

Diseño y desarrollo de una lanzadera electro- magnética

Proyecto Final de Grado presentado para obtener el título de Ingeniería Eléctrica por **Pedro José Romero Gombau** bajo la supervisión de **Ibon Elosegui Simón**

Donostia-San Sebastián, Julio 2024



Tecnun
Universidad
de Navarra

Quiero dedicar este trabajo de final de grado a mis padres y a mi hermana. Ellos han sido una guía y un apoyo constante en mi vida, formándome como persona y proporcionándome la oportunidad de cursar la carrera de Ingeniería Eléctrica. Sin su esfuerzo, sacrificio y cariño incondicional, no habría sido posible alcanzar este logro. Gracias por todo el apoyo y la dedicación que habéis mostrado a lo largo de mi vida y en especial durante estos años de estudio universitario.

También quisiera agradecer a mis profesores Ibón Elosegui y Jose Macayo, sin los cuales no podría haber llevado a cabo este interesante proyecto. A Ibón por sus valiosas enseñanzas en el campo de la electricidad y las muchas enseñanzas vitales. Y a Jose por su interés continuo y su predisposición a ayudar siempre. Sois el pilar de la ingeniería eléctrica en tecnun, y sin ninguna duda habéis tenido un papel imprescindible en el desarrollo de mi vocación.

Resumen

En las carreras de ingeniería, un aspecto muy enriquecedor son las prácticas, en las que los alumnos aplican los conocimientos aprendidos. Con este fin, en este PFG se ha propuesto el diseño de una lanzadera electromagnética, en la que los alumnos tendrán que poner en práctica sus habilidades. Para su diseño, se han realizado una serie de desarrollos teórico-prácticos.

Dichos desarrollos constan de uno analítico que ha proporcionado las fórmulas necesarias para generar una aplicación en MATLAB, un desarrollo mediante ANSYS Maxwell para realizar simulaciones con el sistema y un diseño de un prototipo funcional. Todo esto se ha materializado en una práctica para que los alumnos cursando Sistemas Eléctricos II puedan interactuar con el sistema y mejorar sus competencias en ingeniería eléctrica.

Palabras clave: Prácticas, Lanzadera electromagnética, MATLAB®, ANSYS Maxwell, Prototipo.

Abstract

In engineering degrees, a highly enriching aspect is the practical sessions where students apply the knowledge they have learned. With this aim, this final degree project proposes the design of an electromagnetic launcher, in which students will need to put their skills into practice. For its design, a series of theoretical-practical developments have been carried out.

These developments include an analytical one that has provided the necessary formulas to generate an application in MATLAB[®], a development using ANSYS Maxwell to perform simulations with the system, and the design of a functional prototype. All of this has been materialized into a practical session so that students taking Electrical Systems II can interact with the system and improve their competencies in electrical engineering.

Key words: Practicals, Coilgun, MATLAB[®], ANSYS Maxwell, Prototipo.

Índice

1. Introducción	9
2. Objetivos y motivación del proyecto	10
2.1. Objetivos y métodos	10
2.2. Motivación	11
3. Marco teórico: Obtención de un circuito magnético	12
3.1. Leyes de Maxwell	12
3.2. Ley de Ampère	12
3.3. Campo magnético generado por una bobina	13
3.4. Circuito magnético	16
4. Cálculo analítico de la fuerza de atracción entre el vástago y la bobina	18
4.1. Definición del sistema	18
4.2. Cálculo de la fuerza de atracción ejercida por la bobina sobre el vástago . .	18
4.3. Definición del circuito magnético	20
4.4. Desarrollo del cálculo en MATLAB®	20
4.5. Resultado obtenido para una geometría dada	22
5. Cálculo por Elementos Finitos de la fuerza de atracción	24
5.1. Geometría	24
5.2. Simulaciones instantáneas	27
5.3. Simulaciones transitorias	28
6. Desarrollo de un prototipo de lanzadera electromagnética	32
6.1. Prueba inicial	33
6.2. Estructura	33
6.3. Sensores de movimiento	33
6.4. Circuito electrónico	34
6.5. Diseño de la bobina	39
7. Resultados	41
7.1. Validación de los modelos	41
7.2. Resultados del prototipo	42
8. Práctica propuesta	44
9. Conclusiones	54
10. Referencias	55

Índice de figuras

1.	Cañón de Gauss[1].	9
2.	Ecuaciones de Maxwell [2].	12
3.	Visualización del campo magnético producido alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica.	13
4.	Curva \vec{C} para la cual realizaremos los cálculos [3].	13
5.	Visualización del campo magnético de una bobina energizada [4]. B_{max} corresponde al punto de mayor valor de inducción electromagnética.	15
6.	Esquema cualitativo de la lanzadera electromagnética.	15
7.	Esquema de una bobina con un núcleo ferromagnético y su circuito magnético equivalente, donde R_{total} es el sumatorio de las reluctancias de cada uno de ramales que forman el núcleo, además de las reluctancias de dispersión.	17
8.	Esquema geométrico del sistema.	18
9.	Secciones del sistema con una vista de planta.	19
10.	Círculo magnético del sistema.	20
11.	Aplicación de cálculos de MATLAB [®]	21
12.	Reluctancias en función de la posición del vástago evaluada como el parámetro x de la figura 8.	22
13.	Inducción en función de la posición del vástago evaluada como el parámetro x de la figura 8.	22
14.	Fuerza en función de la posición del vástago evaluada como el parámetro x de la figura 8.	23
15.	Geometría de la barra y bobina en 3D.	24
16.	Mallado de la barra y bobina en 3D.	25
17.	Detalle del mallado de la barra y bobina en 3D.	25
18.	Geometría de la barra y bobina en 2D.	26
19.	Mallado de la barra y bobina en 2D.	26
20.	Detalle del mallado de la barra y bobina en 2D.	27
21.	Visualización de los campos magnéticos con la bobina energizada con $I_{cc} = 3.5$ A y $x = 8/10 * h_c$	27
22.	Visualización de los campos magnéticos dentro del solenoide.	28
23.	Fuerza (verde) y corriente (rojo) en función del tiempo de la configuración 1.	29
24.	Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de en la configuración 1.	29
25.	Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 2.	30
26.	Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 2.	30
27.	Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 3.	31
28.	Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 3.	31
29.	Imagen del banco de pruebas definitivo.	32
30.	Dato experimental de fuerza con la bobina alimentada.	33
31.	Perfiles de aluminio utilizados en la estructura.	33
32.	Esquema conexiones de los sensores capacitivos.	34
33.	Conexión del interrupor de disparo.	35
34.	Colocación del sensor.	35
35.	Esquema eléctrico de la conexión del SSR.	36

36.	Imagen del relé de estado sólido [5]	36
37.	Imagen del relé PRMA1A05 [6]	36
38.	Esquema eléctrico de un divisor de tensiones.	37
39.	Esquemático de la PCB del proyecto.	38
40.	Distribución de la placa del proyecto.	38
41.	Sección central del solenoide.	39
42.	Interfaz de la calculadora actualizada.	40
43.	Comparación de las figuras 14 y 27.	41
44.	Visualización del campo magnético de una bobina energizada.	46
45.	Esquema geométrico del sistema.	47
46.	Aplicación de ejemplo.	48
47.	Reluctancia en función de x	49
48.	Inducción magnética en función de x	49
49.	Fuerza de atracción magnética en función de x	49
50.	Banco de pruebas.	50
51.	Comparación de fuerzas.	53

Índice de tablas

1.	Fuerzas de atracción magnética en los diferentes ejes del espacio.	28
2.	Configuraciones de bobinas a probar.	42
3.	Denominación de las diferentes alimentaciones.	43
4.	Datos tomados con la bobina base y las alimentaciones de la tabla 3.	43
5.	Resultados del disparo con la bobina base y las alimentaciones de la tabla 3.	43
6.	Valores iniciales para la bobina de la lanzadera.	47
7.	Resultados finales.	51
8.	Valores iniciales para la bobina de la lanzadera.	53

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].

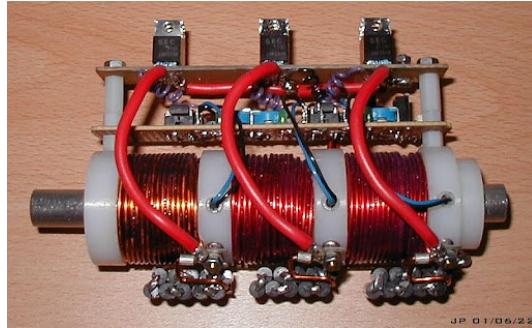


Figura 1: Cañón de Gauss[1].

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 motivación del proyecto

2.1. Objetivos y métodos

Exploraremos ahora los principales objetivos del proyecto, desglosando cada parte constituyente y su resultado esperado. El principal propósito de este trabajo es el diseño de una práctica universitaria que se pueda realizar durante la asignatura de Sistemas Eléctricos II, con la idea de aplicar los conocimientos teóricos de campos magnéticos y resolución de circuitos eléctricos y magnéticos.

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 teórico 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.
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 el diseño de una bobina para implementar en el prototipo, a resolver por los alumnos que realicen la práctica. 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.

2.2. Motivación

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 el autor 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: Obtención de un circuito magnético

3.1. Leyes de Maxwell

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].

3.2. Ley de Ampère

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 a 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”

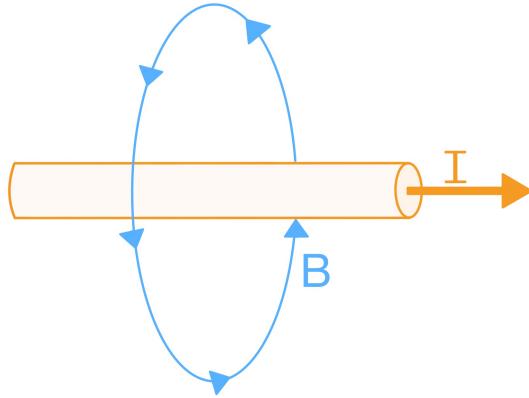


Figura 3: Visualización del campo magnético producido alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica.

3.3. Campo magnético generado por una bobina

El siguiente paso para comprender de forma integral el funcionamiento de la lanzadera electromagnética es 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.

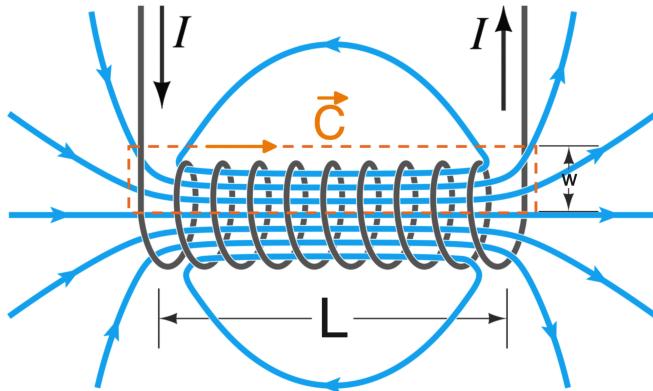


Figura 4: Curva \vec{C} para la cual realizaremos los cálculos [3].

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 del sistema, la longitud considerable del solenoide y el hecho de que el aire es un material con baja permeabilidad magnética ($(\mu_r \text{ aire} \approx 1 \rightarrow \mu_{\text{aire}} = \mu_r \text{ aire} \cdot \mu_0 \approx \mu_0)$), podemos asumir que el campo magnético fuera del solenoide es despreciable en comparación con el interior. Esto implica que la trayectoria exterior de \vec{C} no interfiere significativamente con ninguna línea de campo magnético, salvo en los extremos, donde la influencia es mínima debido a la baja permeabilidad.

Además, los segmentos perpendiculares de la trayectoria elegida solo 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 de línea del campo magnético en la trayectoria \vec{C} 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:

$$I_{\text{encerrada}} = NI$$

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:

$$I_{\text{encerrada}} = nLI$$

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

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

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 solenoide juega un papel crucial en la distribución del campo magnético. Debido a su forma cilíndrica y a la disposición de las espiras, el campo magnético generado en el interior del solenoide es casi uniforme y paralelo al eje del cilindro, variando solo en los extremos donde se curva hacia el núcleo para cumplir la ley de Gauss para el campo magnético ($\nabla \cdot \vec{B} = 0$).

Esta uniformidad del campo magnético simplifica el análisis electromagnético de elementos inductivos, como en el diseño de motores o transformadores. Sin embargo, en la

práctica, un análisis completo y correcto debe considerar los flujos dispersos que rodean a los solenoides, los cuales corresponden a la parte del campo que fluye a través del aire.

En nuestro caso específico, la uniformidad del campo magnético nos permitirá acelerar el proyectoil de la lanzadera de manera rectilínea hacia el centro de la bobina, lo que es esencial para el funcionamiento eficiente del sistema.

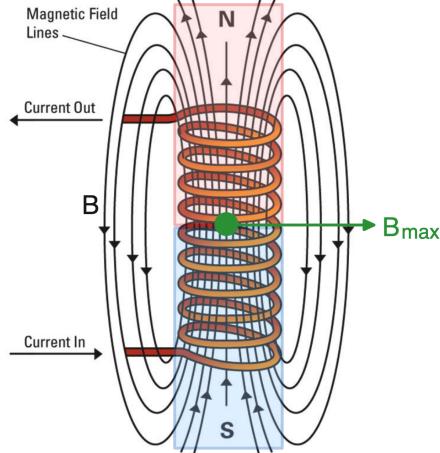


Figura 5: Visualización del campo magnético de una bobina energizada [4]. B_{max} corresponde al punto de mayor valor de inducción electromagnética.

La forma en que este fenómeno será aprovechado para construir la lanzadera consiste en colocar un proyectoil 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 proyectoil y la bobina se encuentren alineados, la corriente se interrumpirá, evitando que el proyectoil 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 proyectoil alcance la máxima velocidad posible. Este circuito será desarrollado en la sección de prototipo (6).

La figura 6 a continuación es un esquema sencillo en el que se visualizan las partes esenciales de una lanzadera electromagnética:

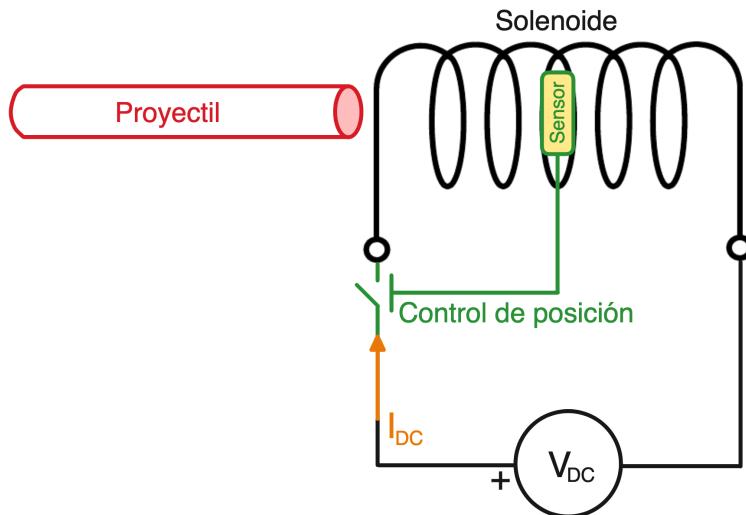


Figura 6: Esquema cualitativo de la lanzadera electromagnética.

