



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Proyecto de un sistema de levitación magnética para un  
prototipo Hyperloop.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Baixauli Barbero, Francisco

Tutor/a: Pineda Sánchez, Manuel

Cotutor/a: Pérez Cruz, Juan

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



Universidad Politécnica de Valencia

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

# Proyecto de un sistema de levitación magnética para un prototipo Hyperloop.

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR: Francisco Baixauli Barbero  
TUTOR: Pineda Sánchez, Manuel  
COTUTOR: Pérez Cruz, Juan

Curso Académico: 2022-2023

*A mis padres y hermano, por ser mi apoyo en todo momento.*

*A mis amigos de siempre, por compartir todas mis alegrías y mis penas.*

*A mi grupo de la universidad, por haberme dado tanto estos años.*

*A la gente de Hyperloop UPV, por hacer de este año un etapa inolvidable.*

*A todos, gracias de corazón.*

## Resumen

El presente trabajo consiste en el diseño de un sistema de levitación magnética para el prototipo Kénos, creado por el equipo Hyperloop UPV en la Universidad Politécnica de Valencia. Este prototipo será presentado en la competición European Hyperloop Week (EHW), que tendrá lugar en Edimburgo.

En primer lugar, se explica la tecnología Hyperloop dentro del sector del transporte, y se presenta el equipo, la competición y los diferentes subsistemas que componen el prototipo Kénos.

A continuación, se definen las especificaciones de trabajo que guiarán el desarrollo del diseño, y se explican las leyes electromagnéticas que rigen el comportamiento del sistema de levitación a diseñar.

A partir de este punto, se lleva a cabo el diseño de las unidades que componen el sistema de levitación. Se presentan varias alternativas, lo que lleva a un diseño propuesto. Se realizan las simulaciones necesarias para obtener la solución óptima. A través de este programa, se caracterizarán las unidades, obteniendo los datos necesarios para el sistema de levitación de Kénos.

Después del proceso de diseño, se llevará a cabo el proceso de fabricación, en el que se definirá el método de montaje de las unidades diseñadas, y se realizará la caracterización de las unidades en una bancada de prueba para realizar la comparación entre los datos obtenidos en las simulaciones y los datos reales.

Finalmente, se presentan las conclusiones y posibles avances en diseños futuros.

## Palabras clave

Levitación; Electromagnetismo; Hyperloop; Control

## **Abstract**

This work involves designing a magnetic levitation system for the Kénos prototype, created by the Hyperloop UPV team at the Polytechnic University of Valencia. This prototype will be presented at the European Hyperloop Week (EHW) competition, which will take place in Edinburgh.

Firstly, the Hyperloop technology is explained within the transportation sector, and the team, competition, and different subsystems that make up the Kénos prototype are introduced.

Next, the work specifications are defined, which will guide the development of the design, and the electromagnetic laws that govern the behavior of the levitation system to be designed are explained.

From this point, the design of the units that make up the levitation system is carried out. Various alternatives are presented, leading to a proposed design. Necessary simulations are conducted using a finite element program to obtain the optimal solution. Through this program, the units will be characterized, obtaining the necessary data for the levitation system of Kénos.

After the design process, the manufacturing process will be carried out, in which the assembly method of the designed units will be defined, and the characterisation of the units on a test bench will be carried out in order to compare the data obtained in the simulations with the real data.

Finally, the conclusions and possible advances in future designs are presented.

## **Key words**

Levitation; Electromagnetism; Hyperloop; Control

## Resum

El present treball consisteix en el disseny d'un sistema de levitació magnètica per al prototip Kénos, creat per l'equip Hyperloop UPV en la Universitat Politècnica de València. Aquest prototip serà presentat en la competició European Hyperloop Week (EHW), que tindrà lloc a Edimburg.

En primer lloc, s'explica la tecnologia Hyperloop dins del sector del transport, i es presenta l'equip, la competició i els diferents subsistemes que componen el prototip Kénos.

A continuació, es defineixen les especificacions de treball que guiaran el desenvolupament del disseny, i s'expliquen les lleis electromagnètiques que regeixen el comportament del sistema de levitació a dissenyar.

A partir d'aquest punt, es duu a terme el disseny de les unitats que componen el sistema de levitació. Es presenten diverses alternatives, el que porta a un disseny proposat. Es realitzen simulacions necessàries utilitzant un programa d'elements finits per a obtenir la solució òptima. A través d'aquest programa, es caracteritzaran les unitats, obtenint les dades necessàries per al sistema de levitació de Kénos.

Després del procés de disseny, es durà a terme el procés de fabricació, en el qual es definirà el mètode de muntatge de les unitats dissenyades, i es realitzarà la caracterització de les unitats en una bancada de prova per a realitzar la comparació entre les dades obtingudes en les simulacions i les dades reals.

Finalment, es presenten les conclusions i possibles avanços en dissenys futurs.

## Paraules clau

Levitació; Electromagnetisme; Hyperloop; Control

# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>6</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>9</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>12</b>
<b>I Memoria Descriptiva</b>	<b>13</b>
1. Objetivo . . . . .	14
2. Antecedentes . . . . .	15
2.1. Hyperloop: un nuevo medio de transporte . . . . .	15
2.2. Hyperloop UPV . . . . .	17
2.3. Kénos . . . . .	19
3. Especificaciones técnicas . . . . .	22
3.1. Infraestructura y vacío . . . . .	22
3.2. Sistema de control . . . . .	23
3.3. Sistema de alimentación . . . . .	23
3.4. Principales requerimientos de diseño . . . . .	26
4. Marco teórico . . . . .	27
4.1. Campo magnético: Inducción magnética . . . . .	27
4.1.1. Clasificación de los materiales según su comportamiento en presencia de un campo magnético . . . . .	27
4.1.2. Teoría de Weiss: Los dominios magnéticos . . . . .	29
4.2. Circuitos magnéticos . . . . .	31
4.2.1. Leyes de aplicación a los circuitos magnéticos: Ecuaciones de Maxwell-Mohr	31
4.2.2. Analogías entre circuitos eléctricos y magnéticos . . . . .	34
4.2.3. Fuentes de excitación magnética . . . . .	35
4.2.4. Elemento pasivo . . . . .	37
4.3. Tecnología HEMS . . . . .	38

4.3.1.	Principios de funcionamiento del sistema . . . . .	38
4.3.2.	Modelo dinámico del sistema . . . . .	39
5.	Diseño de las unidades de levitación . . . . .	40
5.1.	Justificación de diseño . . . . .	41
5.1.1.	Programa de cálculo empleado . . . . .	41
5.1.2.	Propuestas de diseño . . . . .	41
5.2.	Optimización de la configuración escogida . . . . .	45
5.2.1.	Optimización de los imanes permanentes . . . . .	46
5.2.2.	Optimización del núcleo ferromagnético . . . . .	48
5.2.3.	Optimización del bobinado . . . . .	52
5.3.	Caracterización del modelo . . . . .	57
5.3.1.	Fuerzas . . . . .	59
5.3.2.	Inductancias . . . . .	62
5.3.3.	Temperaturas . . . . .	64
6.	Montaje y fabricación de las unidades de levitación . . . . .	66
6.1.	Proceso de fabricación . . . . .	66
6.2.	Proceso de montaje . . . . .	69
6.2.1.	Procedimiento de montaje . . . . .	69
6.3.	Medidas de seguridad . . . . .	72
7.	Comparación de datos teóricos frente a los datos reales . . . . .	75
7.1.	Banco de pruebas de levitación . . . . .	75
7.2.	Procedimiento del ensayo . . . . .	76
7.3.	Obtención de los resultados . . . . .	77
8.	Conclusiones . . . . .	84
9.	Futuros proyectos . . . . .	85
 <b>II Anexos</b>		 <b>88</b>
1.	Plano del perfil en L de la infraestructura . . . . .	89
2.	Plano de conjunto de la herramienta de montaje de los imanes permanentes . . . . .	90
3.	Plano de la cubierta de la unidad de levitación . . . . .	91
4.	Plano de la estructura de arrollamiento del bobinado de la unidad de levitación . . . . .	92
5.	Ficha técnica del artículo Q-40-40-20-N . . . . .	93
 <b>III Presupuestos</b>		 <b>97</b>
1.	Introducción . . . . .	98
2.	Cuadro de precios unitarios . . . . .	98
3.	Cuadro de precios descompuestos . . . . .	100

4.	Cuadro de mediciones . . . . .	101
<b>IV</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>102</b>
1.	Pliego de Condiciones Generales . . . . .	103
1.1.	Objeto y Alcance del Pliego . . . . .	103
1.2.	Documentación del Proyecto . . . . .	103
2.	Pliego de Condiciones Técnicas . . . . .	104
2.1.	Documentos de Soporte . . . . .	104
2.2.	Disposiciones Legales . . . . .	105
3.	Pliego de Condiciones Facultativas . . . . .	105
3.1.	Promotor . . . . .	105
3.2.	Contratista . . . . .	106
3.3.	Proyectista . . . . .	106
3.4.	Plazos y Entrega del Proyecto . . . . .	106
3.5.	Garantía . . . . .	106
<b>V</b>	<b>Planos</b>	<b>107</b>
1.	Plano completo de la unidad de levitación . . . . .	108
2.	Plano del acero de la unidad de levitación . . . . .	109

# Índice de figuras

2.1. Transporte ferroviario de pasajeros para las principales empresas desde 2015 a 2021 (Eurostat, 2022) . . . . .	15
2.2. Boceto de un diseño conceptual del Hyperloop (SpaceX, 2013) . . . . .	16
2.3. Imagen del diseño propuesto por Hyperloop Transport Technologies (HyperloopTT, 2023)	17
2.4. Octava generación de Hyperloop UPV . . . . .	17
2.5. Logo de la European Hyperloop Week (EHW, 2023) . . . . .	18
2.6. Cronología de los prototipos de Hyperloop UPV . . . . .	19
2.7. Vista general de la infraestructura de 30 metros (Hyperloop-UPV, 2023) . . . . .	20
2.8. Vista explosionada de Kénos (Hyperloop-UPV, 2023) . . . . .	21
3.1. Vista isométrica de la parte interior del tubo (Hyperloop-UPV, 2023) . . . . .	22
3.2. Vista explosionada del sistema de alimentación (Hyperloop-UPV, 2023) . . . . .	24
3.3. Visión general de la LPU (Hyperloop-UPV, 2023) . . . . .	25
4.1. Comportamiento de los materiales frente a los flujos magnéticos. (León, 1988) . . . . .	29
4.2. Etapa de un ciclo de histéresis. (López, 2022) . . . . .	29
4.3. Dominios magnéticos para un material ferromagnético en distintas condiciones de presencia o no de campo magnético externo. (López, 2022) . . . . .	30
4.4. Ley de Gauss del campo eléctrico siendo la carga un plano infinito . . . . .	32
4.5. Representación de la ley de Gauss del campo magnético . . . . .	33
4.6. Representación de la ley de Ampere a partir de la corriente circulando por un conductor rectilíneo . . . . .	33
4.7. Representación de la ley de Faraday . . . . .	34
4.8. Aplicación de la regla de la mano derecha sobre un solenoide . . . . .	36
4.9. Campo magnético generado por un imán permanente . . . . .	37
4.10. Curvas de inducción y permeabilidad . . . . .	37
4.11. Esquema funcional de una unidad de levitación (Grebennikov, Lebedev et al., 2018) . . .	39
5.1. Flujograma del diseño de las unidades de levitación . . . . .	40
5.2. Logo del programa JMAG (JMAG, 2023) . . . . .	41

5.3. Unidad de levitación empleada en la séptima generación de Hyperloop UPV (Hyperloop-UPV, 2022) . . . . .	42
5.4. Esquemático del bobinado de dos bobinas en serie . . . . .	42
5.5. Primera propuesta para la unidad de levitación . . . . .	43
5.6. Segunda propuesta para la unidad de levitación . . . . .	43
5.7. Tercera propuesta para la unidad de levitación . . . . .	44
5.8. Flujo magnético distribuido en dos trayectorias . . . . .	44
5.9. Unidad de levitación vertical electromagnética . . . . .	46
5.10. Sistema de referencia global rectangular utilizado en las simulaciones . . . . .	47
5.11. Estudio de la fuerza generada por cuatro imanes permanentes por unidad de levitación en función de la altura y la longitud del núcleo de acero . . . . .	48
5.12. Curva B-H del acero eléctrico M400-50A (JMAG, 2023) . . . . .	49
5.13. Densidad de fuerza para $I = 0$ A en función de la altura y la longitud del núcleo de acero	50
5.14. Densidad de fuerza para $I = 55$ A en función de la altura y la longitud del núcleo de acero	50
5.15. Gráfico de contorno del flujo magnético que atraviesa la unidad de levitación con los orificios realizados sobre el núcleo de acero . . . . .	51
5.16. Gráfico de contorno del flujo magnético que atraviesa la unidad de levitación con los cortes realizados sobre el núcleo de acero . . . . .	52
5.17. Dimensiones geométricas finales del núcleo de acero en <i>mm</i> . . . . .	52
5.18. Incremento exponencial de temperatura y resistencia, con un incremento constante de tiempo	55
5.19. Fijación para las bobinas . . . . .	56
5.20. Unidad de levitación vertical junto a la cubierta de sujeción . . . . .	57
5.21. Comparación de los resultados entre la simetría de 1/4 del modelo y el modelo sin simetrías	58
5.22. Modelo 1/4 utilizado para la caracterización de las unidades de levitación . . . . .	58
5.23. Modelo 1/2 utilizado para la caracterización de las unidades de levitación . . . . .	59
5.24. Mapa de la fuerza de levitación en función del entrehierro y de la amplitud . . . . .	59
5.25. Fuerza de levitación vertical de un módulo de levitación para los casos extremos y nominal en comparación con 1/4 del peso del vehículo . . . . .	60
5.26. Variación de la fuerza de levitación por unidad de levitación en función de la velocidad y del entrehierro . . . . .	61
5.27. Variación de la fuerza de drag por unidad de levitación en función de la velocidad y del entrehierro . . . . .	62
5.28. Mapa de flujo magnético en función de la corriente y del entrehierro para módulos de levitación vertical . . . . .	63
5.29. Mapa de inductancia en función de la corriente y del entrehierro para módulos de levitación vertical . . . . .	64
5.30. Variación de la temperatura en la unidad de levitación . . . . .	65

6.1. Bobinado arrollado sobre la estructura . . . . .	66
6.2. Curvas de magnetización para un solo cristal de hierro bcc en función de la dirección cristalográfica (Verbeken et al., 2010) . . . . .	67
6.3. Acero eléctrico empleado en las unidades de levitación diseñadas . . . . .	68
6.4. Herramienta de colocación de imanes . . . . .	69
6.5. Secuencia de montaje del núcleo ferromagnético . . . . .	70
6.6. Secuencia de montaje de los dos primeros imanes permanentes sobre el núcleo ferromagnético	71
6.7. Secuencia de montaje del resto de imanes permanentes sobre el núcleo ferromagnético . .	72
6.8. Secuencia de montaje de las bobinas sobre el núcleo ferromagnético . . . . .	72
6.9. Caja para el almacenamiento de las unidades de levitación . . . . .	73
6.10. Distancia de seguridad frente a la radiación electromagnética de los imanes permanentes .	74
7.1. Bancada de un grado de libertad para la caracterización de las unidades de levitación y las de guiado horizontal . . . . .	76
7.2. Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 13 mm . . . . .	78
7.3. Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 16 mm . . . . .	79
7.4. Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 19 mm . . . . .	80
7.5. Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 22 mm . . . . .	81
7.6. Fuerza ejercida por los imanes permanentes en función del entrehierro . . . . .	82
7.7. Temperatura alcanzada por las bobinas en función de la corriente . . . . .	83
9.1. Sistema de levitación magnética del tren Transrapid-maglev (Cabral & Chavarette, 2015)	85

# Índice de tablas

3.1. Especificaciones de la alimentación de alta tensión . . . . .	24
3.2. Especificaciones del módulo de batería de alto voltaje . . . . .	25
3.3. Requerimientos de diseño de las unidades de levitación . . . . .	26
4.1. Variables empleadas en las ecuaciones de Maxwell . . . . .	32
4.2. Principales parámetros análogos entre circuitos eléctricos y magnéticos . . . . .	34
5.1. Comparación de las tres opciones estudiadas . . . . .	45
5.2. Características de los imanes permanentes (Supermagnete, 2022) . . . . .	47
5.3. Propiedades y elementos de aleación del acero eléctrico M400-50A (Laakso et al., 2020) .	49
5.4. Cálculo del área de bobinado en función de la sección de cable y el $fill_{factor}$ . . . . .	53
5.5. Valores finales de las dimensiones del bobinado . . . . .	54
5.6. Fuerzas producidas por las bobinas . . . . .	56
5.7. Casos para el estudio de la cubierta . . . . .	57

Documento I

Memoria Descrittiva

## 1. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de levitación magnética, a través del diseño de unas unidades de levitación electromagnéticas que el equipo Hyperloop UPV integrará como parte de su prototipo Kénos y que serán presentadas en la European Hyperloop Week.

El principal objetivo de diseño es obtener unos módulos de levitación que compensen el peso del vehículo y que sea capaz de mitigar las perturbaciones, producidas en gran parte por la aceleración y frenado del sistema de propulsión. En la séptima generación del equipo se logró obtener los primeros módulos de levitación funcionales. Para este año, se busca un diseño optimizado, que cumpla con los estándares de fiabilidad y eficiencia definidos por el equipo.

Para conseguir integrar el sistema de levitación dentro del vehículo, y cumplir con los principales objetivos mencionados previamente, el diseño debe cumplir con los siguientes requisitos:

- A nivel mecánico, se deberá obtener un sistema optimizado que cumpla los requisitos de peso y fuerza especificados y que a su vez, cumpla con los requisitos espaciales, siendo capaz de ser integrado en el chasis del vehículo.
- A nivel eléctrico, se tratará de obtener un sistema que produzca el mínimo consumo de corriente posible, con una tensión de alimentación máxima de 220 V.
- A nivel térmico, el sistema deberá limitar la cantidad de calor generado. Para ello, deberá tener el suficiente rango de control para garantizar el propio funcionamiento del sistema y su alimentación.

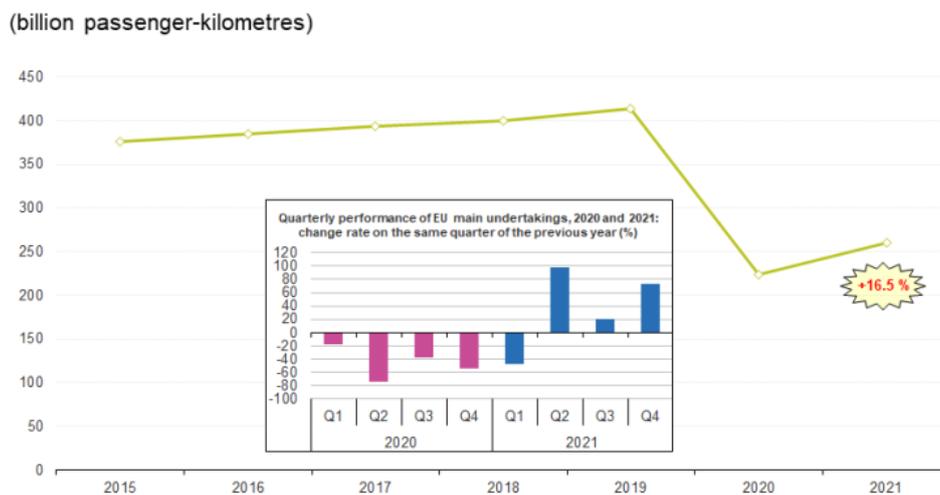
Además, es necesario desarrollar un proceso de montaje y fabricación que asegure tanto la seguridad de los miembros involucrados, como el funcionamiento óptimo de las unidades de levitación.

Por último, el presente trabajo trata de ser una guía para futuros miembros del equipo Hyperloop UPV, ya no solo para el sistema de levitación, sino que también trata de ser una base en el desarrollo de la tecnología electromagnética.

## 2. Antecedentes

A lo largo de la historia, la sociedad ha estado en constante evolución. La necesidad de adaptarse a los diferentes contextos sociales-económicos han conllevado un avance tecnológico que ha seguido hasta nuestros días. Sin embargo en la actualidad, las demandas energéticas y medioambientales requieren que la tecnología avance hacia proyectos de una mayor sostenibilidad.

En este contexto, el sector del transporte y la movilidad no ha sido una excepción. La revolución industrial del siglo XIX con la invención del ferrocarril, la aparición del automóvil a principios del siglo XX, el desarrollo del sector de la aviación y muchos otros avances han marcado la evolución dentro del sector. Según datos de la Oficina Europea de Estadística, el sector del transporte sigue en auge, aumentando sus cifras año tras año.



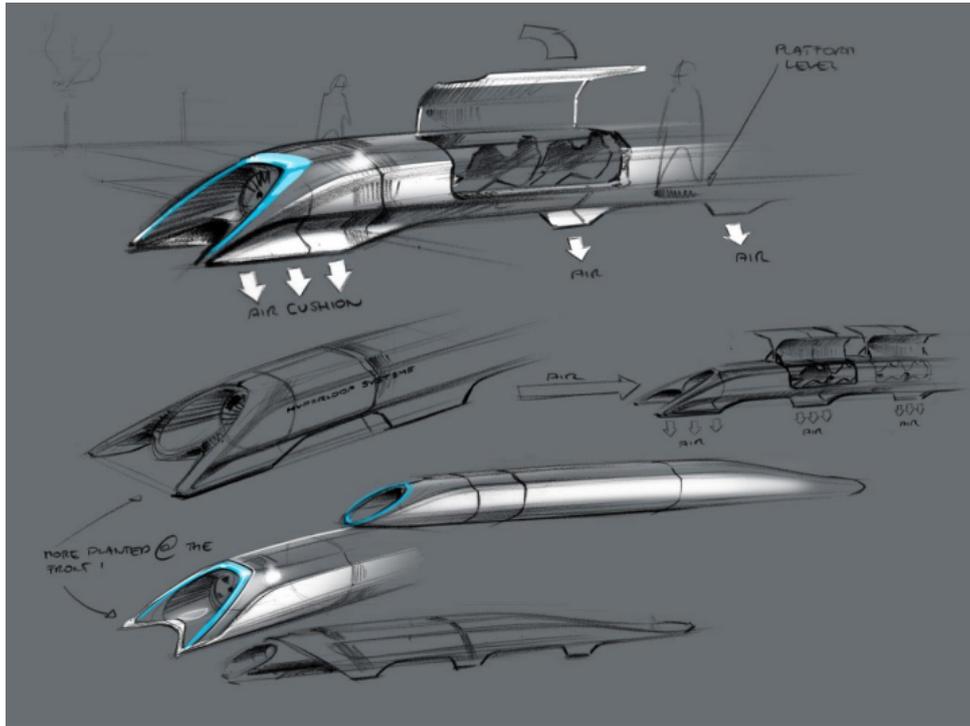
**Figura 2.1:** Transporte ferroviario de pasajeros para las principales empresas desde 2015 a 2021 (Eurostat, 2022)

Estos principales métodos de transporte están basados en el consumo de combustibles fósiles, que en el contexto medioambiental actual, resultan inadmisibles. Con esta situación, en 2012 apareció el concepto Hyperloop.

### 2.1. Hyperloop: un nuevo medio de transporte

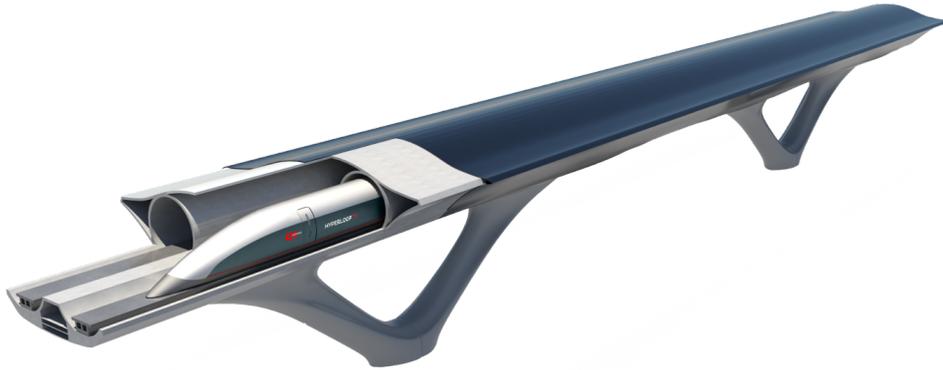
Elon Musk publicó un documento llamado Hyperloop Alpha (SpaceX, 2013). Este documento surgió como reacción a la aprobación del proyecto del Tren de Alta Velocidad de California. Según el CEO de Tesla y SpaceX, el desarrollo de un sistema de transporte masivo a escala estatal era necesario. Sin embargo, la alternativa a proponer debía ser mejor a los viajes en avión o en coche, siendo un proyecto más seguro, rápido, de menor coste y más sostenible.

El concepto se basaba en un tubo a baja presión en el que se transportan las cápsulas tanto a alta como a baja velocidad a lo largo del tubo. La aceleración de las cápsulas se lograría a través de un conjunto de motores lineales magnéticos distribuidos a lo largo del tubo. Además, dichas cápsulas iban situadas sobre un colchón de aire presurizado, con sustentación aerodinámica. En lo referente a los pasajeros, al principio y al final del tubo habría estaciones para la entrada a las cápsulas. También se podría entrar por distintas ramificaciones que se produjesen a lo largo del tubo.



**Figura 2.2:** Boceto de un diseño conceptual del Hyperloop (SpaceX, 2013)

En el 2015 se inauguró la Hyperloop Pod Competition, llevada a cabo por SpaceX. En esta competición, equipos de distintas universidades de todo el mundo presentaban sus respectivos proyectos, ahondando en el concepto y aportando distintas soluciones. Posteriormente, distintas empresas siguieron con el desarrollo de la tecnología Hyperloop, como la start-up Zeleros, que nace del equipo de la universidad, siendo la única empresa española que trabaja en el concepto. Virgin Hyperloop, que realizó las primeras pruebas con humanos a bordo del prototipo o Hyperloop TT cuyo diseño conceptual se puede ver en la Figura 2.3:



**Figura 2.3:** Imagen del diseño propuesto por Hyperloop Transport Technologies (HyperloopTT, 2023)

De esta competición, nace el grupo de Generación Espontánea conocido como Hyperloop UPV.

## 2.2. Hyperloop UPV

Hyperloop UPV es un equipo de estudiantes de la Universidad Politécnica de Valencia que desarrolla, diseña y fabrica un vehículo prototipo de tecnología hyperloop. Este equipo forma parte del grupo Generación Espontánea, programa que sirve como lanzadera para desarrollar iniciativas propias de estudiantes de la universidad.



**Figura 2.4:** Octava generación de Hyperloop UPV

La estructura del equipo se basa en el principio de garantizar el trabajo en equipo, de modo que los retos que puedan surgir a lo largo del año puedan abordarse de forma crítica y creativa desde múltiples puntos

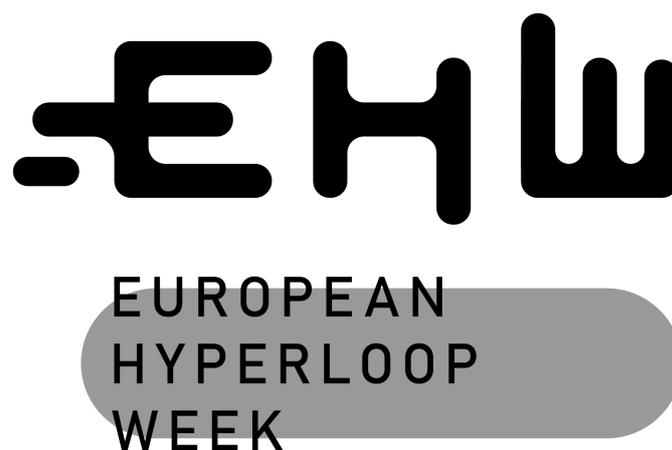
de vista.

El èxito de este enfoque depende en gran medida de la organizaci3n de los miembros en grupos de trabajo separados, conocidos como subsistemas; cada uno centrado en un aspecto diferente del desarrollo del hyperloop. El equipo est1 formado por 44 miembros y 13 colaboradores con experiencia en diversas 1reas relacionadas con el hyperloop, desde la ingenier1a a la gesti3n de operaciones. Adem1s, el equipo ha contado desde sus primeros pasos con el respaldo de dos profesores asesores: Dr. Vicente Dolz, Doctor en Ingenier1a Mec1nica, y Dr. Tomas Baviera, Doctor en Periodismo.

Adem1s, Hyperloop UPV ha evolucionado para arraigarse firmemente en el aspecto formativo de sus miembros. No s3lo es un equipo competitivo y puntero a nivel internacional, sino que tambi3n es una valiosa fuente de conocimiento para los estudiantes en diferentes 1reas, tanto las relacionadas con la propia tecnolog1a como las de car1cter m1s transversal. Prueba de ello es que, a lo largo de su existencia, el equipo ha acogido a m1s de 30 estudiantes de diferentes titulaciones que basaron sus tesis en la actividad del equipo.

