{barra} = 2.4 \text{ N } \forall I_{cc} = 3.5 \text{ A}$$

5. Cálculo por Elementos Finitos de la fuerza de atracción

En esta sección, se describe el proceso de creación del modelo de la lanzadera electromagnética realizado utilizando ANSYS Maxwell. Este software de métodos finitos está especializado en el análisis de sistemas electromagnéticos. El objetivo de estas simulaciones es obtener una comprensión detallada del comportamiento del campo magnético generado por la bobina y su interacción con el proyectil ferromagnético en la lanzadera electromagnética. Se ha dividido el proceso en tres subapartados: creación de la geometría, simulaciones instantáneas y simulaciones transitorias. En la primera, se mostrará el proceso de creación de la geometría paramétrica en 2D y 3D, en la segunda y tercera se explicarán las condiciones de contorno y resultados de las simulaciones instantáneas y transitorias, respectivamente.

5.1. Geometría

El primer paso para realizar las simulaciones fue la creación de la geometría del sistema en ANSYS Maxwell. Para ello, se definieron las dimensiones y características de la bobina y el proyectil de manera paramétrica. Esto quiere decir que las dimensiones de los polígonos que conforman el modelo no son fijas, si no que están asociados a variables por lo que simular diferentes configuraciones se convierte en algo más sencillo. La geometría fue primeramente diseñada en 3D, pero también se obtuvo la sección central del archivo tridimensional para poder simular en 2D, lo que a priori permite menor tiempo de computación. Una vez creada la geometría, se definieron los diferentes materiales y las propiedades eléctricas y magnéticas. El material utilizado para los conductores del solenoide es cobre recocido, PVC para el soporte de la bobina y acero F114 para el vástago. Con esto, se construye la geometría a continuación mostrada:

- **Geometría en 3D:**
- **Mallado en 3D:**
- **Geometría en 2D:**

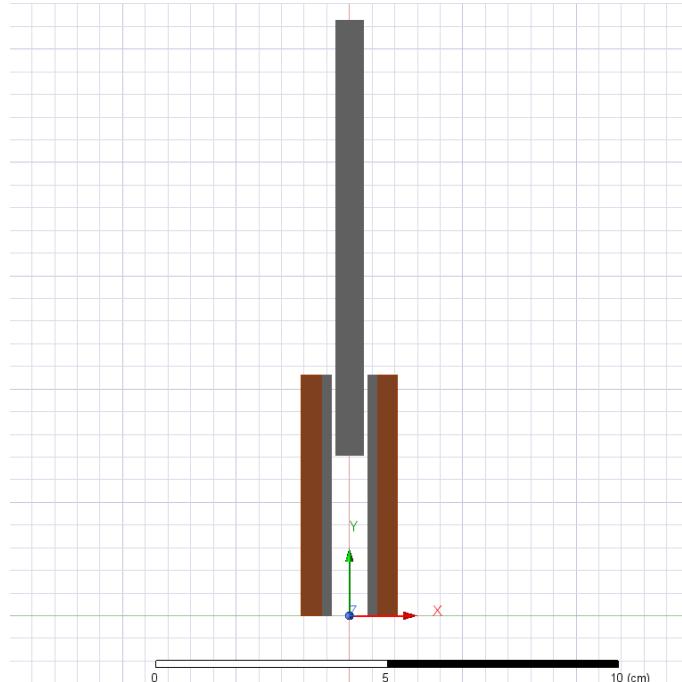


Figura 16: Geometría de la barra y bobina en 2D.

- **Mallado en 2D**

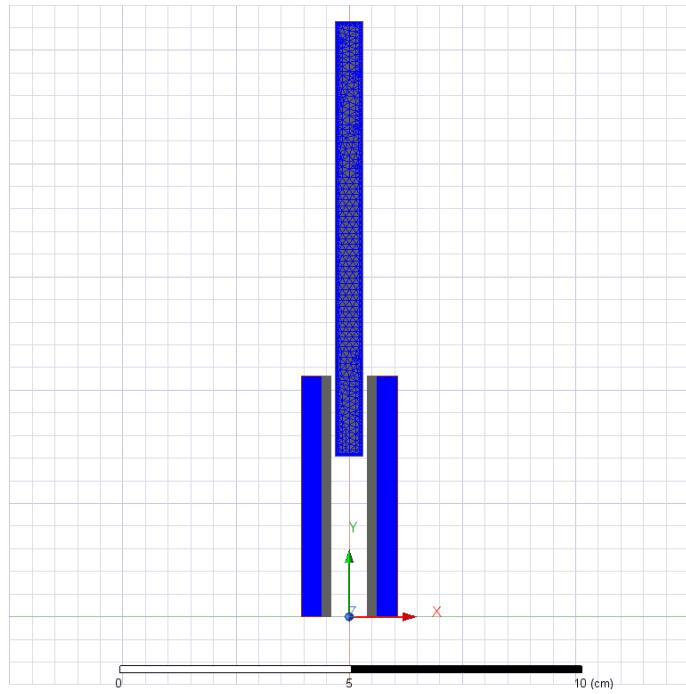


Figura 17: Mallado de la barra y bobina en 2D.

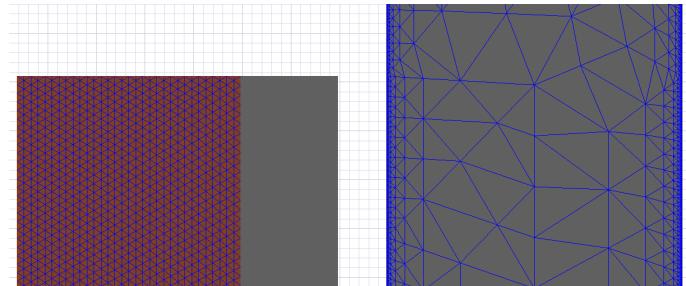


Figura 18: Detalle del mallado de la barra y bobina en 2D.

La bobina se ha generado de la forma mostrada en las figuras anteriores debido a que representar un número de espiras del orden de 10^2 de manera helicoidal y con varias capas es muy complicado en ANSYS, ya que no es un entorno de diseño en 3D. Al crear un cilindro con dimensiones apropiadas, se puede indicar al software que lo trate como un solenoide, asignándole un número de espiras y una corriente de excitación. El programa distribuye uniformemente el campo generado por la corriente en todo el volumen, lo que resulta en una aproximación muy válida [13, p. 13].

5.2. Simulaciones instantáneas

ANSYS Maxwell permite realizar simulaciones de diferentes tipos, de las cuales tienen interés para este proyecto las magnetoestáticas y las transitorias. Como primera prueba para el modelo de la figura **FIGURA3D**, se realizó una simulación electroestática con una $I_{cc} = 3.5 \text{ A}$ para poder observar los campos magnéticos del sistema, resultando en la siguiente figura:

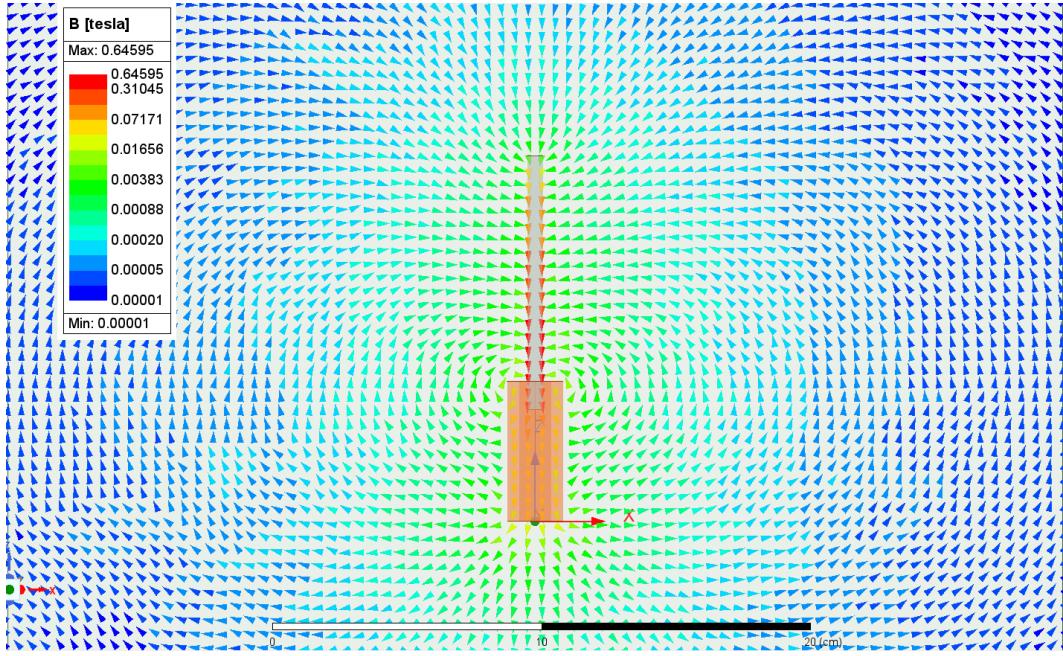


Figura 19: Visualización de los campos magnéticos con la bobina energizada y $x = 2/10 * h_c$.

Vemos que se puede apreciar perfectamente la forma descrita en las figuras 4 y 5, curvándose en los extremos del sistema pero permaneciendo bastante uniforme a lo largo de h_c . Se muestra a continuación un detalle de los campos únicamente dentro de la bobina con la barra en la posición de la figura 19:

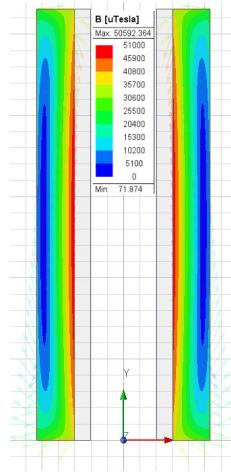


Figura 20: Visualización de los campos magnéticos dentro del solenoide.

Además de visualizar los campos, ANSYS Maxwell permite añadir distintas medidas a la simulación, entre las que se encuentra la fuerza de atracción magnética. Realizando una simulación de nuevo para la configuración en 3D, se obtiene que la fuerza es igual a:

	F_x	F_y	F_z	F_{tot}
F_{ANSYS}	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5

Tabla 1: Fuerzas de atracción magnética en los diferentes ejes del espacio.