3.4. Circuito magnético

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 utilizará 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 $4\pi * 10^{-7}$ [Hm $^{-1}$].

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·v]. La FMM se define como:

$$\mathcal{F} = NI$$

Donde:

N es el número de espiras 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].

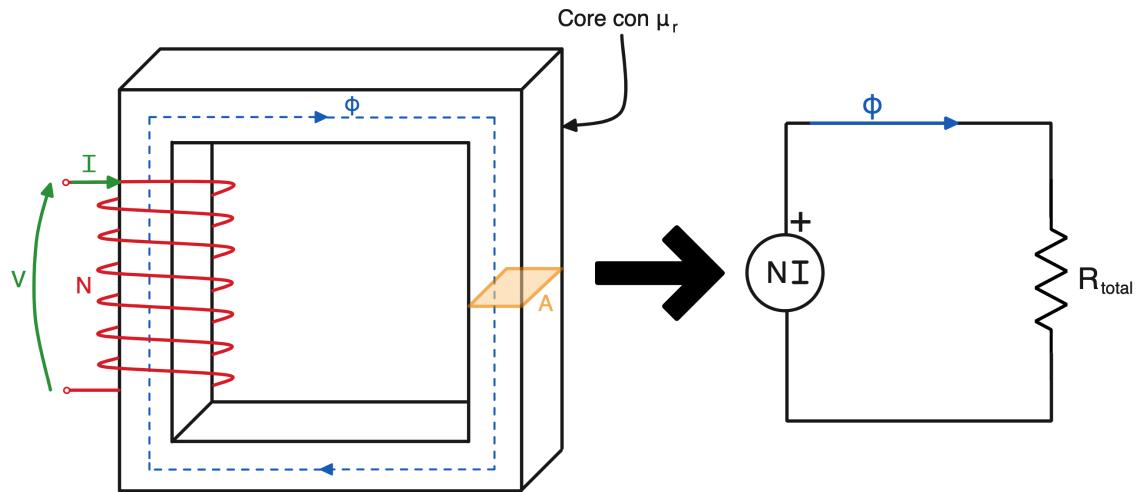


Figura 7: Esquema de una bobina con un núcleo ferromagnético y su circuito magnético equivalente, donde R_{total} es el sumatorio de las reluctancias de cada uno de los ramales que forman el núcleo, además de las reluctancias de dispersión.

4. Cálculo analítico de la fuerza de atracción entre el vástago y la bobina

4.1. Definición del sistema

En la sección de desarrollo teórico se proporcionará 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. En este epígrafe buscaremos desarrollar la fórmula cualitativa del cálculo de la fuerza de atracción entre los elementos, a partir de las siguientes variables de entrada:

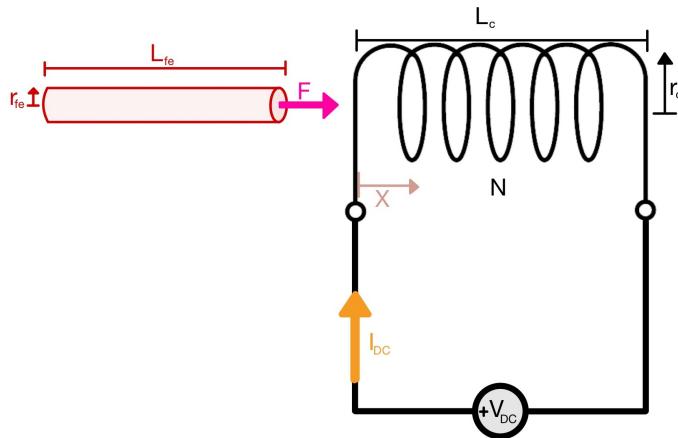


Figura 8: Esquema geométrico del sistema.

■ Parámetros geométricos de la figura 8:

- r_{cext} y r_{cint} : radios exterior e interior de la bobina, respectivamente.
- l_c : altura de la bobina.
- r_{fe} : radio del vástago.
- l_{fe} : longitud del vástago.
- 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 electromagnéticos de la figura 8:

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

4.2. Cálculo de la fuerza de atracción ejercida por la bobina sobre el vástago

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 apartado de marco teórico (3) 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, la cual se relacionará con una reluctancia no obvia del sistema que modela el (escaso) flujo magnético que se dispersa a través del aire que rodea el sistema.

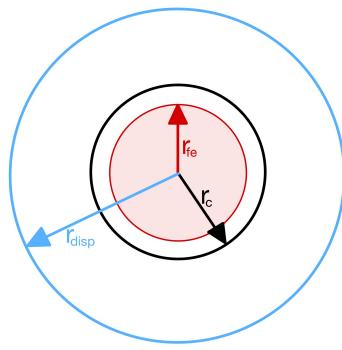


Figura 9: Secciones del sistema con una vista de planta.

4.3. Definición del circuito magnético

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 dentro de la misma disminuye según el vástago aumenta.

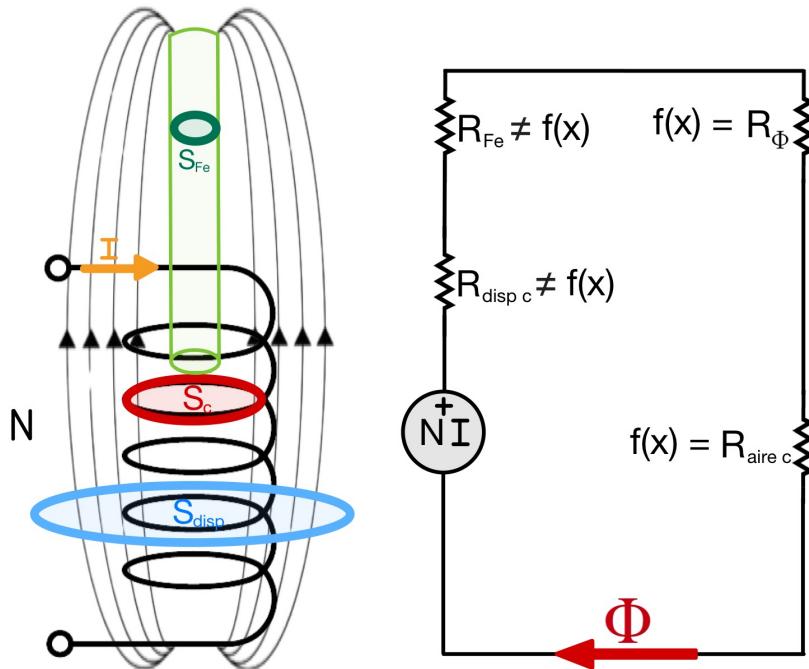


Figura 10: Circuito magnético del sistema.

4.4. Desarrollo del cálculo en MATLAB®

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. El producto de este código es una “calculadora” que devuelve la evolución de la fuerza con el parámetro x , y queda así:

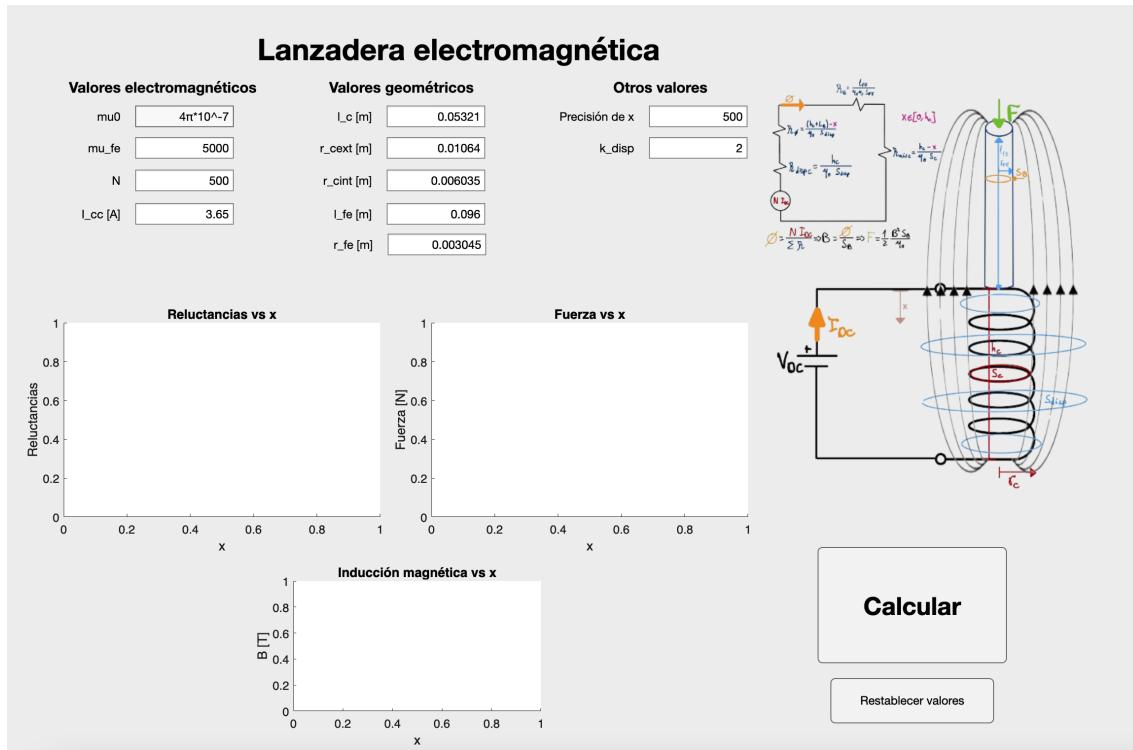


Figura 11: Aplicación de cálculos de MATLAB[®].

4.5. Resultado obtenido para una geometría dada

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:

$$\begin{aligned}\mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} & \mu_{fe} &= 5000 & N &= 500 & k_{disp} &= 2 \\ l_{fe} &= 96 \text{ mm} & r_{fe} &= 3.045 \text{ mm} \\ l_c &= 53.21 \text{ mm} & r_{cext} &= 10.64 \text{ mm} & r_{cint} &= 6.035 \text{ mm}\end{aligned}$$

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

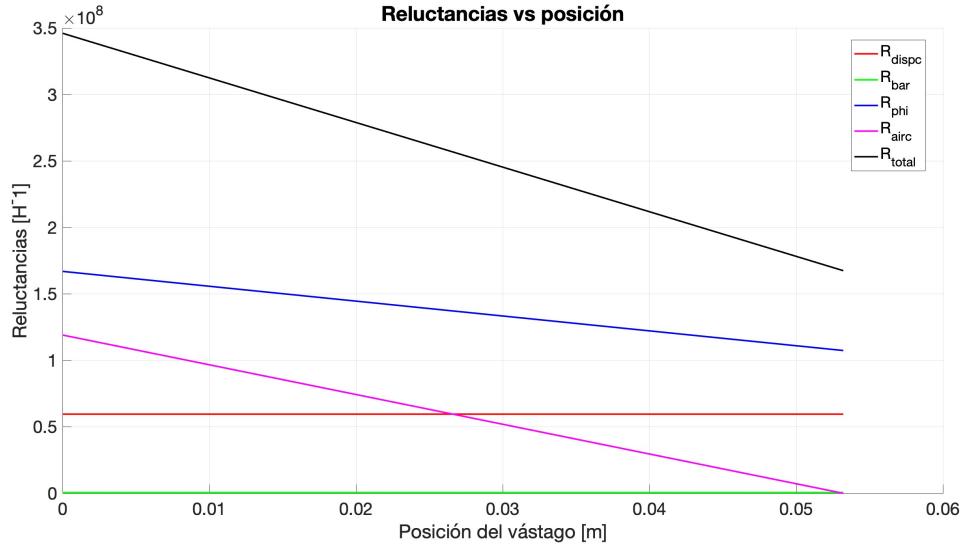


Figura 12: Reluctancias en función de la posición del vástago evaluada como el parámetro x de la figura 8.

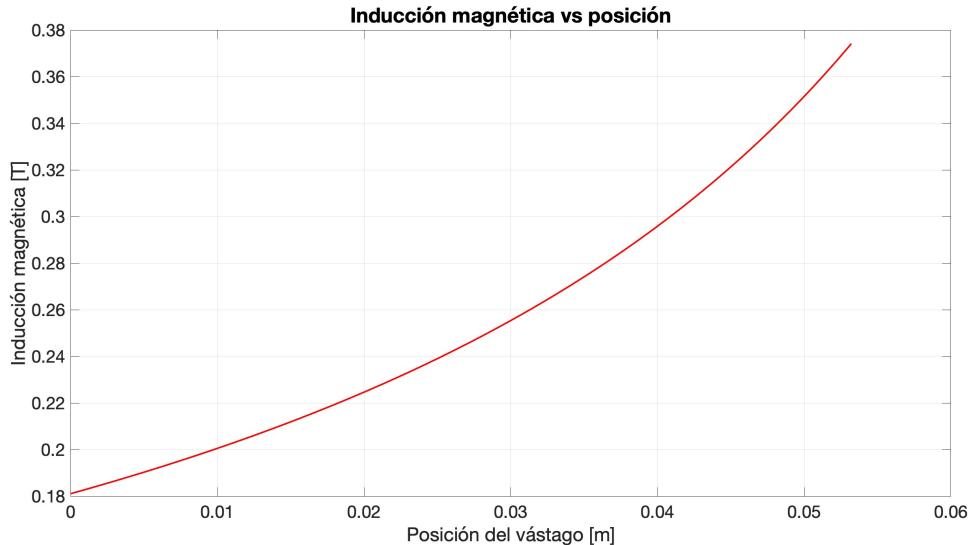


Figura 13: Inducción en función de la posición del vástago evaluada como el parámetro x de la figura 8.