Como se ha comentado previamente, los or1genes del equipo se remontan a la primera edici3n de la competici3n de SpaceX, en la que cinco estudiantes presentaron la idea que les otorgar1a los premios 'Top Design Concept' y 'Propulsion/Compression Subsystem Technical Excellence Award'. En la segunda edici3n, se juntar1an con la Purdue University para fabricar Atlantic II, siendo este el primer prototipo presentado por el equipo. Seguir1an los prototipos Valentia y Turian, que participar1an en las dos siguientes ediciones.

Sin embargo, a partir de 2020, el equipo pas3 de competir en la Hyperloop Pod Competition, a organizar y participar en un evento diferente: La European Hyperloop Week (EHW).



**Figura 2.5:** Logo de la European Hyperloop Week (EHW, 2023)

Este evento surgió de la unión de los equipos Hyperloop UPV, Swissloop, Hyped y Delft Hyperloop, ante la necesidad de un desarrollo de la tecnología Hyperloop más progresista y unificado. En la primera edición llevada a cabo en Valencia en el año 2020, se presentó el cuarto prototipo creado por el equipo, Ignis, que fue el primer vehículo impulsado por un Motor de Inducción Lineal Doble (DLIM).

Y por último, en la última edición llevada a cabo en Delft, se presentó Auran, primer prototipo en lograr desplazarse y levitar sin entrar en contacto con ninguna infraestructura, otorgándole un total de cuatro premios en la competición, siendo el equipo más laureado.

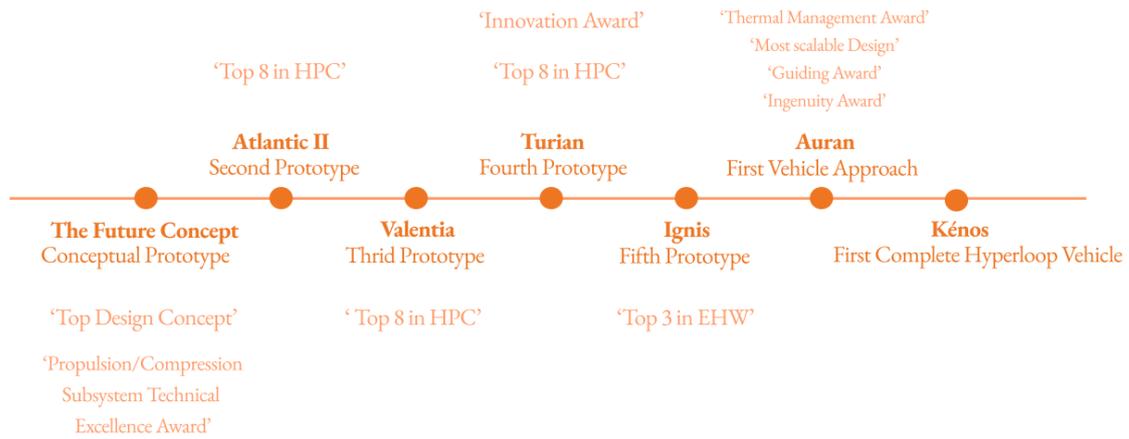
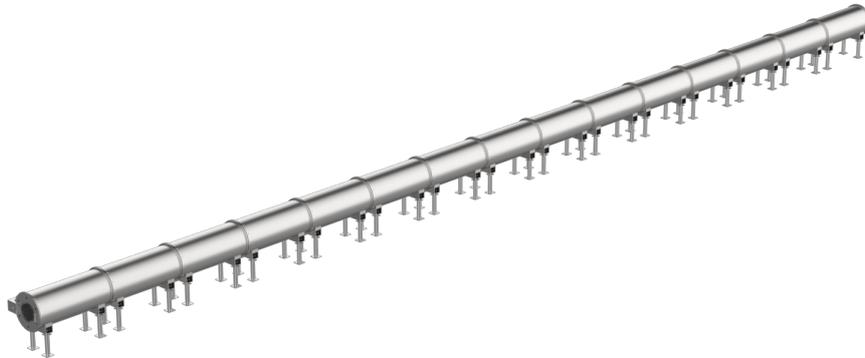


Figura 2.6: Cronología de los prototipos de Hyperloop UPV

### 2.3. Kénos

Para la tercera edición de la EHW, el equipo presentará su quinto prototipo, llamado Kénos. Este prototipo será el primer vehículo desarrollado por el equipo en implementar la tecnología Hyperloop al completo, ya que será el primer año en el que el vehículo opere en condiciones de vacío. Para lograrlo, el equipo ha adaptado la infraestructura desarrollada el año pasado, para poder alcanzar estas condiciones.



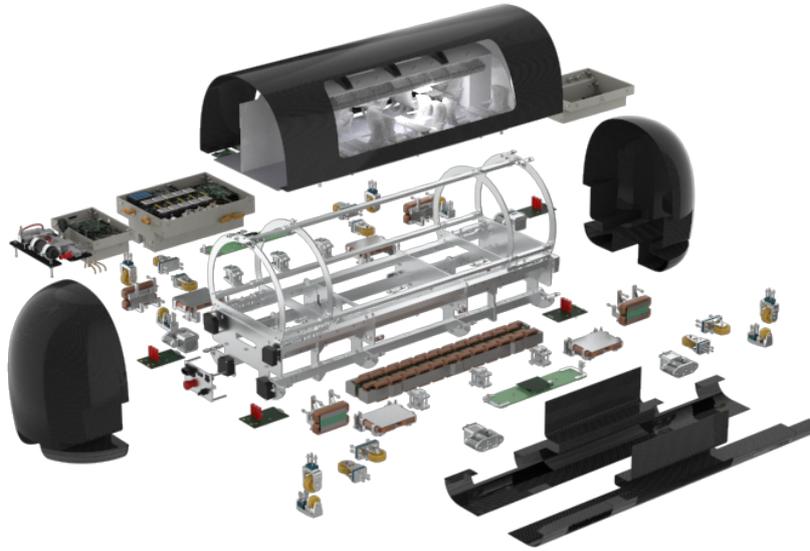
**Figura 2.7:** Vista general de la infraestructura de 30 metros (Hyperloop-UPV, 2023)

Las principales partes activas del prototipo son tanto las Unidades de Levitación (HEMS) como las de Guiado (EMS) y el Motor de Inducción Lineal (DLIM). A partir de estos, se define las condiciones de diseño para el resto del vehículo. Estos elementos conforman los sistemas electromagnéticos.

La parte electrónica está formada por las placas de potencia, que son las encargadas de accionar los sistemas, mientras que las de control monitorizan las entradas y salidas de las placas de potencia. El funcionamiento de ambas se maneja a través de las placas máster.

Además, dos conjuntos de baterías alimentan los sistemas de vehículo. Para la parte de alto voltaje, el primero alimenta las placas de potencia a 220 V, mientras que el segundo bloque alimenta a las placas de control que requieren una alimentación de 24 V.

Por último, todos estos sistemas, junto al resto de sistemas mecánicos se encuentran integrados en el chasis. Éste es el encargado no solo de integrar los sistemas electrónicos y los sistemas electromagnéticos, sino que también evita el fallo estructural bajo condiciones en funcionamiento nominal. Todos estos sistemas se pueden ver en el explosionado de la Figura 2.8:



**Figura 2.8:** Vista explosionada de Kénos (Hyperloop-UPV, 2023)

### 3. Especificaciones técnicas

En este apartado se van a definir las principales condiciones de contorno sobre las que funcionarán las unidades de levitación a diseñar. Para ello, explicaremos el contexto en el que trabajarán los módulos de levitación, restringidos principalmente por tres sistemas.

#### 3.1. Infraestructura y vacío

La infraestructura sobre la que trabajará el prototipo consta de un tubo de acero inoxidable, dividido en un total de 15 secciones de 2 m, haciéndolo de un total de 30 m. Además, el diámetro externo será de una dimensión de 864 mm, que es por donde deberá pasar el vehículo. Una representación de la infraestructura al completo la encontramos en la Figura 2.7.

Sobre esta infraestructura será donde se produzca el vacío. Este vacío se produce en el interior de la infraestructura, con una presión objetivo de 100 mbar. Para conseguir el vacío, se dispone de una bomba de vacío para sacar el aire del tubo, además del sellado de las secciones mediante juntas y las compuertas para cubrir los extremos de la infraestructura.

Además, en la parte interior del tubo se encuentran unos perfiles en L, sobre los que actuarán tanto las unidades de levitación como las de guiado horizontal, para situar al vehículo en la posición deseada. Estos perfiles se encuentran representados en la Figura 3.1:



**Figura 3.1:** Vista isométrica de la parte interior del tubo (Hyperloop-UPV, 2023)

Las unidades de levitación vertical deberán actuar sobre la parte horizontal del perfil, siendo este de un espesor de 15 mm, que limitará el diseño de la unidad.

### 3.2. Sistema de control

El sistema de control se compone de dos etapas. La primera parte define el control para 1 GDL (Grado de libertad), siendo este un paso intermedio con un modo de control más simple. Este control cobra importancia ya que el algoritmo que se emplea para el control de 1 GDL, se expandirá para la segunda parte del control, el de 5 GDL.

Por una parte, el control de 1 GDL debe gestionar la posición de levitación, es decir, la distancia vertical desde la unidad de levitación vertical a la parte horizontal del perfil en forma de L. Una vez diseñado el control de 1 GDL, se desarrolla el control completo del vehículo. El sistema de control debe ser capaz de controlar la altura de levitación y el centrado del vehículo sin rotaciones. Debe evitar las rotaciones en las direcciones de alabeo, cabeceo y guiñada. Este sistema debe ser capaz de controlar los 5 GDL explicados, dejando el sexto para el sistema de tracción.

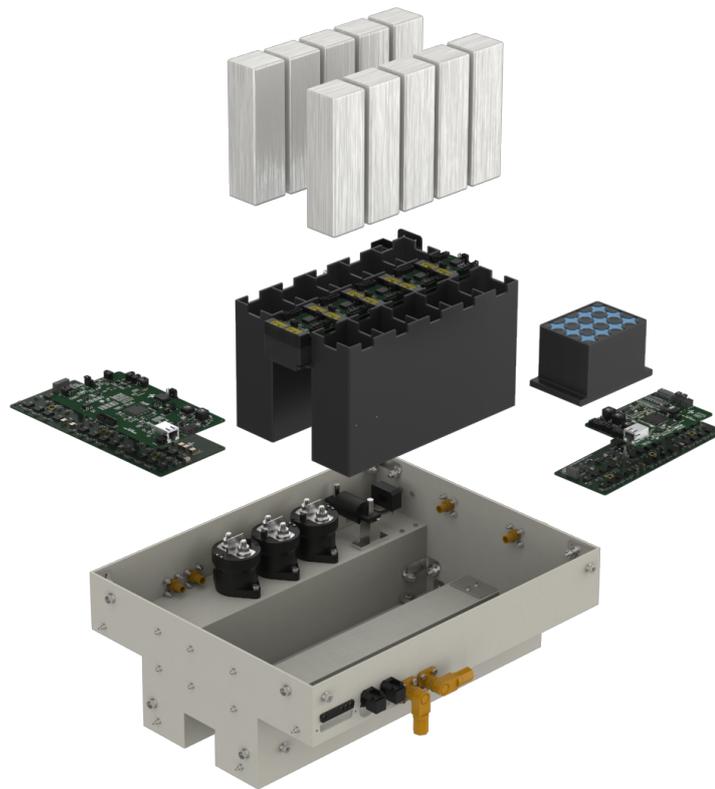
Para lograr dichos objetivos, el sistema a diseñar debe operar en un rango que permita al sistema de control realizar las acciones correctoras oportunas debido a las perturbaciones externas que aparezcan sobre el vehículo.

### 3.3. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación de Kénos es el responsable de suministrar, gestionar y almacenar la energía eléctrica disponible en el interior del vehículo, que se utiliza para alimentar el circuito de potencia de los sistemas de levitación, de guiado horizontal y de la tracción. La topología consta de una batería de alta tensión de 220 V protegida por protecciones eléctricas y otra batería de baja tensión de 24 V para la electrónica. Además, para mayor seguridad y simplicidad de los procedimientos, cada batería tiene su propio cargador de a bordo aislado.

Además, cada batería tiene su propio sistema de gestión que garantiza unas condiciones seguras tanto durante la carga como durante la descarga. Estas PCBs miden tensiones, corrientes y temperaturas en tiempo real y realizan el equilibrado de las celdas.

La Figura 3.2 muestra una visión general del sistema de alimentación:



**Figura 3.2:** Vista explosionada del sistema de alimentación (Hyperloop-UPV, 2023)

Para mejorar la eficiencia y la gestión de la temperatura, la corriente de la batería debe mantenerse al mínimo mientras se suministra la potencia demandada. Se alcanza una solución de compromiso entre un voltaje manejable y una corriente viable a 220 V, como se muestra en la Tabla 3.1:

**Tabla 3.1:** Especificaciones de la alimentación de alta tensión

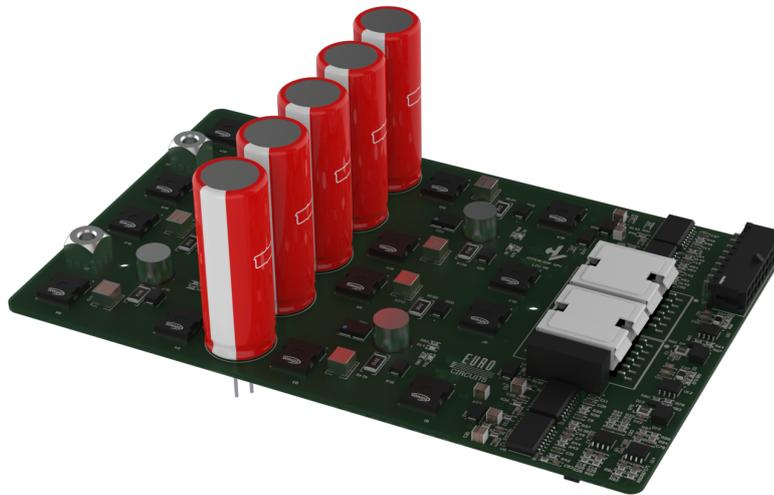
Máxima potencia demandada	Tensión nominal	Corriente máxima de la batería
20.51 [KW]	220 [V]	93.23 [A]

La batería consta de diez módulos conectados en serie, cada uno con una tensión nominal de 22,2 V y 25,2 V a plena carga. Como resultado, la tensión total de salida es de 220 V, con una tensión máxima de 252 V, y el peso total del pack es de 7,8 kg. En la Tabla 3.2 se resume las especificaciones del módulo de batería de alto voltaje:

**Tabla 3.2:** Especificaciones del módulo de batería de alto voltaje

Imagen	Propiedades	Valor
	Voltaje nominal [V]	22.2
	Voltaje máximo [V]	25.2
	Capacidad [mAh]	5000
	Conexión celular interna	6S1P
	Corriente de pico a 65 C [A]	325
	Tasa de carga máxima [C]	10
	Dimensiones LxWxH [mm]	165x45x48
	Weight [kg]	0.78

Por último, habrá una unidad de potencia de levitación (LPU) para cada unidad de levitación. Estas PCBs se encargan de funcionar como conductores tanto para las unidades verticales como para las de guiado horizontal. Su funcionamiento está limitado a la tensión de alimentación, y son capaces de soportar un máximo de 55 [A]. La Figura 3.3 muestra una visión general de la LPU:



**Figura 3.3:** Visión general de la LPU (Hyperloop-UPV, 2023)

Con este sistema de alimentación, la corriente que circule por las unidades de levitación no podrán exceder los valores de voltaje y corriente máximos marcados por dicho sistema de alimentación.

### 3.4. Principales requerimientos de diseño

Debido a los sistemas expuestos previamente, estos módulos deben ajustarse a las siguientes especificaciones técnicas:

- La corriente máxima que circula por las unidades debe garantizar el funcionamiento de las mismas, sin superar los límites de temperatura establecidos.
- El volumen de las unidades debe encajar en el chasis del vehículo, con las restricciones geométricas establecidas, además de cumplir con los requerimientos de peso.
- El rango de control debe ser lo más alto posible siguiendo la ecuación que se muestra en la Ecuación 1.

Estas especificaciones se encuentran representadas en la Tabla 3.3:

**Tabla 3.3:** Requerimientos de diseño de las unidades de levitación

Parámetro	Valor objetivo
Máxima longitud	180 [mm]
Máxima anchura	140 [mm]
Máxima altura	70 [mm]
Fuerza de levitación nominal	500 [N]
Distancia de levitación nominal	19 [mm]
Mínimo rango de control	40 [%]
Máxima corriente	55 [A]
Temperatura máxima con la máxima corriente de funcionamiento	220 [°C]

Siendo la Ecuación para el rango de control:

$$Control_{range}(I) = 100 \cdot \frac{F(I=0) - F(I)}{F(I=0)} \quad (1)$$

Siendo  $F(I=0)$  la fuerza generada cuando no circula corriente por la unidad y siendo  $F(I)$  la fuerza cuando circula una determinada corriente por el sistema.

Con este contexto, el sistema a utilizar estará basado en la tecnología HEMS (Hybrid Electromagnetic Suspension), que vendrá definida en el siguiente apartado.

## 4. Marco teórico

Para comprender el funcionamiento en el que se basa la tecnología HEMS, primero se deben definir las leyes que rigen el comportamiento de los circuitos magnéticos. Éstas permitirán entender los principios en los que se basa dicha tecnología, permitiendo realizar un cálculo iterativo para obtener la mejor solución para el problema en cuestión.

### 4.1. Campo magnético: Inducción magnética

Una carga eléctrica, por el hecho de encontrarse en reposo, genera un campo eléctrico. Sin embargo, el desplazamiento de dicha carga provoca la aparición de un campo magnético. Por lo tanto, las propiedades magnéticas de los materiales surgen debido al movimiento de las partículas cargadas que los integran.

La aparición de estos fenómenos magnéticos se explica a partir de los momentos magnéticos. En cada átomo existe un momento magnético resultante de la acción de tres momentos magnéticos: nuclear, orbital y espín. El primero es producido por el giro del núcleo sobre sí mismo, el segundo es debido al giro de los electrones alrededor del núcleo, y el tercero es consecuencia de la rotación de los electrones sobre su eje. La resultante de los momentos magnéticos atómicos de una molécula se denomina momento magnético o molecular.

Si aplicamos sobre un material un campo magnético externo  $\vec{H}$ , estos momentos magnéticos se alinean en la misma dirección en la que se aplica el campo, produciendo una imanación  $\vec{J}$ :

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H} \quad (2)$$

Siendo  $\chi$  la susceptibilidad magnética del material. Junto a la imanación y al campo magnético exterior, obtenemos la inducción magnética  $\vec{B}$  como:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3)$$

Siendo  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{T m A}^{-1}$ ,  $\mu_r$  y  $\mu$  la permeabilidades del vacío, la relativa y la absoluta respectivamente.

#### 4.1.1. Clasificación de los materiales según su comportamiento en presencia de un campo magnético

##### Materiales diamagnéticos

El diamagnetismo es una propiedad intrínseca del material. Presentan esta propiedad las sustancias con momento magnético atómico nulo. Estos materiales tienen susceptibilidades magnéticas negativas, por lo que se imantan en sentido opuesto al campo magnético aplicado.

Esta propiedad es independiente de la temperatura y aproximadamente un tercio de los elementos simples son diamagnéticos. Algunos ejemplos son el cobre, el agua o el grafito.

### **Materiales paramagnéticos**

A diferencia de los materiales diamagnéticos, estos materiales presentan cuerpos con momento magnético atómico no nulo. Estos materiales en ausencia de un campo exterior, se obtiene un momento magnético resultante nulo. Sin embargo, en el momento en el que se les aplica un campo magnético externo, los momentos magnéticos se orientan en la dirección de dicho campo.

Tienen susceptibilidades positivas, pero de un valor muy bajo, por lo que se requieren campos magnéticos muy intensos para obtener pequeñas imantaciones. Además, está limitada por la agitación térmica, ya que a una mayor temperatura, menor será la susceptibilidad, teniendo una relación inversamente proporcional. Materiales como el aluminio, el aire o el oxígeno tienen esta propiedad.

### **Materiales ferromagnéticos**

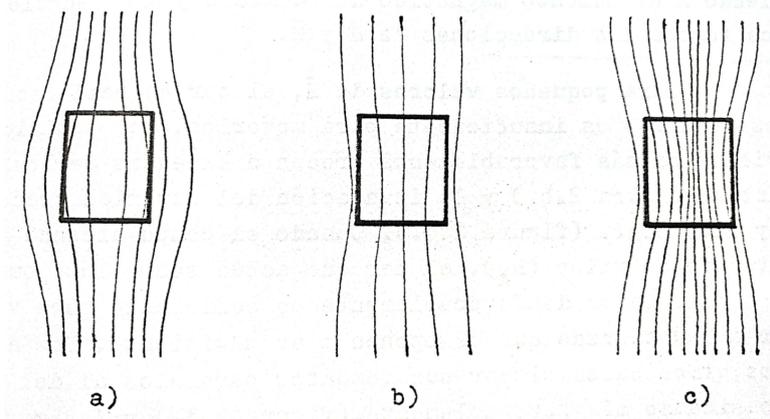
Al igual que con los paramagnéticos, los materiales ferromagnéticos también disponen de momento magnético no nulo, pero las distancias interatómicas son mucho más débiles que en los paramagnéticos, lo que da lugar al acoplamiento entre momentos elementales. (Álvarez et al., 1990)

Tienen susceptibilidades muy grandes, positivas y al contrario que en los otros dos tipos de materiales, la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos no es constante y depende del valor del campo aplicado.

Estos materiales son buenos canalizadores de flujo y son empleados principalmente para la construcción de circuitos magnéticos a partir de materiales como el hierro y sus aleaciones. (Álvarez et al., 1990)

En la Figura 4.1 se puede ver como atraviesan las líneas de campo a los distintos tipos de materiales siendo:

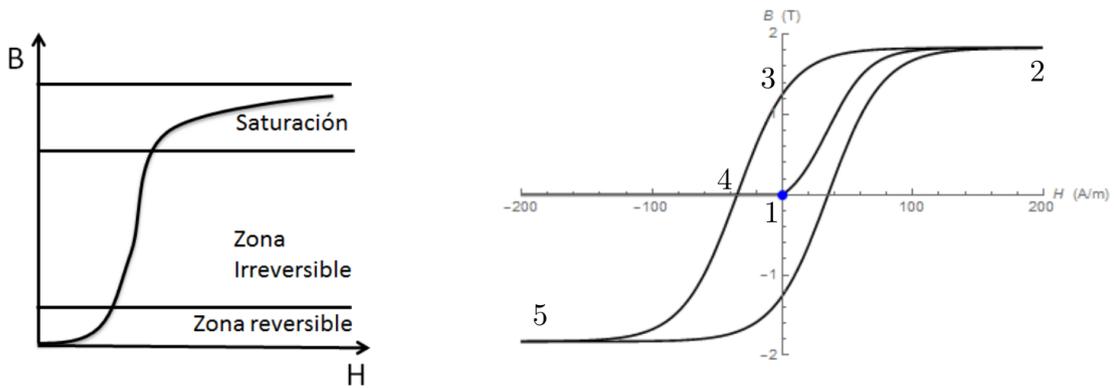
- a) Diamagnéticos ( $\chi < 0$ )
- b) Paramagnéticos ( $\chi > 0$ )
- c) Ferromagnéticos ( $\chi \gg 0$ )



**Figura 4.1:** Comportamiento de los materiales frente a los flujos magnéticos. (León, 1988)

#### 4.1.2. Teoría de Weiss: Los dominios magnéticos

Según la teoría de Weiss, los materiales ferromagnéticos están constituidos por agrupaciones de moléculas denominadas recintos o dominios. En un inicio, si el material no ha sido imantado previamente, estos dominios se encuentran orientados al azar. Una vez el material es sometido a un campo magnético externo, los dominios comienzan a alinearse. El proceso de alineación de dichos dominios se puede definir en tres etapas representadas en la Figura 4.2 a):



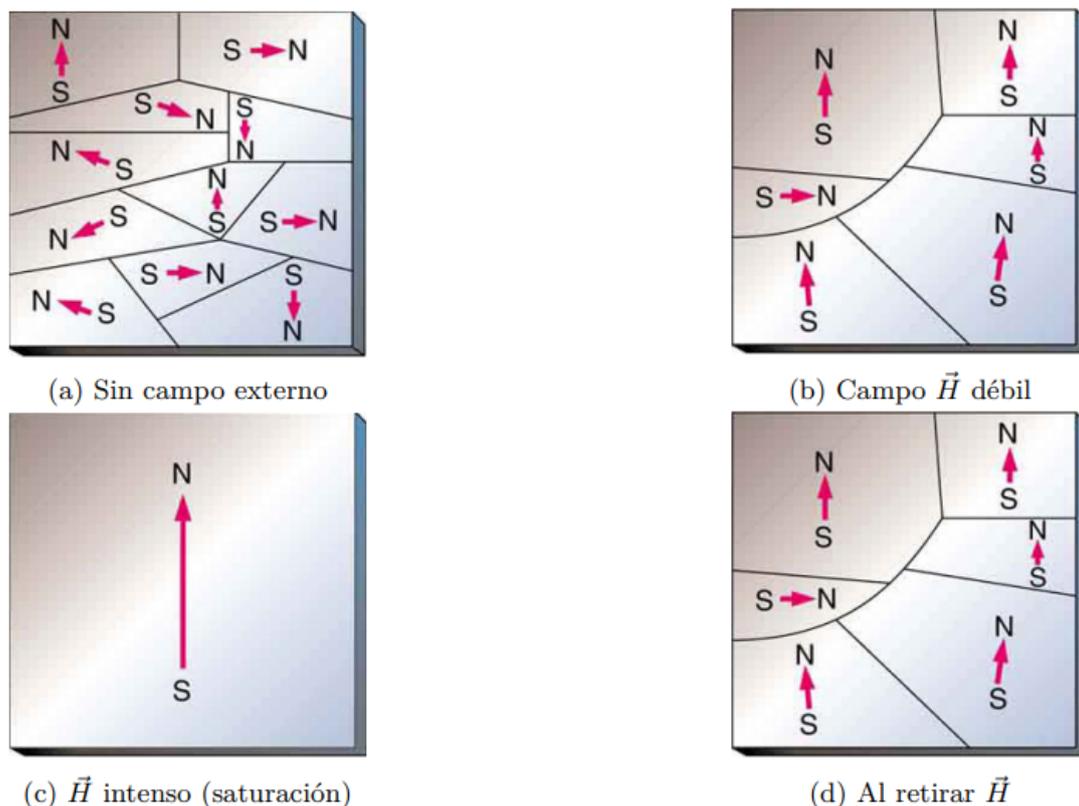
(a) Curva de primera imantación

(b) Ciclo de histéresis completo

**Figura 4.2:** Etapa de un ciclo de histéresis. (López, 2022)

Al principio como se ha descrito previamente, los dominios se encuentran desalineados. La primera zona de la curva representa la aplicación de un campo magnético externo  $\vec{H}$  de baja intensidad. En esta franja, el par ejercido sobre los dominios es insuficiente para desplazarlos, ya que los dominios que se encuentran situados favorablemente con respecto al campo comienzan a extenderse, pero los situados en contra del campo se contraen, quedando una imantación reversible. Una vez se supera un cierto umbral, el par generado por el campo comienza a rotar los dominios en la dirección favorable. Si se sigue aplicando el

campo, los dominios continúan rotando situándose paralelamente al campo externo, pero se necesitará un valor mayor de  $\vec{H}$  para seguir con el proceso. Una vez los dominios se encuentran alineados, por más que se aumente la intensidad del campo magnético, la inducción magnética deja de aumentar, entrando en la última parte del proceso, la saturación magnética del material ferromagnético.



**Figura 4.3:** Dominios magnéticos para un material ferromagnético en distintas condiciones de presencia o no de campo magnético externo. (López, 2022)

Esta curva representa la evolución de un material ferromagnético virgen (sin previa imantación), describiendo la evolución de la inducción magnética  $\vec{B}$  en función de la excitación  $\vec{H}$ . Una vez pasado este proceso, si se va reduciendo la intensidad de campo magnético, a partir del codo de saturación (punto de entrada a la franja de saturación) la curva toma otro camino, quedando el material con un valor de inducción remanente  $B_r$  cuando se extingue el campo magnético externo. Para eliminar esa inducción remanente es necesario una excitación magnética  $H_c$  de sentido contrario a la inicial, conocida como campo coercitivo. Este campo se debe mantener de forma permanente para poder eliminar la inducción remanente. Esta misma operación se realiza en el sentido opuesto, obteniendo el ciclo de histéresis de la Figura 4.2 b).

Es interesante manejar el tamaño del área que alberga el ciclo de histéresis. Un área encerrada por el camino del ciclo posterior a la primera curva de imantación demasiado amplia generará una mayor

cantidad de pérdidas, debidas a las corrientes inducidas que los atraviesa. Mientras que si se consigue reducir el valor tanto de campo coercitivo como de inducción remanente, se consigue reducir las pérdidas, estrechando el área encerrada por el ciclo. Esto se consigue mediante el empleo de láminas de espesor reducido. Este tipo de material se le da el nombre de material ferromagnético blando, mientras que si es un acero en bloque, es un material ferromagnético duro.