5.3. Simulaciones transitorias

Una vez observados los campos de manera estacionaria, el siguiente paso es conseguir la variación de los valores de fuerza con la posición del vástago, además sin forzar este movimiento. Es decir, especificar la región de movimiento y los valores de alimentación de la bobina y dejar que ANSYS genere el movimiento y nos de información acerca de la fuerza y velocidad experimentadas por el vástago. Al realizar esto con el modelo 3D, ANSYS devolvía un error fatal probablemente debido a que los ordenadores en los que se estaba realiendo la simulación no eran lo suficientemente potentes. Se recurrió entonces a la utilización exclusiva de la geometría en 2D, la que dio resultados tanto de movimiento como fuerza. Para llegar a los últimos resultados, se realizaron varias simulaciones con varias configuraciones temporales diferentes, las cuales se muestran a

Configuración 1

La primera configuración transitoria utilizada es:

$$T_{sim} = 150 \text{ ms} \quad T_{step} = 5 \text{ ms} \rightarrow 30 \text{ steps}$$

$$I(t=0) = 3.5 \text{ A} \quad I(t \geq 50 \text{ ms}) = 0 \text{ A}$$

$$V_{coil} = 13.1 \text{ V} \quad R_{coil} = 3.65 \Omega$$

$$m_{bar} = 0.019 \text{ kg} \quad v_{bar \ ini} = 0 \text{ ms}^{-1}$$

Las gráficas resultantes de fuerza-corriente y velocidad-posición son:



Figura 21: Fuerza (verde) y corriente (rojo) en función del tiempo de la configuración 1.

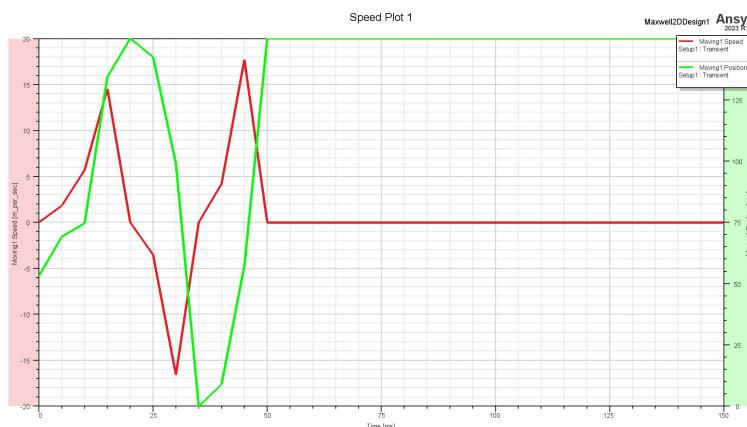


Figura 22: Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de en la configuración 1.

Como se puede observar en las figuras 21 y 22, T_{sim} es muy largo ya que la mayor parte del tiempo no ocurre nada. También es destacable que existen oscilaciones, lo que indica que la bobina está siendo alimentada durante demasiado tiempo y está siendo retenida en el centro.

Configuración 2

La segunda configuración transitoria utilizada es:

$$T_{sim} = 75 \text{ ms} \quad T_{step} = 0.6 \text{ ms} \rightarrow 125 \text{ steps}$$

$$I(t=0) = 3.5 \text{ A} \quad I(t \geq 30 \text{ ms}) = 0 \text{ A}$$

$$V_{coil} = 13.1 \text{ V} \quad R_{coil} = 3.65 \Omega$$

$$m_{bar} = 0.019 \text{ kg} \quad v_{bar \ ini} = 0 \text{ ms}^{-1}$$

Las gráficas resultantes de fuerza-corriente y velocidad-posición son:

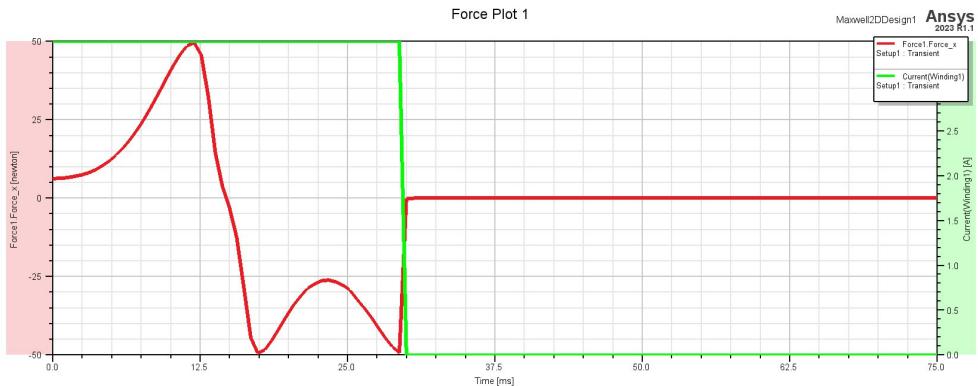


Figura 23: Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 2.

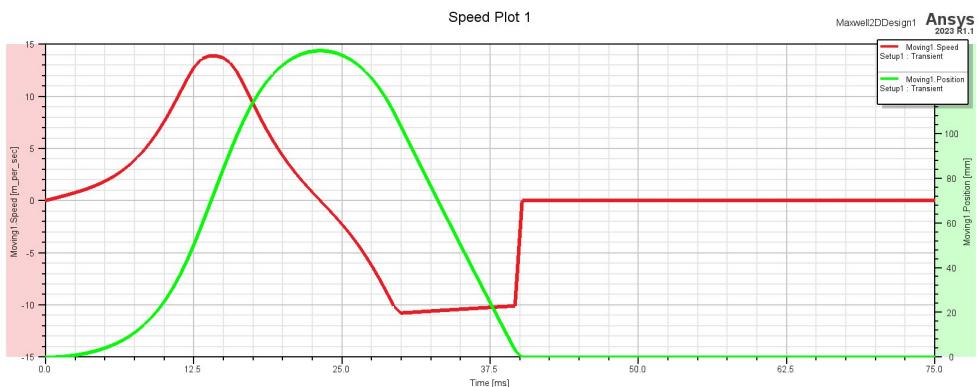


Figura 24: Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 2.

En la segunda configuración, se utilizó un timestep muy pequeño para poder observar con precisión el movimiento del vástagos. Se observa más ajustado el tiempo de simulación, aunque el tiempo de alimentación de la bobina sigue siendo muy elevado ya que el vástagos sigue oscilando, aunque ya solo lo hace una vez.

Configuración 3

La tercera configuración transitoria utilizada es:

$$T_{sim} = 25 \text{ ms} \quad T_{step} = 1 \text{ ms} \rightarrow 25 \text{ steps}$$

$$I(t = 0) = 3.5 \text{ A} \quad I(t \geq 15 \text{ ms}) = 0 \text{ A}$$

$$V_{coil} = 13.1 \text{ V} \quad R_{coil} = 3.65 \Omega$$

$$m_{bar} = 0.019 \text{ kg} \quad v_{bar \ ini} = 0 \text{ ms}^{-1}$$

Las gráficas resultantes de fuerza-corriente y velocidad-posición son:

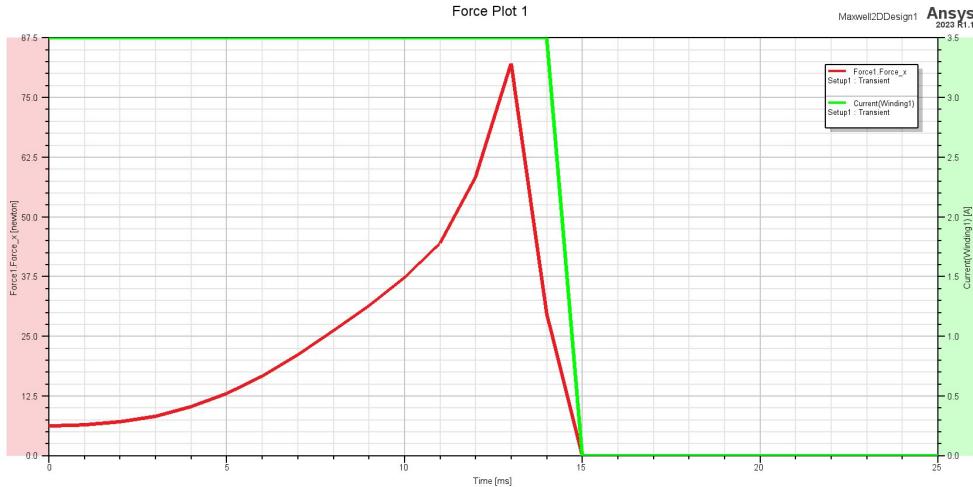


Figura 25: Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 3.



Figura 26: Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 3.

Esta configuración proporciona la evolución de la fuerza según el sistema que queremos crear, dejando de alimentar la bobina antes de que los centros estén alineados y permitiendo que el vástago siga avanzando por inercia, lo cual podemos comprobar observando la gráfica en la figura 26, en la que la posición no decrece en ningún momento. Sin embargo, los resultados de la magnitud de la fuerza no son verosímiles, pues son 40 veces mayores ($F_{max} \approx 80 \text{ N}$) a la fuerza obtenida en la prueba de referencia (figura 15).

Con esto se dará por finalizado el apartado de simulaciones. Aunque se ha encontrado una configuración que imita correctamente el comportamiento del sistema, los resultados obtenidos no son precisos en términos de magnitud. Dado que no se ha logrado avanzar en la mejora de la precisión de los resultados, se ha decidido no continuar dedicando más tiempo a afinar esta configuración. Se analizará en detalle lo obtenido en el apartado de validación de modelos (7).

6. Desarrollo de un prototipo de lanzadera electromagnética

El desarrollo del prototipo de la lanzadera electromagnética constituye una etapa crucial en la validación del modelo teórico y las diferentes simulaciones realizadas en fases previas. Esta sección se centra en el diseño y construcción de un dispositivo funcional que permita la evaluación práctica de los conceptos estudiados y la obtención de datos experimentales que respalden las predicciones teóricas.

El objetivo principal del prototipo es proporcionar una plataforma experimental (a la que se le llamará *banco de pruebas*) que permita comprobar la efectividad de las configuraciones propuestas y realizar ajustes basados en observaciones empíricas. No se pretende construir una lanzadera electromagnética como la de la figura 1, sino más bien un prototipo modular que sea fácilmente modificable para poder probar diferentes configuraciones de bobina y alimentación. Una de las partes más importantes del prototipo ha sido la implementación de un sistema de medición capaz de registrar con exactitud la velocidad y fuerza del proyectil.

El siguiente apartado detalla los pasos específicos seguidos en el desarrollo del prototipo, desde el montaje del banco de pruebas, el diseño del circuito electrónico y la construcción de la bobina, hasta el ensamblaje sistema completo. Cada uno de estos pasos ha conllevado más de una iteración hasta llegar al resultado final, que es lo que se va a detallar en esta sección. Sin embargo, en el Anexo II se puede encontrar el proceso más detallado.