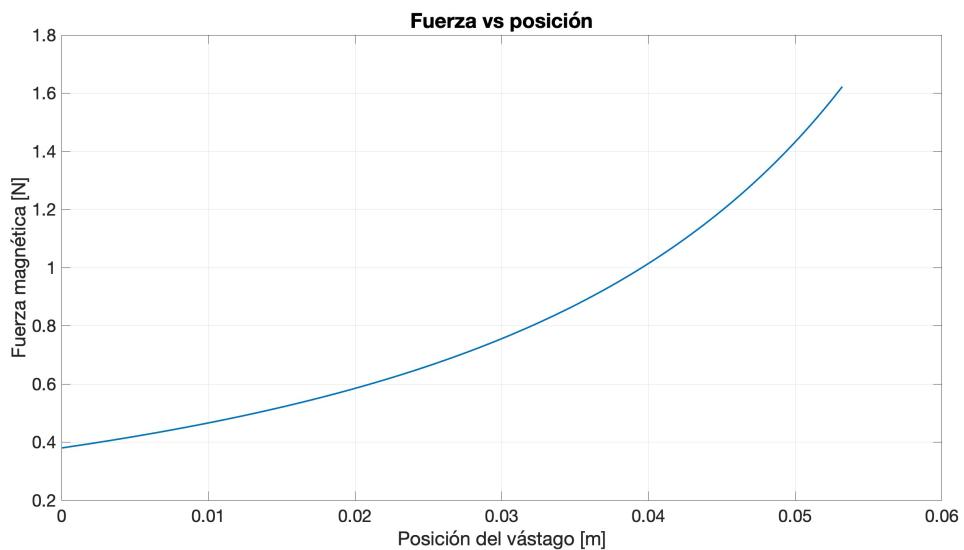


Figura 14: Fuerza en función de la posición del vástago evaluada como el parámetro x de la figura 8.

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

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. En el Anexo III se detalla el procedimiento de creación de la geometría y realización de simulaciones.

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 asociadas 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 permite realizar las simulaciones con un menor tiempo de computación. Una vez creada la geometría, se definieron los diferentes materiales y sus propiedades electromagnéticas. 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 modela la geometría a continuación mostrada:

- **Geometría en 3D:**

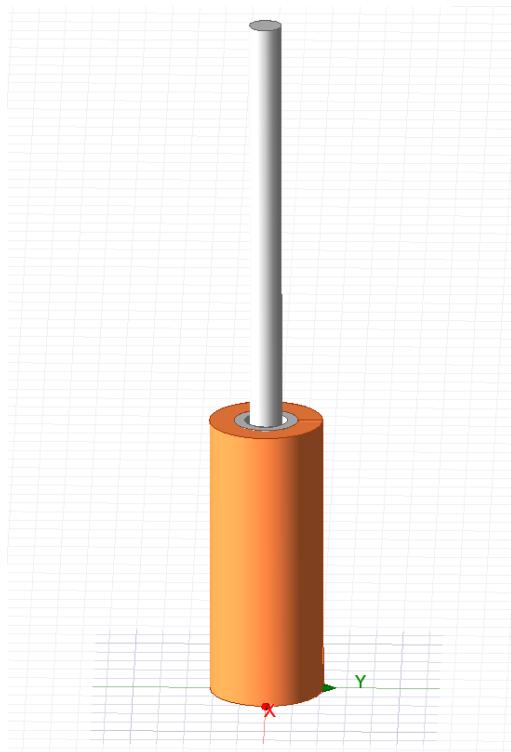


Figura 15: Geometría de la barra y bobina en 3D.

- **Mallado en 3D:**

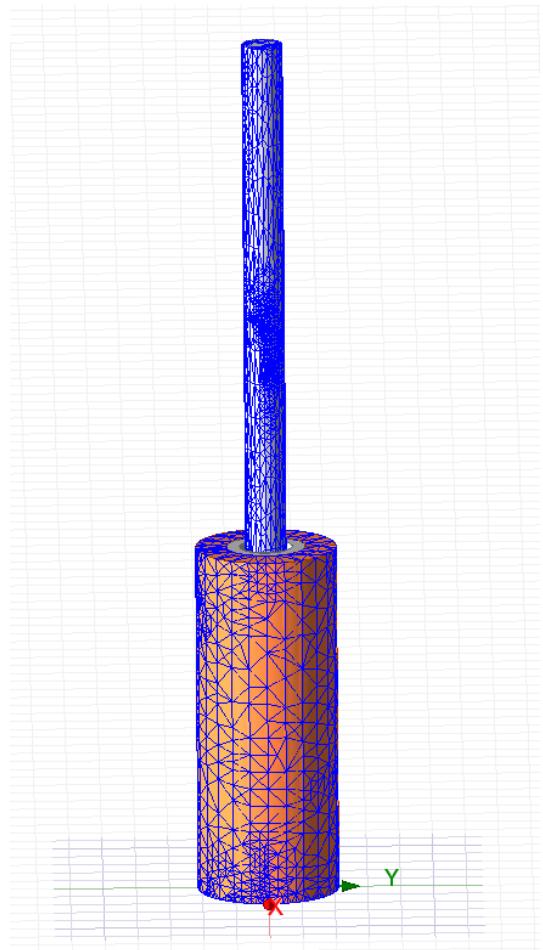


Figura 16: Mallado de la barra y bobina en 3D.

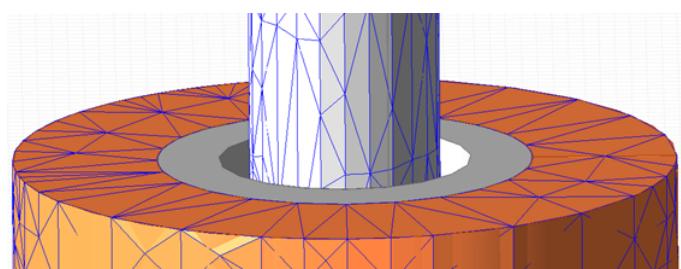


Figura 17: Detalle del mallado de la barra y bobina en 3D.

- Geometría en 2D:

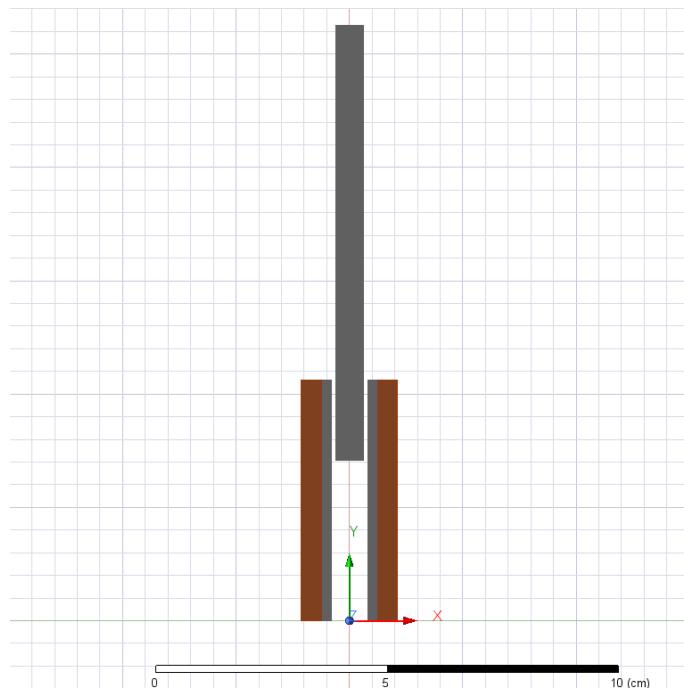


Figura 18: Geometría de la barra y bobina en 2D.

- Mallado en 2D:

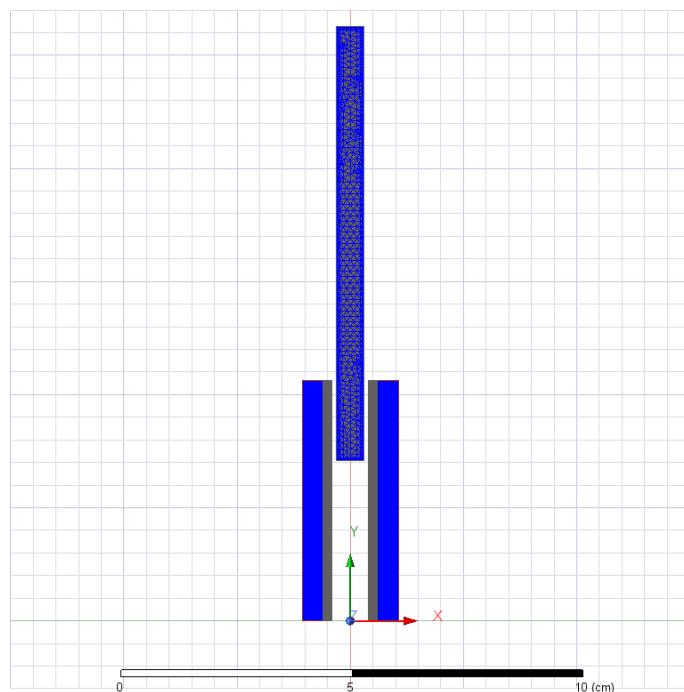


Figura 19: Mallado de la barra y bobina en 2D.

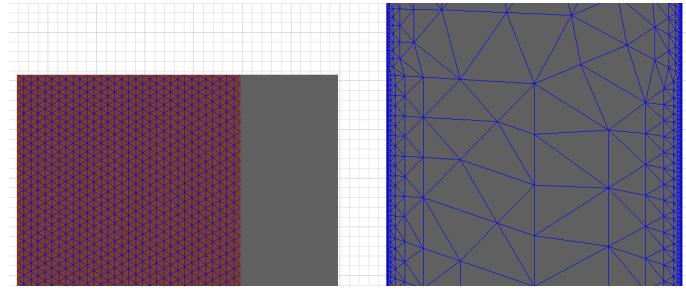


Figura 20: Detalle del mallado de la barra y bobina en 2D.

La bobina (cilindro ocre), se ha generado de la manera mostrada y no con un polígono helicoidal debido a que el orden de magnitud de espiras (10^2) y el orden de magnitud de las medidas (10^{-3}) convierte esto en una muy compleja tarea, ya que ANSYS Maxwell® 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 de un solenoide, sin necesidad de crear una geometría extremadamente compleja [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 15, se realizó una simulación electroestática con una $I_{cc} = 3.65 \text{ A}$ para poder observar los campos magnéticos del sistema, resultando en la siguiente figura:

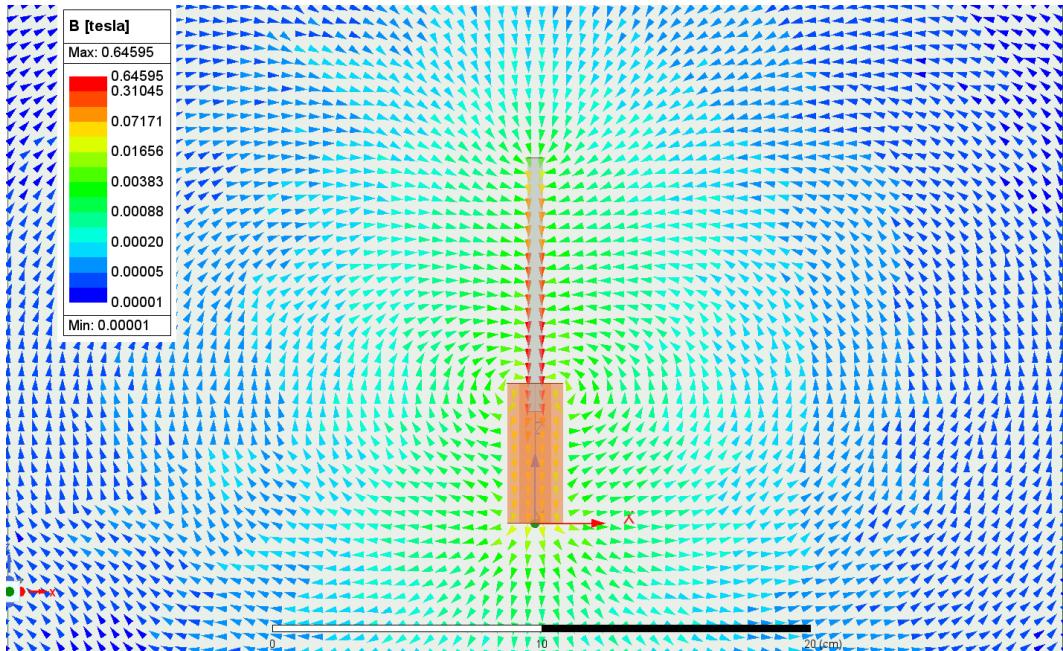


Figura 21: Visualización de los campos magnéticos con la bobina energizada con $I_{cc} = 3.5 \text{ A}$ y $x = 8/10 * h_c$.

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 21:

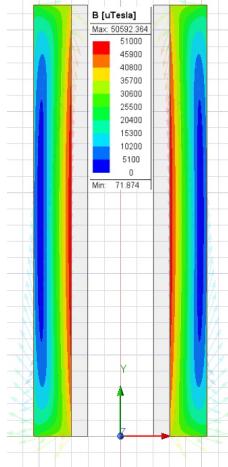


Figura 22: Visualización de los campos magnéticos dentro del solenoide.

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 la 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 Maxwell® 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 Maxwell® 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 continuación:

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

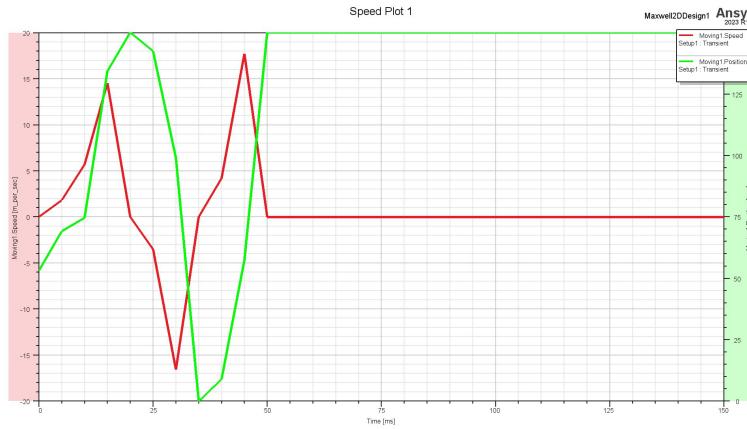


Figura 24: Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de en la configuración 1.

Como se puede observar en las figuras 23 y 24, 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:

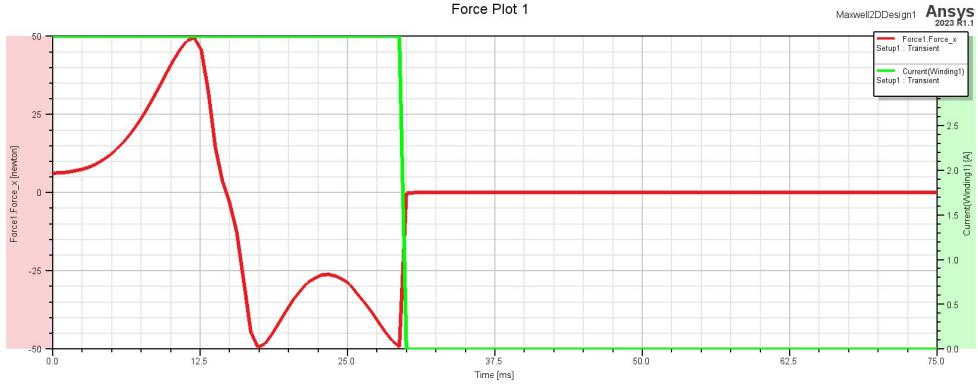


Figura 25: Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 2.