Para el núcleo que emplearemos en la tecnología HEMS, se utilizará el tipo de material ferromagnético blando, aunque no es del todo necesario porque las corrientes inducidas afectan principalmente en las máquinas de corriente alterna, mientras que en la tecnología HEMS, se usa corriente continua, como se verá más adelante.

## 4.2. Circuitos magnéticos

Se define como “circuito magnético” aquel que está constituido en la mayor parte de su longitud por un material magnético de gran permeabilidad de sección transversal sustancialmente uniforme y en el cual queda confinado, principalmente el flujo magnético. (Álvarez et al., 1990)

En este tipo de circuitos magnéticos se suele producir una asociación de diferentes elementos, ya sean de tipo eléctricos (bobinas) y magnéticos (materiales ferromagnéticos), por lo tanto es necesario establecer analogías entre ambos campos de estudio.

### 4.2.1. Leyes de aplicación a los circuitos magnéticos: Ecuaciones de Maxwell-Mohr

En 1864, el físico escocés James Clerk Maxwell resumió las leyes experimentales que rigen el comportamiento de la electricidad y el magnetismo. Estas ecuaciones relacionan los vectores de campo eléctrico  $\vec{E}$  y campo magnético  $\vec{B}$  con sus fuentes (cargas eléctricas, corrientes y campos variables).

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (7)$$

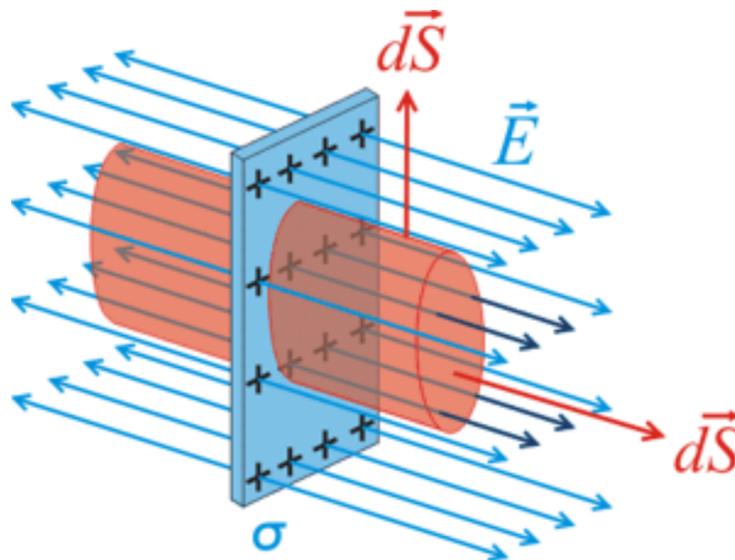
Siendo:

**Tabla 4.1:** Variables empleadas en las ecuaciones de Maxwell

Símbolo	Magnitud	Unidades
$\vec{E}$	Campo eléctrico	$[\frac{V}{m}]$
$\vec{B}$	Flujo magnético	$[T = \frac{Wb}{m^2}]$
$\vec{J}$	Densidad de corriente	$[\frac{A}{m^2}]$
$\rho$	Densidad de carga	$[\frac{C}{m^3}]$
$\epsilon_0$	Constante de permitividad eléctrica en el vacío	$[\frac{C^2}{Nm^2}]$
$\mu_0$	Constante de permeabilidad magnética en el vacío	$[\frac{Tm}{A}]$

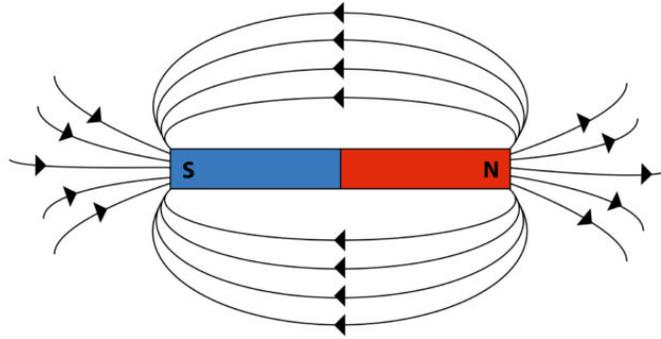
De estas cuatro ecuaciones representadas, para el cálculo de los circuitos magnéticos se utilizarán principalmente la Ecuación 5 siendo esta la Ley de Gauss del campo magnético, la ley de Ampere representada en la Ecuación 7 y la Ecuación 3 que define el comportamiento del material. De todas maneras, explicaremos el funcionamiento de cada una de las ecuaciones de Maxwell.

La Ecuación 4 representa la Ley de Gauss para el campo eléctrico. Esta ley dice que el flujo de campo eléctrico que atraviesa una superficie es igual al cociente entre la carga de dicha superficie y la constante de permitividad eléctrica en el vacío. De aquí podemos extraer que una carga, por el hecho de ocupar un lugar en el espacio, genera a su alrededor un campo eléctrico, ya sea positiva o negativa, sin la necesidad de haber otra carga a su alrededor, lo que provoca la existencia de los monopolos eléctricos.


**Figura 4.4:** Ley de Gauss del campo eléctrico siendo la carga un plano infinito

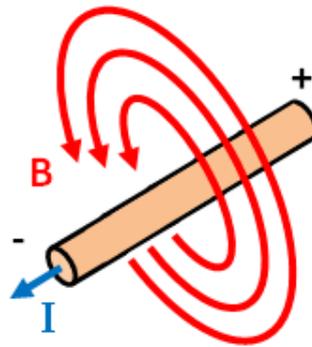
Sin embargo, para el campo Magnético, según la Ecuación 5, se puede observar que el sumatorio de todas las líneas de campo magnético se anulan. Esto quiere decir que las líneas de campo magnético se cierran sobre si mismas, con lo que a diferencia del campo eléctrico, no existen monopolos magnéticos, sino que siempre vamos a disponer en este caso de un polo norte o un polo sur. Esta característica de los campos

magnéticos será muy importante tenerla en cuenta a la hora de componer nuestro circuito magnético, ya que la configuración en la que dispongamos nuestras fuentes de excitación de campo magnético explicadas posteriormente provocarán un funcionamiento distinto del sistema a desarrollar.



**Figura 4.5:** Representación de la ley de Gauss del campo magnético

A continuación se define la ley de Ampere 7, la cual define que la circulación de corriente por un conductor, o la existencia de un campo eléctrico variable producen la aparición de un campo magnético. Esta ley nos sirve para explicar el funcionamiento de una de las principales fuentes de excitación magnéticas de las que dispondrá nuestro dispositivo.



**Figura 4.6:** Representación de la ley de Ampere a partir de la corriente circulando por un conductor rectilíneo

Sin embargo, los experimentos que llevó a cabo Michael Faraday en 1831 concluyeron que realizando el camino inverso al que aplicó Ampere, también podríamos obtener el resultado opuesto. Según la Ley de Faraday 6 si a un circuito cerrado se le aplica un campo magnético variable, se induce sobre este una fuerza electromotriz. Esta corriente que se induce sobre el conductor tiene un sentido determinado, mostrado en la Ecuación 6 mediante un signo negativo, lo que conlleva que la aparición de dicha corriente producirá un campo magnético que se opondrá al anterior. Esta ley es uno de los principios de funcionamiento de las máquinas asíncronas.

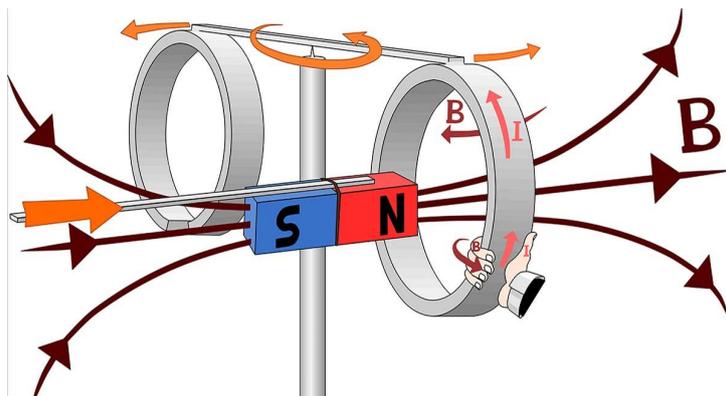


Figura 4.7: Representación de la ley de Faraday

#### 4.2.2. Analogías entre circuitos eléctricos y magnéticos

Una vez definidas las leyes básicas del electromagnetismo, podemos emplear técnicas conocidas para los circuitos eléctricos y aplicar las relaciones correspondientes con el campo magnético. Con el empleo de estas analogías, el cálculo de los diferentes procesos que se llevan a cabo en los circuitos magnéticos se resuelven con una mayor facilidad. Los principales parámetros análogos entre unos y otros se encuentran representados en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Principales parámetros análogos entre circuitos eléctricos y magnéticos

Circuito Eléctrico	Circuito Magnético
Densidad de corriente $J = \frac{di}{dS}$	Densidad de flujo magnética $B = \frac{d\phi}{dS}$
Corriente o flujo eléctrico $i = \int \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$	Flujo magnético $\phi = \int \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Fuerza Electromotriz $e = \int \vec{E} \cdot dt$	Fuerza Magnetomotriz $F = \int \vec{H} \cdot dL = N \cdot I$
Resistencia $R = \frac{e}{i} = \rho \cdot \frac{L}{S}$	Reluctancia $\mathcal{R} = \frac{F}{\phi} = \frac{L}{\mu \cdot S}$
Conductividad $\sigma$	Permeabilidad $\mu$

De esta tabla cabe destacar la ecuación de la fuerza magnetomotriz, la cual recibe el nombre de la Ley de Ohm para los circuitos magnéticos, al ser análoga a la de los circuitos eléctricos mostrada en la ecuación de la fuerza electromotriz. Estas analogías sirven para el proceso del cálculo matemático de los diferentes

parámetros de un circuito magnético. Sin embargo, no caracterizan al completo las características del circuito, presentando ciertas diferencias físicas:

- La conductividad es únicamente dependiente de su naturaleza y temperatura. Sin embargo, la permeabilidad de un material ferromagnético depende, además de su naturaleza y temperatura, de dos factores más: La inducción magnética y la historia magnética previa del material.
- Las corrientes eléctricas atraviesan el conductor por el que están confinadas en su totalidad, es decir, no existen pérdidas de corriente por el aislante. Esto es debido a que materiales conductores como el cobre tienen conductividades del orden de  $10^{22}$  superior a la del aislante y a la del aire. Por el contrario, el campo magnético si que tiene unas ciertas pérdidas de flujo en el aire, ya que su permeabilidad magnética relativa es del orden de  $10^3$  menor que la de los materiales ferromagnéticos.
- Por último, el mantenimiento de una corriente constante a lo largo de un conductor conlleva unas pérdidas de energía en forma de calor por efecto Joule ( $R \cdot I^2$ ). Sin embargo, el flujo magnético constante no origina pérdidas, solo lo origina el flujo alterno por corrientes de Foucault y pérdidas por histéresis.

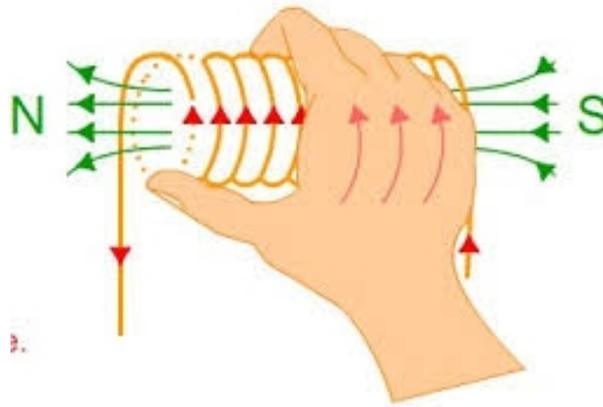
#### 4.2.3. Fuentes de excitación magnética

Al igual que en los circuitos eléctricos, los circuitos magnéticos disponen de elementos generadores de flujo magnético que dependen de la fuerza magnetomotriz. Para el caso de los circuitos magnéticos, disponemos de dos tipos de fuentes de excitación magnéticas: Los electroimanes y los imanes permanentes.

##### **Electroimán**

Los electroimanes están compuestos de hilo conductor arrollado normalmente sobre una material ferromagnético blando para canalizar el flujo magnético. Mediante la circulación de corriente por el material conductor, por la Ley de Ampère descrita previamente en la Ecuación 7, logramos establecer el campo magnético que es reforzado por la imantación que se produce en el mismo material sobre el que está arrollado.

Esta corriente puede ser de dos tipos, o de tipo continua o de tipo variable, lo que producirá campos magnéticos constantes o variables respectivamente. El valor de la fuerza magnetomotriz viene descrita en la Tabla 4.2, siendo  $N$  el número de vueltas o espiras que conforman el solenoide, e  $I$  la corriente que circula por éste. Esta relación [A/Vueltas] es importante tenerla en cuenta, ya que para obtener una misma fuerza magnetomotriz, si empleamos un mayor número de vueltas podemos reducir el consumo de corriente o viceversa. El sentido del flujo magnético se rige por la regla de la mano derecha representada en la Figura 4.8.



**Figura 4.8:** Aplicaci3n de la regla de la mano derecha sobre un solenoide

### Im3n permanente

Los imanes permanentes, a diferencia de los electroimanes, son materiales ferromagn9ticos duros que han sido previamente imantados mediante la aplicaci3n de un campo magn9tico externo de alta intensidad, con lo que se consigue una imanaci3n remanente sobre el material. Con esto se logra mantener un campo magn9tico uniforme, por lo que a diferencia de los electroimanes, no se requiere la circulaci3n de corriente para la obtenci3n de campo magn9tico. Sin embargo, esto produce que no se pueda regular la fuerza magnetomotriz que generan, una ventaja que disponemos con los electroimanes ya que al aumentar o disminuir la corriente logramos obtener un mayor o menor valor.

La f3rmula que define la fuerza magnetomotriz para este tipo de fuentes de excitaci3n viene definida en la Ecuaci3n 8

$$F = -H_i \cdot L_i \quad (8)$$

en donde  $L_i$  es la longitud media del im3n,  $H_i$  es el valor del campo magn9tico (obtenido por intersecci3n de la caracter9stica del im3n con el resto del circuito) y el signo negativo indica que su sentido es el contrario al de una ca9da de tensi3n magn9tica, es decir, que el material ferromagn9tico est1 funcionando como generador. (Le3n, 1988)

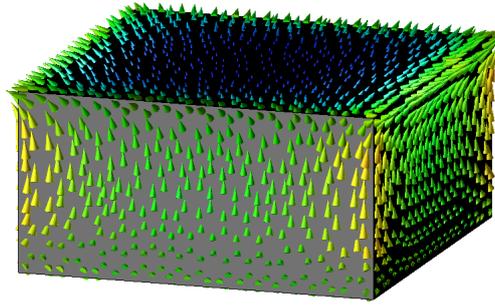


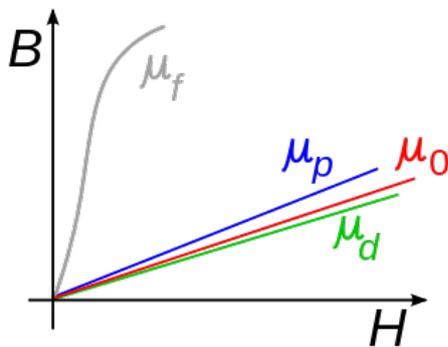
Figura 4.9: Campo magnético generado por un imán permanente

#### 4.2.4. Elemento pasivo

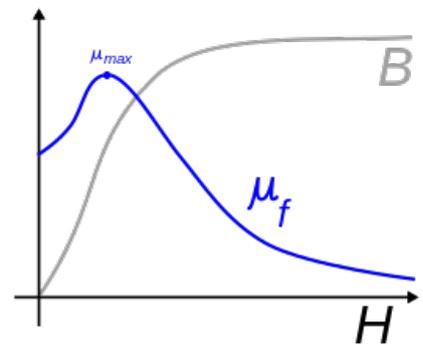
Estos elementos son los encargados de conducir y reforzar las líneas de campo magnético por el circuito, principalmente son los materiales ferromagnéticos blandos, también conocidos como núcleos, recurrentes en distintas máquinas eléctricas como los motores eléctricos o transformadores. En este punto también entrarían los tramos de entrehierro, siendo el material conductor el aire, que como se ha visto previamente, sería un material paramagnético.

Estos elementos están caracterizados por su reluctancia  $\mathcal{R}$ , definida en la Tabla 4.2, donde  $L$  es la longitud media del elemento,  $S$  una sección recta normal al flujo y  $\mu$  es la permeabilidad del material.

Estos circuitos tienen un comportamiento no lineal debido al fenómeno de la saturación, en consecuencia, su permeabilidad  $\mu$  depende del punto de funcionamiento del material. Para el aire, presente en los entrehierros la permeabilidad es siempre constante, por tratarse de un material paramagnético y su comportamiento es lineal. (León, 1988)



a) Comportamiento lineal o no lineal para materiales ferromagnéticos  $\mu_f$ , diamagnéticos  $\mu_d$ , paramagnéticos  $\mu_p$  y en el vacío  $\mu_0$



b) Permeabilidad magnética y curva de inducción de un material ferromagnético

Figura 4.10: Curvas de inducción y permeabilidad

### 4.3. Tecnología HEMS

El sistema HEMS (Hybrid Electromagnetic Suspension) es un tipo de circuito magnético empleado para producir la levitación de un sistema de transporte, en nuestro caso el Hyperloop. Para ello, está conformado por un circuito magnético en forma de U, en el que se incluyen distintos tipos de fuentes de excitación magnética y de elementos pasivos. En este apartado se explicarán sus principios de funcionamiento y se definirá cada una de sus partes.

#### 4.3.1. Principios de funcionamiento del sistema

El diseño de las unidades de levitación vertical se basa en la creación de una fuerza mecánica producida por el fenómeno de atracción magnética entre un perfil comercial de acero en forma de L y fuentes de flujo magnético. El fenómeno descrito es la tendencia del sistema a alcanzar la posición de mínima reluctancia, es decir, el punto en el que no hay entrehierro.

En primer lugar, se dispone de un conjunto de imanes permanentes que generan los polos magnéticos deseados, cuya principal función es la generación de la mayor parte de la fuerza de atracción magnética. Sin embargo, al ser una fuente de excitación que genera inestabilidad, al no poderse regular el campo magnético generado por éstos, se necesita otro tipo de fuente que sea capaz de variar este campo magnético.

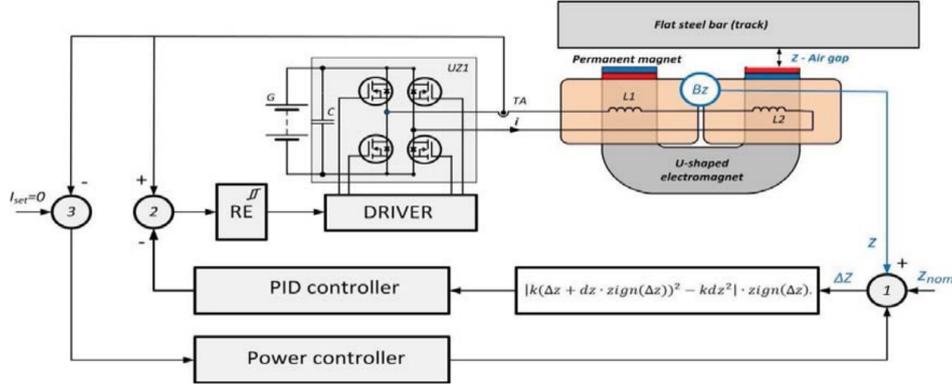
Para lograr controlar la inestabilidad generada por los imanes permanentes, se dispone de un bobinado, que al aplicarle corriente, este aumenta o disminuye la cantidad de flujo magnético que circula por el circuito, variando la fuerza de atracción dependiendo del sentido de la corriente, corrigiendo la posición del vehículo frente a las perturbaciones externas que puedan aparecer.

Con el empleo de ambos tipos de fuentes, logramos un sistema de bajo consumo, ya que el único consumo de corriente se produce con la aparición de las acciones correctoras por parte del bobinado, es decir, limitamos el consumo únicamente al sistema de control. Este tipo de sistema es necesario ya que al funcionar en condiciones de vacío, la disipación de calor es menor, y un consumo menor de corriente provoca una menor generación de calor por efecto Joule.

Además, en el circuito encontramos dos tipos de elementos pasivos. Por una parte, para conducir y reforzar las líneas de campo, se tiene un núcleo ferromagnético, donde se sitúan las fuentes de excitación magnética. Existen diferentes maneras de generar la disposición de estos elementos en el circuito, y será parte del estudio obtener el método de aplicación más eficiente. Estos elementos son los que estarán situados en el vehículo. Por otra parte, se dispone de una placa plana que va situada en la vía. Esta placa se encuentra enfrentada al resto de elementos y también debe estar hecha de un material ferromagnético para poder conducir las líneas de campo del circuito y producir la fuerza de atracción deseada.

Por último, al desear un circuito en el que no se produzca ningún tipo de rozamiento, tendremos una zona de entrehierro entre lo que conocemos como la unidad de levitación (conjunto formado por las fuentes

de excitación magnéticas y por el núcleo ferromagnético) y la placa situada en la vía. Un ejemplo de un sistema HEMS lo podemos encontrar en la Figura 4.11, con un sistema de control ya integrado.



**Figura 4.11:** Esquema funcional de una unidad de levitación (Grebennikov, Lebedev et al., 2018)

#### 4.3.2. Modelo dinámico del sistema

El modelo está basado en un sistema de ecuaciones diferenciales que describe los procesos eléctricos y mecánicos del sistema:

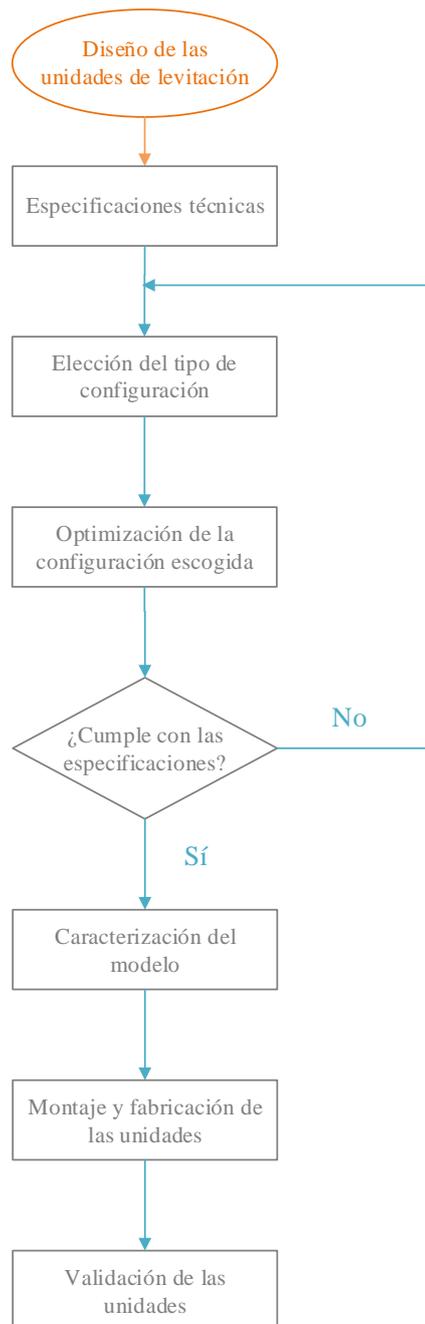
$$\begin{cases} V = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} \\ m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = F_{EM}(i, z) + F_{PM}(z) - m \cdot g - f_z \end{cases} \quad (9)$$

Donde  $i$  es la corriente en el devanado,  $z$  es el entrehierro,  $L$  es la inductancia generada por el flujo magnético,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $m$  es la masa del objeto de levitación, en nuestro caso el peso del vehículo,  $R$  es la resistencia del cobre,  $V$  es la tensión de alimentación del devanado,  $F_{EM}(i, z)$  es la fuerza electromagnética,  $F_{PM}(z)$  es la fuerza del imán permanente y  $f_z$  es la fuerza perturbadora.

La información necesaria para el modelado son los resultados del cálculo electromagnético (Fuerza electromagnética  $F_{EM}(i, z)$  como función de la corriente y del entrehierro, fuerza de gravitación del imán permanente como función del entrehierro  $F_{PM}(z)$  y el cálculo de la inductancia  $L$ ) realizado mediante el método de elementos finitos (FEMM). (Grebennikov, Kononov et al., 2018)

## 5. Diseño de las unidades de levitación

En este apartado se va a mostrar el proceso llevado a cabo para el diseño de las unidades de levitación. Sin embargo, es necesario definir previamente la metodología a seguir, englobando tanto la parte que se llevará a cabo en el diseño como la posterior validación y fabricación de dichas unidades. Para ello, en el flujograma de la Figura 5.1 se definen las distintas etapas a seguir:



**Figura 5.1:** Flujograma del diseño de las unidades de levitación

## 5.1. Justificación de diseño

### 5.1.1. Programa de cálculo empleado

El programa de elementos finitos empleado para la obtención del modelo de las unidades es el JMAG, en concreto el software JMAG-Designer. Este programa es utilizado principalmente para la simulación y caracterización de máquinas asíncronas rotativas. Sin embargo, para nuestro estudio vamos a abstraer varios de los conceptos empleados en dichos estudios aplicándolos a nuestro circuito magnético.



**Figura 5.2:** Logo del programa JMAG (JMAG, 2023)

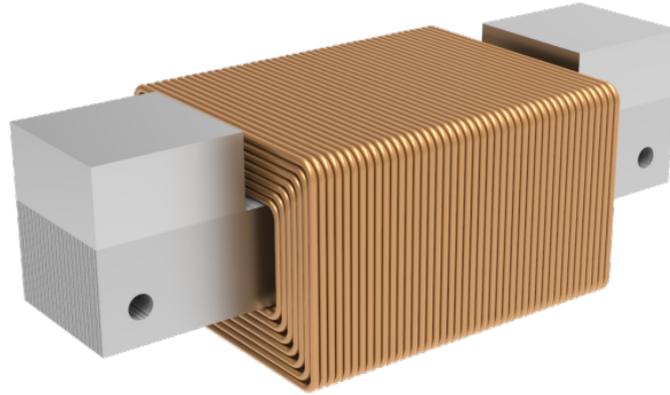
Este programa permite la simulación de los modelos tanto en 2D como en 3D. Esto será importante tenerlo en cuenta, debido al elevado coste computacional que conlleva el método de los elementos finitos. Por lo tanto, para un proceso que será repetitivo como es la elección y optimización del diseño se utilizarán las simulaciones en 2D, ya que conlleva una menor carga computacional, y la caracterización del modelo elegido se llevará a cabo en 3D, ya que aporta una información más detallada del funcionamiento de las unidades.

Para este proceso, el equipo dispone de un ordenador de elevado rendimiento, en el que va instalado un procesador AMD Ryzen 9 de 16 núcleos y 32 hilos que nos permitirá agilizar las simulaciones, al ser un programa que permite trabajar con varios núcleos en paralelo, resolviendo distintos casos a la vez.

### 5.1.2. Propuestas de diseño

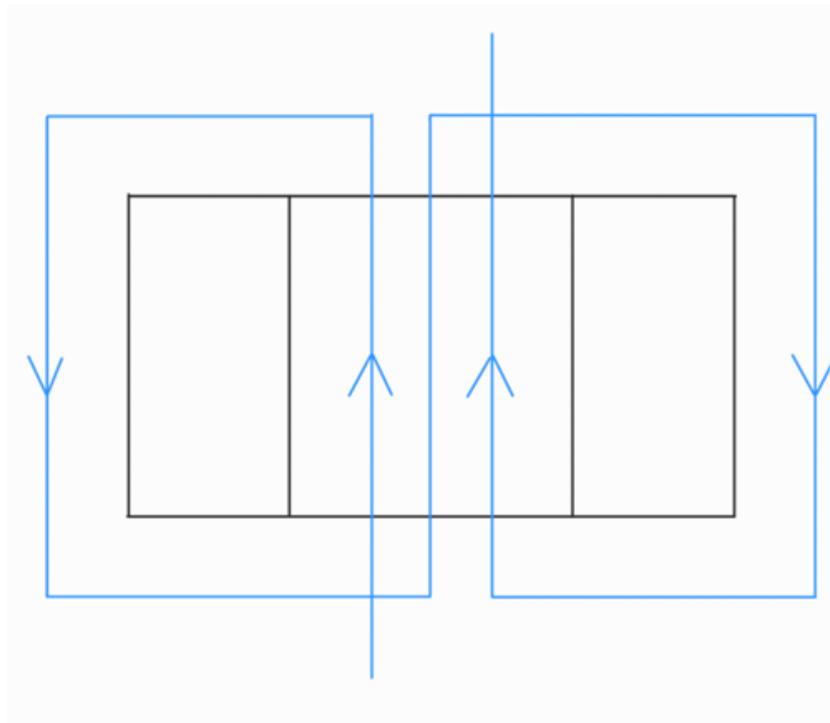
Una vez desarrollados los principios de la tecnología HEMS, para comprometerse con los requisitos establecidos, se han analizado tres opciones diferentes durante el proceso de diseño con el fin de garantizar la fiabilidad, la optimización y la eficiencia. Previamente, se explicará el diseño empleado el año pasado.