FOTO DEL PROTOTIPO FINAL

6.1. Materiales

Para el montaje del prototipo, se utilizaron perfiles técnicos estructurales de aluminio como el que se presenta en la siguiente figura:

FIGURA DE LOS PERFILES DE ALUMINIO

La ventaja de utilizar estos perfiles es que se puede modificar de manera muy sencilla la distribución de las diferentes partes del montaje, las cuales consisten en: dos parejas de perfiles en **T** que sirven de apoyo para el resto de la estructura, un perfil inferior que es en el que se coloca la bobina y un perfil superior que es en el que se colocan los sensores de movimiento y el circuito electrónico.

FIGURA DEL BANCO SOLO CON LOS PERFILES

Se describirán con detalle los sensores de movimiento, las restricciones de la bobina y el circuito electrónico diseñado para el proyecto.

6.2. Sensores de movimiento

Los sensores de movimiento utilizados para el proyecto tienen como objetivo proporcionar la velocidad a la que sale el vástago de la bobina. Los que se han empleado son sensores de carácter capacitivo, lo que significa que detectan la presencia de un objeto delante de ellos por el cambio de la capacidad con la superficie del sensor. Colocando dos de estos dispositivos a una distancia conocida x y obteniendo la diferencia temporal Δt de activación de la señal mediante una placa arduino conectada al sistema, es trivial calcular la velocidad del vástago según la fórmula:

$$v_{vas} = \frac{x}{\Delta t}$$

Los sensores elegidos para llevar a cabo esta tarea son los GLV12-8-200/37/40b/115, los cuales tienen el siguiente esquema de conexión:

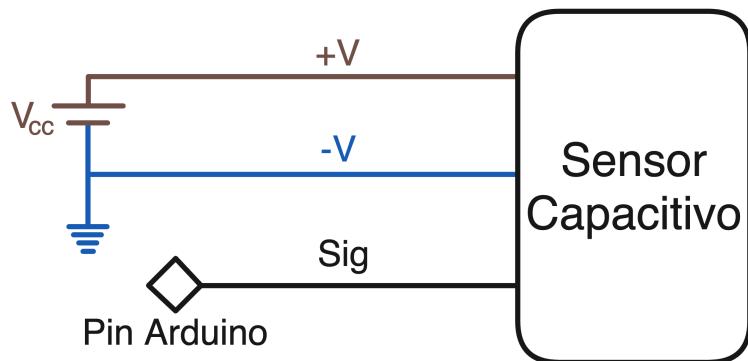


Figura 27: Esquema conexiones de los sensores capacitivos.

Observando las especificaciones de este modelo detalladas en el Anexo III, encontramos que la tensión de alimentación del sensor es de $V_{cc} \in [10, 30]$ V, y la salida de la señal (tensión entre **SIG** y **GND**) es de $V_{sig} = V_{cc}$. Esto es algo a tener en cuenta, pues la entrada de los puertos de arduino no puede superar los 5 V y los sensores deben ser alimentados al menos a 5 V. Montando el prototipo, se decidió que el circuito electrónico

iba a estar alimentado a 15 V, por lo que será necesario un divisor de tensiones para poder leer la señal de los sensores, el cual está detallado en el apartado de diseño del circuito 6.3.

6.3. Circuito electrónico

El diseño y desarrollo de la lanzadera electromagnética no solo requiere de la implementación de los componentes físicos de soporte, bobina y vástago, sino que también es esencial el diseño de un circuito electrónico que controle y optimice su funcionamiento. La precisión y eficiencia del dispositivo dependen en gran medida de la electrónica que lo acompaña. Durante el proceso de montaje del banco de pruebas, se han identificado dos etapas críticas de las cuales se debe encargar el circuito electrónico: la etapa de disparo y la etapa de medición.

Disparo

Para el disparo, debemos indentificar dos momentos críticos, los de inicio y finalización de alimentación de la bobina para que el vástago adquiera inercia sin quedarse atascado en el campo magnético. Cuando se empezó el proyecto se pensó en realizar los disparos a mano apagando y encendiendo la fuente del solenoide, pero al realizar las simulaciones, se descubrió la imposibilidad de este método ya que la constante de tiempo (τ) del sistema ronda los $10^{-2} s$ o $10 ms$. Esto plantea un problema a la hora de disparar el vástago, pues debemos alimentar la bobina por un período de tiempo muy breve, lo cual es prácticamente imposible de hacer manualmente. Es necesario por ende diseñar de manera electrónica las órdenes de inicio y finalización del disparo del vástago.

El inicio del disparo es trivial, y tratará de un interruptor conectado a la placa arduino. Esta detectará la pulsación del interruptor y mandará la orden de disparo a través del mecanismo correspondiente.

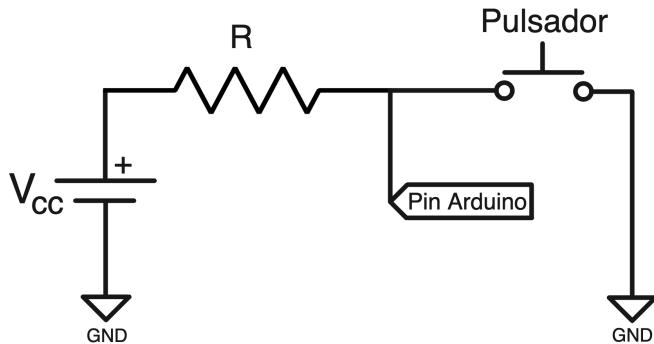


Figura 28: Conexión del interruptor de disparo.

Por otro lado, la finalización del disparo es más compleja. Es necesario dejar de alimentar la bobina antes de que su centro esté alineado con el del vástago, ya que de lo contrario, este seguirá siendo atraído por el campo magnético y no adquirirá la inercia necesaria para que su movimiento continúe. Para lograr esto, se impondrá la restricción de que $l_{fe} < h_c$ en las dimensiones del sistema. Si colocamos uno de los sensores justo a la salida del solenoide, se podrá obtener la señal de detección del primer sensor antes de que los centros estén alineados, permitiendo que el arduino pueda cortar la corriente en el momento exacto para que el vástago no pierda velocidad.

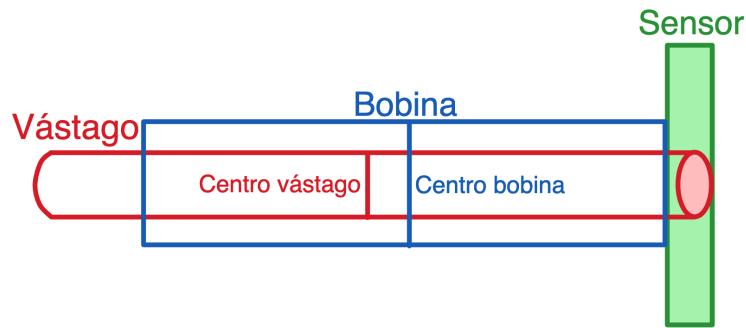


Figura 29: Colocación del sensor.

La señal generada por el sensor de movimiento será enviada al Arduino, que la procesará y activará un relé de potencia de estado sólido conectado a uno de sus pines. Este relé estará a su vez conectado a una fuente de corriente y será responsable de interrumpir la alimentación de la bobina en el momento adecuado. El uso de un relé de estado sólido (*solid state relay* o *SSR*) asegura una conmutación rápida y precisa, eliminando la alimentación de la bobina de manera efectiva y asegurando el correcto funcionamiento del sistema de disparo. Con un sistema de corte asegurado, el disparo del proyectil queda resuelto.

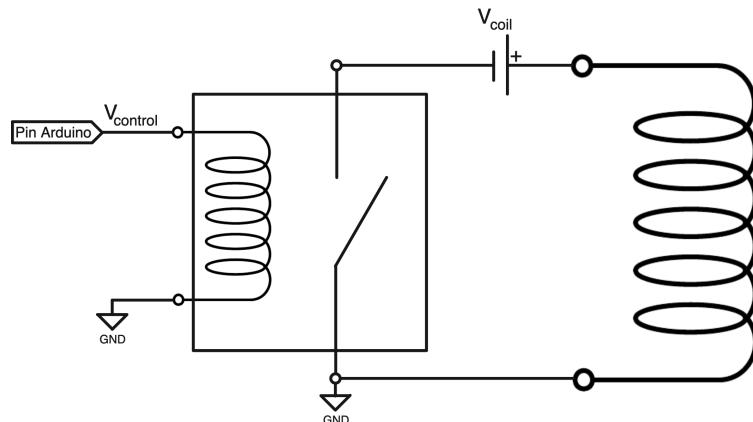


Figura 30: Esquema eléctrico de la conexión del SSR.

El SSR elegido para el proyecto es el KSJ100D20-L(068). Su tensión de control es de $V_{control} \in [4, 32] \text{ V}$ y la carga que soporta se encuentra en $S_{pow} \leq 100 \text{ VA}$. En el circuito se va a implementar un relé auxiliar por si el SSR se cambia y fuera necesaria una tensión de control superior a 5 V, la cual el arduino no podría proporcionar. Este relé auxiliar es un PRMA1A05, al cual se le conectaría la tensión de alimentación de los sensores a la entrada del interruptor y la etapa de control del SSR a la salida del mismo.



Figura 31: Imagen del relé de estado sólido [5].

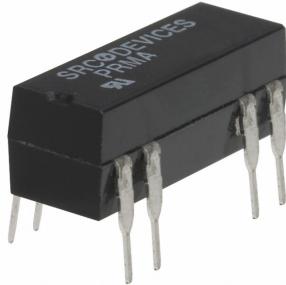


Figura 32: Imagen del relé PRMA1A05 [6].

Medición

El siguiente y último paso para completar el circuito electrónico es la conversión de la tensión de salida de la señal del sensor de movimiento a un nivel apto para el Arduino para poder realizar la medición. Para ello, se utilizará un divisor de tensiones que debe disminuir la tensión de 15V a 5V. Teniendo en cuenta la estructura de esta configuración, obtenemos lo siguiente:

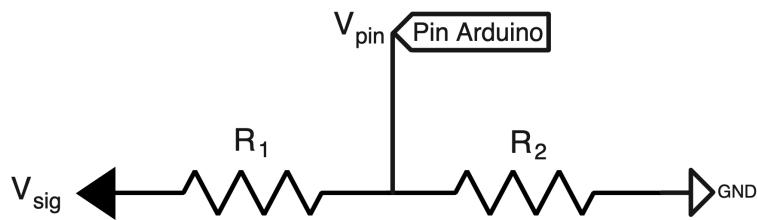


Figura 33: Esquema eléctrico de un divisor de tensiones.

$$V_{pin} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{sig}$$

$$V_{pin} = \frac{1}{4} V_{sig} \rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{4} \rightarrow 4R_2 = R_1 + R_2 \rightarrow R_1 = 3R_2$$

Eliriendo $R_1 = 10 k\Omega$ para que las corrientes sean del orden de $10^{-3} A$, nos queda que $R_2 = 3 k\Omega$. Estas resistencias no existen de manera estandarizada por lo que se utilizarán resistencias de un valor de $R_2 = 2.7 k\Omega$.