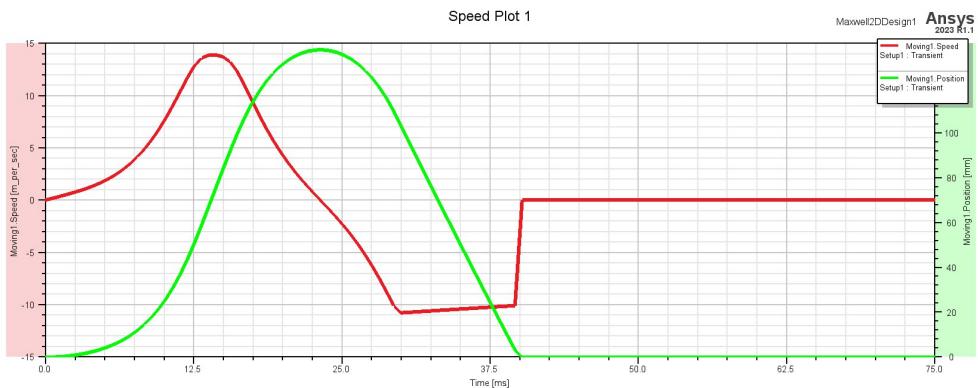


Figura 26: Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 2.

En la segunda configuración, se utilizó un timestep muy pequeño para poder observar con precisión el movimiento del vástago. Se observa más ajustado el tiempo de simulación, aunque el tiempo de alimentación de la bobina sigue siendo muy elevado ya que el vástago 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:

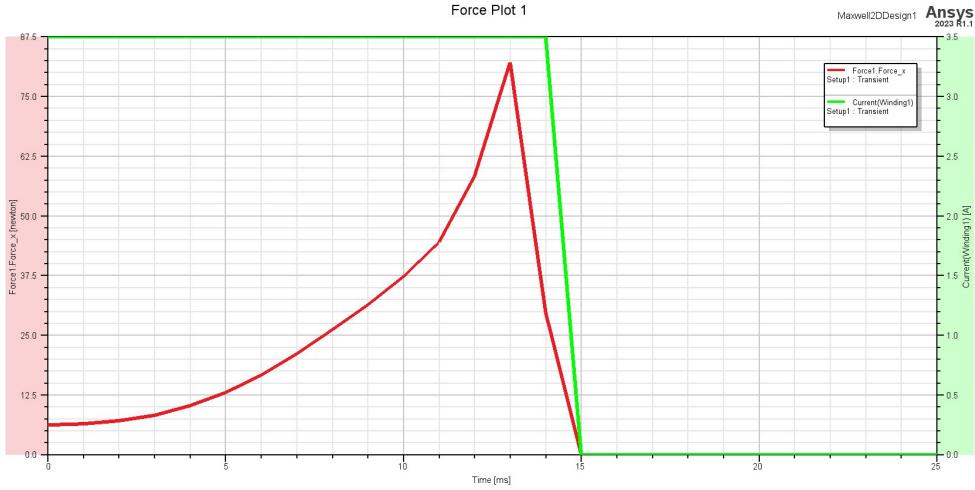


Figura 27: Fuerza (rojo) y corriente (verde) en función del tiempo de la configuración 3.

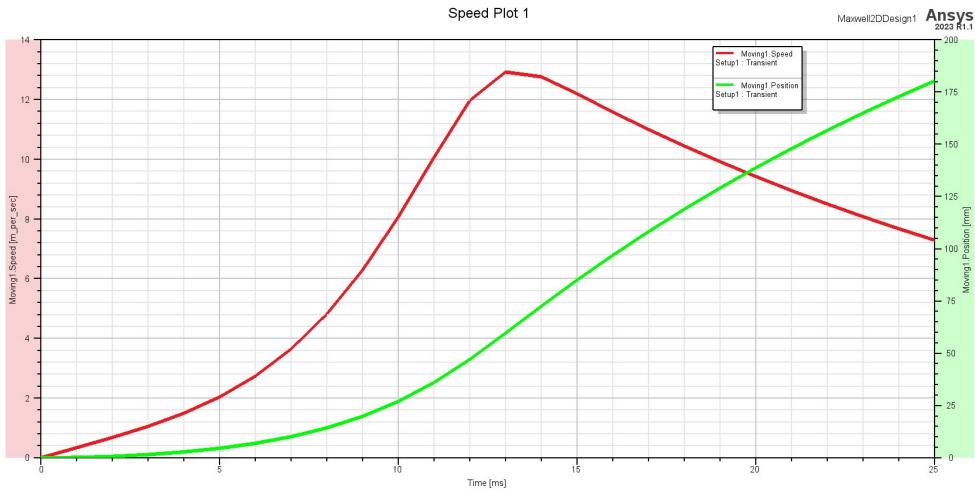


Figura 28: Posición (verde) y velocidad (rojo) en función del tiempo de la configuración 3.

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 28, 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 ($F_{max} \approx 80$ N) a la fuerza obtenida en la prueba de referencia (figura 30).

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 del sistema completo, así como algunas de las consideraciones de diseño que los alumnos tendrán que tener en cuenta a la hora de realizar la práctica.

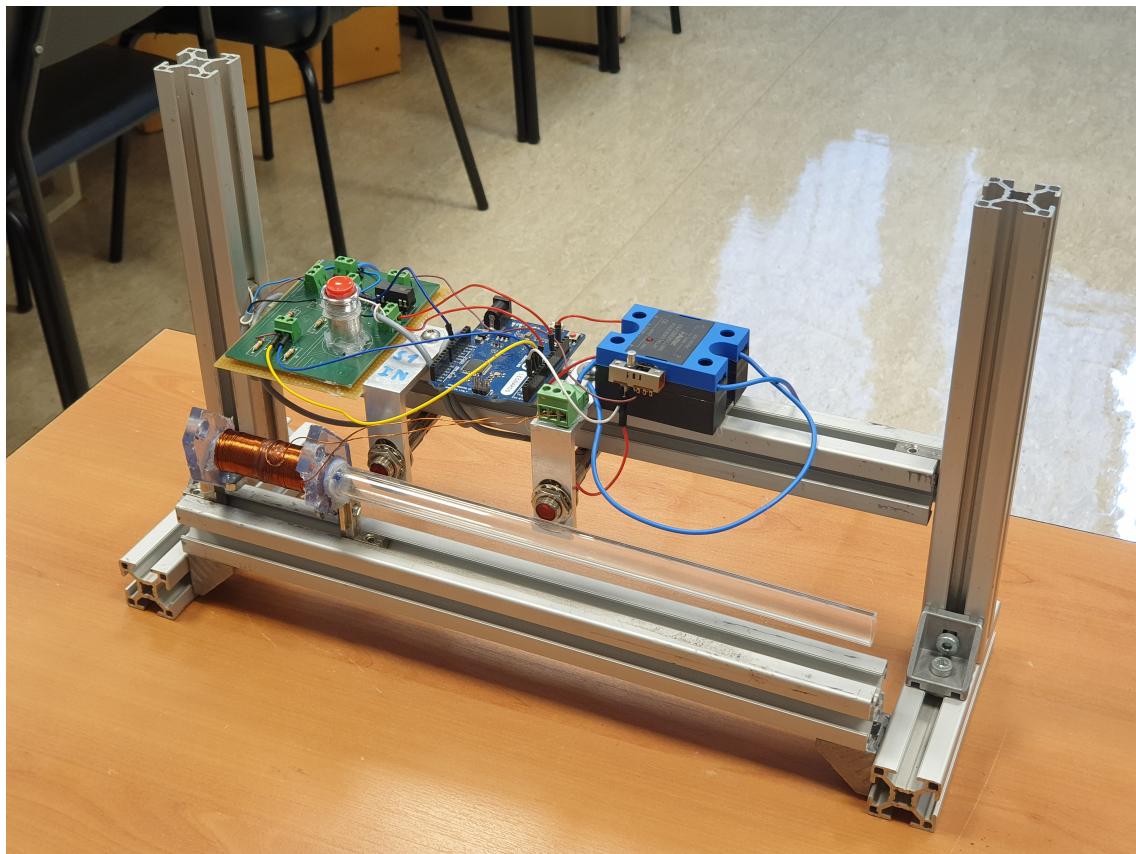


Figura 29: Imagen del banco de pruebas definitivo.

6.1. Prueba inicial

Antes de continuar con el desarrollo del prototipo, se ha realizado una prueba con un dinamómetro sobre la bobina de prueba especificada anteriormente para poder validar los resultados obtenidos en los apartados anteriores respecto a una referencia. El resultado obtenido es el siguiente:



Figura 30: Dato experimental de fuerza con la bobina alimentada.

$$F_{barra} = 2 \text{ N } \forall I_{cc} = 3.5 \text{ A}$$

6.2. Estructura

Para construir una estructura estable para el banco de pruebas, se utilizaron perfiles técnicos estructurales de aluminio como el que se presenta en la siguiente figura:



Figura 31: Perfiles de aluminio utilizados en la estructura.

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.

6.3. Sensores de movimiento

Los sensores de movimiento utilizados para el proyecto tienen como objetivo proporcionar la diferencia temporal que se utilizará para el cálculo de la velocidad de salida del vástago. Los sensores 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 d 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:

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

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:

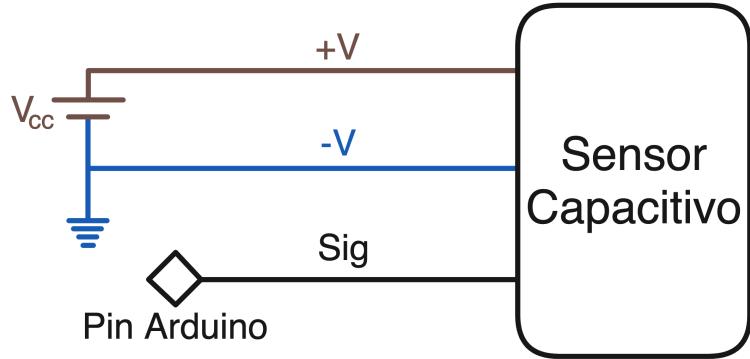


Figura 32: Esquema conexiones de los sensores capacitivos.

Observando las especificaciones de este modelo detalladas en las *datasheets* al final del documento, 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 siguiente apartado.

6.4. 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 imposible de hacer manualmente con repetitividad. 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.

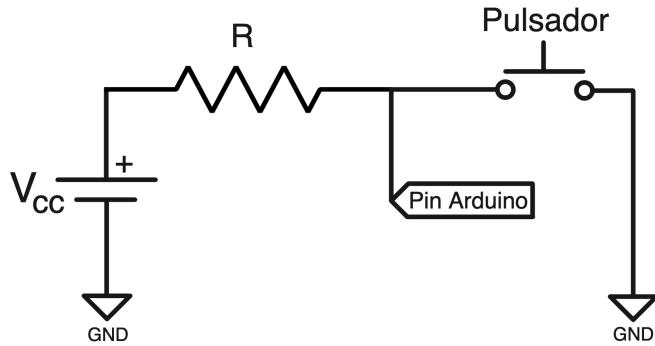


Figura 33: Conexión del interrupor de disparo.

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 vástagos, 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 $l_{fe} < l_c$ 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 vástagos no pierda velocidad.

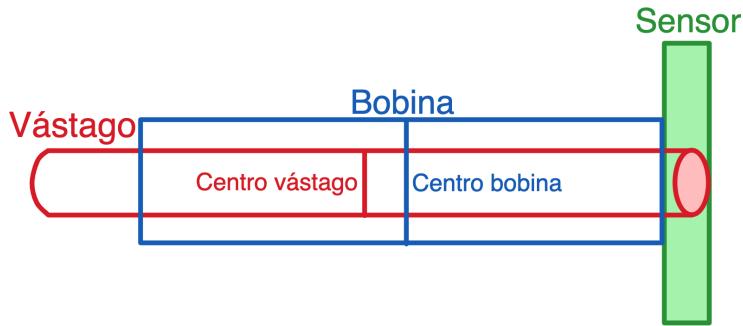


Figura 34: Colocación del sensor.

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 commutación 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.

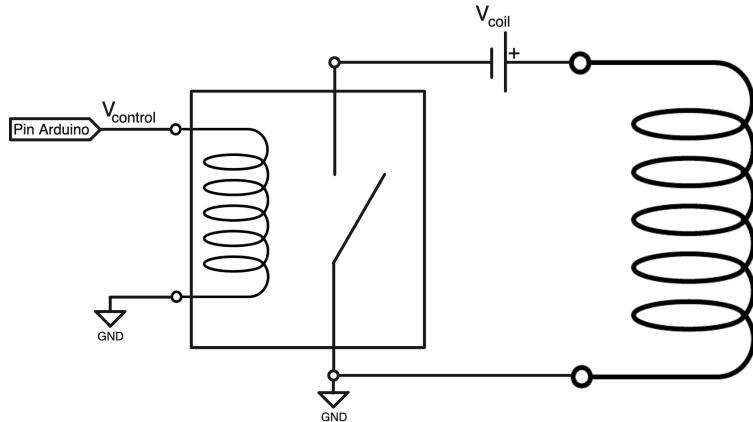


Figura 35: Esquema eléctrico de la conexión del SSR.

El SSR elegido para el proyecto es el KSJ100D20-L(068). Su tensión de control es de $V_{control} \in [4, 32] V$ 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 36: Imagen del relé de estado sólido [5].

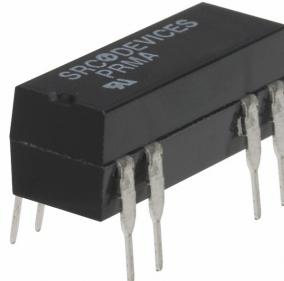


Figura 37: Imagen del relé PRMA1A05 [6].

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:

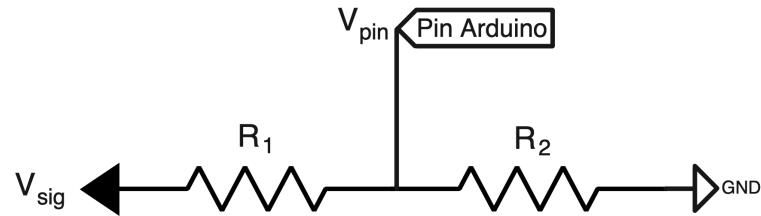


Figura 38: Esquema eléctrico de un divisor de tensiones.