En la séptima generación se empleó la configuración mostrada en la Figura 5.3, esta elección de diseño proponía una única bobina situada en el núcleo del módulo de levitación, lo que ofrecía una disposición mecánica más eficiente, al ser más fácil de arrollar el bobinado, y limitando el movimiento mediante dicho núcleo, a expensas de una mayor cantidad de pérdidas de flujo en el entrehierro.



**Figura 5.3:** Unidad de levitación empleada en la séptima generación de Hyperloop UPV (Hyperloop-UPV, 2022)

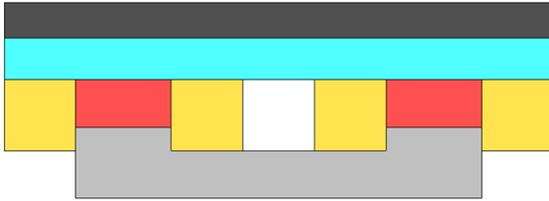
Por lo tanto, para este año, se ha planteado la opción de disponer dos bobinas conectadas en serie como se muestra en el esquemático de la Figura 5.4, localizándolas en el límite entre el módulo y la zona de entrehierro, aumentando el nivel de eficiencia pero apareciendo ciertos problemas mecánicos a resolver.



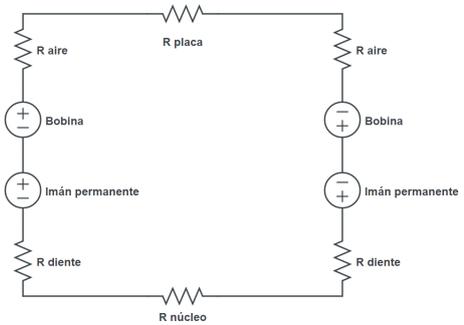
**Figura 5.4:** Esquemático del bobinado de dos bobinas en serie

Las tres propuestas tratan de resolver dicho problema mecánico, con la configuración de bobinado escogida, aportando una solución eficiente, optimizada y fiable.

La primera opción tenida en cuenta es colocar los imanes permanentes a ambos lados de la unidad de levitación, situados encima de dos dientes de acero, encargados de sujetar los electroimanes. En la Figura 5.5 se muestra un ejemplo, junto a su circuito equivalente:



a) Unidad de levitación con imanes permanentes situados a ambos lados, con dientes de acero



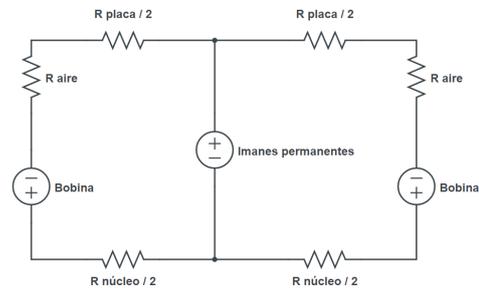
b) Circuito equivalente

**Figura 5.5:** Primera propuesta para la unidad de levitación

Se ha analizado una segunda opción, ubicando los imanes permanentes en el centro del núcleo de acero y los electroimanes ubicados como en la primera opción, pero sólo sujetos por los dientes de acero. Esta distribución puede verse en la Figura 5.6. En este caso, las fuentes de los imanes permanentes y las bobinas se encuentran en paralelo en vez de estar en serie, ramificando el flujo en dos caminos:



a) Unidad de levitación con imanes permanentes situados en el centro del núcleo de acero, con dientes de acero.



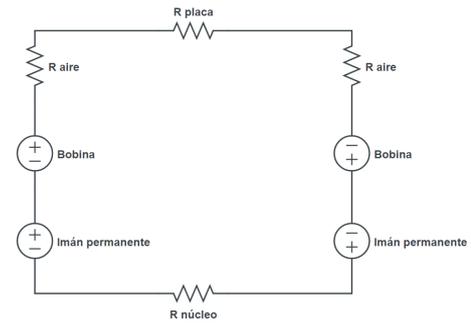
b) Circuito equivalente

**Figura 5.6:** Segunda propuesta para la unidad de levitación

Por último, la tercera propuesta es similar a la primera, sin embargo no dispone de dientes en el núcleo que sustenten a las bobinas, sino que estas están dispuestas alrededor de los imanes permanentes:



a) Unidad de levitación con imanes permanentes situados a ambos lados del núcleo de acero, sin dientes de acero.

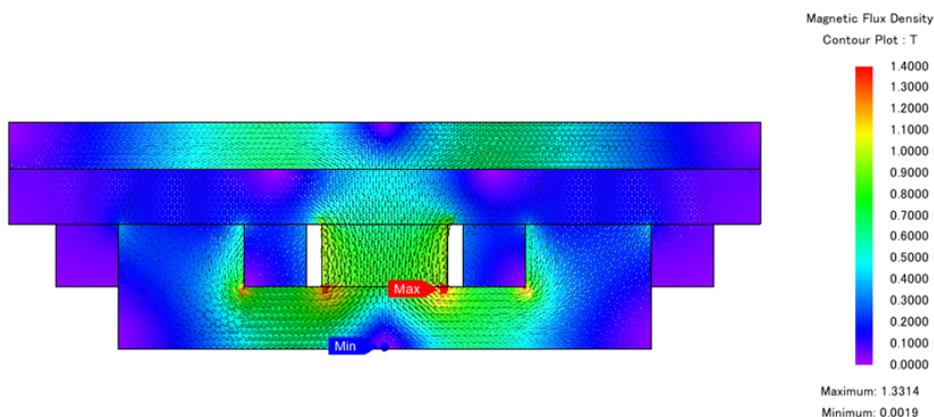


b) Circuito equivalente

**Figura 5.7:** Tercera propuesta para la unidad de levitación

En el caso de la primera propuesta, cumple la mayoría de los requisitos, pero no se ajusta a los requisitos de altura, ya que debe tener un máximo de 70 mm en la dirección vertical, y en su configuración óptima alcanza los 72,5 mm de altura. También presenta algunos problemas mecánicos, ya que tanto los dientes de acero como los imanes permanentes sujetaban los electroimanes. Además, al aumentar la reluctancia, debido al tramo del diente en el núcleo, se produce un decrecimiento en el valor de fuerza a máxima corriente debido a que se alcanza antes la zona de saturación.

La segunda propuesta tiene una mejor distribución del flujo magnético, ya que el flujo se distribuye en dos trayectorias paralelas, permitiendo trabajar en la zona lineal de la curva de imanación, sin entrar en saturación, como se muestra en la Figura 5.8. El flujo magnético máximo disminuye hasta un máximo de 1,33 T en el caso nominal, y también cumple el requisito de altura. Sin embargo, este diseño no cumple los requisitos de fuerza de levitación y peso nominales, ya que a una distancia de levitación de 17.5 mm, la fuerza máxima obtenida es de 466.38 N, y el peso rondaba los 13.48 kg, muy lejos del requisito establecido.



**Figura 5.8:** Flujo magnético distribuido en dos trayectorias

Por último, la tercera propuesta formada por dos imanes permanentes por lado, cumple todos los requisitos establecidos y daba solución a los problemas de altura y peso que aparecieron durante el proceso de diseño.

Aunque esta solución presenta algunos problemas mecánicos por resolver, ya que las bobinas rodean a los imanes permanentes en lugar del núcleo de acero y el fabricante no puede arrollar las bobinas sobre los imanes permanentes.

Todos los datos utilizados para elegir la decisión óptima se ilustran en la Tabla 5.1:

**Tabla 5.1:** Comparación de las tres opciones estudiadas

	Profundidad [mm]	Imanes ud	Peso [kg]	Fuerza (I=0 [A]) [N]	Fuerza (I=55 [A]) [N]	Fuerza/Peso para (I=0 [A]) [N/kg]	Fuerza/Peso para (I=55 [A]) [N/kg]
1ª opción	80	4	5.46	678.86	1066.73	124.33	195.38
2ª opción	120	3	13.48	466.38	1134.72	34.60	84.18
3ª opción	80	4	4.10	674.18	1093.61	164.43	266.73

Cabe resaltar que todos estos estudios se realizaron a la distancia nominal prevista de 19 mm.

En resumen, de las configuraciones planteadas se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Por una parte, la primera opción cumple con la mayoría de los requisitos, dando una solución mecánica aceptable al poder arrollar las bobinas sobre el diente del núcleo, pero no cumple con los requisitos de altura,
- Por otra parte, la 2ª opción no cumplía los requisitos de peso y fuerza mínima, aunque ofrecía una mejor solución mecánica, además de ofrecer un punto de funcionamiento del campo magnético fuera de la zona de saturación a máxima corriente.
- La 3ª opción es la más eficiente, dando un mayor valor de Fuerza/Peso, para ambos casos de estudio, cumpliendo con todos los requisitos mecánicos y de control.

En definitiva, la 3ª opción es la opción seleccionada, a expensas de resolver los problemas mecánicos que presenta el hecho de arrollar las bobinas alrededor de imanes permanentes en vez de ir arrollado alrededor del núcleo ferromagnético.

## 5.2. Optimización de la configuración escogida

El diseño de las unidades de levitación vertical se basa en la creación de una fuerza mecánica producida por el fenómeno de atracción magnética entre un perfil comercial de acero en forma de L y fuentes de flujo magnético.

En la tecnología HEMS, los polos magnéticos son creados por imanes permanentes, que proporcionan la la mayor parte del flujo magnético, compensando la fuerza del peso del vehículo. Además, mediante electroimanes y aplicando corriente a sus bobinas, el consumo de energía se limita únicamente al sistema de control. Dichos electroimanes modifican el flujo magnético para mitigar las perturbaciones, estabilizando el vehículo en su posición nominal de levitación.

Un primer vistazo del diseño obtenido se muestra en la Figura 5.9:



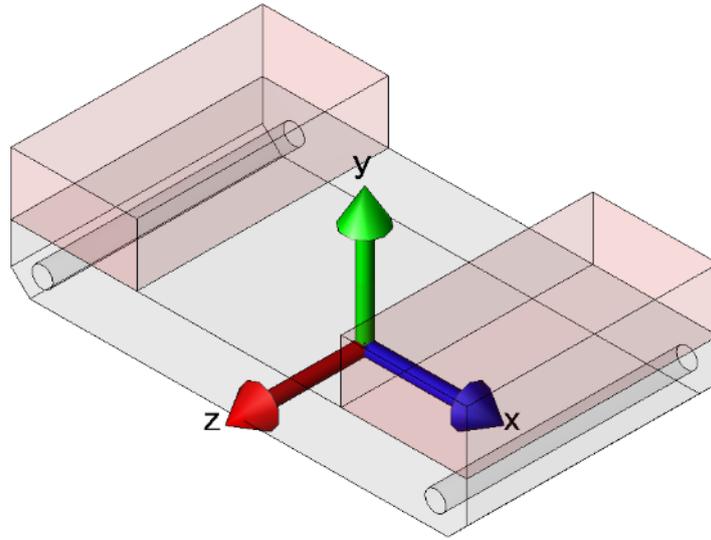
**Figura 5.9:** Unidad de levitación vertical electromagnética

En resumen, cuatro partes diferentes son esenciales en el desarrollo de la tecnología HEMS:

- Los imanes permanentes, que producen el flujo magnético constante, convirtiendo el vehículo en un sistema de bajo consumo de corriente.
- Los electroimanes, mediante bobinas a las que se le aplica corriente para mitigar las perturbaciones.
- El núcleo ferromagnético que crea un camino para el flujo magnético y genera la fuerza mecánica necesaria.
- La placa de material ferromagnético donde ocurre el fenómeno de atracción que es parte de la infraestructura del tubo.

### 5.2.1. Optimización de los imanes permanentes

Para realizar las simulaciones necesarias para la optimización de la geometría de las partes primarias de las unidades de levitación, el sistema de referencia utilizado se muestra en la Figura 5.10; siendo el eje X la longitud, el eje Y la altura y el eje Z la dimensión del espesor.



**Figura 5.10:** Sistema de referencia global rectangular utilizado en las simulaciones

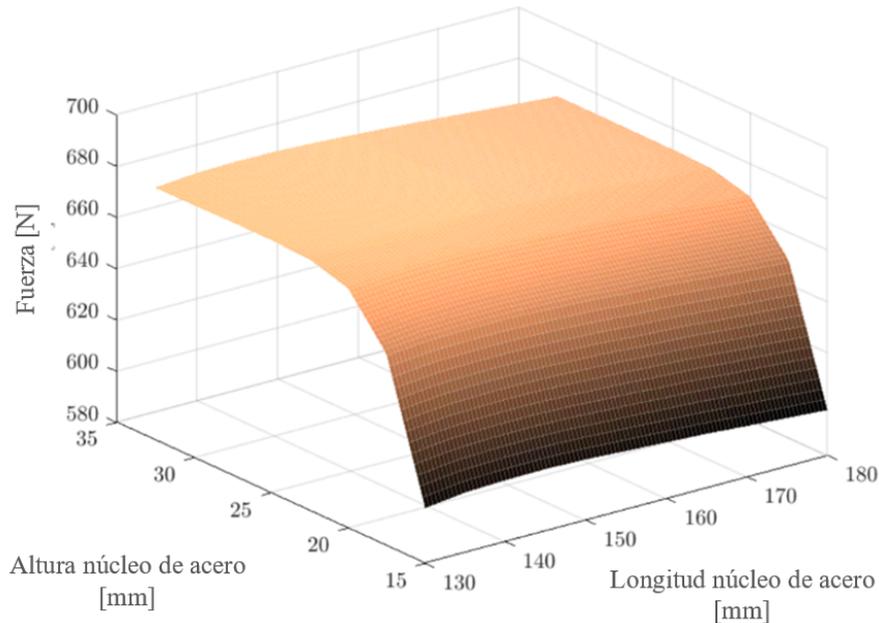
En primer lugar, cabe destacar que los imanes permanentes utilizados son el modelo NdFeB N42. Se trata de un modelo comercial, en lugar de emplear un modelo personalizado, por razones presupuestarias y de cumplimiento con el calendario de producción. Un resumen de las características de los imanes permanentes se muestra en la Tabla 5.2:

**Tabla 5.2:** Características de los imanes permanentes (Supermagnete, 2022)

Parámetro	Valor
Material	NdFeB
Forma	Bloque
Tamaño	40x40x20 [mm]
Superficies polares	40x40 [mm]
Sentido de magnetización	Eje 20 [mm]
Magnetización	N42
Tipo de fabricación	Sinterizado
Recubrimiento	Niquelado (Ni-Cu-Ni)
Límite de temperatura en servicio	80 [°C]
Remanencia ( $B_r$ )	12900-13200 [G], 1.29-1.32 [T]
Coercitividad ( $H_c$ )	10.8-12.0 [kOe], 860-955 [kA/m]

Dado que la fuerza de levitación mínima por unidad de levitación es de 500 N/unidad, se estudió la cantidad de imanes permanentes a disponer en la unidad. Según los resultados obtenidos, se dedujo que debían colocarse cuatro imanes permanentes en la dimensión longitudinal del núcleo de acero. La Figura

5.11 ilustra la fuerza generada por los cuatro imanes permanentes, considerando una altura constante del perfil en forma de L de 15 [mm] de espesor.



**Figura 5.11:** Estudio de la fuerza generada por cuatro imanes permanentes por unidad de levitación en función de la altura y la longitud del núcleo de acero

Además, se puede observar que para el estudio realizado, se supera con creces el valor de los 500 N de fuerza, sin ser muy relevante en este caso las dimensiones del núcleo, ya que en el rango en el que trabajamos, nos serviría cualquier dimensión. Sin embargo, en los estudios en 2D no se tienen en cuenta gran parte de las pérdidas de flujo en la unidad. Por lo tanto, en este punto es bueno tener una cantidad de fuerza sobrante ya que como se podrá ver en los análisis en 3D, estos valores de fuerza se verán reducidos.

### 5.2.2. Optimización del núcleo ferromagnético

Para el núcleo de acero laminado, el material utilizado es M400-50A, seleccionado debido a su alta permeabilidad magnética, necesaria para crear el camino a las líneas de campo magnético.

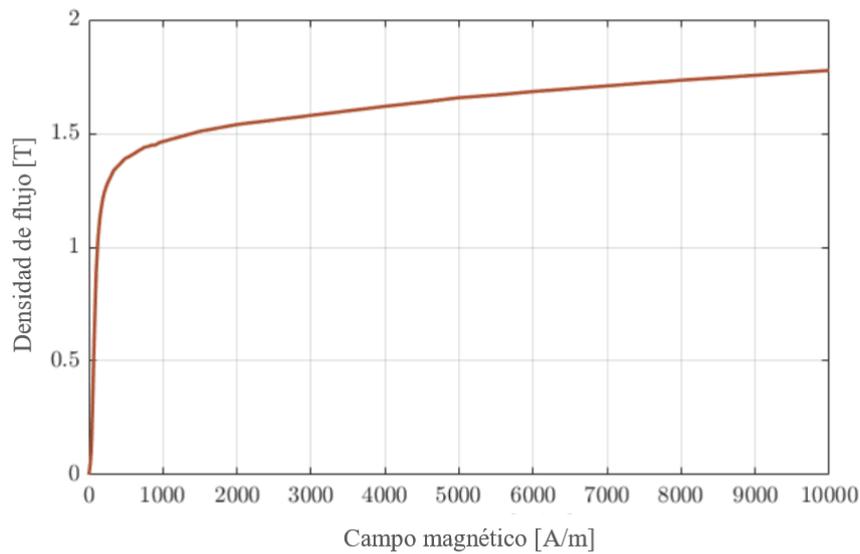
Los aceros eléctricos se definen en la norma DIN EN 10106 en espesores de 0,35, 0,5, 0,65 y 1,0 mm. La designación M400-50A se lee como M para acero magnetizable con pérdidas de hierro máximas de 4 W/kg (400), 50 para un espesor de 0,5 mm y A para granos no orientados. El M400-50A está aleado con Si y Al. (Laakso et al., 2020).

Las características principales de este tipo de acero se encuentran representadas en la Tabla 5.3:

**Tabla 5.3:** Propiedades y elementos de aleación del acero eléctrico M400-50A (Laakso et al., 2020)

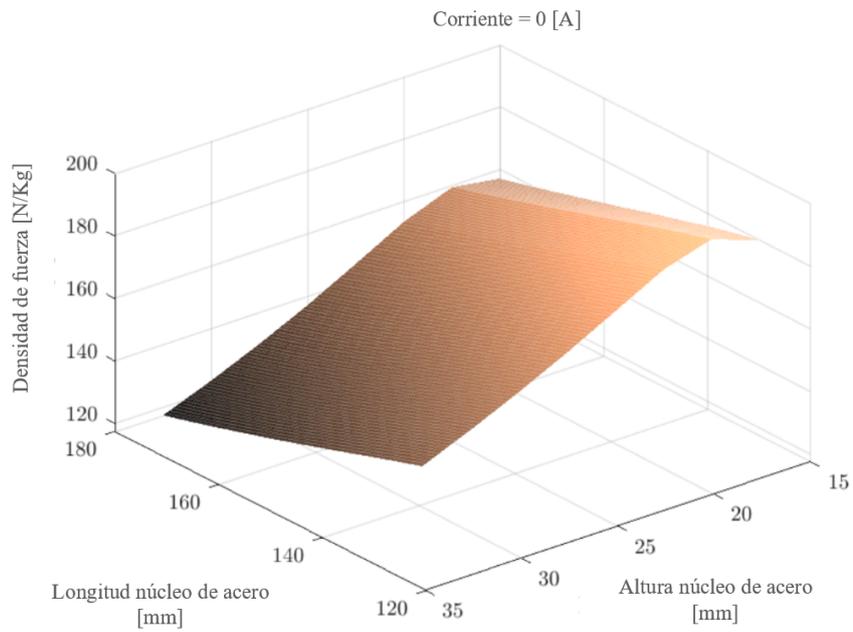
Parámetro	Valor	Unidades
Módulo de Young	200-210	[GPa]
Conductividad térmica a 100 °C	25	$[\frac{W}{m \cdot K}]$
Densidad	7700	$[\frac{Kg}{m^3}]$
Contenido de Carbon	$\leq 0.005$	[wt. %]
Contenido de Si + Al	$< 2.8$	[wt. %]

Además, en la Figura 5.12 se puede ver la curva de histéresis, también conocida como la curva B-H:

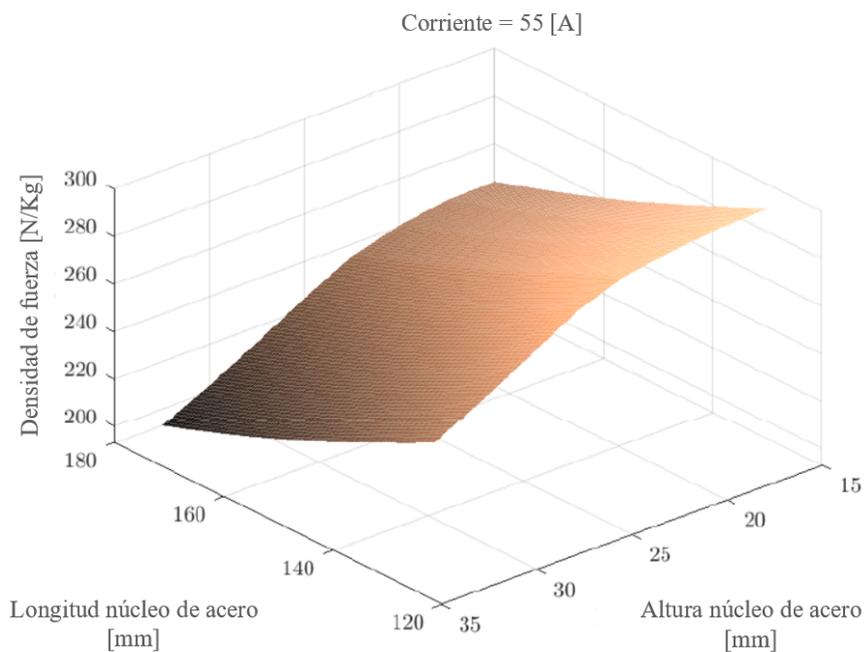

**Figura 5.12:** Curva B-H del acero eléctrico M400-50A (JMAG, 2023)

Como la combinación de dos de los imanes debía ocupar la misma longitud que el espesor del núcleo de acero, y como se ha visto previamente, es necesario emplear cuatro imanes permanentes para producir la fuerza de compensación del peso del vehículo, el espesor total para el núcleo de acero se fija en 80 mm.

Una vez obtenidas la longitud del imán permanente y el grosor del núcleo de acero, se realizó una optimización paramétrica de la densidad de fuerza para determinar las dimensiones óptimas de altura y longitud del núcleo. Este estudio se representa en las Figuras 5.13 y 5.14:



**Figura 5.13:** Densidad de fuerza para  $I = 0$  A en función de la altura y la longitud del núcleo de acero



**Figura 5.14:** Densidad de fuerza para  $I = 55$  A en función de la altura y la longitud del núcleo de acero

De estas gráficas se puede extraer que, al reducir tanto la altura como la longitud del acero se logra alcanzar niveles mayores de densidad de fuerza. Esto es debido a la reducción de la reluctancia del núcleo

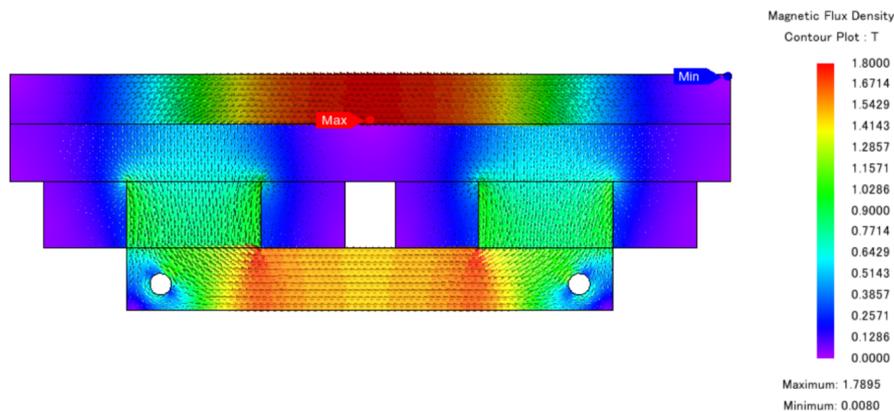
de acero, lo que produce una subida en el flujo magnético y por tanto, una subida en la fuerza, y una reducción en el peso debido a la bajada de dichas dimensiones.

Sin embargo, se puede observar la llegada a la zona de saturación entre 15 y 20 *mm* de altura y entre los 130 y 150 *mm* de longitud. Como el objetivo es alcanzar la máxima fuerza posible, y al circular corriente continua por las bobinas, las pérdidas en la zona de saturación son mínimas, pudiendo trabajar en esta zona sin afectar al funcionamiento de la unidad.

Estos análisis se realizaron antes de incluir los orificios de anclaje; por tanto, la pérdida de fuerza debida a su implantación todavía no se había considerado. Estos orificios, debido a los requerimientos mecánicos que planteaba su soporte, debían ser unos taladros de métrica M6. Además, el centro del orificio debía estar situados a una altura mínima de 5 *mm* con respecto a la superficie inferior del núcleo, y a una distancia mínima de otros 5 *mm* respecto a su superficie lateral, para no producir un elevado concentrador de tensiones en la zona y que tanto el núcleo como el soporte evitasen tener problemas mecánicos.

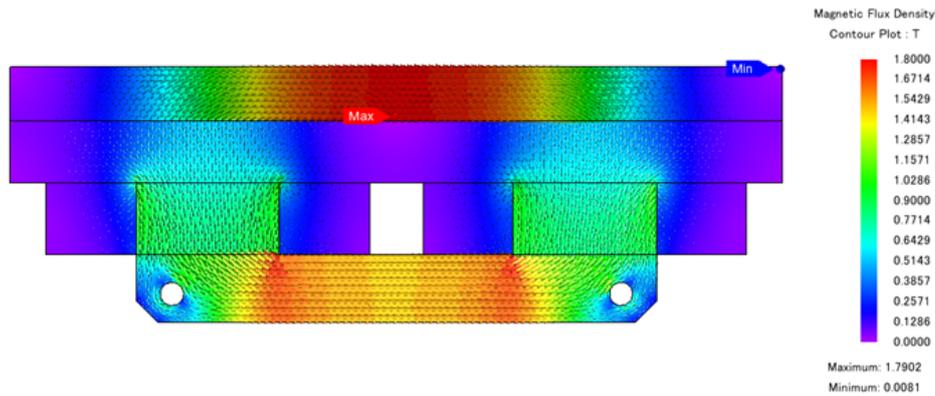
Estos orificios además ramificaban en dos zonas el flujo a su alrededor. Si se estrecha demasiado uno de los dos caminos, situando el orificio justo en la zona por donde atraviesa el flujo, se entra en zona de saturación a una corriente más baja de lo esperada, lo que disminuye el rango de control en el que se trabaja.

Para analizar este suceso, se hizo un análisis de la cantidad de flujo que atravesaba la unidad, que se puede observar en la Figura 5.15:



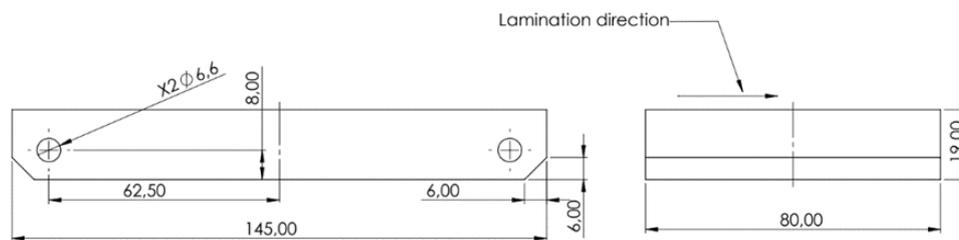
**Figura 5.15:** Gráfico de contorno del flujo magnético que atraviesa la unidad de levitación con los orificios realizados sobre el núcleo de acero

En la imagen se puede observar un fenómeno electromagnético conocido. Las líneas de campo magnético tienden a ir por la longitud media del núcleo, lo que nos permite realizar cortes en las esquinas para reducir peso en la unidad, y de este modo seguir aumentando la densidad de fuerza. Este estudio se muestra en la Figura 5.16:



**Figura 5.16:** Gráfico de contorno del flujo magnético que atraviesa la unidad de levitación con los cortes realizados sobre el núcleo de acero

Se puede observar que el flujo magnético no cambia drásticamente al incluir los orificios, y la fuerza generada disminuye sólo un 0,0016 %. Además, los cortes ayudarán a aumentar la densidad de fuerza, al reducir el peso de la unidad. Con estos estudios, las dimensiones geométricas finales del yugo de acero laminado se muestran en la Figura 5.17:



**Figura 5.17:** Dimensiones geométricas finales del núcleo de acero en *mm*

### 5.2.3. Optimización del bobinado

Como ya se ha comentado previamente, para obtener la distribución de las bobinas, se consideraron dos opciones: situar una sola bobina en el centro del núcleo de acero o colocar dos bobinas en el límite de la unidad de levitación.

Por un lado, para la trayectoria del flujo magnético generado por una única bobina situada en el centro del de acero, los imanes permanentes actúan como una zona de aire, lo que aumenta la reluctancia del circuito magnético y reduce la eficacia.