PCB

Teniendo en cuenta todas las etapas mencionadas en esta sección, se ha diseñado una PCB para colocar en el banco de pruebas y poder hacer el control oportuno de la bobina. El esquemático queda tal que:

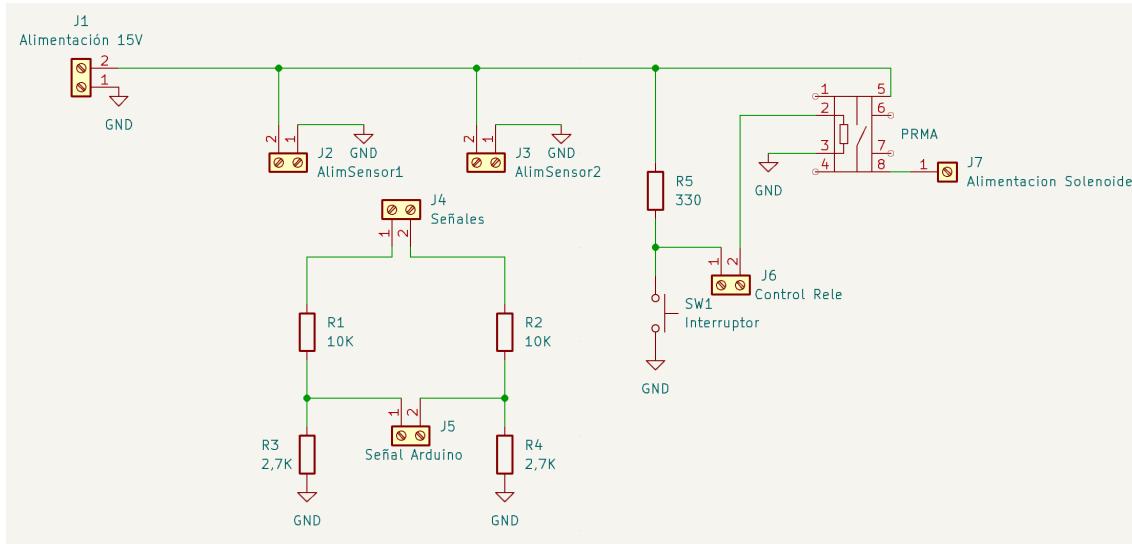


Figura 34: Esquemático de la PCB del proyecto.

Y la distribución de la placa queda:

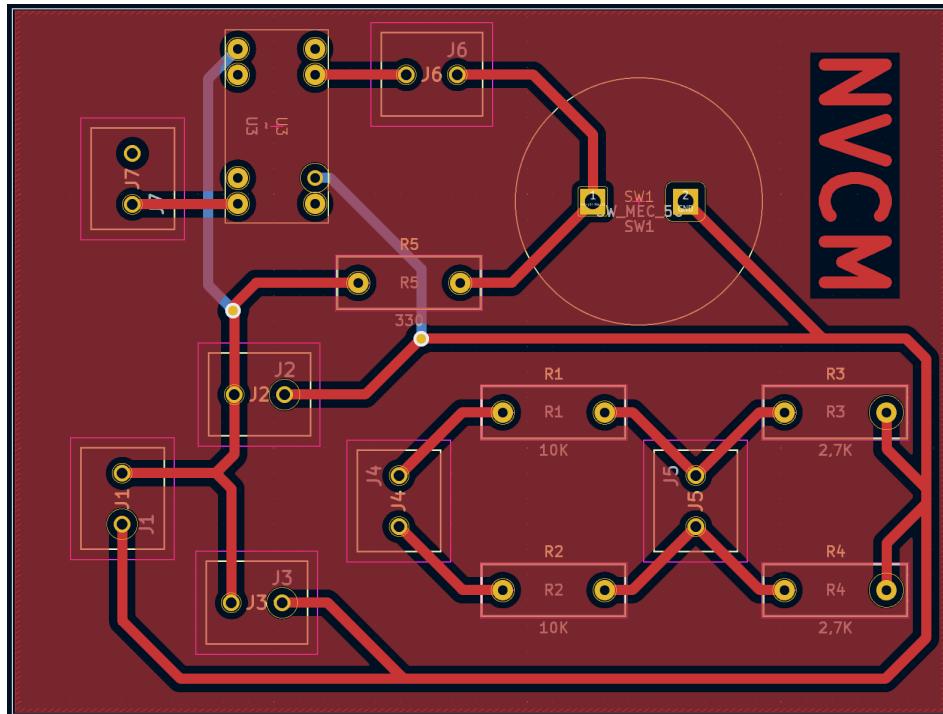


Figura 35: Distribución de la placa del proyecto.

El relé U_3 que se observa en los esquemas es el PRMA1A05. Esta PCB irá conectada a un Arduino Leonardo en los pines de salida que se observan en la figura 34, y el código de control se encuentra en el Anexo II.

6.4. Bobina

Los solenoides que se prueben en el prototipo deben de cumplir las siguientes especificaciones:

- $0.5 \leq h_c \leq XX$: la longitud máxima de la bobina está delimitada por la longitud del perfil menos un espacio mínimo entre sensores.
- $h_c < l_{fe}$: como se ha desarrollado en el apartado anterior, será necesario que la longitud de la bobina sea menor que la del vástago para que el sistema de medición funcione.
- $r_{cint} > r_{fe}$: es evidente que el radio interior de la bobina debe ser mayor que el del vástago para permitir que este último pueda desplazarse en su interior.
- $r_{cext} < XXX$: debido a la disposición de los perfiles de aluminio, hay un radio máximo para que la bobina entre en el banco de pruebas.

En cuanto al solenoide del banco de pruebas, solo queda un aspecto por valorar. Aunque hasta el momento no se ha considerado, es crucial para el diseño de una bobina tener en cuenta el radio de la sección del cobre (r_{cu}), ya que este determinará la cantidad de corriente que la bobina puede soportar dentro de los límites térmicos del material, así como sus dimensiones. Este radio del cobre hace que el radio externo de la bobina se convierta en un parámetro dependiente, por lo que ya no será un valor de diseño a elección del alumno. Los estudiantes que realicen la práctica deberán evaluar la cantidad de corriente y el número de espiras que desean implementar, y seleccionar una sección de cobre que les proporcione un r_{cext} dentro del límite especificado al inicio de esta sección. Para comprobar que efectivamente el radio cumple con las restricciones, se desarrollará una expresión partiendo de N , r_{cu} , r_{int} y h_c como variables conocidas:

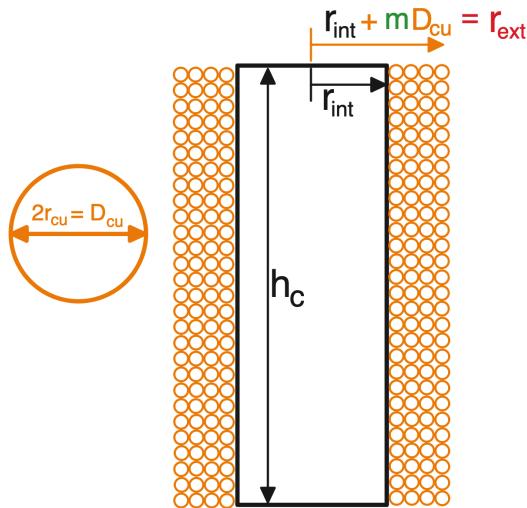


Figura 36: Sección central del solenoide.

El objetivo es conseguir el parámetro m , que se corresponde con el número de capas que van a envolver a r_{int} y contendrán N espiras. El primer paso será obtener el número de conductores en cada capa, que se puede escribir como el truncamiento del cociente entre la longitud de la bobina y el diámetro de los conductores:

$$\text{nº de conductores por capa} = t = \frac{h_c}{D_{cu}} = \frac{h_c}{2r_{cu}}$$

El número de capas será por tanto el número de espiras entre este valor:

$$m = \frac{N}{t} = \frac{ND_{cu}}{h_c}$$

Y el radio exterior queda:

$$r_{ext} = r_{int} + mD_{cu} = r_{int} + \frac{ND_{cu}^2}{h_c} = r_{int} + 4\frac{Nr_{cu}^2}{h_c}$$

Podemos comprobar la efectividad de la fórmula con la bobina de prueba del proyecto, para la que:

$$N = 500 \quad r_{cu} = 0.8 \text{ mm} \quad r_{int} = 0.006035 \text{ m} \quad h_c = 0.05312 \text{ m}$$

Sustituyendo en la fórmula obtenida:

$$r_{ext \text{ form}} = 0.006035 + \frac{500 * (0.8 * 10^{-3})^2}{0.05312} = 0.01206 \text{ m}$$

Comparando ahora con el valor expuesto en el apartado de cálculo analítico 4:

$$r_{ext \text{ form}} = 0.01206 \text{ m} \approx r_c = 0.01064 \text{ m}$$

Observamos que los valores son bastante similares, con un error del 13 %. Esta diferencia se debe a que en la fórmula estamos asumiendo que el parámetro t es igual para todas las capas, lo cual es muy difícil de lograr cuando se bobina un solenoide en la realidad. A pesar de esto, consideramos que el desarrollo proporciona un dato bastante preciso, por lo que se empleará en la práctica como camino para obtener r_{ext} . Se añadirá además al código de *MatLab®* la opción de poder calcular la fuerza de atracción a partir de este desarrollo. Esto resulta en la siguiente actualización de la interfaz de la calculadora:

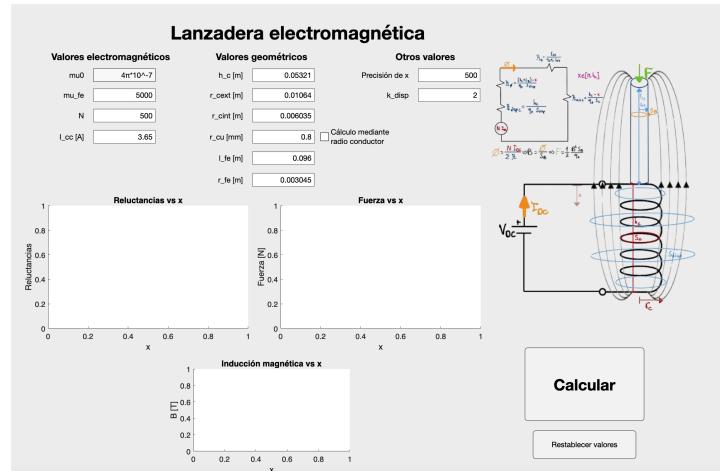


Figura 37: Interfaz de la calculadora actualizada.