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

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

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

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:

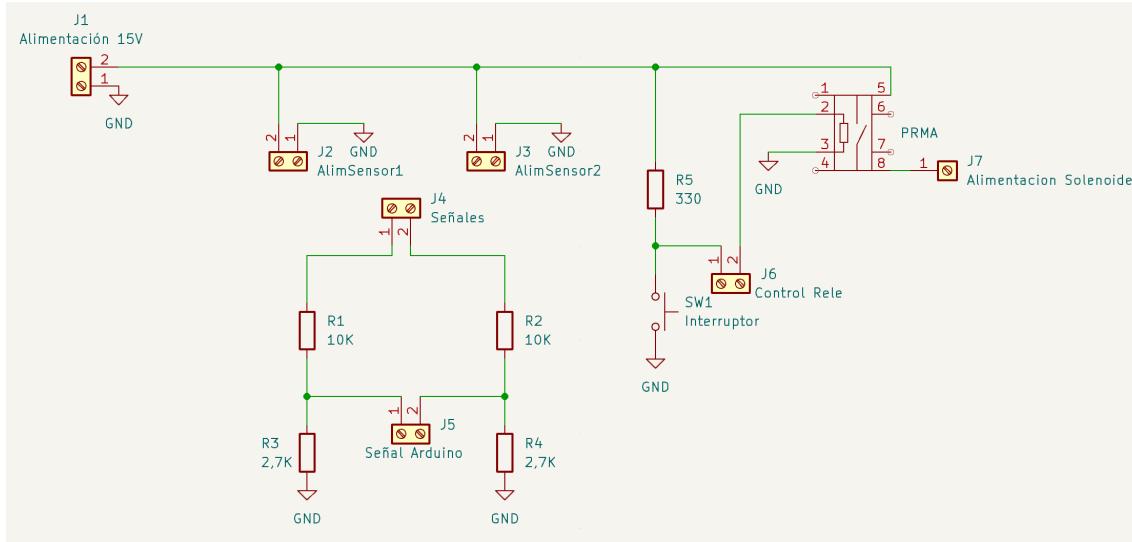


Figura 39: Esquemático de la PCB del proyecto.

Y la distribución de la placa queda:

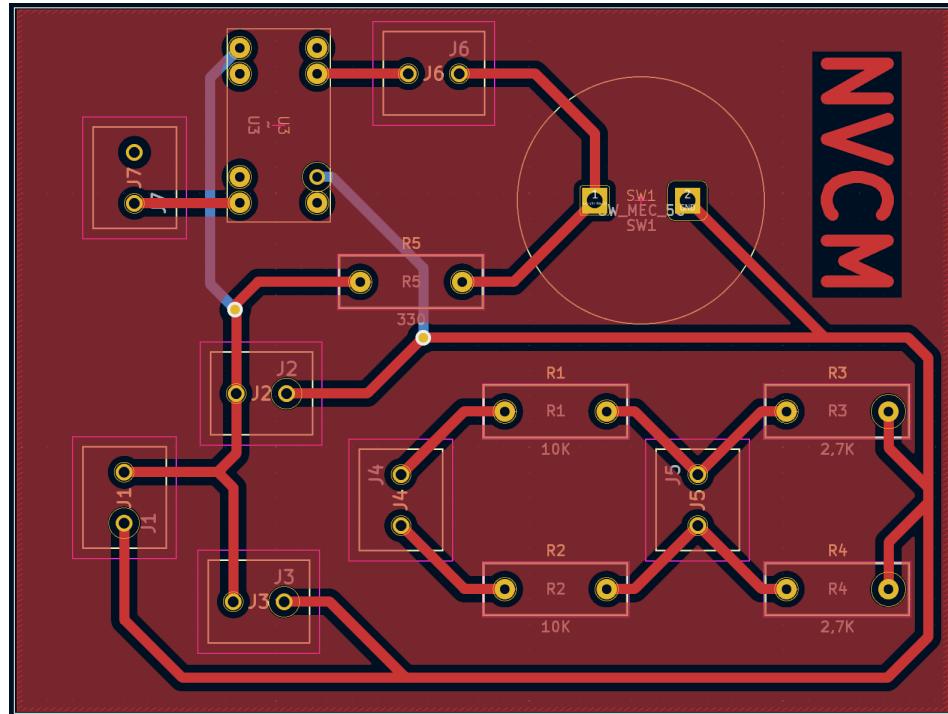


Figura 40: Distribución de la placa del proyecto.

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 39, y el código de control se encuentra en el Anexo II.

6.5. Diseño de la bobina

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

- $0.5 \leq l_c \leq XX$: la longitud máxima de la bobina está delimitada por la longitud del perfil menos un espacio mínimo entre sensores.
- $l_c < l_{fe}$: 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 l_c como variables conocidas:

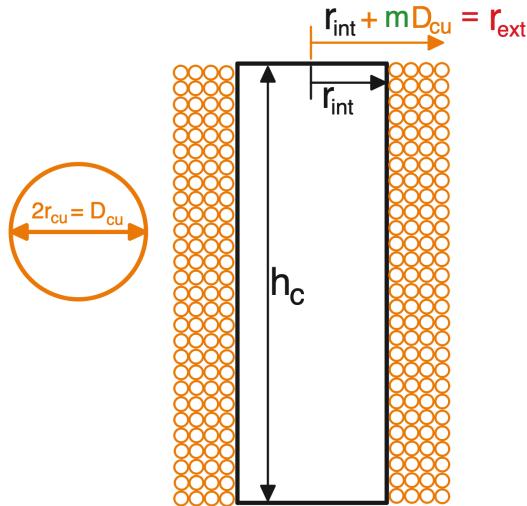


Figura 41: Sección central del solenoide.

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:

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

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

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

Y el radio exterior queda:

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

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

$$N = 500 \quad r_{cu} = 0.8 \text{ mm} \quad r_{int} = 6.035 \text{ mm} \quad l_c = 53.12 \text{ mm}$$

Sustituyendo en la fórmula obtenida:

$$r_{ext \ form} = 0.006035 + \frac{500 * (0.8 * 10^{-3})^2}{0.05312} = 0.01206 \text{ m} = 12.06 \text{ mm}$$

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

$$r_{ext \ form} = 12.06 \text{ mm} \approx r_c = 10.64 \text{ mm}$$

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:

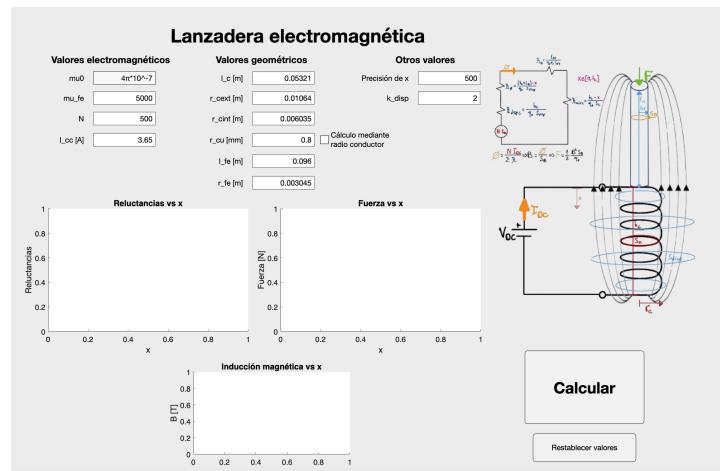


Figura 42: Interfaz de la calculadora actualizada.

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 27 para comprobar que, efectivamente, la evolución del parámetro de fuerza de atracción sigue el mismo patrón.

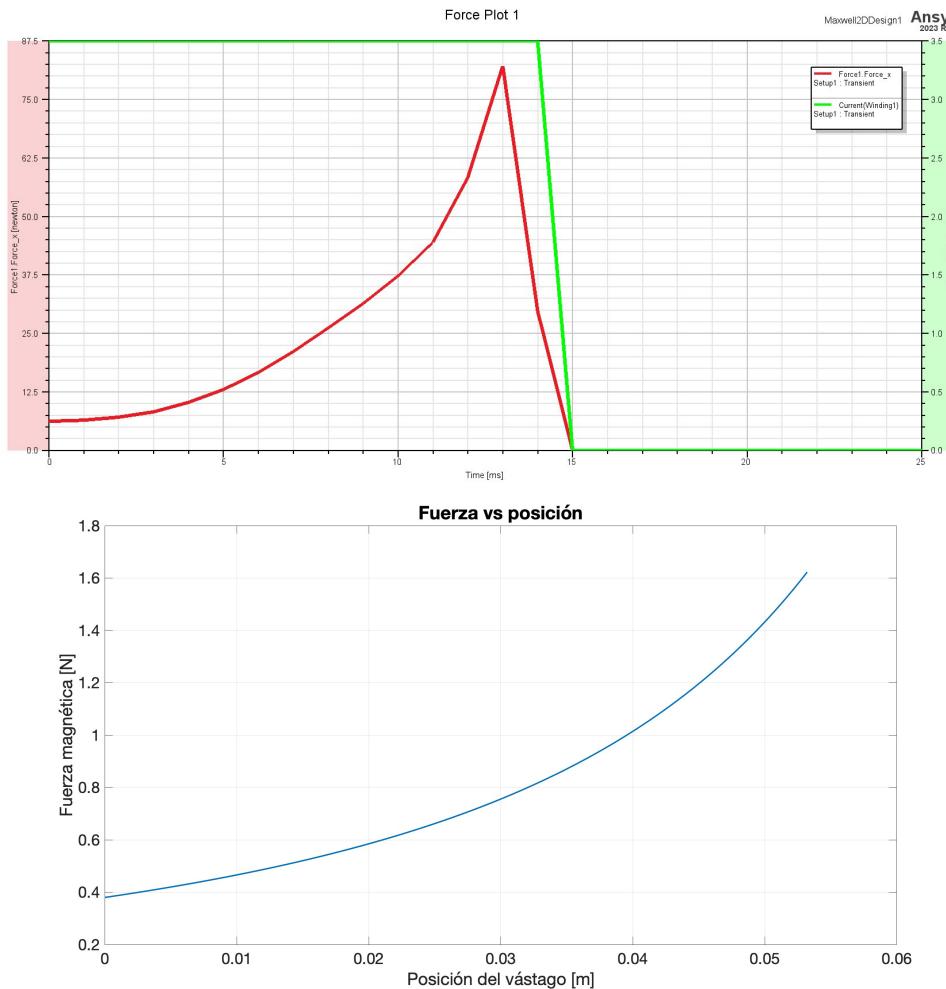


Figura 43: Comparación de las figuras 14 y 27.

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 vástagos 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.

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 [mm]	r_{cext} [mm]	r_{cint} [mm]	r_{cu} [mm]	l_{fe} [mm]	r_{fe} [mm]
Base	500	53,21	16,40	6,04	0,80	96,00	3,05
1	750	87,20	13,00	5,75	1,3	131,00	5,00
2	500	78,31	18,91	12,53	1,00	10,00	8,50
3	300	81,66	14,21	8,00	1,3	10,00	5,00

Tabla 2: Configuraciones de bobinas a probar.

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]	Distancia [m]	Velocidad [ms^{-1}]	Aceleración [ms^{-2}]
1	27	0,0691	2,16	67,48
	22		2,09	63,45
	24		2,09	63,45
	38		2,09	63,45
	25		2,09	63,45
	33		2,03	59,78
	24		1,97	56,41
	28		2,23	71,9
	25		2,09	63,45
	31		2,09	63,45
2	18	0,0691	2,47	88,14
	18		2,66	102,22
	18		2,47	88,14
	21		2,47	88,14
	19		2,56	94,79
	25		2,56	94,79
	18		2,56	94,79
	25		2,56	94,79
	17		2,66	102,22
	22		2,56	94,79
3	21	0,0691	2,47	88,14
	20		2,56	94,79
	20		2,56	94,79
	19		2,66	102,22
	21		2,56	94,79
	23		2,56	94,79
	22		2,47	88,14
	20		2,56	94,79
	22		2,56	94,79
	23		2,47	88,14

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]	Fuerza calculada [N]
1	2,53	92,49	1,76	1,35
2	3,47	174,31	3,31	3,68
3	3,28	155,8	2,96	8,31

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

Analizando las tablas anteriores, podemos observar que a medida que se incrementa la corriente (de 3.74 A en la alimentación 1 a 8.49 A en la alimentación 3), la fuerza calculada también aumenta considerablemente (de 1.35 N a 8.31 N) como es de esperar. Sin embargo, la fuerza medida no sigue el mismo patrón de incremento lineal. Aunque sí aumenta con la corriente, la relación no es directamente proporcional, sugiriendo posibles pérdidas o ineficiencias en el sistema.

Con estos resultados, podemos terminar de validar la simulación ejecutada para obtener las figuras 12, 13 y 14 y asegurar que el modelo de MATLAB® proporciona resultados verosímiles con los que se pueden realizar predicciones acertadas.

8. Práctica propuesta

Se presenta a continuación el planteamiento de la práctica a realizar por los alumnos de la asignatura de Sistemas Eléctricos II.

Diseño y optimización de una lanzadera electromagnética

Objetivo

El objetivo de esta práctica es que los estudiantes diseñen y construyan la bobina de una lanzadera electromagnética optimizando su geometría y alimentación para lograr la mayor fuerza de atracción magnética y por ende velocidad del proyectil. Se deberán aplicar conocimientos teórico-prácticos de electromagnetismo en tres entornos: MATLAB®, ANSYS Maxwell® y laboratorio.

Marco teórico

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

El comportamiento de las ondas electromagnéticas está definido por las ecuaciones de Maxwell, descritas a continuación:

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

En el caso de esta práctica, la ley de mayor interés es la de Ampère. Esta es la ley que define la relación entre un campo magnético y uno eléctrico, y partir de su forma diferencial expresada en las ecuaciones de Maxwell, se puede desarrollar 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.”

Esta ley es esencial porque proporciona el punto de partida de la práctica. Debido a que el componente principal de una lanzadera es una bobina, desde la ley integral de Ampère se puede deducir la expresión del campo magnético generado por la misma:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{L}$$

Siendo:

B valor del campo magnético en [T].

μ_0 valor de la permeabilidad del vacío. Constante e igual a $4\pi * 10^{-7}$ [Hm⁻¹].

μ_r valor de la permeabilidad relativa del núcleo de la bobina.

N número de espiras del solenoide.

I corriente de alimentación de la bobina [A].

L longitud de la bobina [m].

Todo esto además de la ecuación de campo magnético de Gauss ($\nabla \cdot \vec{B} = 0$) nos lleva a que el campo magnético alrededor de una bobina tiene la siguiente forma y polaridad:

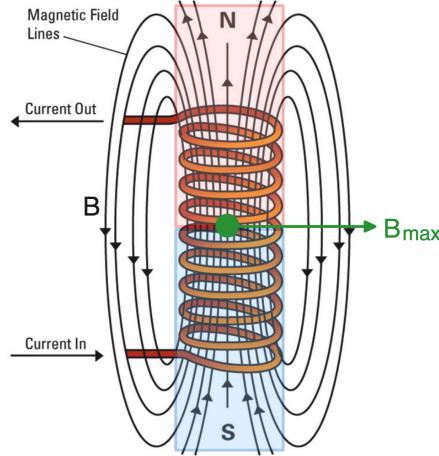


Figura 44: Visualización del campo magnético de una bobina energizada.