Mientras que con la segunda opción, la reluctancia de la trayectoria del flujo magnético se reduce, ya que las bobinas están situadas en el límite de la unidad, produciendo una menor cantidad de pérdidas de flujo magnético, proporcionando una distribución más eficiente.

Por lo tanto, se conectan dos bobinas en serie para aumentar o disminuir el flujo magnético, dependiendo de si la corriente fluye a través de las bobinas en una dirección o en la opuesta.

Para calcular el área necesaria para las bobinas se ha seguido la Ecuación 10, siendo  $S_{conductor}$  la sección del cable,  $N_{vueltas}$  el número de vueltas de cada bobina y el  $fill_{factor}$  o factor de relleno una constante dada por el fabricante.

$$Area_{bobinado} = \frac{S_{conductor} \cdot N_{bobina}}{fill_{factor}} \quad (10)$$

Para el número de vueltas, al necesitar un máximo de 55 A, y una densidad de corriente de 16000 A · Vueltas entre las dos bobinas, podemos obtener el número de vueltas entre las dos bobinas:

$$N_{vueltas} = \frac{16000A \cdot V}{55A} = 290,91Vueltas \quad (11)$$

Siendo el número de vueltas por bobina:

$$N_{bobina} = \frac{N_{Vueltas}}{2} = 145Vueltas \quad (12)$$

Con estos datos, estimando para distintos tamaños de conductores y aplicando la Ecuación 10, con un  $fill_{factor}$  del 55 %, obtenemos las áreas disponibles de las que se dispone para la sección de bobinado:

**Tabla 5.4:** Cálculo del área de bobinado en función de la sección de cable y el  $fill_{factor}$

Tamaño de $S_{conductor}[AWG]$	Tamaño de $Area_{bobinado}[mm^2]$
12	654.91
13	583.13
14	518.69
15	462.55
16	411.83

Con estos datos, la opción a escoger debía ajustarse al espacio disponible, maximizando la sección de conductor al máximo posible, ya que al obtener una sección mayor, disminuye la resistencia del bobinado, como se puede observar en la ecuación de la resistencia mostrada en la Tabla 4.2, y de este modo el voltaje necesario decrece según la Ley de Ohm, enunciada en la Ecuación 13

$$V = I \cdot R \quad (13)$$

Siendo  $V$  el voltaje,  $I$  la intensidad de corriente y  $R$  la resistencia del cableado.

Sin embargo, los nuevos requisitos de fabricación impuestos tanto por el fabricante como por el equipo fueron los siguientes:

- Las bobinas deben estar separadas 5 *mm*.
- El factor de relleno adoptado debía ser inferior al 55 %.
- El diámetro de cable disponible era de 1.55 *mm*, incluido el aislamiento.

Con estos nuevos datos, se utilizó el software JMAG-Designer para estimar mejor el número de vueltas necesarias. El resultado se encuentra en la Tabla 5.5:

**Tabla 5.5:** Valores finales de las dimensiones del bobinado

Parámetro	Valor
Sección del conductor	1.55 <i>mm</i> <sup>2</sup>
Número de vueltas por bobina	143
Resistencia a 40°C por bobina	0.54 Ω

Además, para cumplir con el requisito de temperatura, se realizó un estudio del incremento de temperatura con la corriente que circula por las bobinas, obteniendo el incremento de resistencia.

Para la obtención del incremento de temperatura, el modelo no puede considerarse lineal, ya que la temperatura de la bobina aumenta exponencialmente cuando circula por ella una corriente constante durante un periodo de tiempo. Por ello, el estudio se realiza en condiciones adiabáticas, es decir, no hay transferencia de calor desde la bobina.

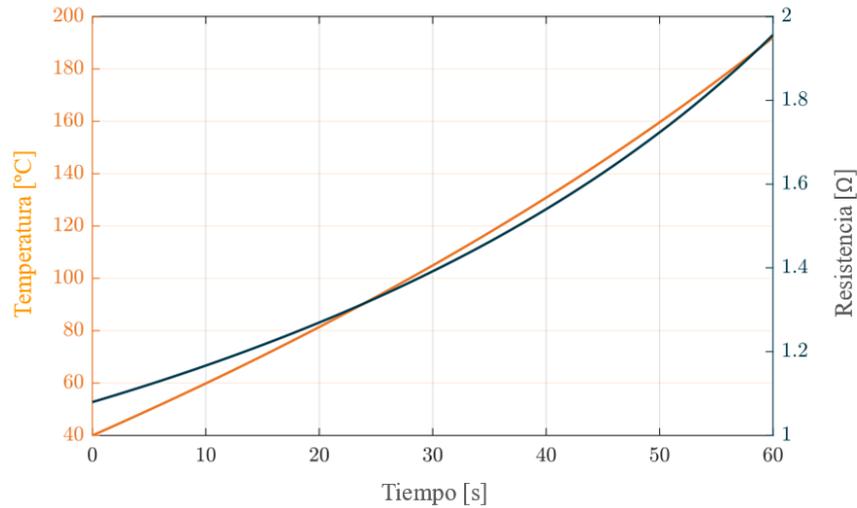
En el estudio se ha considerado la Ecuación 14, siendo  $T_0$  el valor inicial de temperatura de 40 °C,  $P$  el valor de potencia [W],  $\Delta t$  el incremento de tiempo [s],  $m$  la masa de la bobina [kg] y  $ct$  el coeficiente de transferencia con un valor de  $ct = 380 \left[ \frac{W}{k \cdot m} \right]$ :

$$T_f = T_0 + \frac{P \cdot \Delta t}{m \cdot ct} \quad (14)$$

Con el incremento de temperatura previamente calculado, la resistencia se obtiene siguiendo Ecuación 15, siendo  $\alpha$  el coeficiente de térmico y  $R_{i-1}$  representa la resistencia anterior:

$$R = R_{i-1} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \cdot T) \quad (15)$$

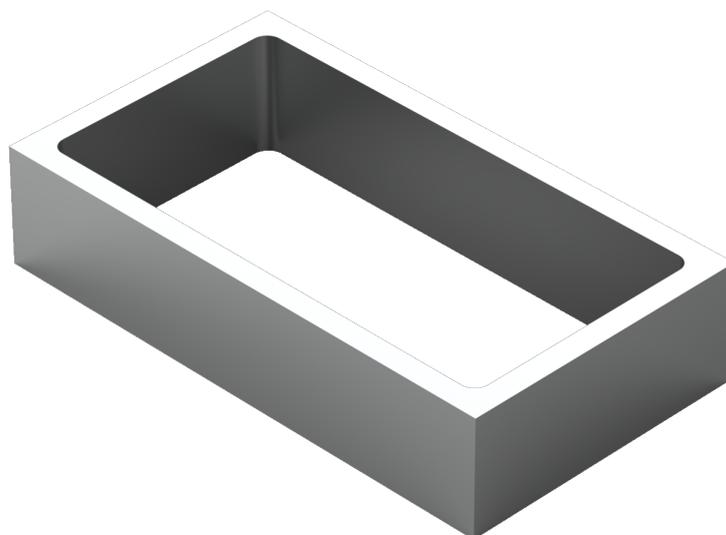
Utilizando ambas ecuaciones, y considerando el peor de los casos, 30 A circulando por las bobinas, la Figura 5.18 da los resultados que se muestran a continuación:



**Figura 5.18:** Incremento exponencial de temperatura y resistencia, con un incremento constante de tiempo

Como se observa en los resultados obtenidos, y dado que el aislamiento del cable tiene una temperatura máxima de servicio de 220 °C, la corriente máxima de 30 A sólo puede aplicarse a las bobinas durante 60 segundos. Sin embargo, al considerar condiciones adiabáticas, no se produce transmisión de calor. Posteriormente en las simulaciones, se emplea un modelo térmico mediante el software JMAG-Designer que permite aplicar unas condiciones de contorno más adecuadas.

Como se ha comentado previamente, ambas bobinas rodean los imanes permanentes. Dado que el bobinado no puede ir directamente a su alrededor, debe diseñarse una estructura que encierre los imanes permanentes, permitiendo la correcta colocación de las bobinas a su alrededor. La Figura 5.19 muestra la solución obtenida:



**Figura 5.19:** Fijación para las bobinas

Las bobinas se ensamblan en el elemento de la Figura 5.19, que se coloca alrededor de los imanes permanentes. Está fabricado en aluminio, un material no ferromagnético, por lo que evita perturbaciones en el flujo magnético. Este elemento también limita el desplazamiento de los imanes permanentes en el plano horizontal.

Sin embargo, esta distribución no limita el desplazamiento vertical de las bobinas. En el peor de los casos, la bobina genera fuerzas que se muestran en la Tabla 5.6:

**Tabla 5.6:** Fuerzas producidas por las bobinas

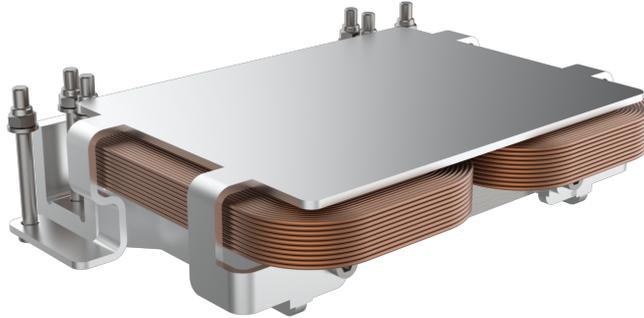
	1º Caso	2º Caso	3º Caso	4º Caso
Fuerza Eje X [ <i>N</i> ]	-29.33	-44.44	-60.33	-62.29
Fuerza Eje Y [ <i>N</i> ]	75.87	241.14	106.96	94.05
Fuerza Eje Z [ <i>N</i> ]	-1.58	-1.24	-0.32	-2.03
Valor absoluto [ <i>N</i> ]	81.36	245.20	122.80	112.83

Siendo los casos analizados:

**Tabla 5.7:** Casos para el estudio de la cubierta

Casos [ <i>ud</i> ]	Amplitud [ <i>A</i> ]	Entrehierro [ <i>mm</i> ]
1	55	17.5
2	55	9
3	-55	17.5
4	-55	9

Para evitar que se produzca este desplazamiento, se monta una cubierta conectada al soporte del HEMS, tal y como se muestra en la Figura 5.20 quedando restringidos todos los grados de libertad de las bobinas.

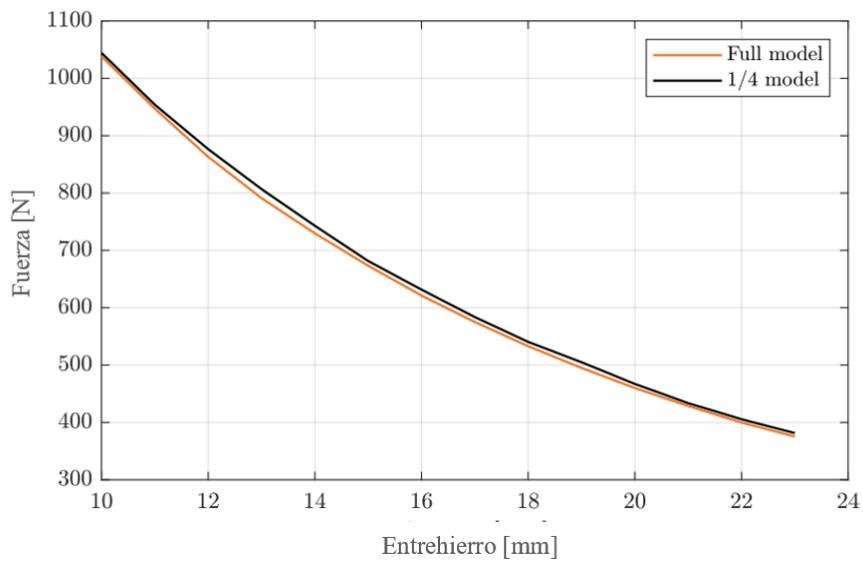


**Figura 5.20:** Unidad de levitación vertical junto a la cubierta de sujeción

### 5.3. Caracterización del modelo

Las simulaciones electromagnéticas se han realizado en el software JMAG-Designer. Mientras que todas las simulaciones realizadas para la optimización de la geometría y la selección de la propuesta de diseño se hicieron en 2D, las simulaciones de caracterización se ejecutan en 3D, ya que las simulaciones en 2D son demasiado optimistas, dado que no hay dispersión de flujo en el plano de profundidad.

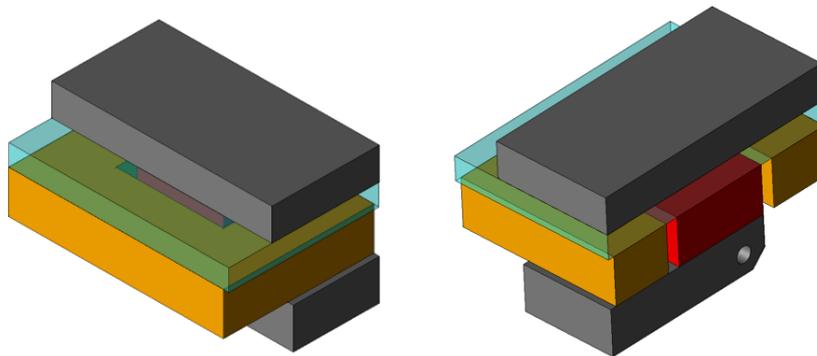
Por otra parte, se han considerado dos simetrías distintas para reducir el tiempo de cálculo. Para todo el proceso de caracterización, se ha utilizado un modelo de simetría 1/4, aunque carece de un segundo plano de simetría debido a la forma en L del perfil de acero. No obstante, como se muestra en la Figura 5.21, la diferencia entre el modelo completo y el modelo 1/4 supone un error máximo de cálculo del 1,96%.



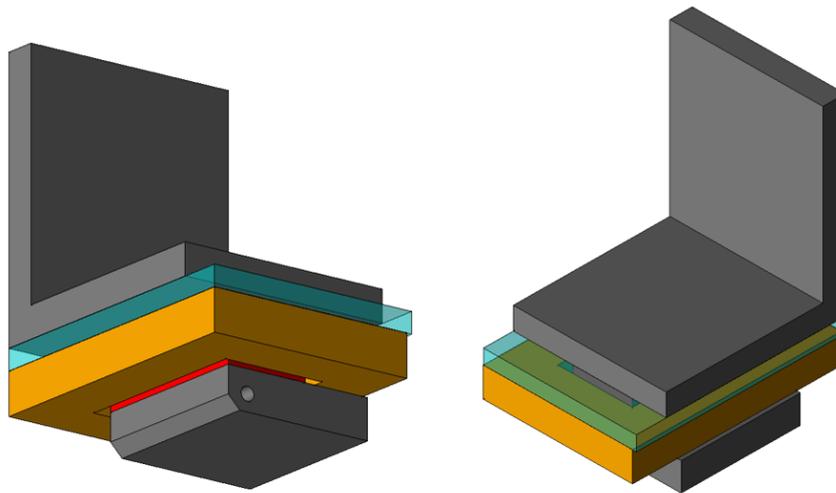
**Figura 5.21:** Comparación de los resultados entre la simetría de 1/4 del modelo y el modelo sin simetrías

Como puede observarse en la Figura 5.21, la diferencia es insignificante. Para el cálculo de las fuerzas horizontales, los resultados obtenidos con el modelo 1/4 del módulo de levitación difieren de los del perfil en forma de L, lo que no tiene sentido físico según la Ley de Acción y Reacción. En su lugar, se ha utilizado un modelo 1/2 para obtener los resultados.

En futuras simulaciones se utilizarán los modelos de las Figuras 5.22 y 5.23:



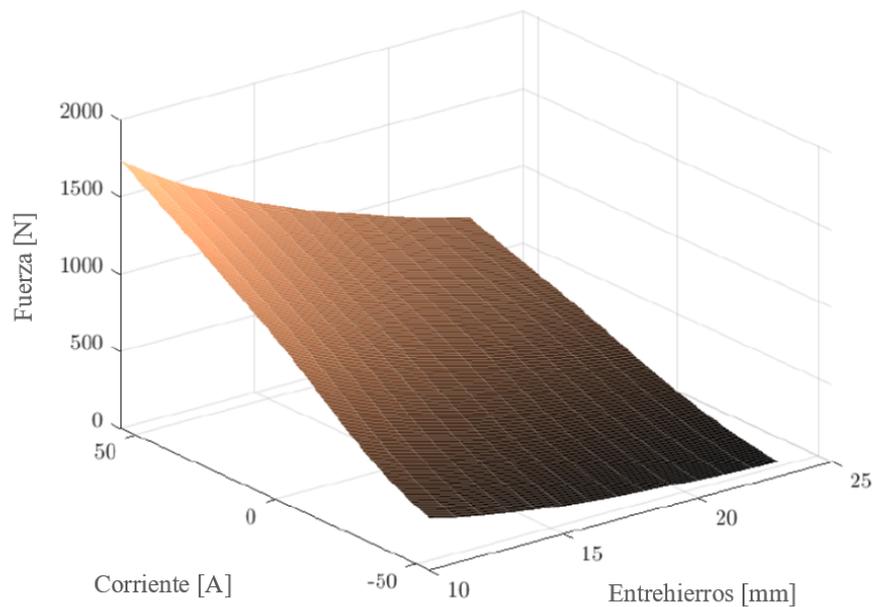
**Figura 5.22:** Modelo 1/4 utilizado para la caracterización de las unidades de levitación



**Figura 5.23:** Modelo 1/2 utilizado para la caracterización de las unidades de levitación

### 5.3.1. Fuerzas

Para la primera simulación, se ha realizado un barrido de entrehierros y corrientes para adquirir los valores de las fuerzas verticales, obteniendo el rango de control operativo de una sola unidad. Los resultados se muestran en la Figura 5.24



**Figura 5.24:** Mapa de la fuerza de levitación en función del entrehierro y de la amplitud

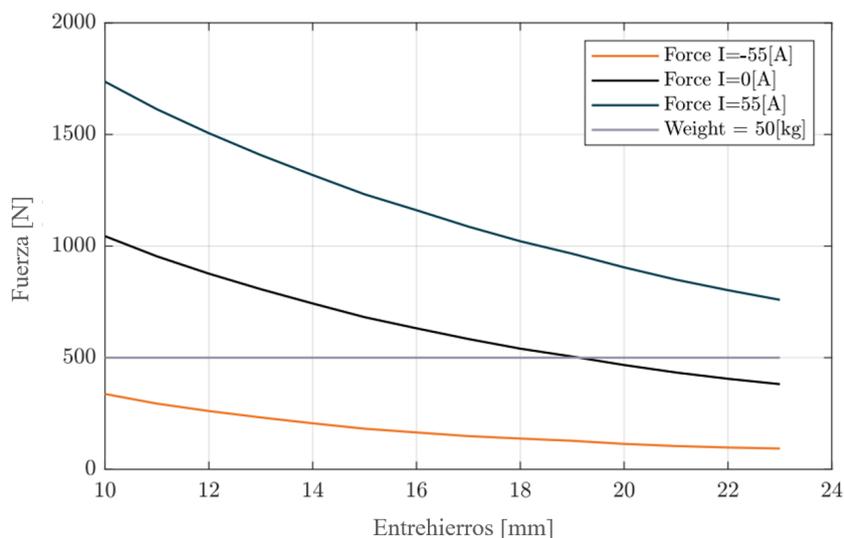
De estos datos, junto a la Ecuación 1, podemos obtener los rangos de control para los casos de máxima corriente respecto al caso de levitación nominal a 19 mm de entrehierro, es decir, el caso de corriente nula:

$$Control_{range}(I = 55) = 100 \cdot \frac{F(I = 55) - F(I = 0)}{F(I = 55)} = 100 \cdot \frac{965,812 - 504,942}{965,812} = 47,72\% \quad (16)$$

$$Control_{range}(I = -55) = 100 \cdot \frac{F(I = 0) - F(I = -55)}{F(I = 0)} = 100 \cdot \frac{504,942 - 127,749}{504,942} = 74,70\% \quad (17)$$

Como se muestra, el rango de control mínimo del 40 % se cumple para ambos casos extremos de corriente. Esto permite que el vehículo trabaje en una amplitud de corriente más baja, reduciendo el consumo de energía y la cantidad de temperatura producida, cumpliendo con el requisito de corriente nominal y creando un sistema más robusto frente a perturbaciones.

En el siguiente gráfico, se observan los casos de fuerza de levitación vertical para los tres casos de corriente estudiados previamente, con respecto a la horizontal del peso:



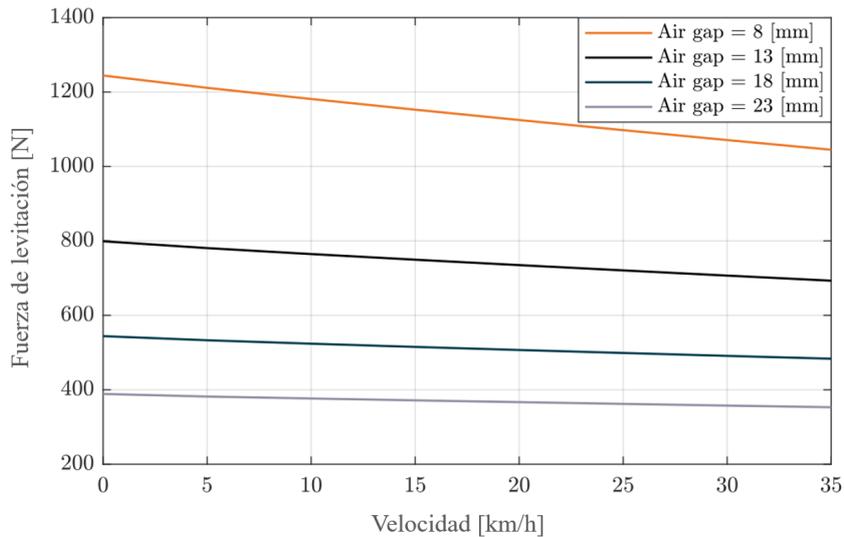
**Figura 5.25:** Fuerza de levitación vertical de un módulo de levitación para los casos extremos y nominal en comparación con 1/4 del peso del vehículo

Con este gráfico, se puede observar que el punto de corte entre la horizontal del peso y la curva del caso nominal cortan a una distancia de levitación de 19.65 mm, lo que cumple con los requerimientos establecidos. Además, también se puede observar como en los dos casos extremos, es decir, cuando pasa máxima corriente en un sentido o en otro, compensamos el peso del vehículo, lo que da una mayor robustez al sistema de control.

Además, se ha realizado el estudio de las fuerzas horizontales generadas por la unidad de levitación. Estas se han estudiado debido a la posible influencia que podía llegar a tener con las unidades de guiado horizontal, pudiendo restar fuerza a estas, disminuyendo su rango de control. Sin embargo, la fuerza

horizontal máxima generada por la unidad no llega a superar los 8 N de fuerza, por lo que sus efectos se consideran despreciables.

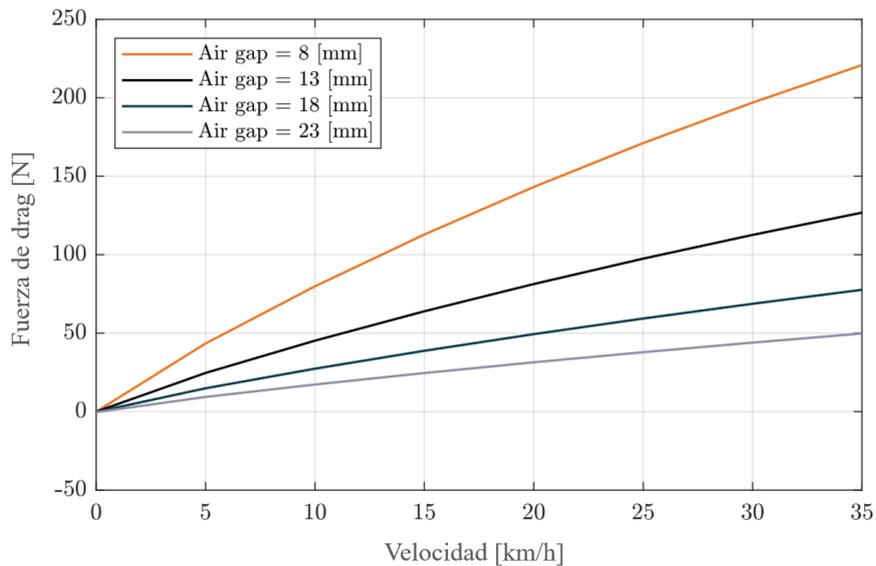
Siguiendo con los estudios de fuerza, es necesario comprobar el funcionamiento de la unidad en movimiento. Para ello, se ha realizado una simulación en régimen transitorio para caracterizar el comportamiento de los imanes permanentes en movimiento. Esta simulación permite determinar los efectos de las corrientes inducidas en los perfiles de acero en forma de L situados en el interior del tubo. La Figura 5.26 muestra la pérdida de fuerza de levitación por unidad al aumentar la velocidad.



**Figura 5.26:** Variación de la fuerza de levitación por unidad de levitación en función de la velocidad y del entrehierro

La Figura 5.26 muestra que, para la distancia nominal de levitación, la pérdida de fuerza es inferior al 11,56 %, que es inferior al rango de control obtenido en la simulación de fuerzas verticales, lo que significa que es controlable.

Por último, la Figura 5.27 muestra las fuerzas de drag generadas por unidad de levitación en la dirección de movimiento del vehículo, éstas son las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo:

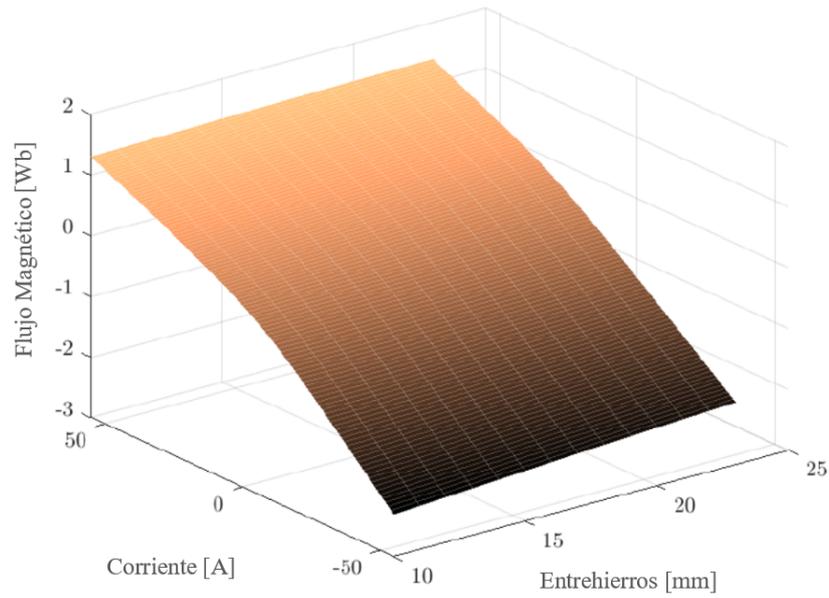


**Figura 5.27:** Variación de la fuerza de drag por unidad de levitación en función de la velocidad y del entrehierro

Estas fuerzas surgen como consecuencia de las corrientes inducidas en el perfil en L de la infraestructura. Esto es debido al campo magnético variable que se da al desplazarse la unidad, lo que provoca que estas corrientes surjan oponiéndose a la causa que las producen, según la ley de Faraday enunciada en la Ecuación 6. Estos datos se consideran para el estudio del motor de inducción lineal que lleva el vehículo, reduciendo su rango de control a medida que aumenta la velocidad.

### 5.3.2. Inductancias

Por lo tanto, para obtener los cálculos de inductancia, el software JMAG-Designer también calcula el flujo magnético a través de las bobinas, como se ilustra en la Figura 5.28.

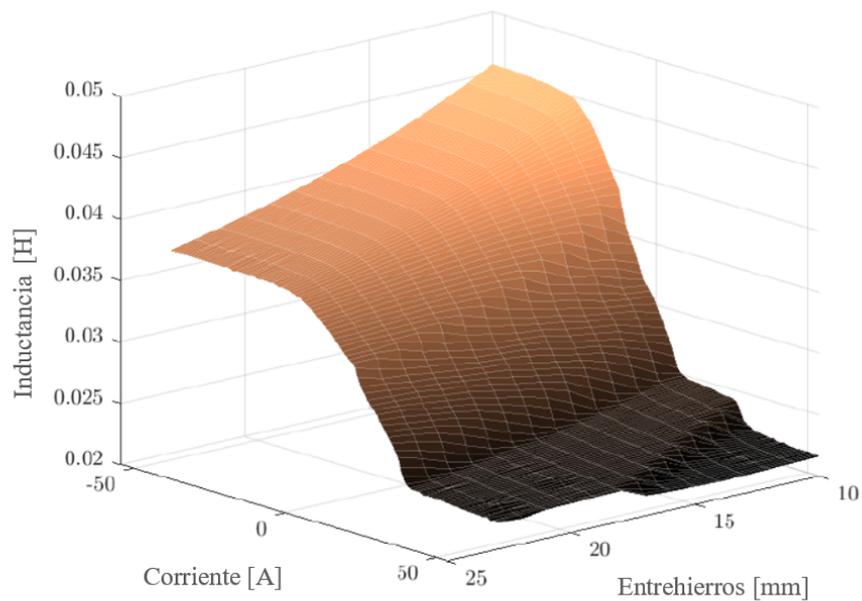


**Figura 5.28:** Mapa de flujo magnético en función de la corriente y del entrehierro para módulos de levitación vertical

A partir de los datos extraídos de la Figura 5.28 y de la siguiente Ecuación 18, donde  $L$  es la inductancia y  $\frac{d\phi}{dI}$  es la derivada del flujo de la corriente.

$$L = \frac{d\phi}{dI} \quad (18)$$

Obtenemos los resultados de la inductancia representados en la Figura 5.29



**Figura 5.29:** Mapa de inductancia en función de la corriente y del entrehierro para módulos de levitación vertical

De este estudio previo se pueden extraer algunas conclusiones. En primer lugar, cabe destacar que la influencia del entrehierro, para esta gama de valores operativos, es insignificante. Sin embargo, se puede observar que existe una dependencia de la corriente, alcanzándose la zona de saturación a una inductancia máxima de 35 mH.