7. Resultados

7.1. Validación de los modelos

Esta sección se centrará en validar los diferentes modelos obtenidos en las secciones anteriores, específicamente la calculadora desarrollada en el cálculo analítico (4) y el modelo de cálculo por elementos finitos (5).

Los resultados de ambos modelos se presentan en forma de gráficas que muestran la evolución de la fuerza de atracción magnética. En el caso del cálculo analítico, la fuerza se expresa en función de la posición del vástago, mientras que en el modelo de elementos finitos, se expresa en función del tiempo. Aunque estas parecen ser variables independientes diferentes, ambas gráficas pueden considerarse análogas, ya que la única variable que varía en el sistema físico es la posición del vástago, midiéndola directamente en el primer modelo y observando su evolución temporal en el otro.

Esto implica que la evolución de la fuerza en ambas gráficas debería ser muy similar. Aunque se ha mencionado anteriormente que la magnitud del cálculo mediante elementos finitos no es precisa, podemos comparar las gráficas de las figuras 14 y 25 para comprobar que, efectivamente, la evolución del parámetro de fuerza de atracción sigue el mismo patrón.

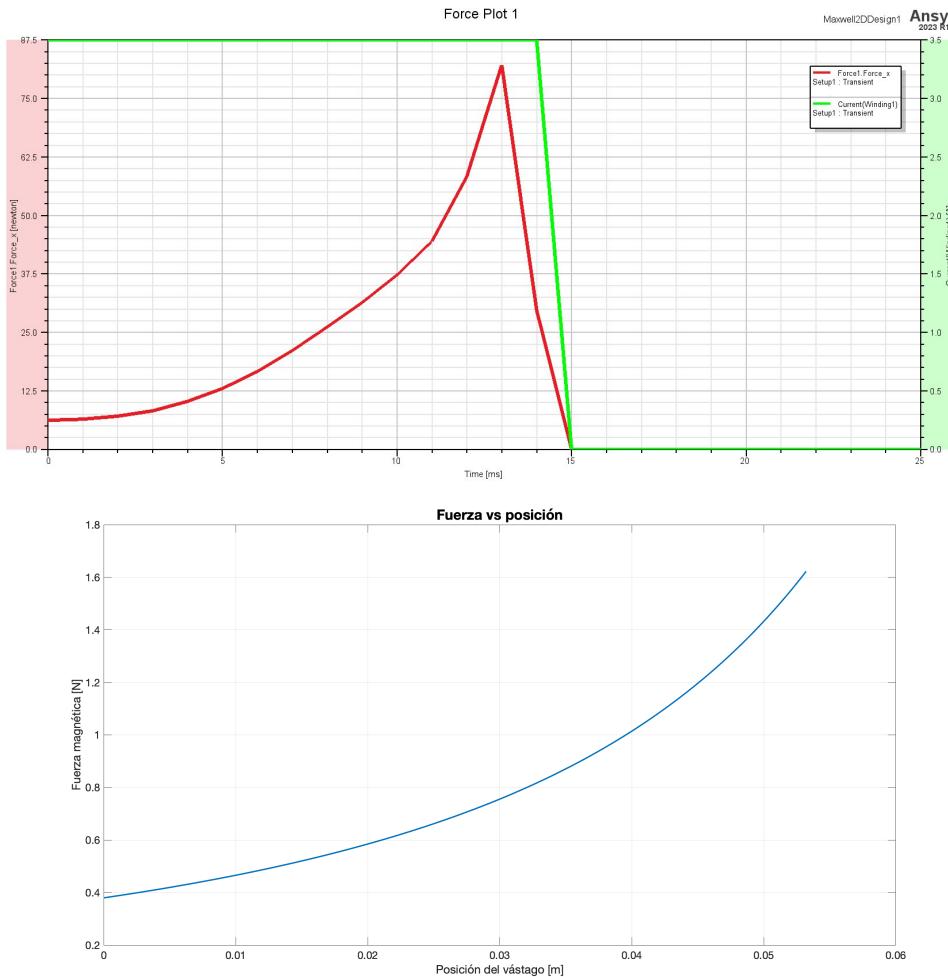


Figura 38: Comparación de las figuras 14 y 25.

Como observamos en esta figura, la evolución de ambas gráficas muestra una curva

ascendente, alcanzando el valor máximo de fuerza en el último momento de alimentación de la bobina. La gráfica de la figura 14 no decrece porque no está computado lo que ocurre después de que x llegue a su valor máximo. Sin embargo, este máximo del parámetro de posición del vástago coincide con el cese de la alimentación de la bobina, por lo que la fuerza se haría cero instantes después.

Como última observación, se puede notar en la gráfica del cálculo por elementos finitos que, al estar en un orden de magnitud de tiempo tan pequeño, ocurre un estado transitorio desde que la fuente deja de proporcionar corriente a la bobina hasta que esta realmente deja de emitir campo magnético. Esto se debe a la expresión de la evolución de la tensión y corriente en un solenoide:

$$V_L = L \frac{\partial i}{\partial t}$$

Lo que indica que existe una resistencia a la desaparición de la corriente en estos dispositivos debido a su tendencia de retener campo magnético. **REFERENCIA**

Dado que el modelo analítico proporciona una aproximación mucho más certera tanto del valor de la fuerza como de su evolución, se concluye que ha sido exitoso su desarrollo y será el que se presente a los alumnos como método de comprobación de su elección de parámetros en el apartado de la práctica (8).

7.2. Resultados del prototipo

Los resultados del prototipo consisten en una serie de mediciones con diferentes geometrías de bobinas y valores de alimentación de las mismas. Se detallarán a continuación las diferentes configuraciones probadas y se discutirá si se puede explicar efectivamente las variaciones con el modelo propuesto en el apartado anterior. Las geometrías de las bobinas que se van a probar son:

Configuración	N	h_c [m]	r_{ext} [m]	r_{int} [m]	r_{cu} [m]	l_{fe} [m]	r_{fe} [m]
Base	500	0,5321	0,0164	0,006035	0,0008	0,096	0,003045
1	700	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
2	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
3	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
4	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN

Tabla 2: Geometrías a probar.

Configuración base

IMAGEN SOLENOIDE

Alimentación	Tensión [V]	Resistencia [Ω]	Corriente [A]
1	13,1	3,5	3,74
2	20,0	3,5	5,71
3	29,7	3,5	8,49

Tabla 3: Denominación de las diferentes alimentaciones.

Alimentación	Tiempo [ms]	Velocidad [ms^{-1}]	Aceleración [ms^{-2}]
1	27	2,56	94,79
	22	3,14	142,77
	24	2,88	119,97
	38	1,82	47,85
	25	2,76	110,56
	33	2,09	63,45
	24	2,88	119,97
	28	2,47	88,14
	25	2,76	110,56
	31	2,23	71,90
2	18	3,84	213,27
	18	3,84	213,27
	18	3,84	213,27
	21	3,29	156,69
	19	3,64	191,41
	25	2,76	110,56
	18	3,84	213,27
	25	2,76	110,56
	17	4,06	239,10
	22	3,14	142,77
3	21	3,29	156,69
	20	3,46	172,75
	20	3,46	172,75
	19	3,64	191,41
	21	3,29	156,69
	23	3,00	130,62
	22	3,14	142,77
	20	3,46	172,75
	22	3,14	142,77
	23	3,00	130,62

Tabla 4: Datos tomados con la bobina base y las alimentaciones de la tabla 3.

Alimentación	Vel. Media [ms^{-1}]	Ac. Media [ms^{-2}]	Fuerza [N]
1	2,53	92,49	1,76
2	3,47	174,31	3,31
3	3,28	155,8	2,96

Tabla 5: Resultados del disparo con la bobina base y las alimentaciones de la tabla 3.

Con estos resultados, podemos terminar de validar la simulación ejecutada para obtener las figuras 12, 13 y 14. Pondremos ahora a prueba la calculadora final, descrita en el subapartado del prototipo 6.4, en la que se incluye la modificación del parámetro r_{cu} para realizar los cálculos. También se pondrá a prueba como se comporta el modelo frente a variaciones de diferentes parámetros.

8. Práctica propuesta

En este apartado se desarrollarán los criterios que se van a emplear para utilizar todo lo aprendido en el momento y confeccionar así una práctica universitaria para los alumnos de Sistemas Eléctricos de tercer año de ingeniería eléctrica.

9. Conclusiones

Este proyecto de fin de grado se ha centrado en el diseño, simulación y desarrollo de un prototipo de lanzadera electromagnética. A lo largo del documento, se han abordado diferentes aspectos técnicos y teóricos necesarios para comprender y optimizar el funcionamiento de este tipo de dispositivos. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes:

- **Cálculo analítico de la fuerza de atracción:** Se han establecido las bases teóricas necesarias para el entendimiento del comportamiento de las lanzaderas electromagnéticas. A partir de la ley de Ampère y el análisis de circuitos magnéticos, se ha desarrollado un modelo teórico que permite calcular la fuerza de atracción magnética en función de los parámetros geométricos y eléctricos de la bobina y el vástagos. Este modelo teórico ha sido implementado en un programa en Matlab que facilita el cálculo y la visualización de los resultados.
- **Cálculo por elementos finitos de la fuerza de atracción:** Utilizando el software ANSYS Maxwell, se han realizado simulaciones tanto instantáneas como transitorias para analizar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones. Aunque las simulaciones han proporcionado una buena comprensión del comportamiento del campo magnético y la fuerza de atracción, se ha identificado una limitación en la precisión de los resultados en términos de magnitud. Sin embargo, las simulaciones han sido útiles para validar el modelo teórico y ajustar los parámetros del sistema.
- **Desarrollo de una lanzadera electromagnética:** Se ha diseñado y construido un prototipo funcional de lanzadera electromagnética que permite la validación experimental de los modelos teóricos y las simulaciones. El prototipo ha demostrado ser una herramienta eficaz para la enseñanza y la investigación en el campo de la ingeniería electromagnética. Los resultados experimentales obtenidos con el prototipo han corroborado en gran medida las predicciones teóricas y han proporcionado datos valiosos para futuras mejoras y optimizaciones del diseño.
- **Práctica propuesta:** Uno de los objetivos principales de este proyecto ha sido el desarrollo de una práctica universitaria para estudiantes de ingeniería. El proyecto ha demostrado ser una excelente plataforma para la aplicación práctica de conocimientos teóricos en un contexto real, fomentando el interés por la ingeniería electromagnética y mejorando las habilidades técnicas y analíticas de los estudiantes.