Por ende, si a la situación que observamos en la figura anterior, le añadimos un elemento de material ferromagnético en uno de los extremos del solenoide, este se verá atraído hasta su centro. Aprovechando este suceso, podemos controlar la alimentación de la bobina para que solamente esté energizada durante el tiempo necesario para atraer el vástago al punto deseado. Una vez que el vástago alcance el centro de la bobina, cortaremos la alimentación para que deje de ser atraído y continúe su movimiento por inercia. El objetivo final de la práctica es predecir cuál va a ser la fuerza ejercida por la bobina sobre el proyectil mediante software, optimizar la geometría para conseguir la mayor densidad energética posible y comprobar las predicciones en el banco de pruebas.

Modelo de la bobina y parámetros iniciales

El modelo del sistema con el que trabajaremos durante los siguientes apartados consta de las siguientes variables:

- **Parámetros geométricos:**

- a. r_{cext} y r_{cint} : radios exterior e interior de la bobina, respectivamente [m].
- b. l_c : altura de la bobina [m].
- c. D_{cu} : diámetro de la sección del conductor [m].
- d. r_{fe} : radio del vástago [m].
- e. l_{fe} : longitud del vástago [m].
- f. k_{disp} : parámetro multiplicador para obtener la sección de dispersión.

- **Parámetros eléctricos:**

- a. N : número de espiras.
- b. V_{cc} : tensión de alimentación del solenoide [V].
- c. $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$: permeabilidad del vacío [Hm^{-1}].
- d. μ_{fe} : permeabilidad relativa del vástagos ferromagnéticos.

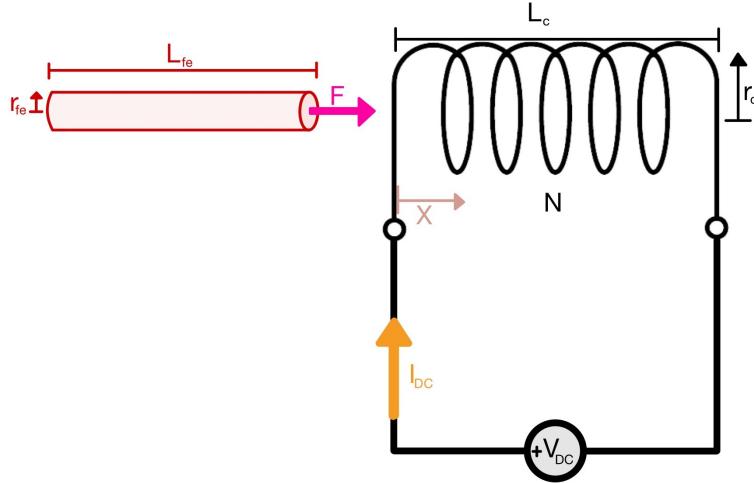


Figura 45: Esquema geométrico del sistema.

El primer paso de esta práctica será elegir la geometría de la bobina inicial sobre la que se realizarán los cálculos de los modelos y las pruebas iniciales. Para ello, se debe llenar la tabla 6 con valores dentro de los intervalos especificados y teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- $r_{cext} = r_{cint} + \frac{ND_{cu}^2}{l_c}$
- $r_{cext} \leq XXX$
- $l_c \leq XXX$
- $l_c \leq l_{fe}$
- $V_{cc} \leq 30\text{V}$
- El valor de r_{cint} dependerá del cilindro sobre el que se vaya a bobinar el solenoide. Elegirlo del laboratorio y tomar la medida.

	D_{cu} [m]	l_c [m]	r_{fe} [m]	l_{fe} [m]	N	V_{cc} [V]
Valor mínimo	0,8	XX	XX	XX	1	1
Valor máximo	1,3	XX	XX	XX	-	30
Valor elegido						

Tabla 6: Valores iniciales para la bobina de la lanzadera.

Modelo analítico en MATLAB®

El objetivo de esta parte es computar el modelo de la figura 45 en MATLAB® para que devuelva unas gráficas con la evolución de la fuerza de atracción experimentada por el vástago en función de su posición.

Para ello, será necesario realizar el circuito magnético equivalente del sistema. Dicho circuito estará compuesto por las siguientes reluctancias, que deben ser desarrolladas por el alumno:

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

- $\mathcal{R}_{disp\ c}$: Será la reluctancia de dispersión de la bobina. No es dependiente de x .
- \mathcal{R}_{Fe} : Será la reluctancia correspondiente al vástago. No es dependiente de x .
- \mathcal{R}_ϕ : Será la reluctancia correspondiente al camino del flujo magnético que abraza todo el sistema. Es dependiente de x .
- $\mathcal{R}_{aire\ c}$: Será la reluctancia correspondiente al volumen de aire que hay dentro de la bobina. Es dependiente de x .

Una vez elegidas las longitudes y secciones efectivas de cada una de las reluctancias expresadas, se podrá calcular la inducción magnética según:

$$B = \frac{NI}{\sum \mathcal{R}}$$

Y la expresión de la fuerza de atracción magnética sobre un cuerpo T cualquiera es:

$$F_T = \frac{1}{2} \frac{B_T^2 * S_{effect\ T}}{\mu_0}$$

Teniendo en cuenta que x es la posición del extremo del vástago, que su intervalo de interés para la práctica es $x \in [0, l_c]$ y que el circuito magnético cambia para cada valor de x , se pide diseñar el código y llenar las figuras 47, 48 y 49 con los los valores obtenidos. El resultado puede ser algo como:

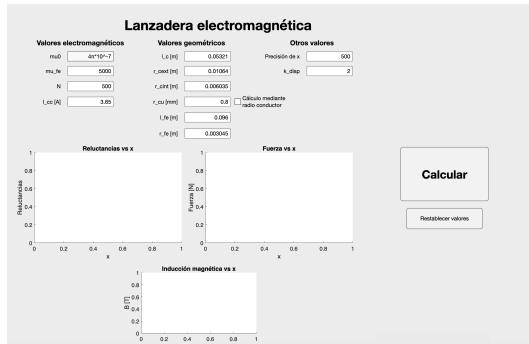


Figura 46: Aplicación de ejemplo.

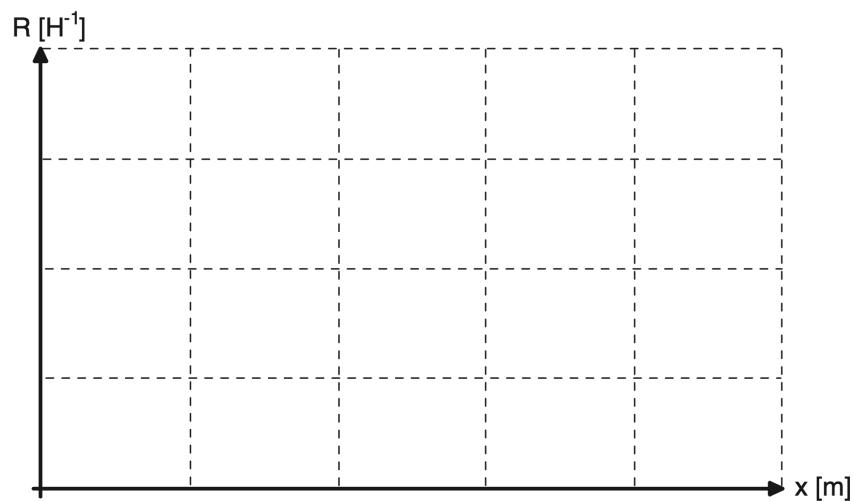


Figura 47: Reluctancia en función de x .

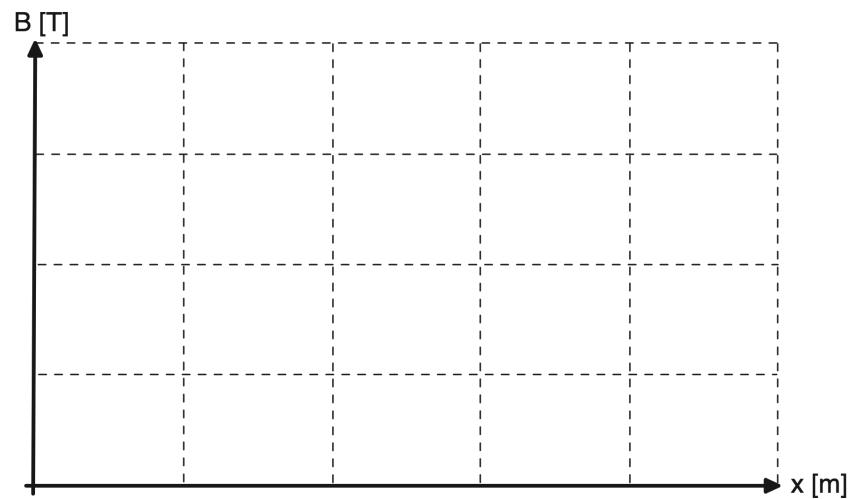


Figura 48: Inducción magnética en función de x .

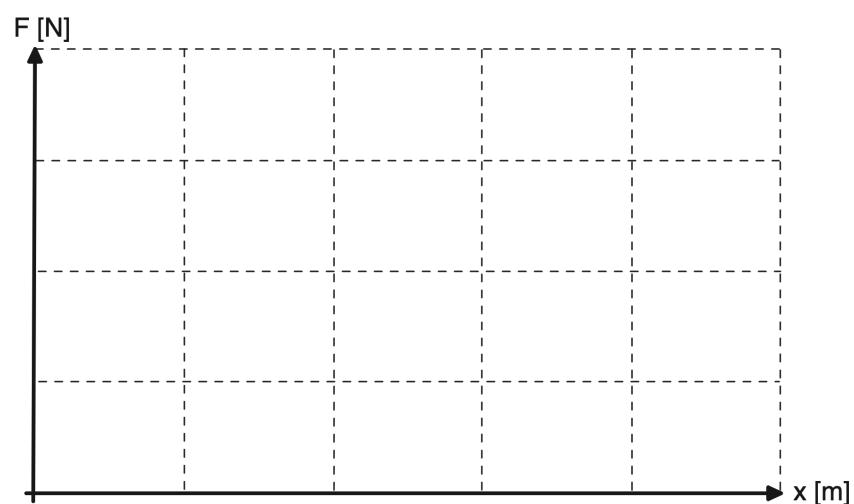


Figura 49: Fuerza de atracción magnética en función de x .

Pruebas en el laboratorio

En el laboratorio de electricidad se encuentra el *banco de pruebas*, un montaje modular que nos permitirá tomar medidas de la fuerza y velocidad de la bobina.

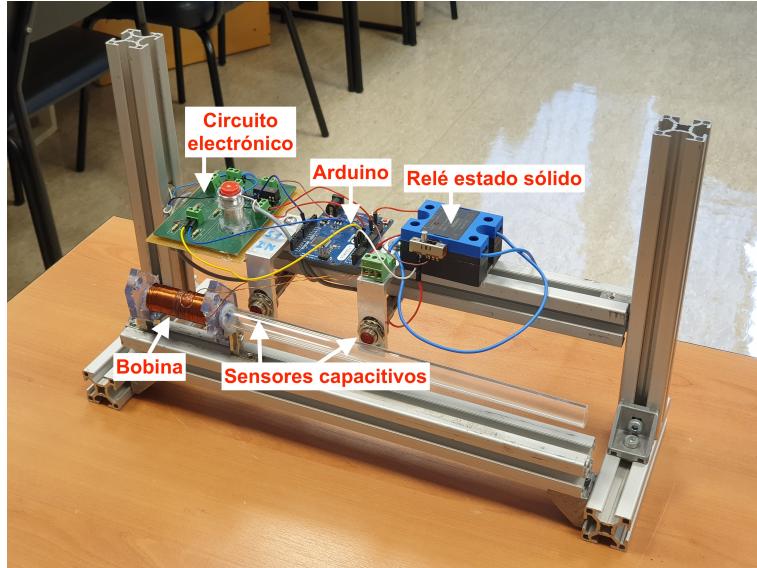


Figura 50: Banco de pruebas.

El objetivo esta sección de la práctica es validar los modelos teóricos realizados anteriormente mediante la construcción y prueba de el solenoide de la 6. Los medios para conseguir esto será emplear montaje de la figura 50, el cual cuenta con un circuito electrónico que controla los disparos de la bobina así como las mediciones de velocidad del vástagos. Las medidas de fuerza se tomarán mediante el uso del dinamómetro.

Para realizar las mediciones de velocidad, habrá que seguir los siguientes pasos:

1. Bobinar el solenoide sobre el cilindro escogido en el apartado 1 de la práctica.
2. Comprobar que el valor r_{cext} no difiere mucho del calculado analíticamente. Si es así introducir el valor experimental de r_{cext} en la calculadora.
3. Acoplar el solenoide al banco de pruebas.
4. Asegurar que hay un sensor de movimiento justo en la salida del solenoide.
5. Asegurar que el switch acoplado al relé de estado sólido cierra el circuito en el PIN2 del arduino.
6. Alimentar el sistema:
 - a) Conectar el circuito eléctronico (terminales de la izquierda) a una tensión de 15 VDC.
 - b) Conectar el arduino a un PC o portátil.
 - c) Conectar los terminales del relé de estado sólido (terminales de la derecha) a la tensión V_{cc} .

7. Abrir el IDE de arduino.
8. Acceder al repositorio github.com/promerogomb/Codigo-Control-Lanzadera/ y descargar el código.
9. Subir el código a la placa Arduino.
10. Abrir el *Serial Plotter*.
11. Colocar el vástago al borde de la bobina.
12. Pulsar el botón rojo.
13. Observar la diferencia temporal en el *Serial*.

Una vez obtenida la diferencia temporal, se deberá medir la distancia entre los centros de los sensores para poder completar los cálculos siguiendo el siguiente procedimiento. El primer paso será calcular la velocidad de salida:

$$v_{vas} = \frac{d_{sens}}{\Delta t}$$

Conocida la velocidad, podemos calcular la aceleración a partir de la fórmula de la distancia recorrida para un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (con $v_0 = 0 \text{ ms}^{-1}$):

$$d = v_0 * \Delta t + \frac{1}{2} * a * (\Delta t)^2 \rightarrow a = \frac{2d}{(\Delta t)^2}$$

Y desde aquí podemos obtener el valor de la fuerza según la segunda ley de Newton:

$$F = m * a$$

Una vez presentados ambos procedimientos, se pide llenar la siguiente tabla:

Distancia	Tiempo	Velocidad	Aceleración	Fuerza	Fuerza calculadora

Tabla 7: Resultados finales.

Ejercicios adicionales

Se plantean a continuación una serie de ejercicios y cuestiones adicionales para asegurar la comprensión completa de la práctica.