Además, del modelo eléctrico expuesto en la Ecuación 9, se observa que al aumentar el valor de la inductancia, se produce una disminución en la derivada de la corriente. Por lo tanto, en los puntos de inductancia máxima, la corriente tardará más en llegar a su valor de referencia. Estos datos son importantes para el control, ya que en función de la inductancia calculada, es necesario corregir sus constantes, para hacer una acción más rápida.

### 5.3.3. Temperaturas

Para contrastar los resultados obtenidos con los resultados teóricos representados en la Figura 5.18, se ha realizado una simulación térmica en régimen transitorio. Con este tipo de estudio se pueden aplicar las condiciones de conducción y convección, modelizando la transferencia de calor entre los elementos de las unidades de levitación y rechazando la radiación ya que sus efectos son insignificantes, debido a que las unidades trabajaran en el interior de un tubo totalmente cerrado, sin la incidencia de la radiación solar.

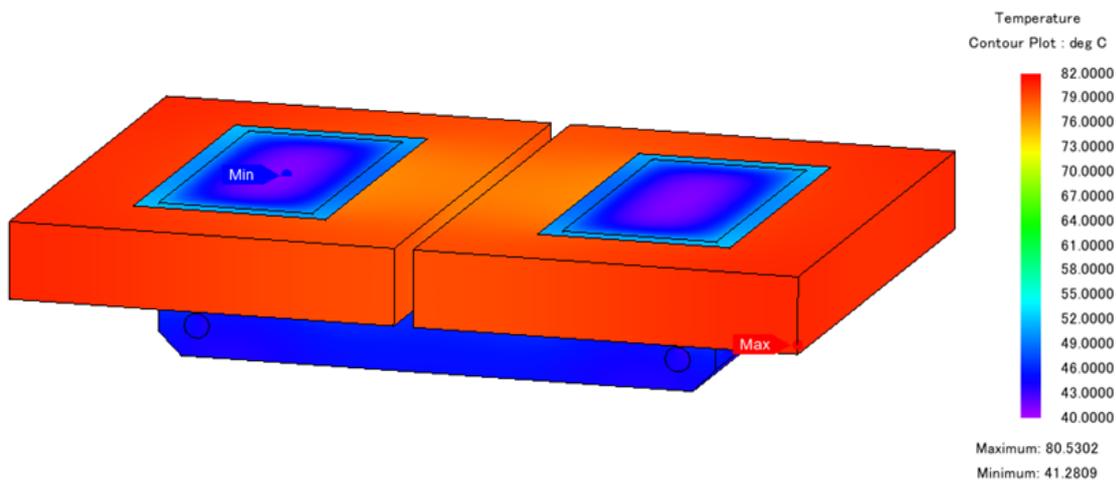
En el modelo térmico se han supuesto las siguientes condiciones de contorno:

- La temperatura inicial de los componentes del módulo de levitación es de 40 °C, al igual que la

temperatura del aire de referencia para la transferencia de calor por convección.

- Conductividad térmica entre elementos con una resistencia térmica de contacto de  $0.15 \text{ W}/^\circ\text{C}$ .
- Convección de los elementos al aire con un coeficiente de transferencia de calor de  $0.4 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , suponiendo el funcionamiento en un entorno de baja presión.
- Las fuentes de calor son las pérdidas de calor por efecto Joule en las bobinas y las pérdidas en el núcleo ferromagnético.

Los resultados se muestran en la Figura 5.30:



**Figura 5.30:** Variación de la temperatura en la unidad de levitación

La simulación se ha realizado asemejándose a los cálculos teóricos, haciendo pasar por las bobinas una corriente constante de 30 A durante 60 segundos. Comparando estos resultados con los teóricos, se observa que la temperatura en la unidad de levitación es inferior a la esperada, ya que las ecuaciones utilizadas son demasiado restrictivas. Esto se debe a las condiciones adiabáticas asumidas en los cálculos teóricos, siendo éste el peor escenario posible, ya que el calor producido en las bobinas no se transfiere a los otros elementos.

Como se muestra en la Figura 5.30, la temperatura máxima alcanzada en las bobinas es de  $80.53 \text{ }^\circ\text{C}$ , y en la Figura 5.18, la temperatura máxima es de  $192.01 \text{ }^\circ\text{C}$ . En ambas situaciones, la temperatura obtenida es inferior a la temperatura máxima en servicio para las bobinas, siendo  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  la temperatura límite en servicio aportada por el fabricante.

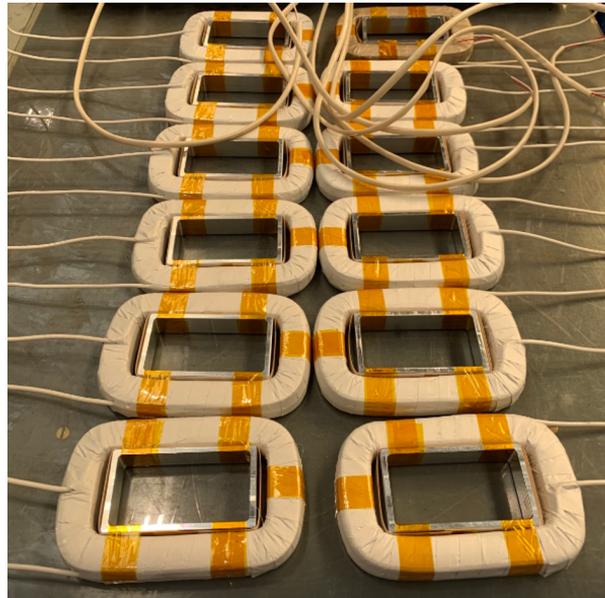
Además, con esta simulación se puede obtener la temperatura en el imán permanente, siendo inferior a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que garantiza que los imanes permanentes no se desmagneticen.

## 6. Montaje y fabricación de las unidades de levitación

Esta elección de diseño presentaba ciertos problemas mecánicos que eran necesarios resolver. Las tres partes principales de las que se compone la unidad son procesos de fabricación diferentes, en localizaciones distintas, debiendo montarse in situ. Por lo tanto, era necesario establecer un procedimiento de montaje junto al subsistema de mecánica del equipo para el ensamblaje de la unidad, además de unas pautas de seguridad a seguir por parte de los involucrados en el montaje.

### 6.1. Proceso de fabricación

Previamente al montaje, es necesario conocer el proceso de fabricación de las distintas partes de la unidad de levitación. En primer lugar, las bobinas de la unidad ya vienen arrolladas por el fabricante sobre la estructura generada. Éstas vienen montadas tal y como se muestra en la Figura 6.1:



**Figura 6.1:** Bobinado arrollado sobre la estructura

El conjunto entre ambos será una parte principal del montaje, ya que no solo sirven para el arrollado de las bobinas sino que el conjunto de la estructura será el elemento de sujeción de los imanes permanentes. Estas vienen en un baño de resina que funcionará como aislante eléctrico formando un sólido rígido entre la bobina y la estructura.

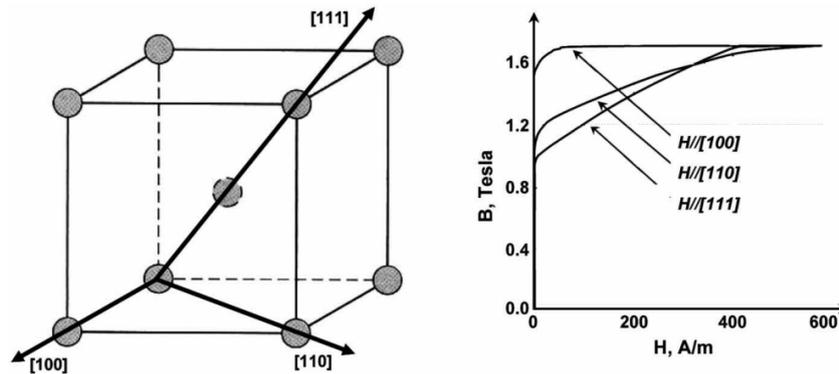
Tras la retroalimentación de la empresa que realizó el montaje, el bobinado presenta unas tolerancias demasiado grandes, lo que provoca que ciertos bobinados superen los 140 *mm* establecidos. Por ello, se midieron todos los bobinados, seleccionando de entre ellos los que cumplían con dichas tolerancias. Tras esto, y la posterior medición del chasis, se comprobó que las tolerancias entraban dentro de un rango

aceptable.

Por otra parte, como en la gran mayoría de los circuitos magnéticos, los núcleos ferromagnéticos se construyen apilando chapa de espesor reducido (para reducir las pérdidas por corrientes de Foucault) hasta conseguir el espesor total requerido por el paquete de las chapas. La chapa magnética que se usa suele ser de acero al silicio. El uso de aleaciones al silicio presenta tres ventajas (Álvarez et al., 1990):

- Reducción de las pérdidas por histéresis magnética.
- Aumento de la resistividad del acero, lo que reduce las pérdidas por corrientes parásitas.
- Mejora de la chapa frente a la temperatura lo que retrasa su envejecimiento y el consiguiente aumento de las pérdidas.

Además, las propiedades magnéticas de los materiales magnéticos blandos, como los aceros eléctricos, están relacionadas con la microestructura y la textura del acero. La textura cristalográfica es importante porque el comportamiento de magnetización de la red BCC (Estructura cúbica centrada) del hierro es diferente a lo largo de las distintas direcciones cristalográficas. Las direcciones  $\langle 100 \rangle$  son mucho más fácilmente magnetizables que las direcciones  $\langle 110 \rangle$  o  $\langle 111 \rangle$ , como se ilustra en la Figura 6.2:

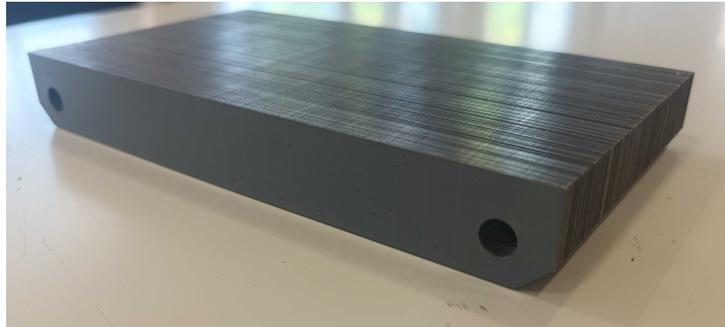


**Figura 6.2:** Curvas de magnetización para un solo cristal de hierro bcc en función de la dirección cristalográfica (Verbeken et al., 2010)

En consecuencia, la textura óptima para el acero eléctrico utilizado por ejemplo en máquinas rotativas es la textura de fibra cúbica en la que la mayoría de los granos tienen una dirección  $\langle 100 \rangle$  normal al plano de la chapa. Cuando se consigue una distribución equitativa de las orientaciones cristalográficas a lo largo de esta fibra, esto ofrecerá la máxima permeabilidad y propiedades magnéticas isotropas en el plano de la chapa. Este tipo de aceros eléctricos se denominan "no orientados". En aplicaciones para máquinas eléctricas estáticas, como transformadores, suele preferirse una dirección  $\langle 001 \rangle$ , porque el campo magnético puede alinearse con dicha dirección. Estos aceros son los aceros eléctricos de grano orientado. (Verbeken et al., 2010)

En la configuración de grano orientado, al disponer de una estructura cristalina anisótropa, en la dirección

de laminación se presenta una permeabilidad mucho más favorable que en el resto de direcciones. Mientras que en la de grano no orientado, se presentan las mismas condiciones de permeabilidad en todas las direcciones. Por lo tanto, como el flujo producido por la unidad avanza en distintas direcciones a través del núcleo ferromagnético, dispondremos de un tipo de acero de grano no orientado. El resultado final se puede observar en la Figura 6.3:



**Figura 6.3:** Acero eléctrico empleado en las unidades de levitación diseñadas

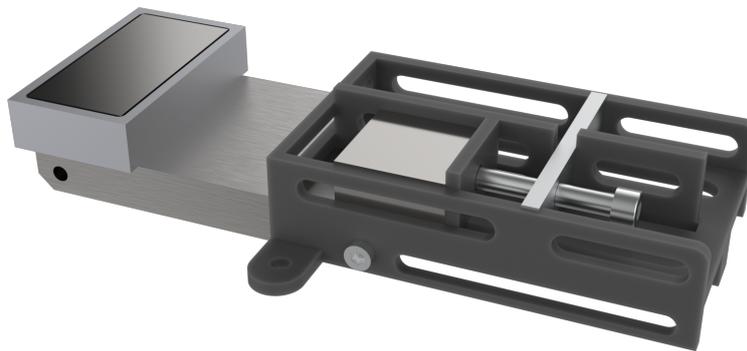
Por último, el proceso de fabricación de los imanes permanentes se compone de seis partes, explicados por la empresa Supermagnete en su página web (Supermagnete, 2023):

- **Extracción y tratamiento:** Se extrae el Neodimio, y se forma la aleación junto al Hierro y al Boro formando el NdFeB.
- **Fabricación y sinterización de piezas en bruto:** Se trabaja con la aleación, dándole una forma similar al producto final, pero con una superficie irregular, y se determina el sentido de magnetización deseado al aplicarle un leve campo magnético externo.
- **Nivelación de la superficie:** En esta etapa, el material se pule y se recorta, dándole la forma final. Debido a la dureza del neodimio, se debe trabajar con herramientas de diamante con agua para enfriarlas.
- **Revestimientos de imanes en bruto:** La aleación NdFeB es oxidable y muy frágil, para compensarlo, se aplica un revestimiento normalmente de níquel-cobre-níquel (Ni-Cu-Ni), que reduce la cantidad de fuerza de sujeción magnética.
- **Magnetización y control de calidad:** Los imanes quedan imantados debido al campo magnético externo debido a la circulación de una potente corriente por una bobina durante un milisegundo.
- **Embalaje y envío de los imanes:** Los imanes de neodimio intentan atraerse entre sí debido a su enorme fuerza de sujeción. Los imanes grandes quedan protegidos entre sí mediante un embalaje individual, en el que se disponen dos chapas de material ferromagnético, cerrando las líneas de campo magnético del imán, evitando su interacción con el resto de imanes.

## 6.2. Proceso de montaje

El objetivo de este procedimiento es proporcionar una guía detallada paso a paso para el correcto montaje de los imanes permanentes y las bobinas sobre el núcleo ferromagnético de la unidad de levitación.

Para llevarlo a cabo, se desarrolló la herramienta de montaje mostrada en la Figura 6.4 de la que se explicará su correcto funcionamiento en los pasos de montaje:



**Figura 6.4:** Herramienta de colocación de imanes

Además de esta herramienta, es necesario disponer de la siguiente lista de materiales para el completo montaje de la unidad:

- **Componentes de las Unidades de levitación:** Núcleo ferromagnético, bobinas con sus estructuras de montajes e imanes permanentes.
- **Herramientas de montaje:** Paneles de madera, alicates de acero inoxidable, tornillos M6 de acero inoxidable y herramienta de montaje de los imanes permanentes.
- **Elementos de protección:** Guantes, gafas y calzado de seguridad.
- **Magnetómetro.**

### 6.2.1. Procedimiento de montaje

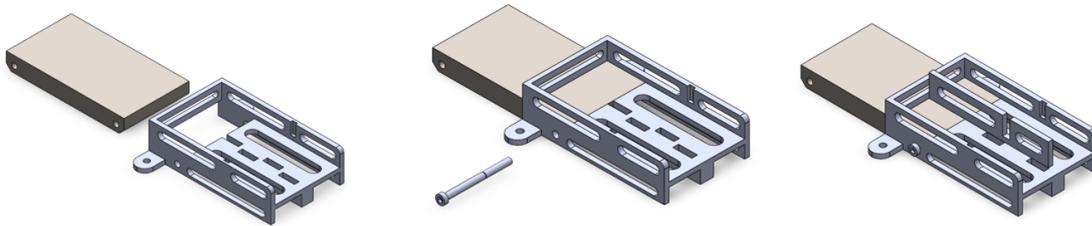
La primera secuencia de pasos a seguir se centra en la preparación del montaje, estos pasos son los siguientes:

- **Establecer el perímetro de seguridad:** Delimitar una zona segura para el montaje que no suponga un riesgo para las personas ajenas al procedimiento.

- **Utilice los EPI necesarios:** Llevar gafas de protección, calzado de seguridad y guantes de protección.
- **Retirada de aparatos electrónicos, materiales férricos y accesorios:** Asegurar que no haya dispositivos electrónicos, como teléfonos móviles o relojes, ni materiales ferrosos, como herramientas, collares, pendientes y anillos cerca de los imanes permanentes.
- **Reunir todas las herramientas y equipos necesarios:** Paneles de madera, imanes permanentes, herramientas de montaje, núcleo de acero, pernos y medidor de campo magnético.

Una vez se cumplen todos estos pasos, se puede comenzar el montaje de la unidad al completo. En primer lugar, se debe montar y fijar la herramienta de montaje de los imanes permanentes. Para ello, se debe fijar la herramienta al panel de madera y colocar los elementos de la herramienta en la configuración deseada para montar el primer imán.

A continuación, se debe fijar el núcleo ferromagnético a la herramienta de montaje. Para su fijación, se dispondrá de unos pernos de acero inoxidable, al ser un material no ferromagnético. De este modo, evitamos que sean atraídos a los imanes permanentes. Su montaje se debe seguir como en la secuencia de imágenes mostrada en la Figura 6.5:



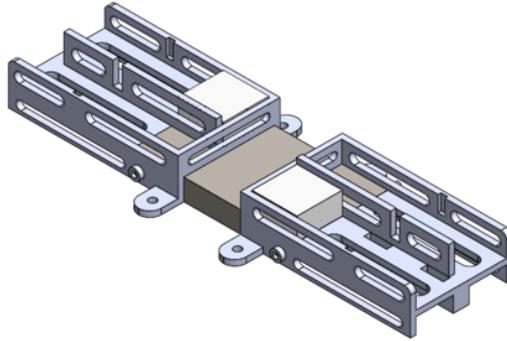
**Figura 6.5:** Secuencia de montaje del núcleo ferromagnético

Una vez se ha anclado el núcleo ferromagnético sobre la primera herramienta, se debe montar la segunda herramienta al otro lado del núcleo, repitiendo la secuencia seguida en el paso anterior. Una vez montadas ambas herramientas, se debe comprobar que todas las superficies de la herramienta de montaje y el núcleo de acero estén limpias, libres de cualquier material ferroso y que estén bien niveladas.

A continuación, se debe comprobar la polaridad de los imanes. Para ello se debe usar el magnetómetro que al hacer contacto con el imán permanente, muestra la polaridad y la densidad de flujo magnético, identificando la polaridad de los imanes con un rotulador indicando el sentido de magnetización.

A partir de este punto, se procede al montaje de los imanes sobre el acero. La herramienta de montaje dispone de una pieza intermedia que permite la colocación de los imanes que van juntos creando uno de los polos magnéticos. Además, como el imán tiende a atraerse al acero, buscando el camino de menor reluctancia, se dispone de una pieza retenedora en la zona del acero, para evitar dañar ambos materiales.

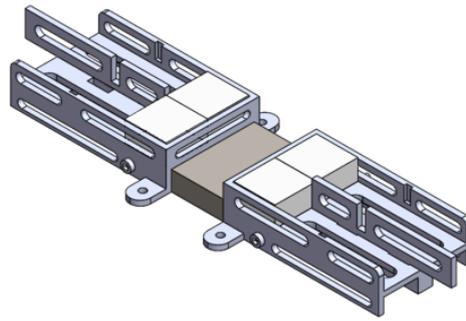
A continuación, se coloca la pieza en la configuración mostrada en la Figura 6.6 con ambas herramientas situadas en los dos lados del núcleo, e introducimos los dos imanes de una de las diagonales, cerrando de esta manera el flujo magnético por la unidad, reduciendo el nivel de fuerza de atracción para los posteriores imanes.



**Figura 6.6:** Secuencia de montaje de los dos primeros imanes permanentes sobre el núcleo ferromagnético

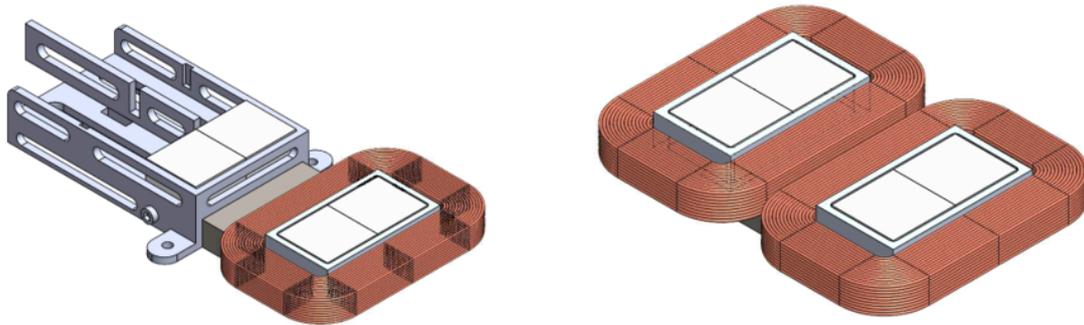
Es importante destacar que ambos imanes tienen orientaciones diferentes en el núcleo, ya que en un lado, la superficie del polo norte debe estar en contacto con el núcleo y en el otro lado, la superficie que contiene el polo sur debe estar en contacto con el acero, creando así el monopolio magnético a lo largo del núcleo. Para situarlos en la parte final, se emplea el tornillo ilustrado en la Figura 6.4. Sin embargo, a la hora de realizar el montaje, se prescindió de dicha herramienta, ya que el imán avanza por el núcleo sin dificultad, debido a que el imán al desplazarse a en la dirección de cortadura no realiza fuerza.

Para el montaje de los imanes situados en la otra diagonal del núcleo, es necesario cambiar la configuración de la pieza intermedia. Con esta nueva configuración, se permite fijar al imán ya situado en el núcleo, permitiendo el paso del imán que irá a su lado. Es importante destacar que para esta parte, se necesita evitar el desplazamiento vertical del imán que se va a introducir, empleando tabloncillos de madera. Esto es debido a que el imán trata de levantarse, uniéndose la polaridad sur o norte, dependiendo de la superficie del imán en el núcleo que quede expuesta. Si es la norte, tratará de unirse la superficie sur y al contrario en el lado opuesto. Además, también es necesario comprobar que se está introduciendo el imán en el sentido correcto, debiendo quedar los dos imanes situados en el mismo sentido de magnetización en cada uno de los lados. Una vez entra en contacto el acero con el imán, ya no es necesario bloquear su desplazamiento vertical, ya que queda fijado por las líneas de campo establecidas por la otra diagonal ya montada. La configuración final queda representada en la Figura 6.7:



**Figura 6.7:** Secuencia de montaje del resto de imanes permanentes sobre el núcleo ferromagnético

Por último, es necesario colocar el sólido rígido formado por la estructura en la que se encuentra arrollada la bobina. Para ello, se retira una de las herramientas de montaje mientras se sujeta los imanes permanentes con unas alicates de acero inoxidable, ya que estos tratan de separarse al estar juntos los mismos polos de ambos imanes. Mientras se sujetan, se sitúa la bobina junto a la estructura a su alrededor, quedando fijados los imanes. Se repite el proceso en el otro lado del núcleo. Además, posteriormente se soldarán las conexiones entre ambas bobinas, para realizar la conexión en serie.



**Figura 6.8:** Secuencia de montaje de las bobinas sobre el núcleo ferromagnético

### 6.3. Medidas de seguridad

La manipulación de fuentes de flujo magnético, como los imanes permanentes, debe tenerse en cuenta en las medidas de seguridad. Los imanes permanentes crean potentes fuerzas de atracción, principalmente cuando se utilizan juntos algunos con diferentes polaridades.

Los imanes permanentes y las unidades de levitación vertical ensambladas se almacenarán y trasladarán en cajas fabricadas con materiales no ferromagnéticos. Tanto su estructura externa como su cubierta

se fabricarán con madera, mientras que, para los separadores situados en el interior, se ha preferido la poliamida PA12. Como se muestra en la Figura 6.9, entre las paredes de PA12 y las unidades se colocará un material viscoelástico que amortigüe cualquier posible movimiento de la unidad dentro de la caja. El interior de esta caja garantizará que la distancia entre los imanes sea lo suficientemente grande como para evitar cualquier fuerza significativa entre ellos.

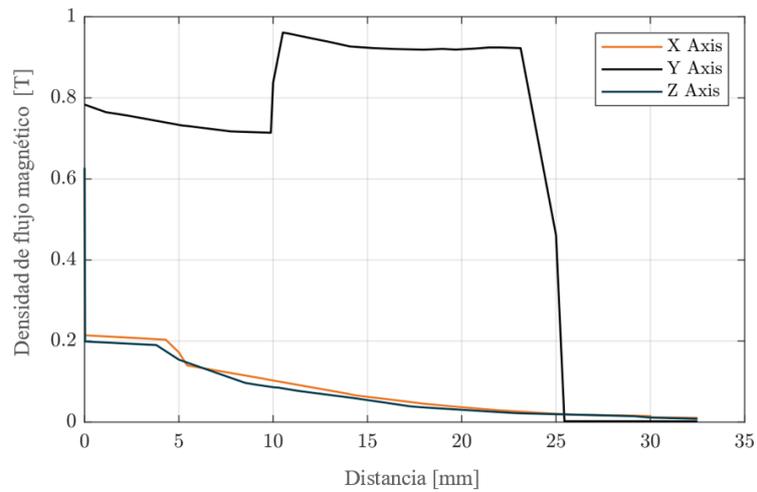


**Figura 6.9:** Caja para el almacenamiento de las unidades de levitación

Una vez colocados los imanes permanentes como corresponde, la fuerza de atracción generada con el yugo de acero laminado los mantiene fijos en la posición prevista. Para restringir el movimiento de las bobinas en todas las direcciones, se ha diseñado una cubierta, como se detalla minuciosamente en el Apartado 5.2.3.

Además, cuando el vehículo no se utilice con fines de ensayo, se colocarán las cubiertas no ferromagnéticas en las unidades de levitación vertical para evitar percances con los imanes permanentes.

En cuanto a la radiación electromagnética, se han realizado simulaciones para confirmar que la dispersión del flujo no afecta a ningún componente electrónico durante el funcionamiento del vehículo. Como se muestra en la Figura 6.10, el flujo magnético es despreciable después de 25 mm.



**Figura 6.10:** Distancia de seguridad frente a la radiación electromagnética de los imanes permanentes

Las unidades de levitación y la caja que contiene los imanes exhibirán una etiqueta de peligro magnético. Asimismo, en aras de la protección de las personas, se incluirán advertencias reglamentarias sobre la presencia de campos magnéticos y se restringirá el acceso al contenido de la caja a las personas autorizadas. Al montar o trabajar cerca de las unidades, los miembros del equipo retirarán cualquier elemento mecánico y utilizarán guantes de protección.

## 7. Comparación de datos teóricos frente a los datos reales

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de levitación y del guiado horizontal, son necesarios dos bancos de pruebas principales para validar el sistema completo.

- El banco de pruebas de levitación se utiliza para caracterizar el rendimiento de las unidades electromagnéticas y validar el control de levitación de 1 GDL.
- El banco de pruebas de levitación estática sirve de plataforma para validar el control de 5 DOF y ajustar todos sus parámetros, recreando diversos escenarios potencialmente perturbadores.

En lo que repercute a este proyecto, se va a explicar el funcionamiento del primer banco de pruebas, ya que el segundo banco de pruebas compete a la parte del control del sistema de levitación, que no forma parte de este proyecto. Además, solo se mostrarán los resultados obtenidos para el sistema de levitación vertical, obviando los datos de las unidades de guiado lateral.