En resumen, este trabajo ha logrado combinar con éxito teoría, simulación y práctica para el diseño y desarrollo de una lanzadera electromagnética. Los resultados obtenidos son prometedores y abren la puerta a futuras investigaciones y desarrollos en este campo, tanto en el ámbito académico como en aplicaciones industriales y tecnológicas.

10. Referencias

- [1] David W. Michelson. Coilgun physics and design, 2024. URL <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/>. Accedido: 2024-06-18.
- [2] Purcell, Edward M. and Morin, David J. Electricidad y magnetismo, 2013.
- [3] Simple Solutions WBN Ltd. Artpictures, 2023. URL <https://artpictures.club/autumn-2023.html>. Accedido: 2024-06-22.
- [4] Department of Electrical and Northeastern University Computer Engineering. Electromagnets, 2024. URL <https://ece.northeastern.edu/fac-ece/nian/mom/electromagnets.html>. Accedido: 2024-06-22.
- [5] i Autoc. Ksj series solid state relay, 2024. URL <https://es.rs-online.com/web/p/reles-de-estado-solido/9032933>. Accedido: 2024-07-03.
- [6] Coto Technology. Prma1a05b - reed relay, 2024. URL <https://www.digikey.es/en/products/detail/coto-technology/PRMA1A05B/264389>. Accedido: 2024-07-03.
- [7] Vineeth Kumar Sai Chaithanya. *A Review on Technological Advancement in Electromagnetic Coil Gun System*, 2018. URL <https://www.ijert.org/>. Accedido: 05-06-2024.
- [8] R.J. Kaye, B.N. Turman, and S.L. Shope. *Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology*, 08 2002. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1189573>. Accedido: 05-06-2024.
- [9] 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.
- [10] David J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*, 2005.
- [11] Paul A. Tipler and Gene Mosca. *Physics for Scientists and Engineers*. W. H. Freeman, New York, NY, 6th edition, 2008.
- [12] Nicolás Jerez. *Problemas de Máquinas Eléctricas*, 2016. URL <https://www.researchgate.net/profile/Nicolas-Jerez-3/>. Accedido: 2024-06-04.
- [13] ANSOFT. *ANSOFT Maxwell 3D V15 User Guide*, 2012. URL https://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V15.pdf. Accedido: 2024-06-22.

Anexo I. Código de MATLAB para la calculadora de fuerza.

En este anexo se presenta el código escrito para la calculadora expuesta en el apartado de cálculo analítico 4. El código para la calculadora es ligeramente diferente ya que recibe las variables del campo *Value* de los componentes de la interfaz en lugar de desde un valor numérico fijo, pero el procedimiento que ejecuta es el mismo que se muestra a continuación:

```
1 % Propiedades electromagneticas
2 mu0 = 4 * pi * 10^-7; % Permeabilidad del vacio [H/m]
3 mu_fe = 5000; % Permeabilidad relativa del hierro
4 N = 500; % Numero de espiras
5 I_c = 3.65; % Corriente de la bobina
6
7 % Geometria
8 h_c = 0.05321; % Longitud de la bobina [m]
9 r_c = 0.01064; % Radio externo de la bobina [m]
10 l_fe = 0.096; % Longitud del vastago [m]
11 r_fe = 0.003045; % Radio del vastago [m]
12
13 S_c = pi * r_c ^ 2; % Seccion de la bobina [m^2]
14 S_bar = pi * r_fe ^ 2; % Seccion del vastago [m^2]
15 S_disp = 2 * S_c; % Seccion de dispersion [m^2]
16
17 % Vectores espaciales
18 num_points = 2000; % Numero de puntos
19 x = linspace(0, h_c, num_points); % Region de movimiento
20
21 % Definicion de los vectores magneticos
22 R_dispc = zeros(size(x));
23 R_phi = zeros(size(x));
24 R_B = zeros(size(x));
25 R_airc = zeros(size(x));
26 R_total = zeros(size(x));
27 Phi = zeros(size(x));
28 B = zeros(size(x));
29 F = zeros(size(x));
30
31 % Calculos
32 for i = 1:length(x)
33     % Calculo de reluctancias:
34     R_dispc(i) = h_c / (mu0 * S_disp); % Reluctancia de
35         % dispersion de la bobina [H^-1]
36     R_B(i) = l_fe / (mu_fe * mu0 * S_bar); % Reluctancia
37         % del vastago [H^-1]
38     R_phi(i) = ((h_c + l_fe) - x(i)) / (mu0 * S_disp); %
39         % Reluctancia de dispersion [H^-1]
40     R_airc(i) = (h_c - x(i)) / (mu0 * S_c); % Reluctancia
41         % del aire dentro de la bobina [H^-1]
42
43     R_total(i) = R_dispc(i) + R_phi(i) + R_B(i) + R_airc(
44         i); % Reluctancia total [H^-1]
```

```

41      % Flujo [Wb]
42      Phi(i) = (N * I_c) / R_total(i);
43
44      % Induccion magnetica [T]
45      B(i) = Phi(i) / S_bar;
46
47      % Fuerza en x(i) [N]
48      F(i) = 0.5 * B(i)^2 * S_bar / mu0;
49  end
50
51  % Graficas
52
53  % Reluctancias R[H^-1]
54  figure;
55  hold on;
56  plot(x, R_dispC, 'r', 'DisplayName', 'R_{dispC}');
57  plot(x, R_B, 'g', 'DisplayName', 'R_{bar}');
58  plot(x, R_phi, 'b', 'DisplayName', 'R_{phi}');
59  plot(x, R_airc, 'b', 'DisplayName', 'R_{airc}');
60  plot(x, R_total, 'k', 'DisplayName', 'R_{total}');
61  xlabel('Posicion del vastago [m]');
62  ylabel('Reluctancias [H^-1]');
63  title('Reluctancias vs posicion');
64  legend show;
65  legend('Location', 'best');
66  grid on;
67  hold off;
68
69  % Induccion magnetica B[T]
70  figure;
71  plot(x, B, 'LineWidth', 2);
72  xlabel('Posicion del vastago [m]');
73  ylabel('Induccion magnetica [T]');
74  title('Induccion magnetica vs posicion');
75  grid on;
76
77  % Fuerza [N]
78  figure;
79  plot(x, F, 'LineWidth', 2);
80  xlabel('Posicion del vastago [m]');
81  ylabel('Fuerza magnetica [N]');
82  title('Fuerza vs posicion');
83  grid on;

```

Anexo II. Código de control de disparo.

En este anexo se presenta el código de control de disparo de la lanzadera, escrito en Arduino:

```
1 // Asignacion de pines
2 const int relayPin = 11;
3 const int sensor1Pin = 5;
4 const int sensor2Pin = 4;
5 const int buttonPin = 6;
6
7 // Variables de control de tiempo
8 unsigned long timeSensor1 = 0;
9 unsigned long timeSensor2 = 0;
10 bool sensor1HighDetected = false;
11
12 void setup() {
13     Serial.begin(9600);
14
15     // Modos de los pines
16     pinMode(relayPin, OUTPUT);
17     pinMode(sensor1Pin, INPUT);
18     pinMode(sensor2Pin, INPUT);
19     pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);
20
21     digitalWrite(relayPin, LOW);
22 }
23
24 void loop() {
25     // Comprobacion de pulsacion del boton
26     if (digitalRead(buttonPin) == LOW) { // Condicion de
27         pulsacion
28         digitalWrite(relayPin, HIGH); // Activacion del rele
29         int timeOn = millis(); // Tiempo de inicio de alimentacion
30         // Reinicio de variables
31         sensor1HighDetected = false;
32         timeSensor1 = 0;
33         timeSensor2 = 0;
34
35         // Esperamos a que el sensor a la salida de la bobina
36         detecte el vastago
37         while (!sensor1HighDetected) {
38             if (digitalRead(sensor1Pin) == HIGH) {
39                 timeSensor1 = millis(); // Valor temporal
40                 sensor1HighDetected = true;
41             }
42         }
43
44         digitalWrite(relayPin, LOW); // Apagamos el rele
45         int timeOff = millis(); // Tiempo de corte de alimentacion
46
47         // Esperamos a que el segundo sensor detecte el vastago
48         while (timeSensor2 == 0) {
49             if (digitalRead(sensor2Pin) == HIGH) {
50                 timeSensor2 = millis(); // Valor temporal
51             }
52         }
53 }
```

```
52 // Calculamos las diferencias temporales
53 unsigned long timeDifference = timeSensor2 - timeSensor1;
54     // Intervalo de tiempo para la velocidad
55 unsigned long currentTime = timeOff - timeOn; // Intervalo
56     de tiempo de alimentacion
57
58 // Mostramos los valores en el terminal
59 Serial.println("Diferencia de tiempo de medicion: ");
60 Serial.println(timeDifference);
61 Serial.println(" milisegundos.");
62 Serial.println("La bobina ha estado alimentada por: ");
63 Serial.println(currentTime);
64 Serial.println(" milisegundos.");
65
66 delay(500);
}
}
```



CE

Model Number

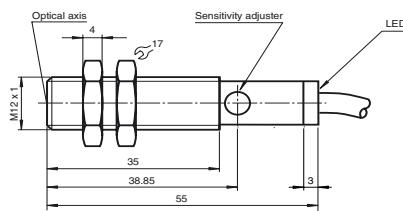
GLV12-8-200/37/40b/115

Diffuse mode sensor
with 2 m fixed cable

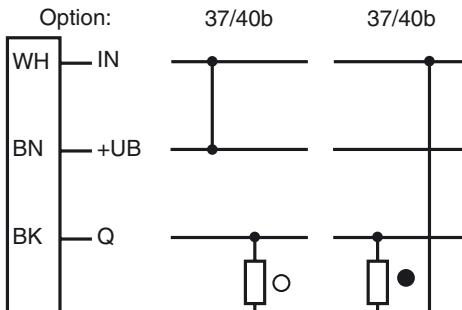
Features

- M12 threaded housing made of brass, nickel plated
- Visible red light
- Light/dark ON, programmable
- Protection degree IP67

Dimensions



Electrical connection



○ = Light on
● = Dark on

Additional accessories can be found in the Internet.