Conceptos

- ¿Cuáles son las ecuaciones de Maxwell relevantes para esta práctica y qué representan?
- ¿Cómo es el valor de B en los extremos del solenoide frente a su centro? ¿Y la forma del campo?
- Define con tus propias palabras lo que expresan las distintas ecuaciones de Maxwell:
 - $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$:
 - $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$:
 - $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$:
 - $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$:

Variaciones de parámetros

- ¿Por qué se analiza solamente el valor de la fuerza de atracción en $x \in [0, l_c]$?
- Describe de manera justificada pero cualitativa lo que ocurre con la fuerza de atracción magnética al realizar las siguientes variaciones en algunos de los parámetros del solenoide:
 - Aumentamos l_c :
 - Aumentamos N :

- Disminuimos r_{fe} :
- Disminuimos r_{cu} :
- Elige una nueva configuración geométrica para la bobina, simúlala en tu modelo de MATLAB®, compárala con los resultados de la figura 49 y discute la razón de la variación en el resultado. Los valores elegidos deben seguir respetando las restricciones impuestas.

	D_{cu} [m]	r_{cint} [m]	l_c [m]	r_{fe} [m]	l_{fe} [m]	N
Valor inicial						
Valor nuevo						

Tabla 8: Valores iniciales para la bobina de la lanzadera.

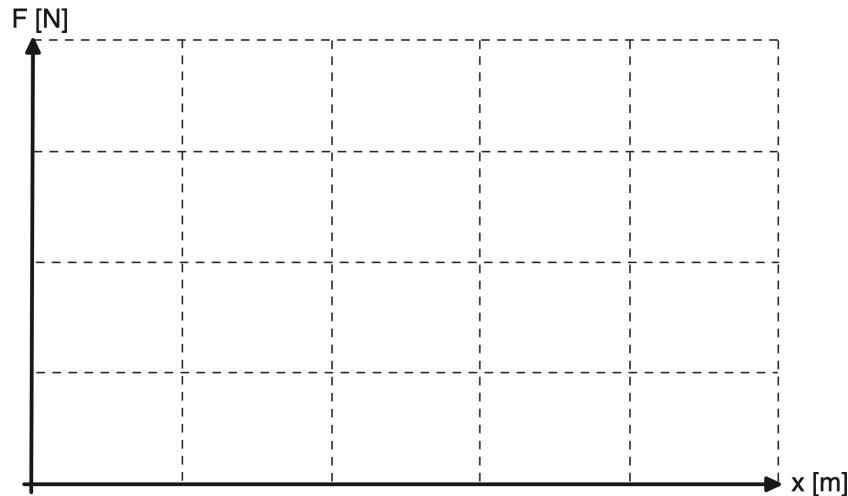


Figura 51: Comparación de fuerzas.

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 teóricos y prácticos necesarios para comprender y optimizar el funcionamiento de una lanzadera electromagnética. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes de cada sección:

- **Cálculo analítico de la fuerza de atracción:** Se han establecido las bases teóricas necesarias para el entendimiento del comportamiento de las lanzaderas electromagnéticas. Desde la ley integral 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 vástago. Este modelo teórico ha sido implementado en MATLAB®, facilitando el cálculo y la visualización de los resultados. El resultado de esta implementación ha sido positivo, con un error de tan solo el 12%. Se considera, por tanto, un modelo válido para realizar predicciones de la fuerza de atracción magnética a la que será sometido un proyectil que entre en un sistema análogo al desarrollado.
- **Cálculo por elementos finitos de la fuerza de atracción:** Utilizando el software ANSYS Maxwell®, se han realizado simulaciones tanto instantáneas como transitórias 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 confirmar el modelo de MATLAB® y para observar cómo se comportan los campos magnéticos del sistema.
- **Desarrollo de una lanzadera electromagnética:** Se ha diseñado y construido un prototipo funcional de lanzadera electromagnética que complementa a los modelos teóricos de los apartados anteriores. Los resultados experimentales obtenidos con el prototipo han corroborado en gran medida las predicciones teóricas.
- **Práctica propuesta:** Uno de los objetivos principales de este proyecto ha sido el desarrollo de una práctica universitaria para los estudiantes de ingeniería eléctrica que cursen la asignatura de Sistemas Eléctricos I. 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 eléctrica y permitiendo que los alumnos mejoren sus aptitudes prácticas en el laboratorio. La práctica propuesta también proporciona una oportunidad para que los estudiantes experimenten con la optimización de parámetros y vean directamente los efectos de sus ajustes en el rendimiento de un sistema.

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 en los diferentes ámbitos del proyecto validan cada uno de ellos, proporcionando una solución teórico-práctica general del sistema, el cual ha sido abordado de manera efectiva y desde varias perspectivas. Lo que este trabajo deja pendiente de cara al futuro es la optimización del modelo de elementos finitos, que ha fallado a la hora de proporcionar resultados magnitudinalmente precisos. Se deja al lector acceso completo a todo el desarrollo interno de este documento, así como de cada uno de los apartados, código y planteamientos del proyecto en <https://github.com/promerogomb/Lanzadera-Electromagnetica/>