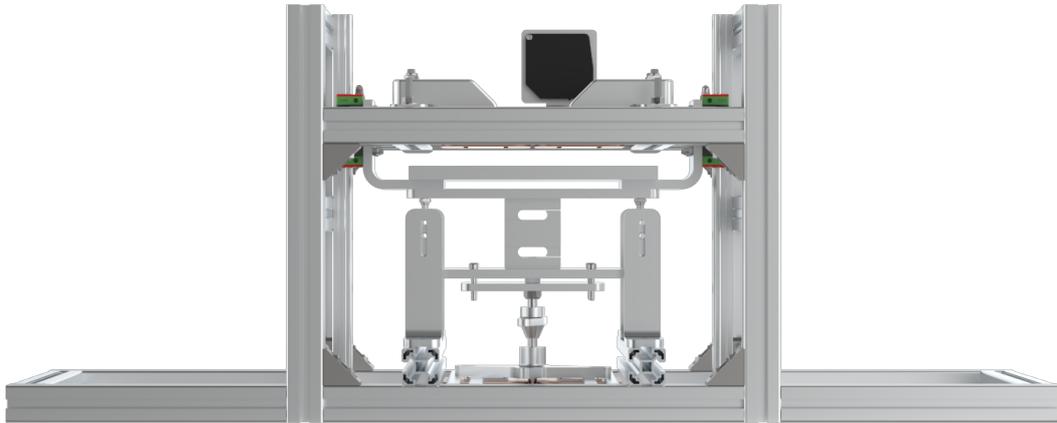
### 7.1. Banco de pruebas de levitación

El banco de pruebas de levitación es un entorno de levitación diseñado a medida por Hyperloop UPV para validar las unidades de levitación vertical y las unidades de guiado lateral. Este mismo banco de pruebas se utilizó el año pasado para validar las unidades de levitación, por lo que para la presente edición del proyecto sólo es necesario adaptarlo a los nuevos valores de fuerza y geometría de las unidades de levitación.

Los objetivos de las pruebas realizados en el banco de levitación son los siguientes:

- Caracterizar los valores de fuerza en diferentes entrehierros y corrientes en levitación vertical.
- Medir las temperaturas alcanzadas en las unidades electromagnéticas.

El proceso de caracterización utilizará el banco de pruebas de levitación en la configuración representada en la Figura 7.1. En primer lugar, las unidades de levitación vertical se dispondrán en una posición tal que la fuerza pueda medirse mediante la célula de carga. A continuación, se medirá el entrehierro visto por la unidad electromagnética. Manteniendo el mismo entrehierro, se realizará un barrido de corriente, variando el paso y el rango dependiendo del entrehierro estudiado. Durante el proceso descrito se medirán la fuerza y la temperatura. Si la temperatura de la bobina alcanza 80 °C, se detendrá el proceso, reanudándose en el punto donde se dejó cuando la temperatura baje a 40 °C.



**Figura 7.1:** Bancada de un grado de libertad para la caracterización de las unidades de levitación y las de guiado horizontal

Para la obtención de los datos de fuerza, como se ha comentado previamente, se sitúa una célula de carga debajo de la plancha de acero, que simula el funcionamiento del perfil en L, para medir la cantidad de fuerza generada. Además, para medir el barrido de entrehierros, se dispone de un sensor de distancia que controla la distancia a la que se sitúa la unidad de levitación con respecto a la plancha, siendo capaces de caracterizar la unidad en diferentes puntos de trabajo. Para regular la distancia, se dispone de un mecanismo en el que mediante unos guidos, la plancha sube o baja regulando el desplazamiento mediante una tuerca moleteada.

El mapa obtenido durante el proceso de caracterización se comparará con el obtenido en las simulaciones; así, el modelo de la unidad electromagnética se actualizará con los nuevos datos.

## 7.2. Procedimiento del ensayo

Para que el ensayo salga correctamente en primer lugar, al igual que con el montaje de los imanes permanentes, se ha establecido una lista de materiales necesaria para llevar a cabo el ensayo:

- Unidad de levitación ya completamente montada.
- Célula de carga para la medición de la fuerza ejercida.
- Calibre Vernier para la comprobación de las medidas de los entrehierros.
- Banco de pruebas de levitación junto a todos sus componentes.

- Fuente de alimentación (SM210-CP-150).
- Sensores de temperatura (E6386658P0001), distancia (OD2000-1301T15) y corriente (L01Z300S05).
- EPIs como guantes de protección térmica y guantes de aislamiento eléctrico, además del calzado de seguridad correspondiente.

Además, para cumplir con las medidas de seguridad y lograr obtener los resultados idóneos, se han definido los siguientes pasos a seguir:

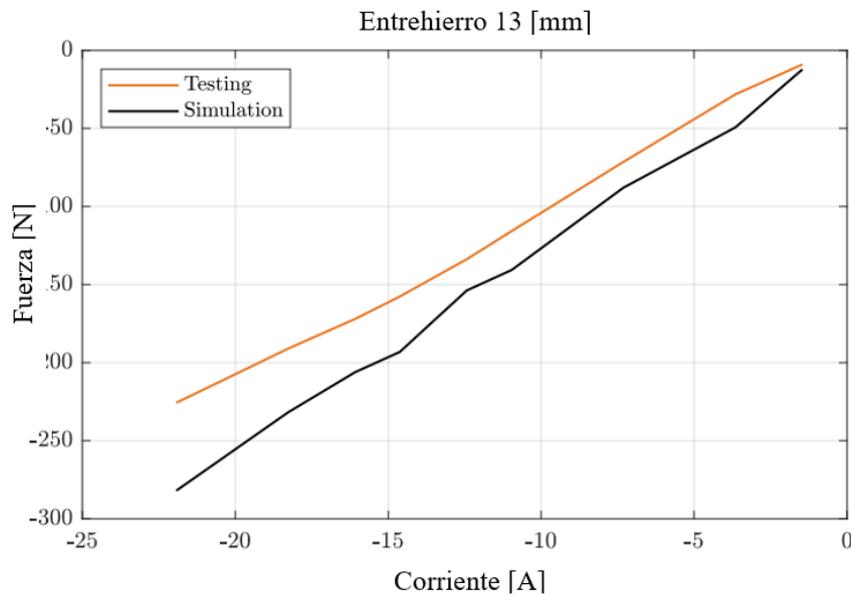
- **Establecer la unidad en el primer entrehierro:** Colocar la unidad al máximo entrehierro dentro del rango establecido entre la unidad y la placa de acero.
- **Chequear el entrehierro:** Con la ayuda de un calibre Vernier, comprobar que el entrehierro es correcto. Comprobar también que el sensor de entrehierro marca la misma distancia.
- **Suministrar el barrido de tensiones a la unidad:** Encienda la fuente de alimentación, partiendo de 0 V y aumente la tensión en el rango indicado.
- **Anotar todos los resultados de la fuerza ejercida por la unidad y su corriente para cada caso:** Tomar nota de las fuerzas y los valores actuales y guardar los resultados en el documento.
- **Desconectar la fuente de alimentación:** Después de completar toda la gama de tensiones, alcanzando el máximo del rango indicado. Desconectar la fuente de alimentación.
- **Reducir el espacio de aire entre la unidad y la placa de acero:** Utilizando la tuerca moleteada, reducir la distancia entre la unidad y la placa de acero.
- **Repetir los mismos pasos midiendo la fuerza y la corriente:** Repetir los mismos pasos realizados anteriormente, para cada entrehierro hasta alcanzar el entrehierro mínimo del rango.
- **Apagar todos los dispositivos:** Después de terminar todas las mediciones en la unidad, apagar todos los dispositivos. Asegurarse de que no circula corriente.
- **Desmontar y almacenar todos los elementos:** Desconectar todo el cableado, asegurarse de que la unidad está por debajo de los 40 °C y almacenar la unidad en su caja correspondiente.

### 7.3. Obtención de los resultados

Tras realizar la prueba de caracterización de las unidades HEMS, se muestran los resultados de las fuerzas medidas en función de la corriente para diferentes entrehierros. En la misma gráfica, se muestran tanto los valores de la prueba como los de la simulación realizadas mediante el software JMAG-Designer para comparar los resultados.

El primer gráfico representado en la Figura 7.2 muestra el caso en el que la unidad se encuentra a una distancia de 13 mm. Cabe destacar que a este gráfico se le ha restado la fuerza que genera el imán

permanente. Por lo tanto, únicamente estamos comprobando la fuerza que genera la bobina conociendo así la acción correctora que es capaz de generar la unidad. Esto se llevará a cabo para todos los entrehierros y finalmente se mostrará una gráfica en la que únicamente se mostrará la fuerza generada por los imanes permanentes.



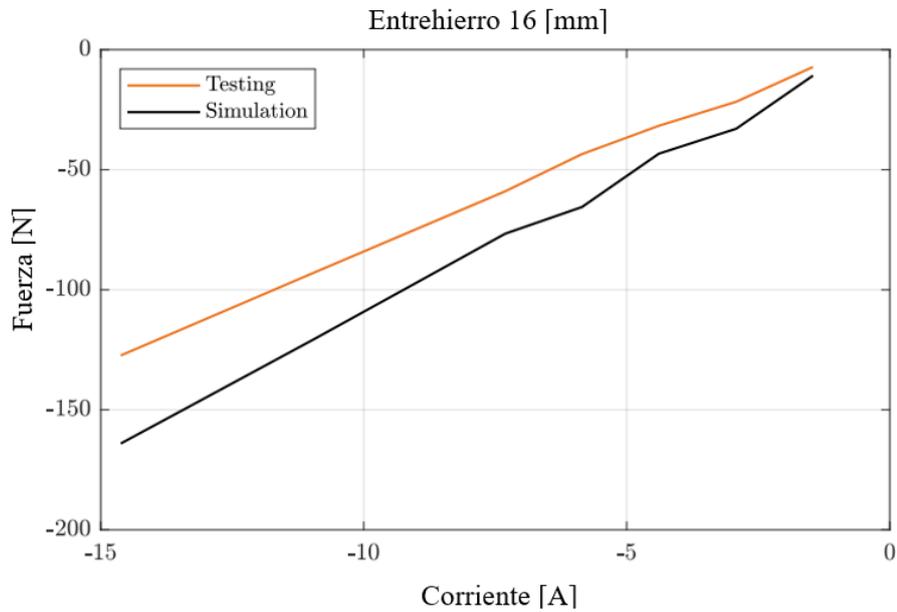
**Figura 7.2:** Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 13 mm

Este es el punto más cercano al que se puede acercarse la unidad a la plancha de acero. Esto es debido a que la bancada estaba diseñada para sostener una fuerza máxima de 1000 [N]. Si se acercara más la unidad, los elementos del banco de pruebas podrían sufrir deformaciones plásticas que variarían la medida obtenida.

En este gráfico, se observa que a bajas corrientes, los valores de la simulación se asemejan en gran medida a los obtenidos en el banco de pruebas. Sin embargo, a medida que aumenta la corriente, la diferencia aumenta. Esto es debido a un error de la célula de carga, ya que al ser una galga extensiométrica que se encuentra trabajando a tracción en todo momento, el punto cero es difícil de observar dependiendo del caso de entrehierro en el que nos situemos.

Aún con este problema, se puede observar una buena tendencia de los valores de fuerza, por lo que estos valores son asumibles para la parte de control. Sin embargo, en entrehierros posteriores, se prestará especial atención a los casos de menor corriente, siendo estos los más relevantes.

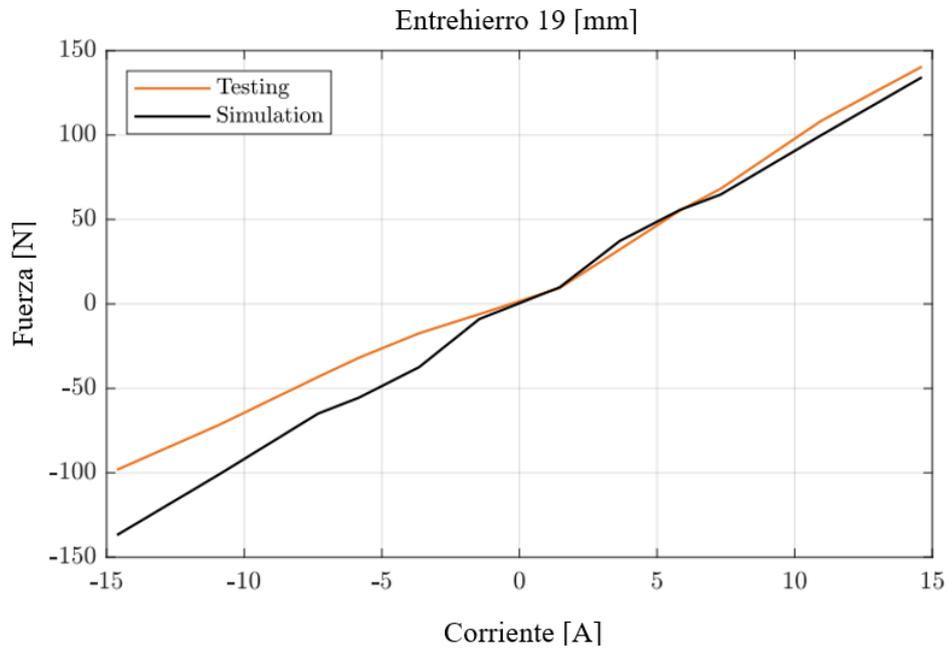
A continuación, se muestra los valores de fuerza obtenidos para un entrehierro de 16 mm:



**Figura 7.3:** Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 16 mm

Al igual que con el gráfico representado en la Figura 7.2, se sigue observando el mismo error a medida que se aumenta la corriente. Cabe destacar que para ambos casos, únicamente se han pasado corrientes negativas. Esto es debido a que el punto de levitación nominal se encuentra alrededor de los 19 mm, y por lo tanto, cuando la unidad se encuentra en un entrehierro menor, el control únicamente debe pasar corriente en el sentido que disminuye la cantidad de flujo magnético generado por los imanes permanentes. Para el sistema de control, esto se obtiene pasando corrientes negativas a las bobinas en serie de la unidad. Además, se puede observar que el rango de corrientes varía para un entrehierro y otro. A un menor entrehierro, es necesario pasar una mayor corriente negativa que en el caso de la Figura 7.3, por lo que se analizan más casos a corrientes más altas en el primer caso, llegando hasta los 25 A, y en el segundo solo es necesario pasar corriente hasta un máximo de 15 A.

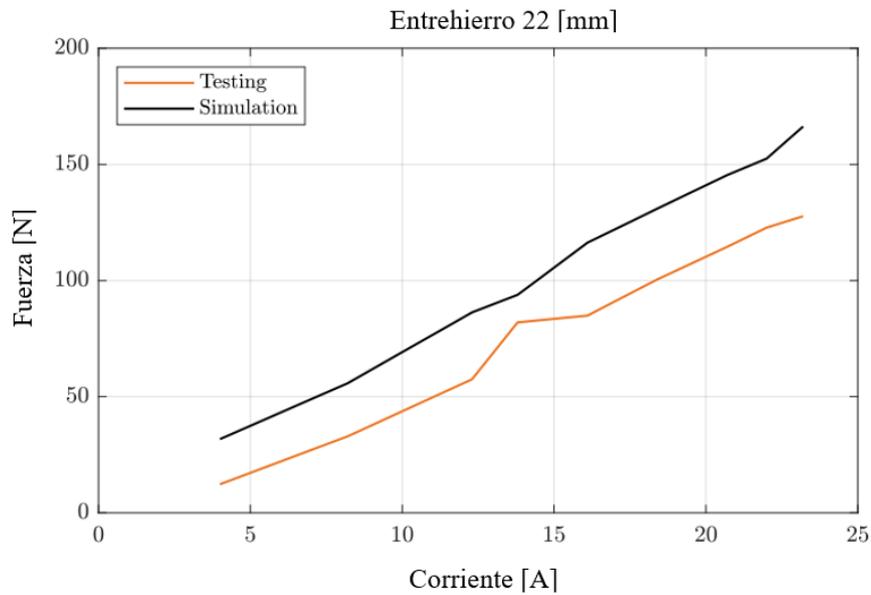
Una vez se han analizado los casos por debajo del punto de levitación nominal, se debe analizar dicho punto. Los resultados se observan en la Figura 7.4:



**Figura 7.4:** Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 19 mm

Para este caso, se analizaron tanto los casos positivos como negativos, ya que este es el punto de funcionamiento en régimen nominal de la unidad, por lo que el control necesita datos más fiables, y una masa de datos mayor. En este gráfico se puede observar como cuando se pasan las corrientes positivas, la tracción de la célula disminuye, y aunque siga habiendo diferencias, los resultados ya se asemejan mucho más a los de las simulaciones, por lo que se asegura que los valores obtenidos en las simulaciones son algo más fiables. Sin embargo, a corrientes negativas encontramos el mismo error de antes.

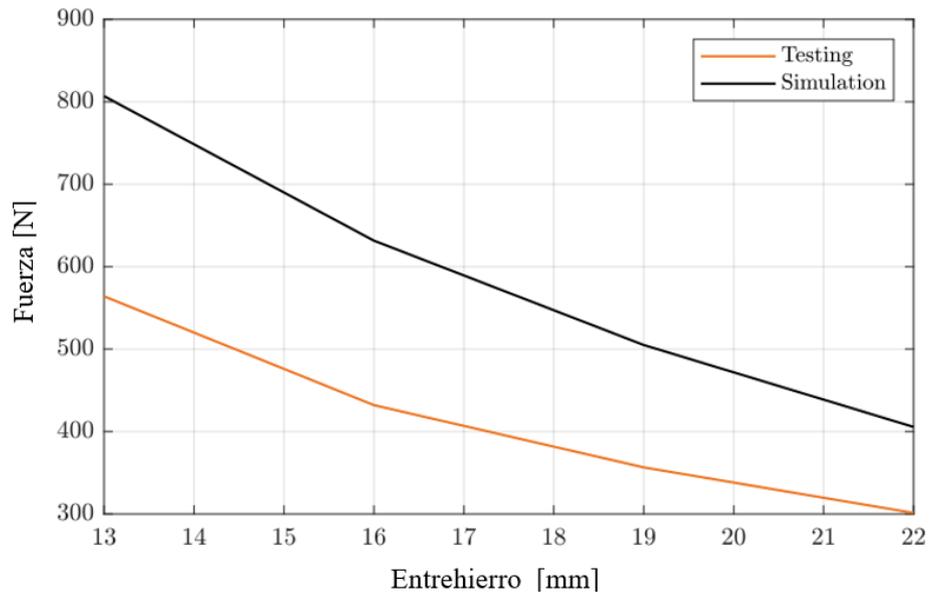
Por último, se analizó el punto más lejano al que permite trabajar el banco de pruebas. Los resultados se muestran en la Figura 7.5:



**Figura 7.5:** Fuerza ejercida en función de la corriente para un entrehierro de 22 mm

En estos resultados ya se observan datos mucho más fiables, con los errores comentados previamente. Además, se observa que el error a baja corriente es prácticamente constante y se encuentra alrededor de los 20-30 [N]. Sin embargo, es necesario comprobar su correcto funcionamiento se asegurará en el banco de pruebas de 5 GDL.

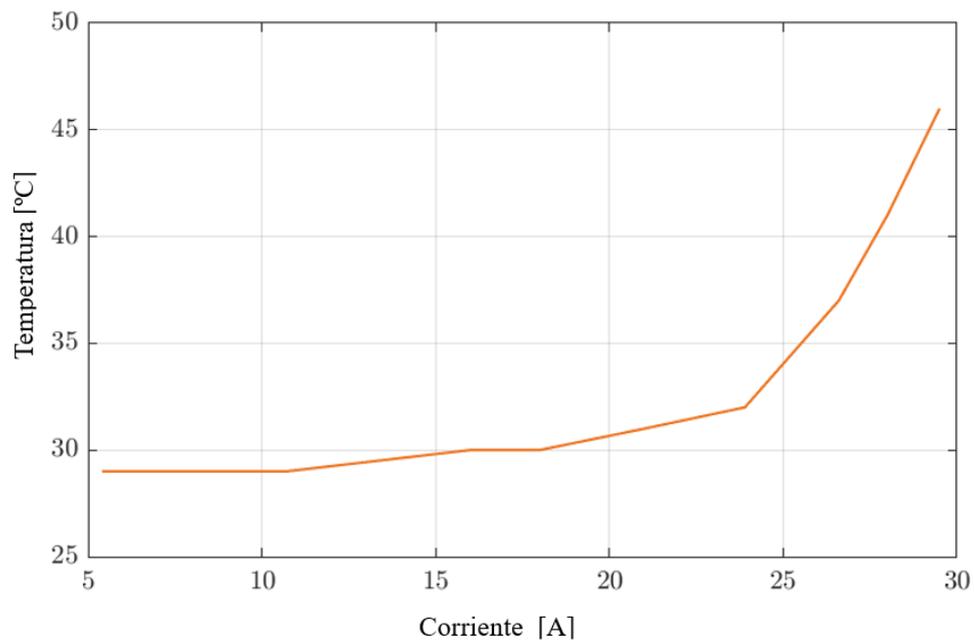
Para garantizar que la reducción de fuerza se debía a un error de tarado en la célula, se comparó la fuerza medida a corriente nula, es decir, la fuerza generada únicamente por los imanes permanentes con la de las simulaciones:



**Figura 7.6:** Fuerza ejercida por los imanes permanentes en función del entrehierro

Se puede observar un error grande en la medida, a valores de fuerza altos. Esto ocurre también cuando aumenta la corriente en el bobinado, ya que a una mayor fuerza de tracción, peor es la medida obtenida. Otra de las suposiciones que se han tenido en cuenta es que la célula al trabajar a tracción, ofrezca peores prestaciones que al trabajar a compresión. Sin embargo, según datos del fabricante expuestos en los anexos del documento, la célula es capaz de trabajar bidireccionalmente a un máximo de 300 kg de fuerza, límite al que nunca llegamos en estas simulaciones, descartando esta teoría.

Por último, en la Figura 7.7 se observa la temperatura máxima alcanzada en el proceso:



**Figura 7.7:** Temperatura alcanzada por las bobinas en función de la corriente

En esta gráfica se observa la temperatura alcanzada durante cada uno de los ensayos de corriente. Estos valores garantizan que las bobinas trabajan en un rango de temperatura dentro de lo esperado, ya que no superan en ningún momento los 80 °C.

## 8. Conclusiones

El presente trabajo se centra en el diseño de un sistema de levitación magnética, resumiendo todo el trabajo realizado durante el curso por el autor del documento con el principal objetivo de ayudar al equipo Hyperloop UPV a lograr el prototipo más escalable presentado en la European Hyperloop Week.

De la fase de diseño, se pueden extraer ciertas conclusiones:

- La elección de una configuración óptima es vital para el devenir del proyecto, siendo necesario adaptar la solución a los sistemas del vehículo, cumpliendo con los requisitos establecidos. Esto conlleva a que otras configuraciones que presentan soluciones mecánicas más viables sean desestimadas.
- En el proceso de optimización, se observa como el aumento en las dimensiones del núcleo produce un aumento en la reluctancia, produciendo una reducción tanto en la cantidad de flujo magnético generado como en la cantidad de fuerza generada, siendo necesario obtener un punto óptimo.
- En la optimización del bobinado se observa que al aumentar el número de vueltas, se obtiene una mayor fuerza magnetomotriz con una corriente menor, por lo que es de una gran importancia maximizar el número de vueltas, buscando una solución de compromiso con la sección de conductor, factor limitante en el proceso.
- Por último, durante el proceso de caracterización cabe destacar que el uso de simetrías en la generación del modelo en JMAG-Designer, además de la posibilidad de emplear varios núcleos del procesador a la vez, permite agilizar en gran medida los cálculos, perdiendo poca información en el cálculo de elementos finitos. Sin embargo, se ha observado que al realizar los estudios en régimen transitorio, el coste computacional aumenta, limitando la cantidad de resultados que se puede aportar al control.

A continuación, de los resultados obtenidos en la caracterización del modelo, y tras la posterior comparación con los resultados obtenidos en el banco de pruebas, se pueden destacar ciertos puntos relevantes:

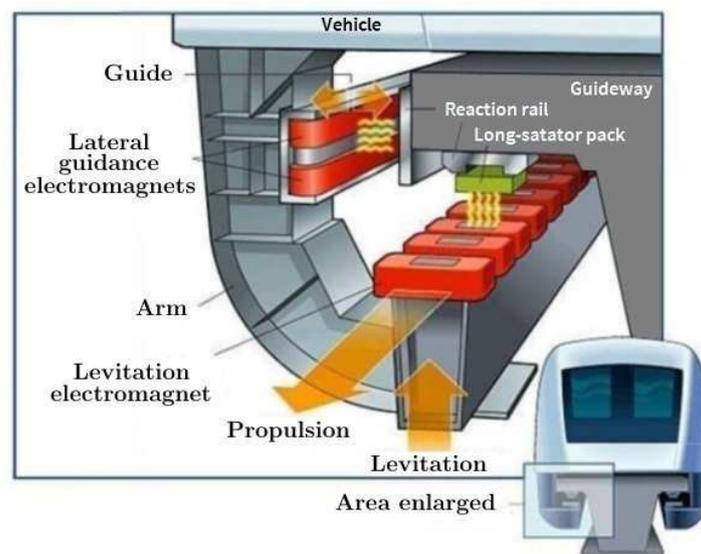
- El sistema de alimentación es suficiente para alimentar el bobinado. Además, el alto rango de control obtenido permite un consumo de corriente menor.
- Las temperaturas alcanzadas en las simulaciones garantizan el correcto funcionamiento de la unidad, aún en condiciones de vacío.
- A nivel mecánico, se cumplen los valores de fuerza requeridos por el equipo tanto en levitación estática como levitación dinámica.
- Por último, la célula de carga situada en la bancada ofrece unos valores poco fiables, aún observando una buena tendencia en los datos. Para futuros diseños del banco de pruebas, deberá plantearse otro tipo de bancada para la realización de pruebas.

## 9. Futuros proyectos

Este trabajo presenta una configuración optimizada del sistema de levitación de ediciones anteriores, siendo un documento referencia para futuros prototipos.

Como se ha podido ver a lo largo del documento, la configuración escogida ha conllevado unas dificultades mecánicas en la fase de montaje. Si se quisiera mantener la configuración con las bobinas situadas en los extremos de la unidad, una opción más viable sería la de facilitar la unión del elemento sobre el que se arrolla la bobina al mismo soporte de la unidad. Sino, otra opción sería volver a arrollar la bobina en el centro del núcleo, perdiendo eficiencia en el diseño.

En vistas a futuro, otro tipo de sistema de levitación a emplear es el EDS (Electrodynamic Suspension). Este tipo de tecnología, en trenes de levitación como el Maglev, se lleva a cabo mediante el uso de superconductores. Una representación del sistema se muestra en la Figura 9.1:



**Figura 9.1:** Sistema de levitación magnética del tren Transrapid-maglev (Cabral & Chavarette, 2015)

Por el término “Superconductividad” se entiende el conjunto de propiedades que presentan algunos materiales cuando se enfrían a muy bajas temperaturas. En particular la resistencia eléctrica se hace nula y el material conduce sin resistencia (superconduce). Además presentan otro tipo de propiedades, como por ejemplo los efectos Meissner y Josephson. (Díaz, 2008)

Al desplazarse el vehículo a lo largo del carril se inducirá una corriente en las bobinas de este que actuarán entonces actuaran como electroimanes. Al interactuar con los superconductores montados en el tren, se producirá la levitación. La fuerza de levitación será cero cuando el vehículo se encuentre detenido e ira aumentando a medida que vaya creciendo la velocidad del tren hasta producirse la sobreelevación del mismo sobre el carril. (Sánchez-Lafuente, 2012)

# Bibliografía

Álvarez, C., Roger, J., & Roldán, C. (1990). *Circuitos magnéticos*. SPUPV-90.315.

Cabral, T., & Chavarette, F. (2015). Dynamics and control design via LQR and SDRE methods for a maglev system.

Díaz, J. (2008). *Sistematización del diseño de dispositivos de levitación superconductora por efecto Meissner*.

EHW. (2023). *European Hyperloop Week Web Page*.

Disponible en: <https://hyperloopweek.com/gallery/>.

Eurostat. (2022). *Railway passenger transport statistics quarterly and annual data*.

Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway\\_passenger\\_transport\\_statistics\\_-\\_quarterly\\_and\\_annual\\_data](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data).

Grebennikov, N., Kononov, G., Kireev, A., & Kozhemyaka, N. (2018). Hybrid electromagnetic suspension for high-speed vacuum transport.

Grebennikov, N., Lebedev, A., Kireev, A., & Kozhemyaka, N. (2018). Model Test of Hybrid Electromagnetic Suspension for High-Speed Vacuum Transport.

HyperloopTT. (2023). *Hyperloop Transportation Technologies Web Page*.

Disponible en: <https://www.hyperlooptt.com/technology/>.

Hyperloop-UPV. (2022). Final Demonstration Documentation H7.

Hyperloop-UPV. (2023). Final Demonstration Documentation H8.

JMAG. (2023). *Librería de materiales*.

Laakso, S., Krajnik, P., & Aydin, U. (2020). Verification of electric steel punching simulation results using microhardness.

León, V. (1988). *Introducción a los circuitos magnéticos*. SPUPV-88.525.

López, J. (2022). *Determinación del ciclo de histéresis de materiales ferromagnéticos*.  
Disponibile en: <http://faii.etsii.upm.es/Personal/aminguez/Guionhisteresis.pdf>.

Sánchez-Lafuente, F. E. (2012). Los superconductores.  
Disponibile en: <https://www.coitt.es/res/revistas/04c%Superconductores.pdf>.

SpaceX. (2013). Hyperloop Alpha.  
Disponibile en: [https://www.tesla.com/sites/default/files/blog\\_images/hyperloop-alpha.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf).