Technical data

General specifications

Detection range	0 ... 200 mm
Light source	LED, 660 nm
Approvals	CE
Adjustment range	20 ... 200 mm
Reference target	standard white 200 mm x 200 mm
Light type	red, modulated light
Ambient light limit	20000 Lux

Indicators/operating means

Function display	LED yellow: switching state
Operating elements	sensing range adjuster

Electrical specifications

Operating voltage	10 ... 30 V DC
Ripple	10 %
No-load supply current	$I_0 \leq 20 \text{ mA}$
Time delay before availability	$t_v \leq 25 \text{ ms}$

Input

Control input	Light ON: +UB Dark ON: 0 V
---------------	-------------------------------

Output

Switching type	light/dark switching
Signal output	1 PNP output, short-circuit proof, protected from reverse polarity, open collector
Switching voltage	max. 30 V DC
Switching current	max. 300 mA
Voltage drop	$U_d \leq 3 \text{ V}$
Switching frequency	$f \leq 700 \text{ Hz}$
Response time	$\leq 0.7 \text{ ms}$

Standard conformity

Standards	EN 60947-5-2
-----------	--------------

Ambient conditions

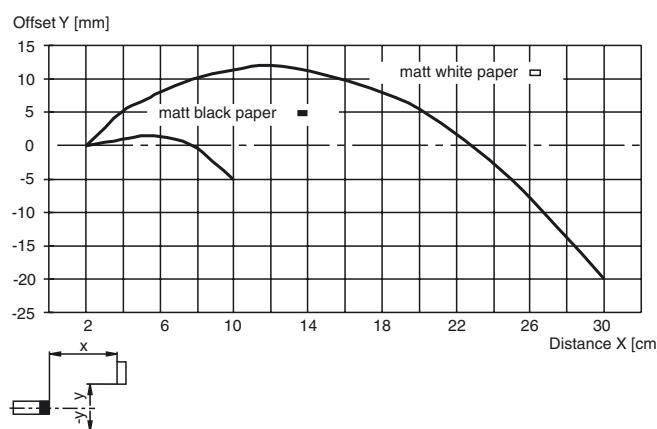
Ambient temperature	-25 ... 55 °C (248 ... 328 K)
Storage temperature	-40 ... 70 °C (233 ... 343 K)

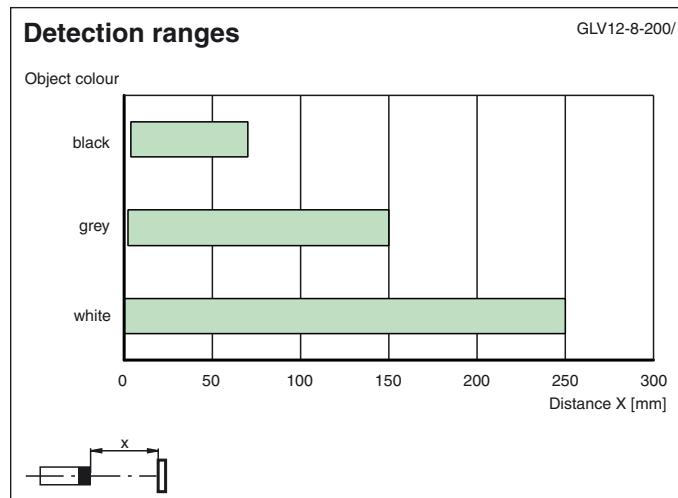
Mechanical specifications

Protection degree	IP67
Connection	fixed cable 2 m
Material	
Housing	brass, nickel-plated
Optical face	PMMA
Mass	45 g

Characteristic response curve

GLV12-8-200/





- ◆ MOSFET or IGBT Output
- ◆ Low Impedance
- ◆ 4-32VDC Control Input
- ◆ Load Current:7A-100A
- ◆ Dielectric Strength: 2500Vrms
- ◆ Internal Over-voltage Protection
- ◆ LED Indicator
- ◆ RoHS Compliant



Ordering Information

KSJ	50	D	40	-L	(XXX)
KSJ Series (1)	Load Voltage 30: 30VDC 50: 50VDC 60: 60VDC 100: 100VDC 200: 200VDC 400: 400VDC 600: 600VDC 1200: 1200VDC	DC Control	Load Current 7: 7Amp 10: 10Amp 20: 20Amp 25: 25Amp 40: 40Amp 50: 50Amp 80: 80Amp 100: 100Amp	LED Indicator	Customized Code

Note (1): The part number selection is subject to the following list.

	30VDC	50VDC	60VDC	100VDC	200VDC	400VDC	600VDC	1200VDC
7A			KSJ60D7-L					
10A					KSJ200D10-L			
20A				KSJ100D20-L	KSJ200D20-L			
25A						KSJ400D25-L	KSJ600D25-L	KSJ1200D25-L
40A		KSJ50D40-L		KSJ100D40-L	KSJ200D40-L			
50A	KSJ30D50-L		KSJ60D50-L				KSJ600D50-L	KSJ1200D50-L
80A		KSJ50D80-L		KSJ100D80-L				
100A	KSJ30D100-L							

Input Specifications (Ta=25°C)

Control Voltage Range	4-32VDC
Must Turn-On Voltage	4VDC
Must Turn-Off Voltage	1VDC
Maximum Input Current	25mA @32VDC
Maximum Reverse Voltage	32VDC

General Specifications

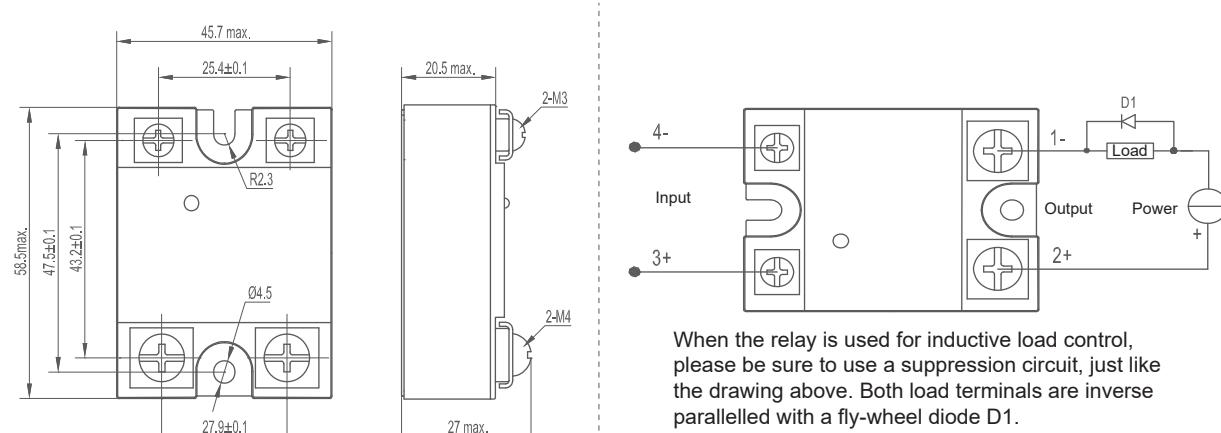
Output Specifications (Ta=25°C)																						
KSJ30D-L			KSJ50D-L			KSJ60D-L			KSJ100D-L			KSJ200D-L			KSJ400D25-L			KSJ600D-L				
50	100	40	80	7	50	20	40	80	100	10	20	40	25	50	25	50	25	50	25	50		
Load Voltage Range (VDC)	0-24			0-36			0-48			0-75			0-120			0-300			0-500			
Maximum Load Current (A)	50	100	40	80	7	50	20	40	80	100	10	20	40	25	50	25	50	25	50	25	50	
Maximum Surge Current (Apk@10ms)	150	250	120	200	30	150	60	120	200	250	30	60	120	150	150	300	150	300	150	300	150	300
Maximum On-State Resistance (mΩ)	4.2	2.1	12	6	14	7	13	13	6.5	6.5	60	30	30	1.75	0.1	0.5	2	2	1	1	1	
Maximum On-State Voltage Drop@Rated Current (V)													1.75									
Maximum Off-State Leakage Current@Rated Load Voltage (mA)													0.1									
Minimum Load Current (mA)													2									
Maximum Turn-On Time (ms)													0.1									
Maximum Turn-Off Time (ms)													0.1									

General Specifications (Ta=25°C)	
Dielectric Strength (50/60Hz)	Input/Output 2500Vrms
Input, output/Base	2500Vrms
Minimum Insulation Resistance (@500VDC)	1000MΩ
Ambient Temperature Range	-30°C ~ +80°C
Storage Temperature Range	-30°C ~ +100°C
Weight (Typical)	100g

Applications

Control heating, DC power supplies, electromechanical valves, motors, medical equipment, and etc.