10. Referencias

- [1] David W. Michelson. Coilgun physics and design, 2024. Accedido: 2024-06-18.
- [2] Purcell, Edward M. and Morin, David J. Electricidad y magnetismo, 2013.
- [3] Simple Solutions WBN Ltd. Artpictures, 2023. Accedido: 2024-06-22.
- [4] Department of Electrical and Northeastern University Computer Engineering. Electromagnets, 2024. Accedido: 2024-06-22.
- [5] i Autoc. Ksj series solid state relay, 2024. Accedido: 2024-07-03.
- [6] Coto Technology. Prma1a05b - reed relay, 2024. Accedido: 2024-07-03.
- [7] Vineeth Kumar Sai Chaithanya. *A Review on Technological Advancement in Electromagnetic Coil Gun System*, 2018. Accedido: 05-06-2024.
- [8] R.J. Kaye, B.N. Turman, and S.L. Shope. *Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology*, 08 2002. Accedido: 05-06-2024.
- [9] IEEE Spain. *Doscientos aniversario de Oersted y el descubrimiento del electromagnetismo*, 2020. 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. Accedido: 2024-06-04.
- [13] ANSOFT. *ANSOFT Maxwell 3D V15 User Guide*, 2012. 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);
}
}
```

Anexo III. Procedimiento de creación del modelo de elementos finitos en ANSYS Maxwell®

El software ANSYS Maxwell® o ANSYS Electronics®, es una rama del software de simulación por elementos finitos ANSYS®, utilizado para realizar simulaciones electromagnéticas tanto instantáneas como transitorias. Este apartado de la práctica consistirá en definir la geometría de la tabla 6 en ANSYS Maxwell® para conseguir dos objetivos: visualizar los campos magnéticos y obtener un valor para la fuerza de atracción. Como este es un software con el que el alumno no está familiarizado, se presenta a continuación una guía para poder realizar esta parte de la práctica:

Creación del proyecto

El primer paso será abrir ANSYS Maxwell® e inicializar el proyecto. Para ello, pulsaremos la tecla de menú de inicio () y escribiremos “ANSYS Maxwell®”. Pulsaremos aceptar en las ventanas que aparezcan hasta que salga lo siguiente:

IMAGEN DE INICIO AM

Ahora abriremos un nuevo proyecto en 3D clicando en la siguiente parte del menú:

IMAGEN/ES DE CREACIÓN DE PROYECTO 3D

El siguiente paso será empezar a definir la geometría. Esto hará de manera paramétrica, es decir, asignando a variables las medidas de los polígonos que utilicemos, lo que nos permitirá cambiar de solenoide fácilmente o realizar pruebas en distintos dispositivos que montemos en el laboratorio. Las variables o parámetros serán los mismos que los expuestos en el apartado de ”Modelo de la bobina y geometría inicial”. Para incluir estos parámetros, nos dirigiremos al menú de ”Variables”, localizado en la ventana de abajo a la izquierda. Las variables se añaden de la siguiente manera:

IMAGEN DE ADICIÓN DE PARÁMETROS DEL SISTEMA

En ANSYS Maxwell®, hay dos maneras de representar una bobina. Para inductores electrónicos, que generalmente tienen pocas espiras y una trayectoria muy definida, se puede crear una función helicoidal que represente la bobina de manera fidedigna a la realidad, pero se convierte en algo imposible cuando se trata de una bobina en el orden de magnitud en el que trabajaremos en esta práctica, pues hay muchas capas de conductores que no son uniformes, con radios diferentes entre capa y capa y número de conductores distinto, lo que convierte la tarea de describir la función en algo innecesariamente difícil. En cambio, ANSYS Maxwell® permite generar un cilindro, especificar unos terminales, una resistencia y un número de espiras para tratarlo como un solenoide con los conductores distribuidos de manera homogénea en su volumen. Esto es muy conveniente, ya que simplifica el proceso a los siguientes pasos:

IMAGENÉS DE COMO GENERAR EL CILINDRO BOBINA (fig:cilindroAnsys)

Una vez generado el cilindro que representa la bobina, el siguiente paso es generar otro cilindro de manera análoga en el centro del primero, que se corresponderá con el vástago. Lo único que debemos de tener en cuenta a la hora de definir el vástago, es que es útil definir su posición en función de la altura de la bobina, para que después podamos ver con facilidad la evolución de los campos en función de la posición. También será necesario

hacer clic izquierdo sobre la geometría seleccionada y añadirle el parámetro de fuerza. A continuación se muestran unas imágenes que explican el proceso de creación del vástago:

IMÁGENES DE COMO GENERAR EL CILINDRO VÁSTAGO

El siguiente paso es añadir las cualidades de bobina al cilindro de la figura para lo cual tendremos que realizar una sección en uno de los planos verticales, la cual se corresponderá con uno de los terminales de la bobina... **TERMINAR LA EXPLICACIÓN NO ME ACUERDO DE CABEZA**

IMÁGENES DE CREACIÓN DE TERMINALES

El siguiente paso necesario es definir una región de aire para poder dar las condiciones de contorno al sistema. Para ello pulsaremos el botón de *region* en el menú del modelo, y definiremos un cubo con un 500 % de offset partiendo del origen de coordenadas. Luego seleccionaremos sus bordes y le asignaremos la condición de contorno de *insulating*.

IMÁGENES DE CREACIÓN DE LA REGION

Para simular el comportamiento del sistema correctamente, será necesario definir también los materiales de cada una de las geometrías que hemos definido. Para ello, seleccionamos la geometría y buscamos su material, el cual será *annealed copper* para la bobina y *Steel ENG 100GJL* para el vástago.

IMÁGENES DE SELECCIÓN DE MATERIAL

Para poder obtener la visualización del flujo electromagnético a través del aire, tendremos que añadir un eje de coordenadas relativo al la sección del extremo superior de la bobina para poder dibujar un cuadrado que seccione al solenoide y a la barra por la mitad. Es importante definir este cuadrado como *non-model*, para que no interfiera con las interacciones electromagnéticas del modelo.

IMÁGENES DE GENERACIÓN DEL CUADRADO DE VISUALIZACIÓN

Por último antes de empezar a simular, debemos definir el tipo de solución que estamos buscando. Para ello, pulsaremos el apartado de *Setup* con el botón izquierdo del ratón... **TERMINAR CON ANSYS DELANTE**

IMÁGENES DE CREACIÓN DEL SETUP

Con este último paso, debería estar todo listo para realizar la primera simulación. De todas formas, para comprobarlo, iremos al apartado de *Simulation* y pulsaremos el tick verde que dice *Verify*. Si todo sale en verde, podemos pulsar *Analyze All* y ANSYS Maxwell® empezará a ejecutar la simulación, lo cual sabremos por la aparición de una barra verde en la esquina inferior derecha de la pantalla que indica el progreso. Cuando termine, tendremos que ir al apartado de *Solution*, y buscar **NO RECUERDO EL NOMBRE DEL BOTÓN** para obtener el valor de fuerza de atracción que ANSYS Maxwell® ha calculado para la posición simulada. También podremos obtener la forma del campo magnético si seleccionamos el cuadrado que secciona la geometría, pulsamos el botón derecho del ratón, y navegamos por el menú que aparece siguiendo la ruta *Fields → B → B vector*.



CE

Model Number

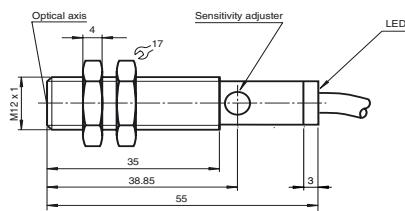
GLV12-8-200/37/40b/115

Diffuse mode sensor
with 2 m fixed cable

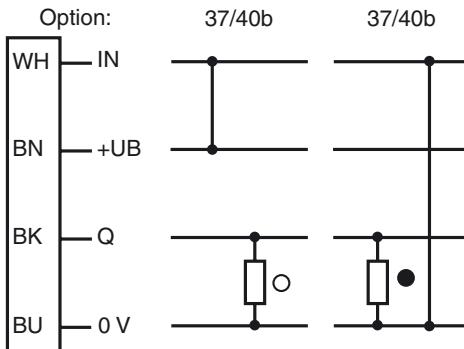
Features

- 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

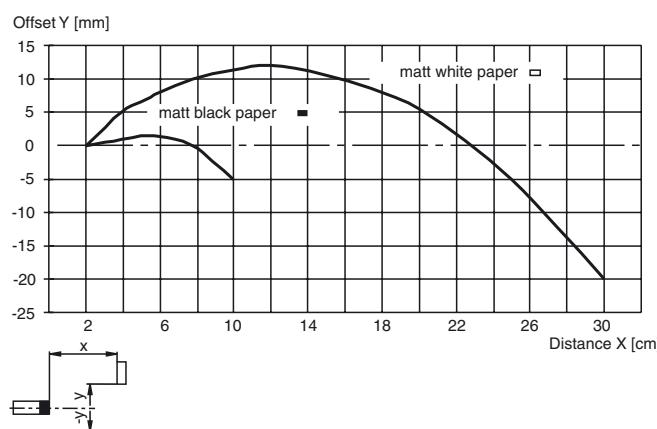
Ambient temperature	-25 ... 55 °C (248 ... 328 K)
Storage temperature	-40 ... 70 °C (233 ... 343 K)

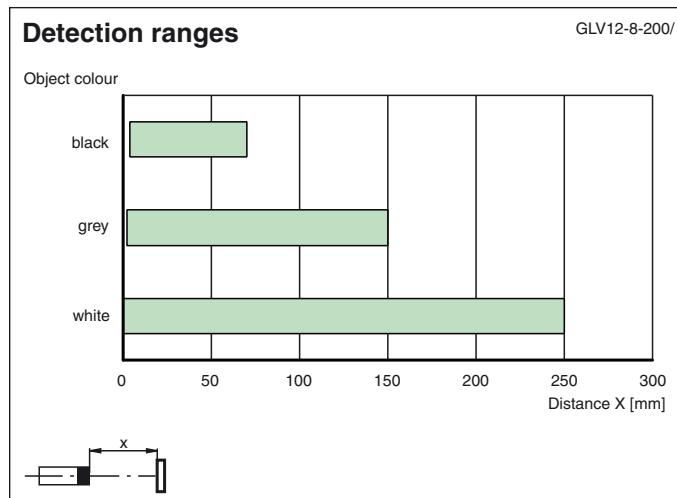
Mechanical specifications

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

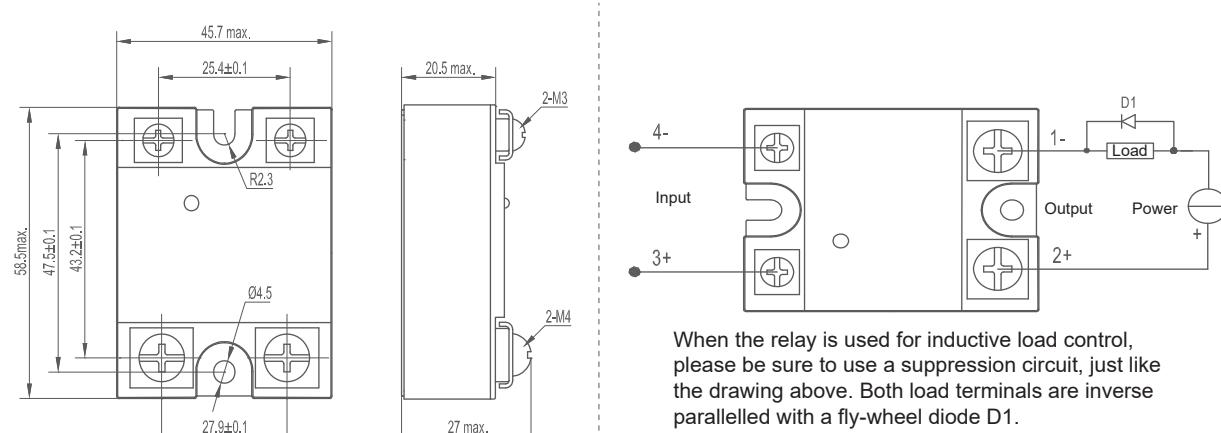
Output Specifications (Ta=25°C)																						
KSJ30D-L			KSJ50D-L			KSJ60D-L			KSJ100D-L			KSJ200D-L			KSJ400D25-L			KSJ600D-L				
50	100	40	80	7	50	20	40	80	100	10	20	40	25	50	25	50	25	50	25	50		
Load Voltage Range (VDC)	0-24			0-36			0-48			0-75			0-120			0-300			0-500			
Maximum Load Current (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

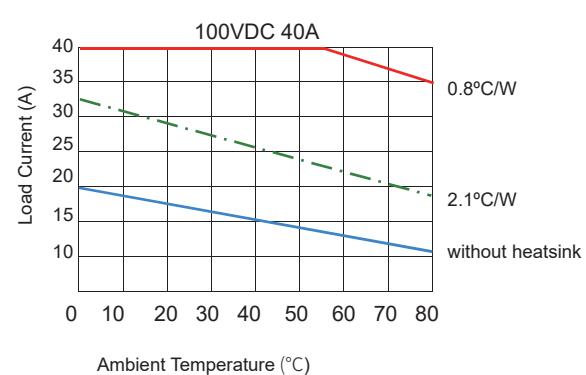
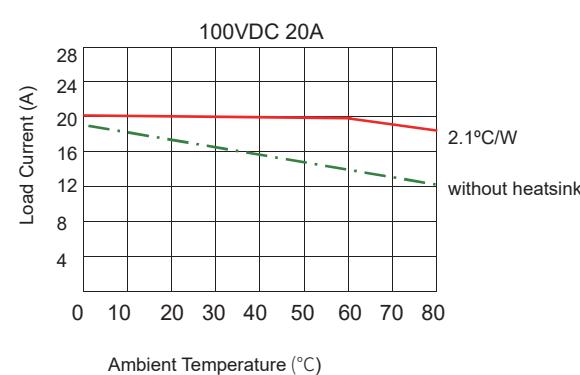
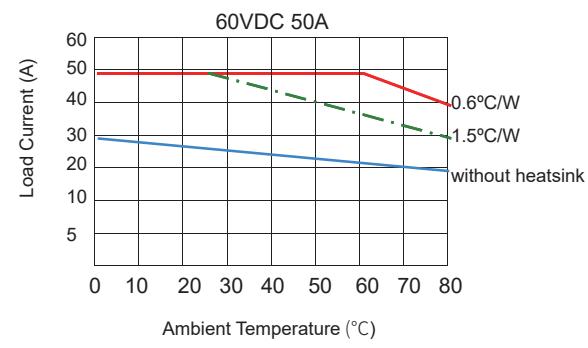
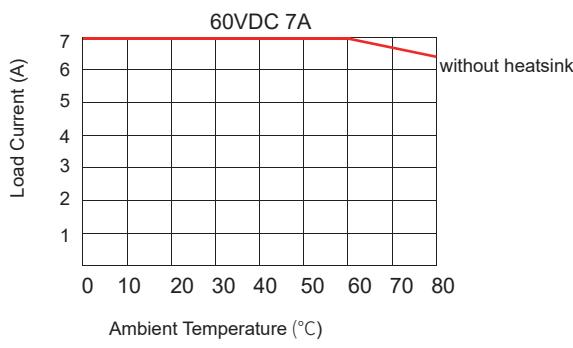
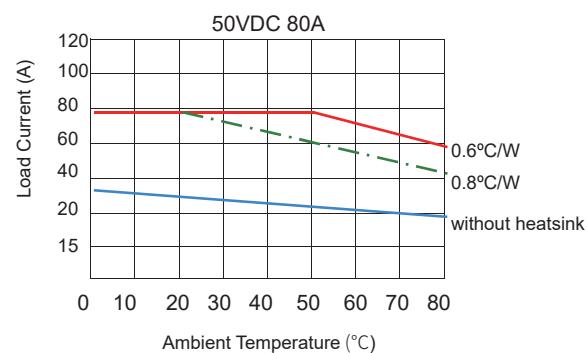
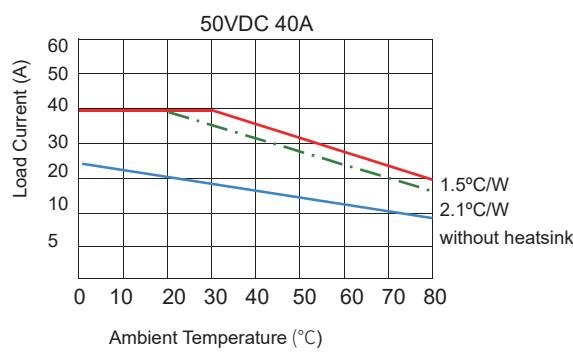
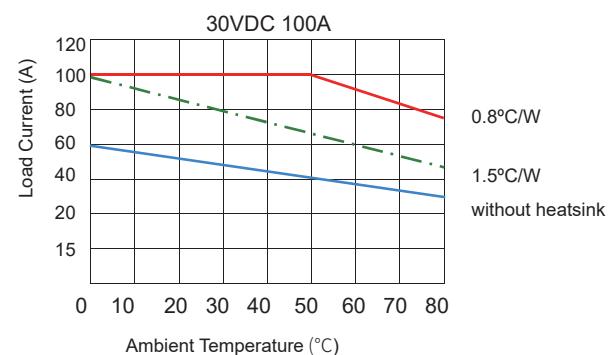
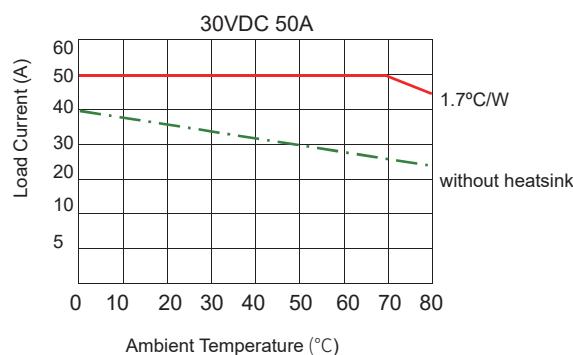


Outline Dimensions

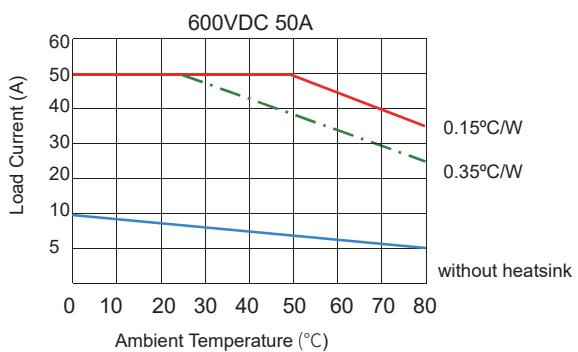
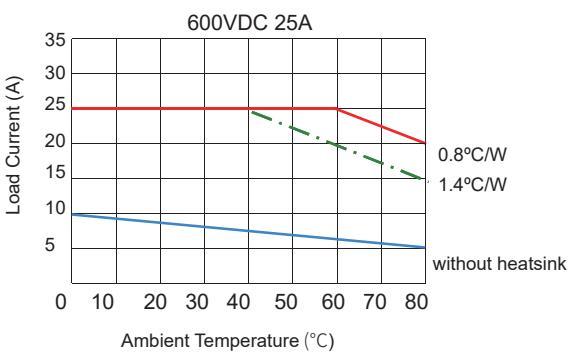
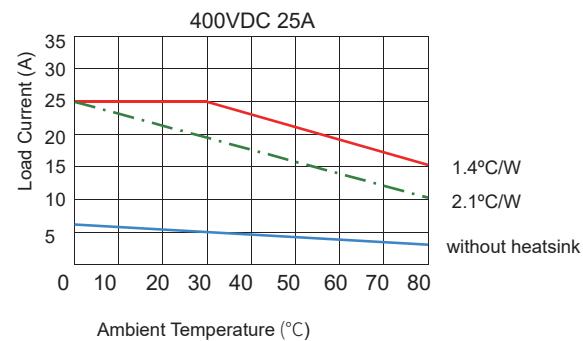
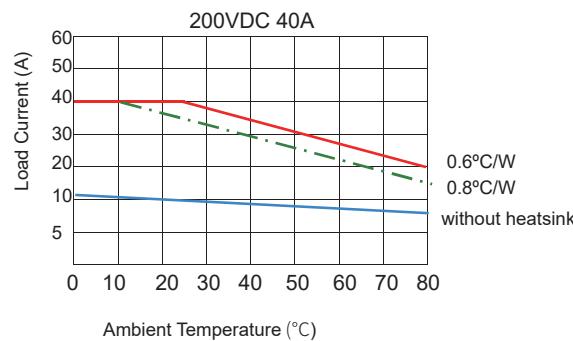
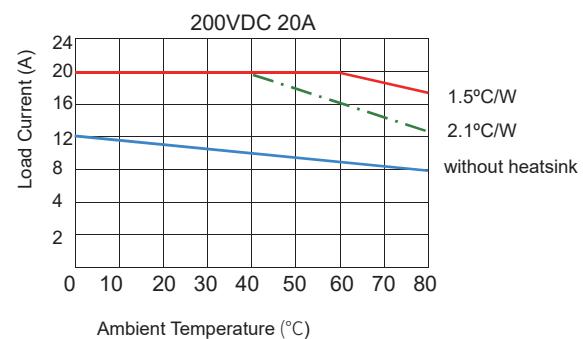
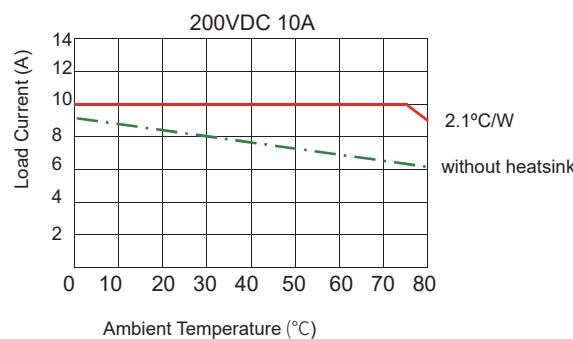
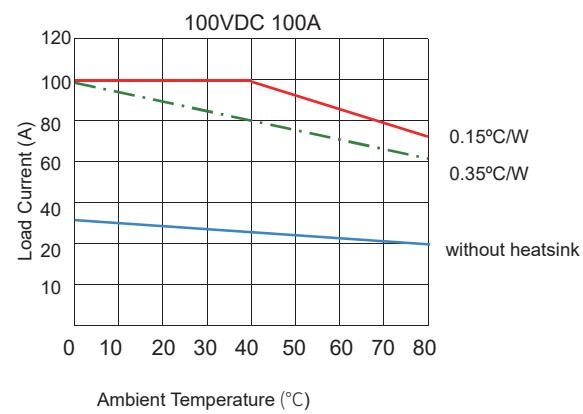
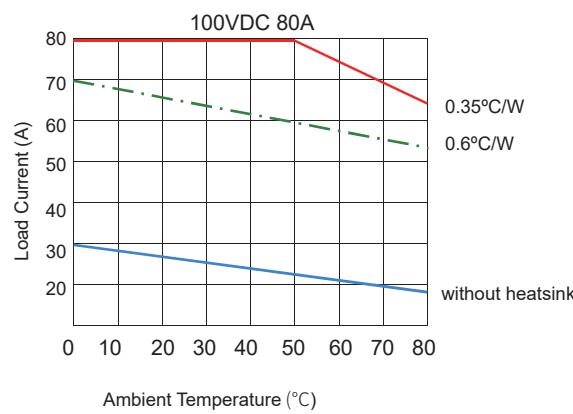
Wiring Diagram

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

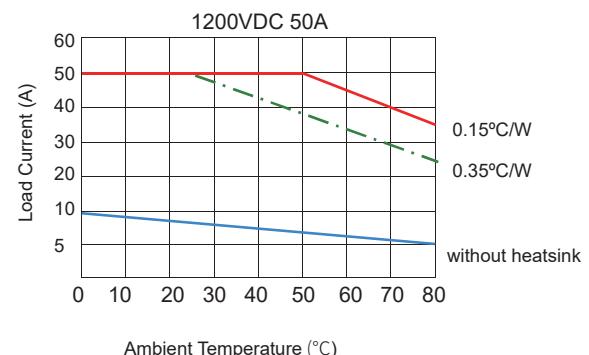
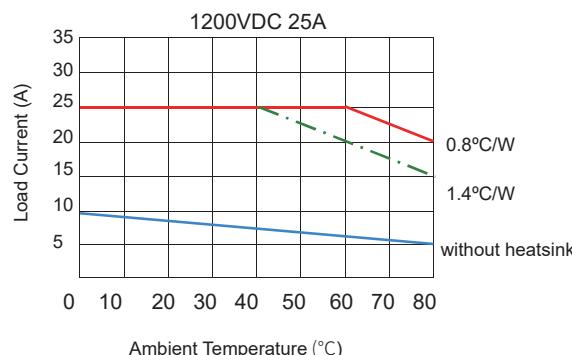
Thermal Derating Curve



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)