Outline Dimensions/Wiring Diagram

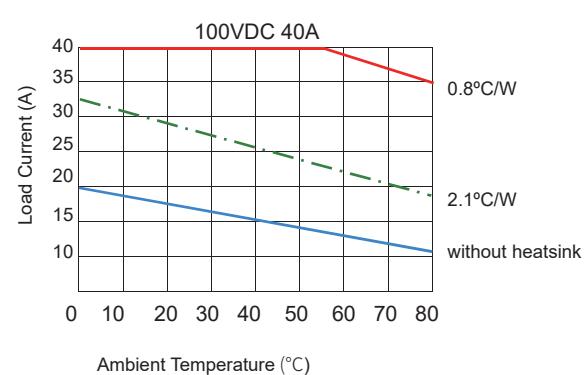
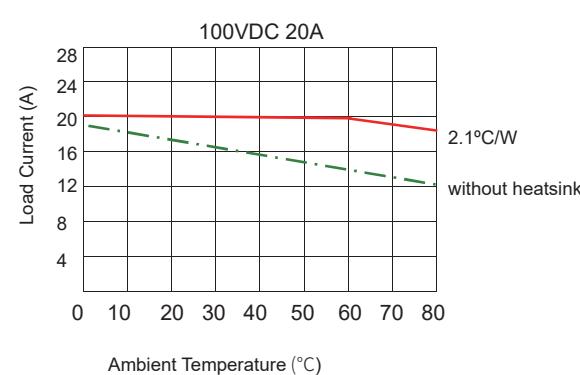
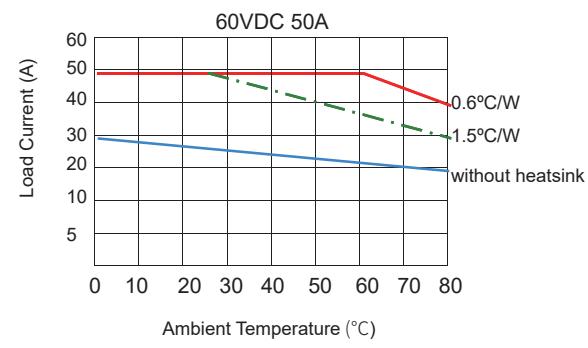
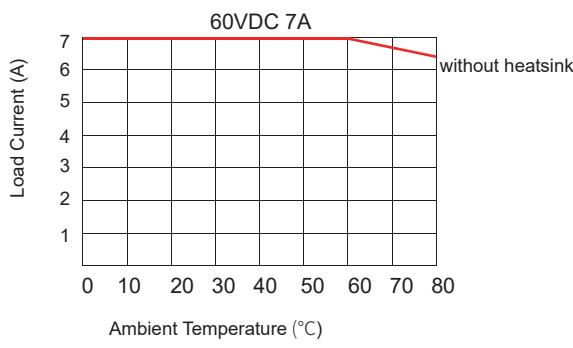
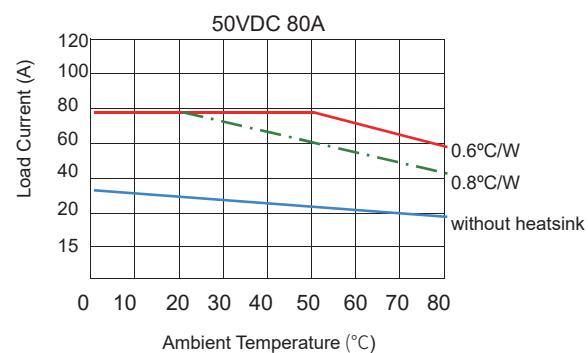
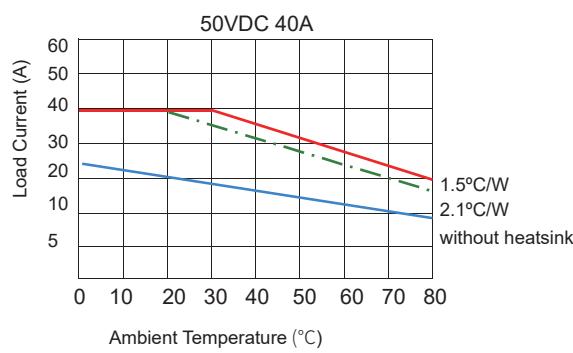
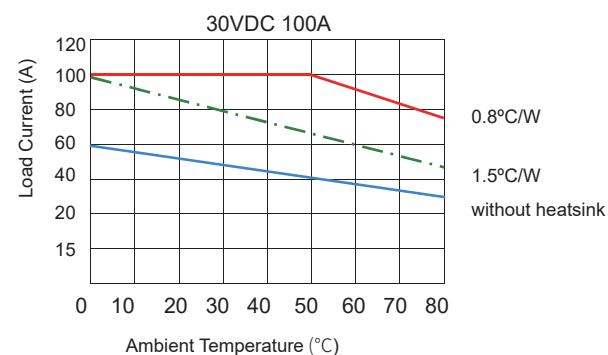
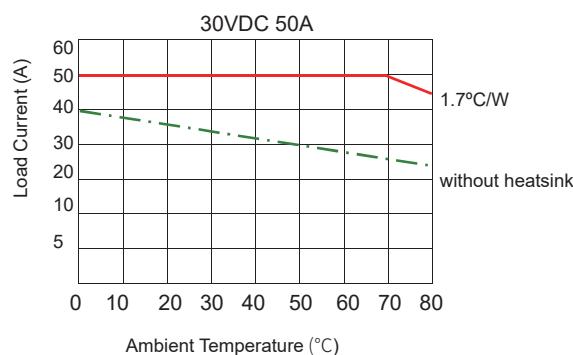


Outline Dimensions

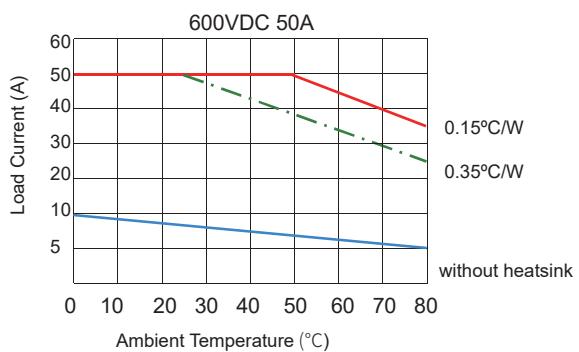
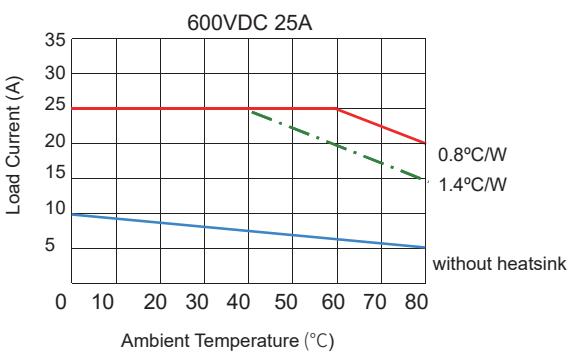
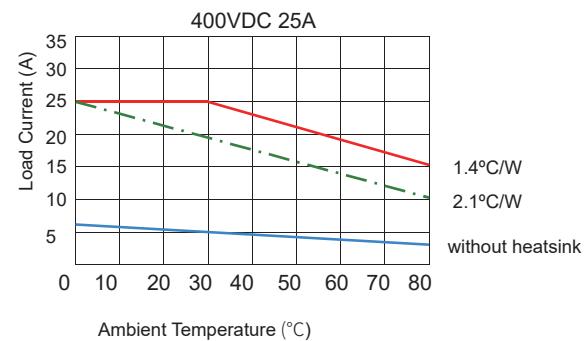
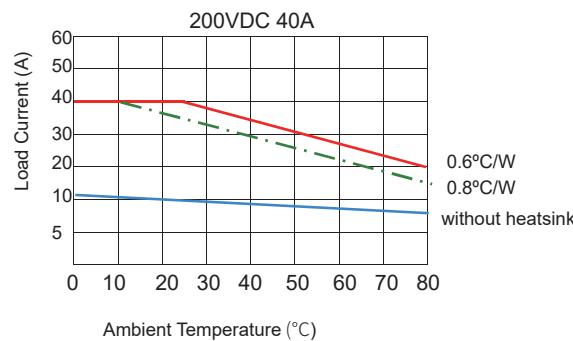
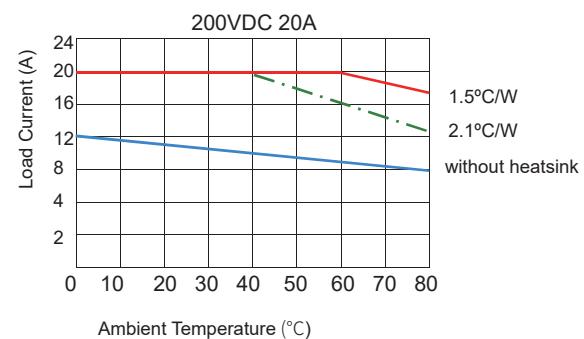
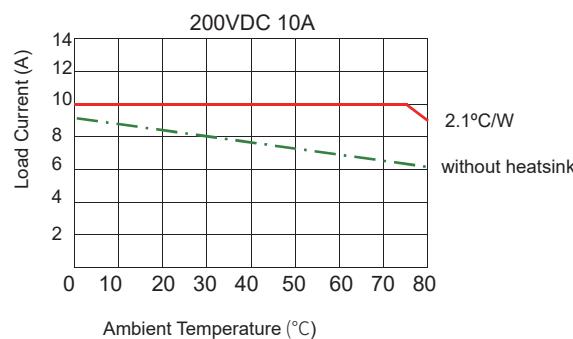
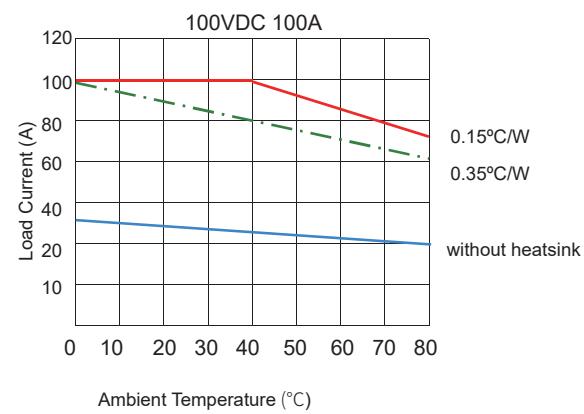
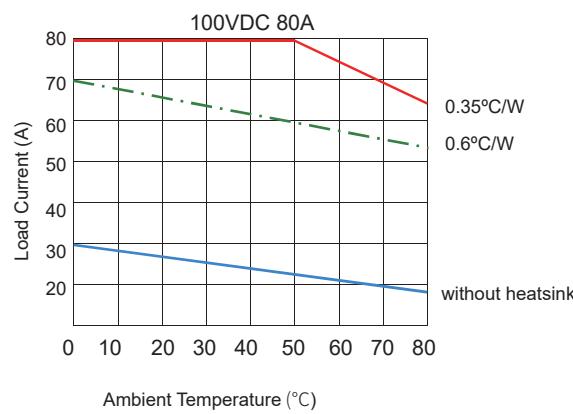
Wiring Diagram

When the relay is used for inductive load control, please be sure to use a suppression circuit, just like the drawing above. Both load terminals are inverse parallelled with a fly-wheel diode D1.
D1: Fast Recovery Diode

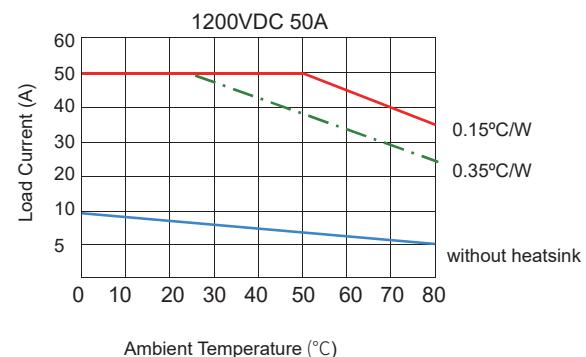
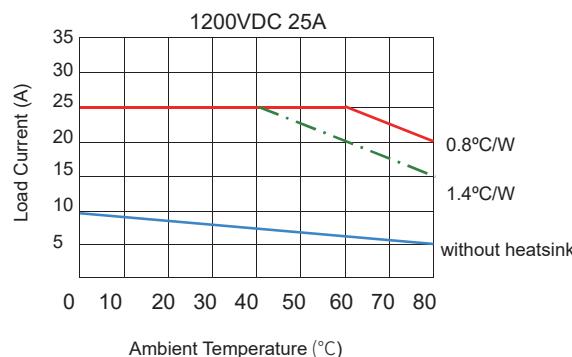
Thermal Derating Curve



Thermal Derating Curve



Thermal Derating Curve



General Notes

1. Relay must be mounted to proper sized heat sink based on thermal curves. Thermal grease or a thermal pad must be used between relay and heat sink and be torqued down to 18-20/2.0-2.2 in-lb/N·m.
2. When connection wiring to SSR please ensure screws are torqued down properly (input 13-15/1.5-1.7in/lb/N·m, output 18-20/2.0-2.2 in-lb/N·m).
3. When Ambient temperature is above 25°C see thermal derating curve.

Agency Approvals (Certification)