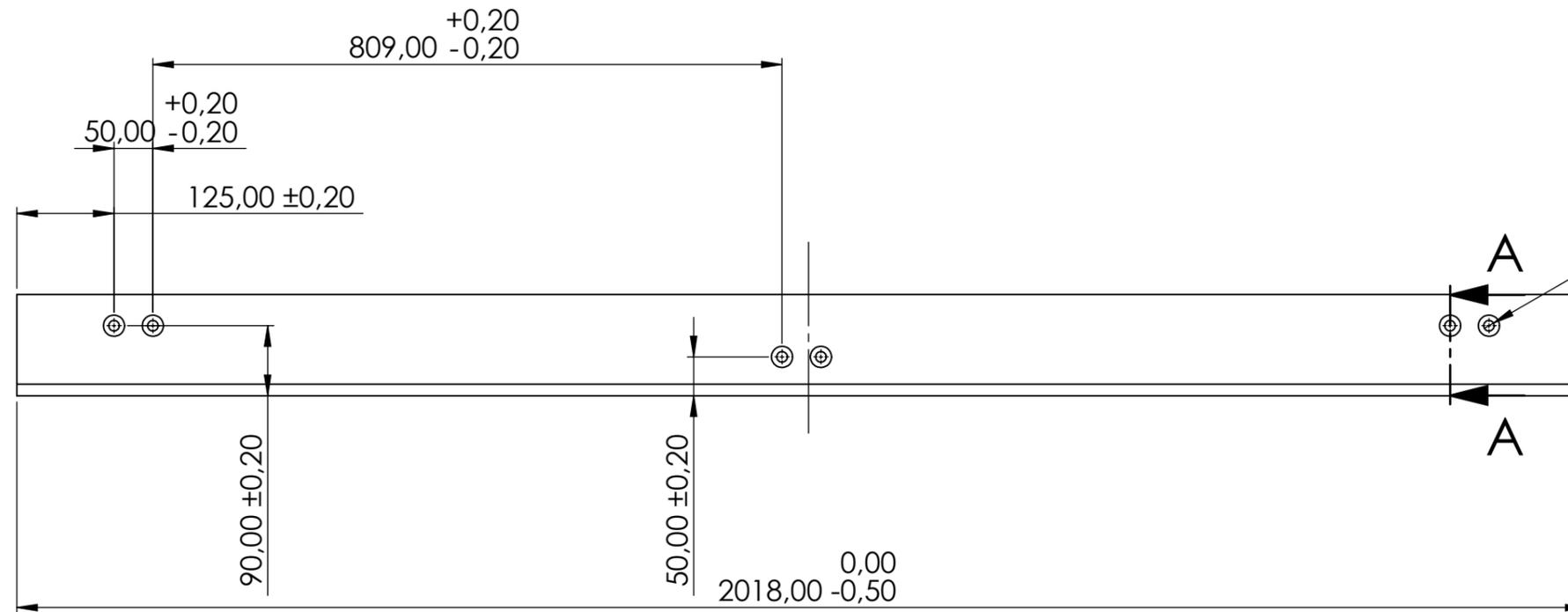
Supermagnete. (2022). *Ficha técnica del artículo Q-40-40-20-N*.  
Disponibile en: [https://www.supermagnete.es/data\\_sheet\\_Q-40-40-20-N.pdf](https://www.supermagnete.es/data_sheet_Q-40-40-20-N.pdf).

Supermagnete. (2023). *Proceso de fabricación de imanes de neodimio*.  
Disponibile en: <https://www.supermagnete.es/faq/Como-se-fabrican-los-iman-de-neodimio>.

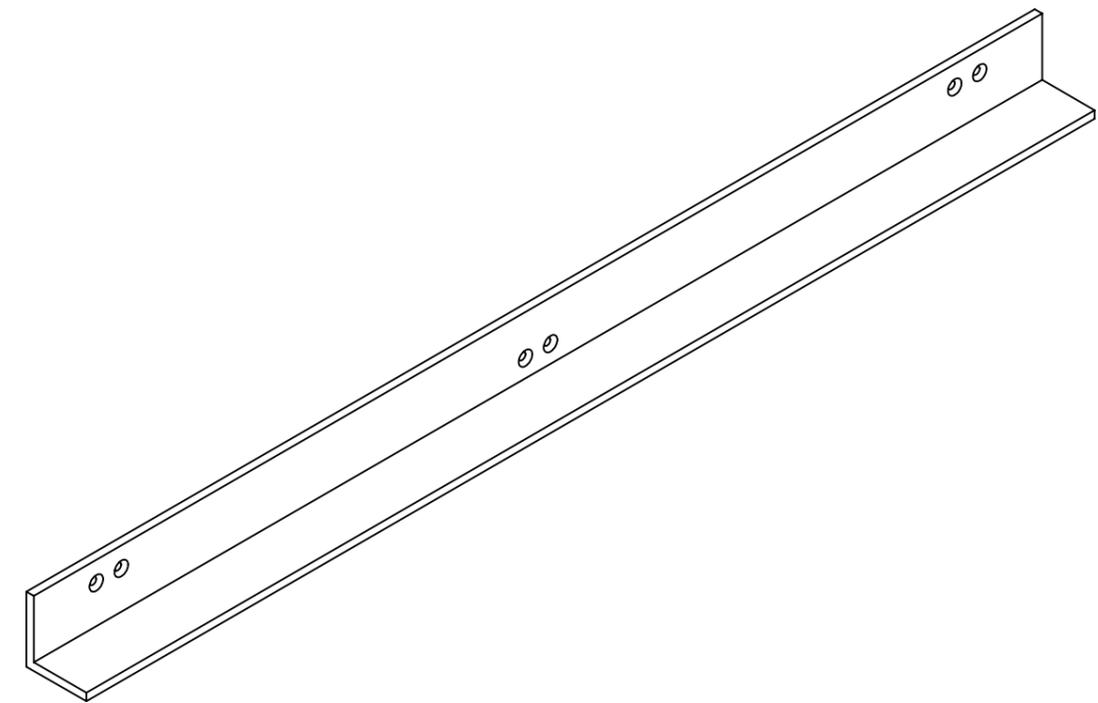
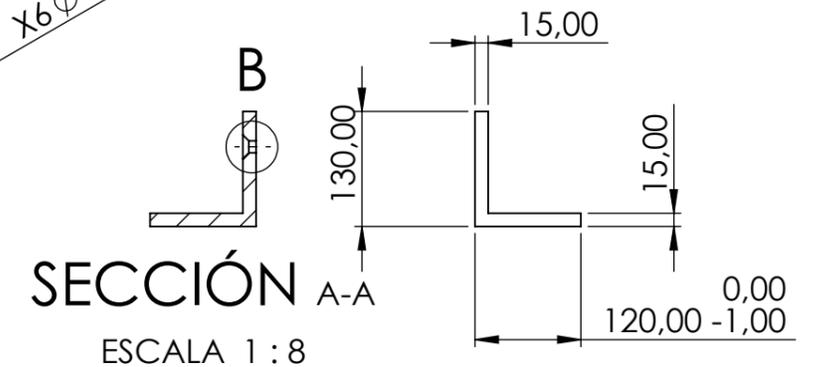
Verbeken, K., Infante-Danzo, I., Barros-Lorenzo, J., Schneider, J., & Houbaert, Y. (2010). Innovative processing for improved electrical steel properties.

## Documento II

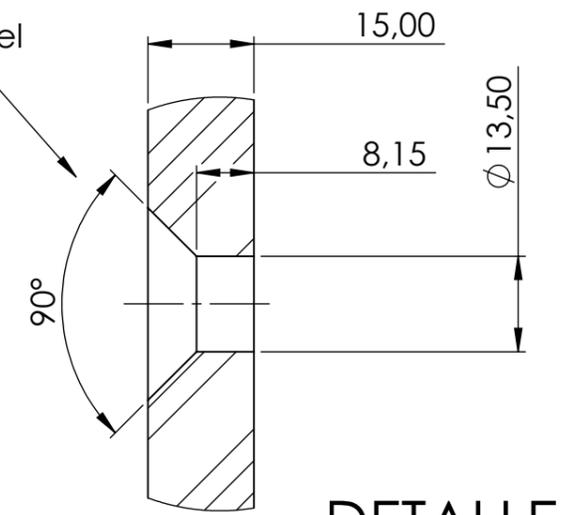
### Anexos



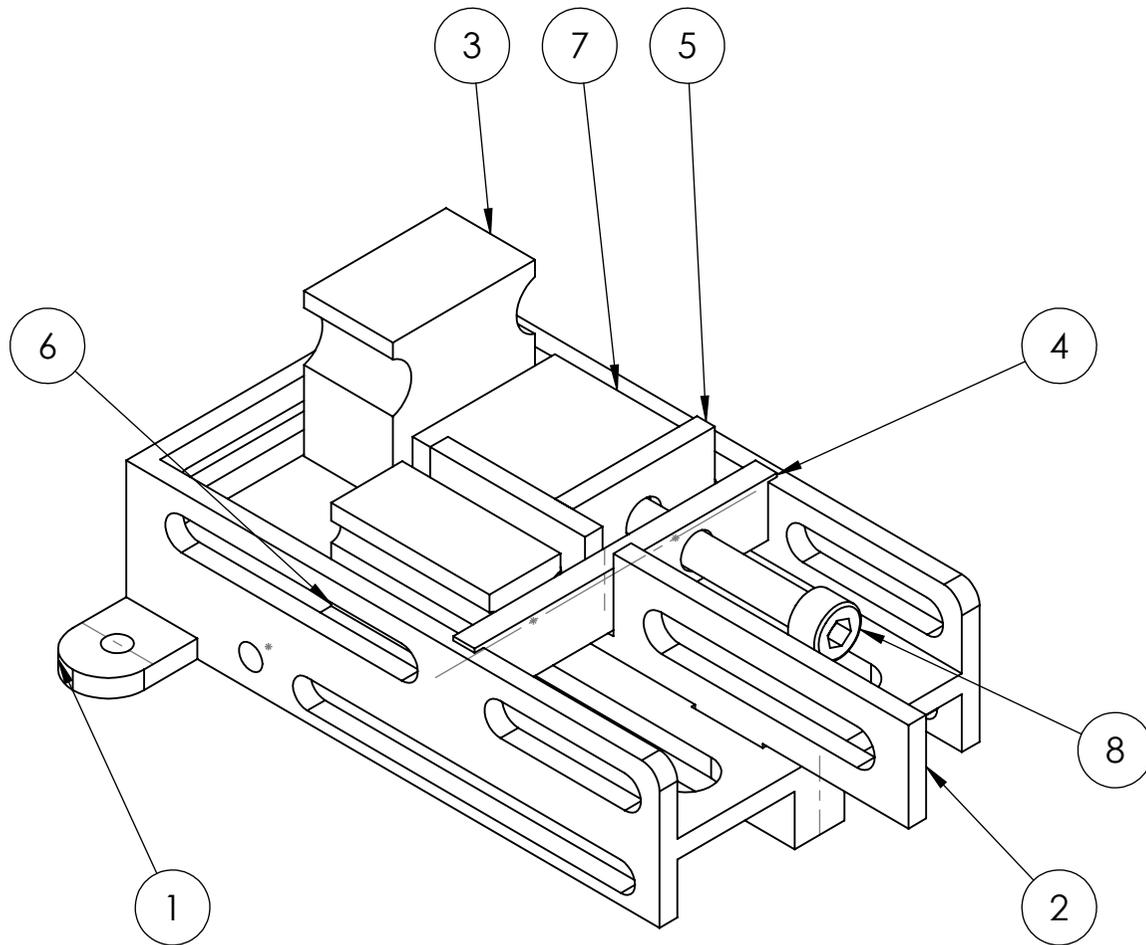
X6  $\phi$  13,50



Los 6 taladros tiene el mismo avellanado

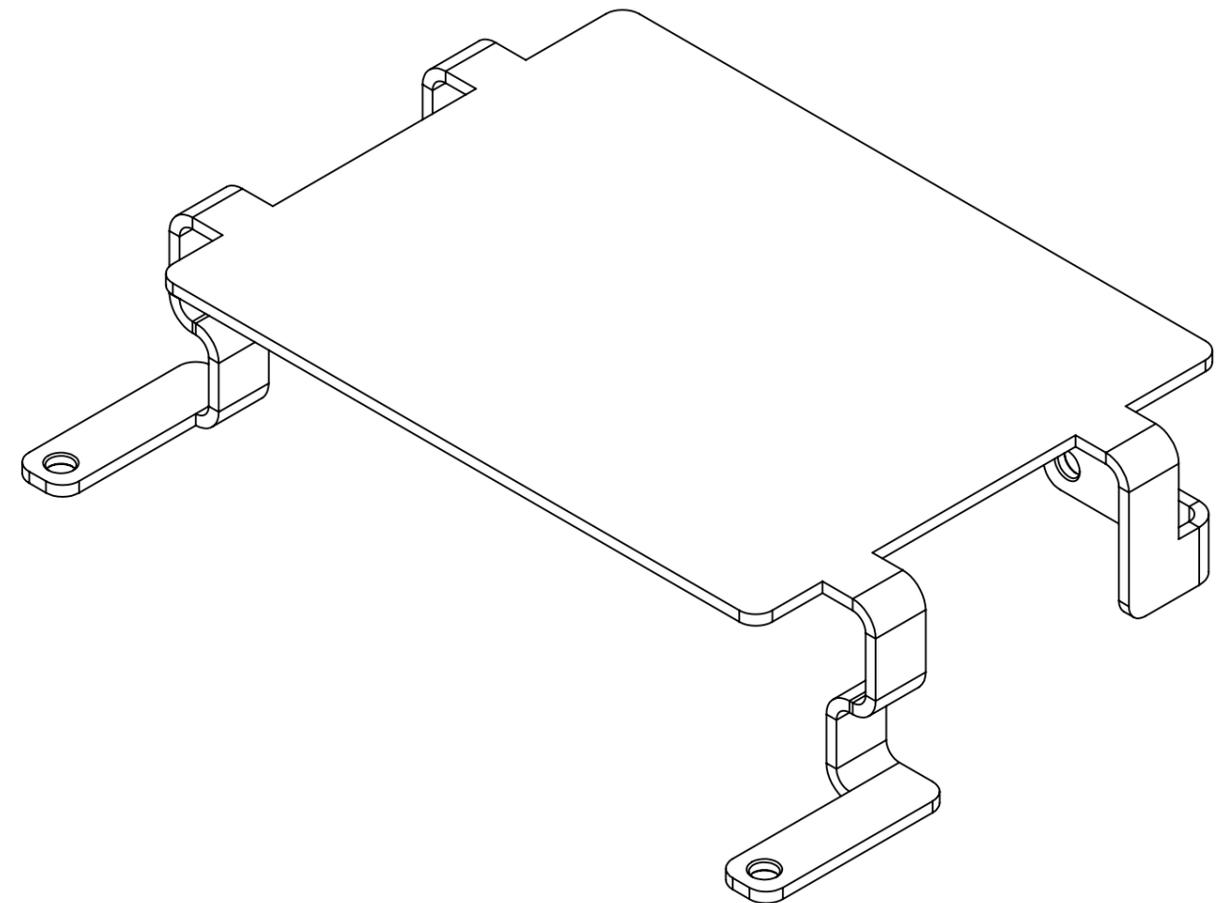
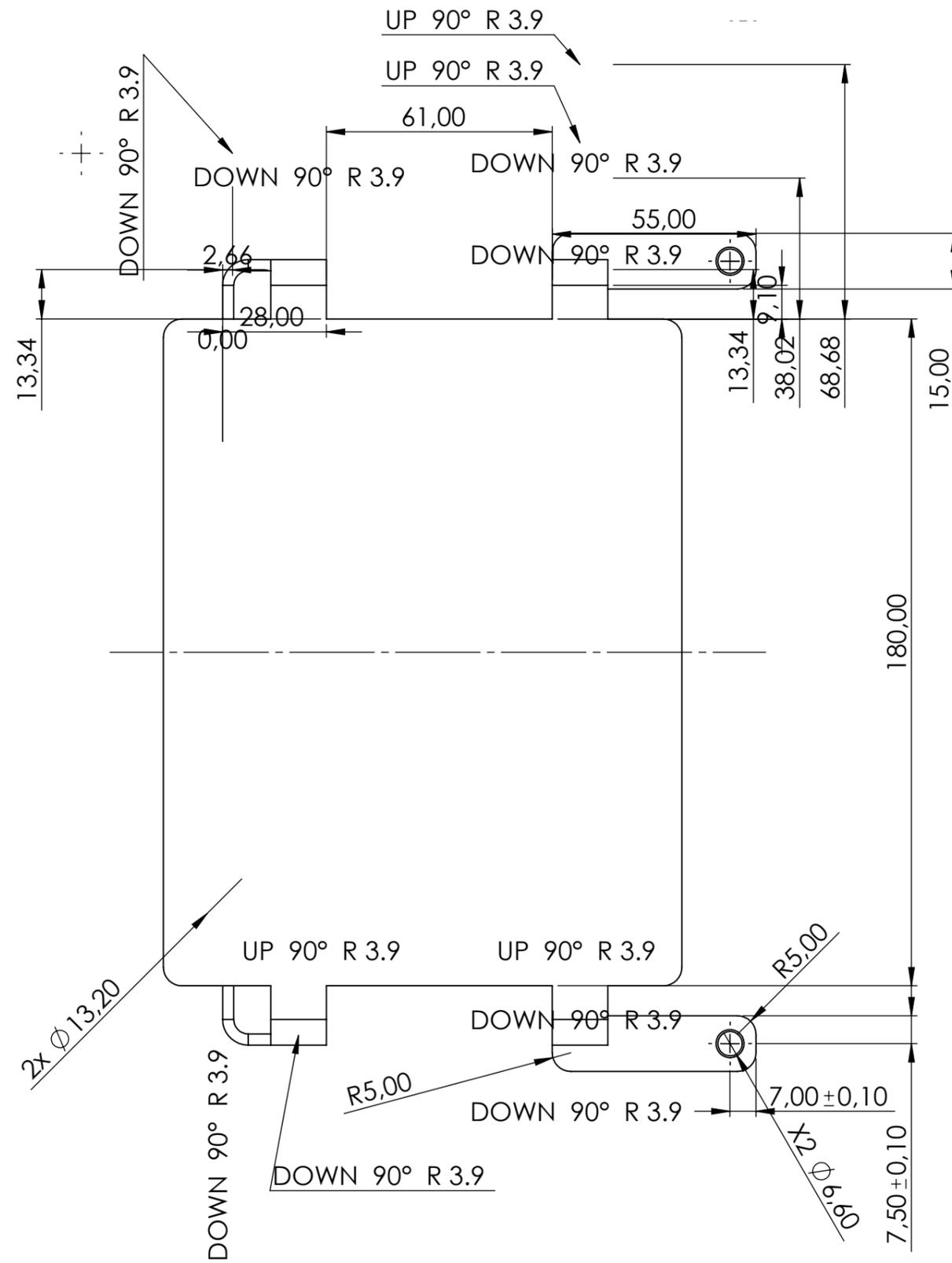


<b>Observaciones:</b> Observaciones		<b>Título:</b> PR-A001-P03-M-Perfil L - L Profile		<b>Plano nº:</b> 1
				<b>Cantidad:</b> 2
<b>Escala</b> 1:8	Un. dim. mm		<b>Dirigido por:</b> Jose Ángel Jarabo	<b>Fecha:</b> 12/12/2022
			<b>Revisado por:</b> Ricardo González-barranca	<b>Material:</b> Acero S275

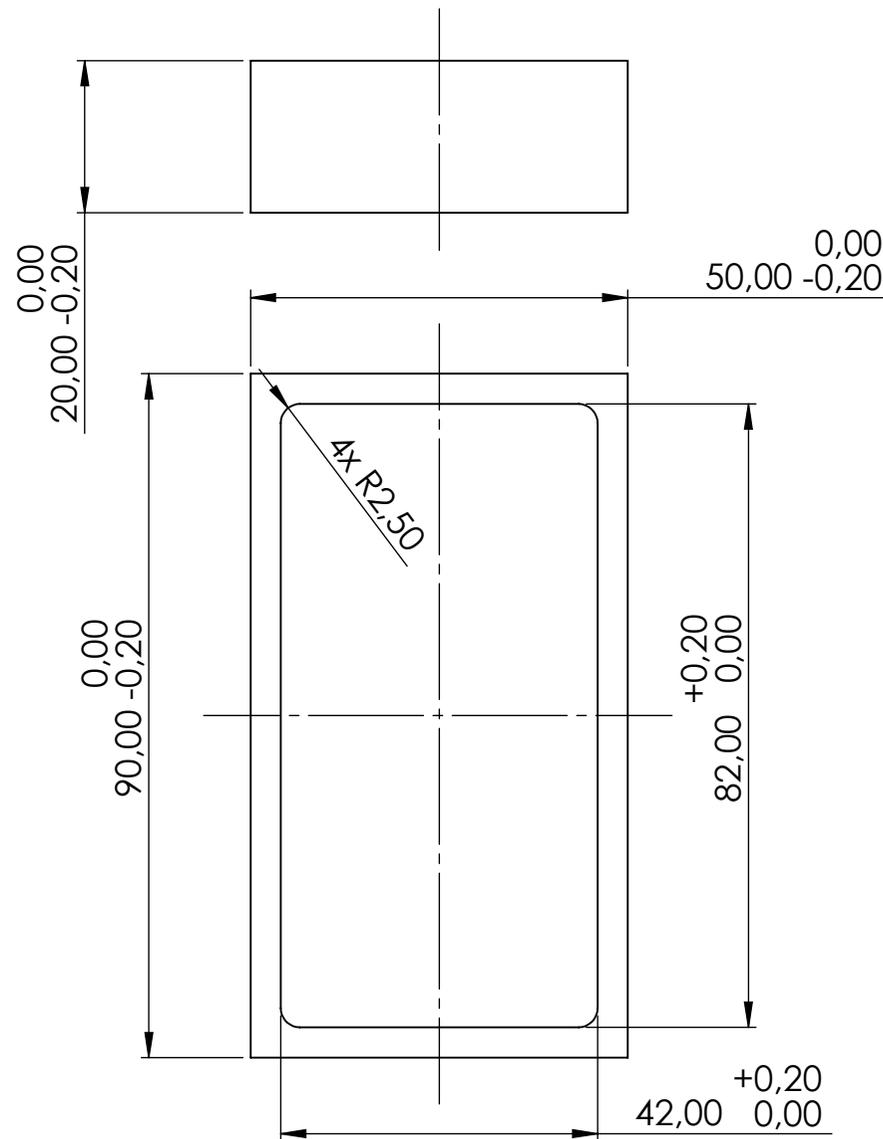
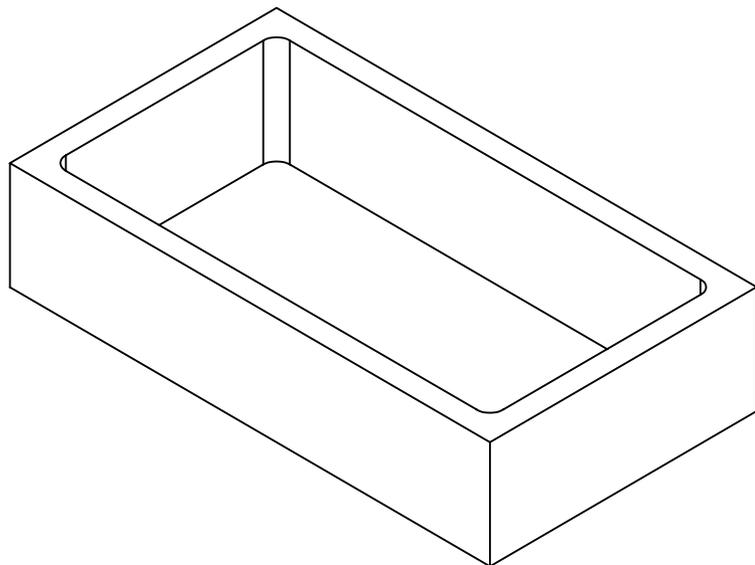


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	EM-A001-P01-M- Base de montaje	1
2	EM-A001-P02-Separador	2
3	EM-A001-P03-M- Retenedor	1
4	EM-A001-P04-M- Pieza roscada	2
5	EM-A001-P05-M- Superficie de empuje	2
6	EM-A001-P06-M- Retenedor longitudinal	1
7	EM-A001-P02-Iman-C	2
8	STANDARD- Tornillo M8 x 50 allen	2
9	EM-A001-P07-M- Pieza roscada impre 3D	2

<b>Observaciones:</b> Observaciones		<b>Título:</b> Montaje HEMS		<b>Plano nº:</b> v1	
<b>Escala:</b> X:X		Un. dim. mm 		<b>Cantidad:</b> 1	
		<b>Dirigido por:</b> Francisco, Baixauli		<b>Fecha:</b> 29/06/2023	
		<b>Revisado por:</b> Jose Ángel Jarabo		<b>Material:</b> PLA	



<b>Observaciones:</b> Todos los agujeros tienen chaflanes de 0,5mmx45°		<b>Título:</b> EM-A001-P07-M-Cubierta HEMS	<b>Plano nº:</b> 1
<b>Escala</b> 2:3	Un. dim. mm 	Dirigido por: Jose Ángel Jarabo	<b>Cantidad:</b> 4
		Revisado por: Ricardo González	<b>Fecha:</b> 19/01/2023
			<b>Material:</b> Aluminio



<b>Observaciones:</b> El radio de 2,5 mm puede ser también de 2 mm, a conveniencia de las brocas disponibles		<b>Título:</b> EM-A001-P06-M-magnet placer		<b>Plano nº:</b> v1
<b>Escala:</b> 1:1		<b>Dirigido por:</b> Ricardo Gonzalez		<b>Cantidad:</b> 12
Un. dim. mm 		<b>Revisado por:</b> Raquel Murcia		<b>Fecha:</b> 09/12/2022
				<b>Material:</b> Aluminio

# Ficha técnica del artículo Q-40-40-20-N

## Datos técnicos y seguridad de uso

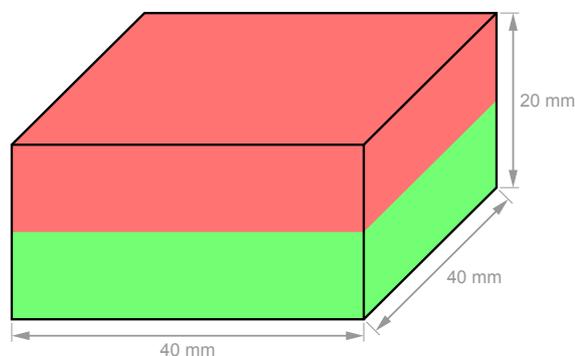
Webcraft GmbH  
Industriepark 206  
78244 Gottmadingen, Alemania

Teléfono: +49 7731 939 839 1

www.supermagnete.es  
support@supermagnete.es

### 1. Datos técnicos

Cód. artículo	Q-40-40-20-N
EAN	7640155436519
Material	NdFeB
Forma	Bloque
Tamaño	40 x 40 x 20 mm
Página 1	40 mm
Página 2	40 mm
Página 3	20 mm
Superficies polares	40 x 40 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm
Sentido de magnetización	Eje 20 mm
Revestimiento	níquelado (Ni-Cu-Ni)
Tipo de fabricación	sinterizado
Magnetización	N42
Fza. sujec.	aprox. 60 kg (aprox. 588 N)
Fuerza de desplazamiento	aprox. 12 kg (aprox. 118 N)
Temperatura de servicio máx.	80°C
Peso	243,2000 g
Temperatura de Curie	310 °C
Remanencia Br	12900-13200 G, 1.29-1.32 T
Coercitividad bHc	10.8-12.0 kOe, 860-955 kA/m
Coercitividad iHc	≥12 kOe, ≥955 kA/m
Producto energético (BxH)max	40-42 MGOe, 318-334 kJ/m <sup>3</sup>



El producto cumple la Directiva europea RoHS.



El producto cumple el Reglamento europeo REACH.

### 2. Advertencias

<p><b>Advertencia</b></p> 	<p><b>Contusiones</b></p> <p>Los imanes grandes tienen una fuerza de atracción enorme.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En caso de uso imprudente, podría pillarse los dedos o la piel entre dos imanes. Esto puede provocar contusiones y hematomas en las áreas afectadas.</li> <li>• Los imanes muy grandes pueden causar fracturas óseas debido a su fuerza.</li> </ul> <p>A la hora de manipular imanes grandes, póngase unos guantes protectores gruesos.</p>
---	---

<b>Advertencia</b>	<b>Marcapasos</b>
	<p>Los imanes pueden alterar el funcionamiento de marcapasos y de desfibriladores implantados.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un marcapasos podría cambiarse al modo de prueba, lo que provocaría una indisposición.</li> <li>• Un desfibrilador podría incluso dejar de funcionar.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si lleva alguno de estos dispositivos, manténgase a una distancia prudente de los imanes: <a href="http://www.supermagnete.es/faq/distance">www.supermagnete.es/faq/distance</a></li> <li>• Advierta siempre a las personas que lleven en este tipo de dispositivos de su proximidad a los imanes.</li> </ul>

<b>Advertencia</b>	<b>Objetos pesados</b>
	<p>Las cargas excesivas o bruscas, los signos de desgaste y los defectos en el material pueden provocar que un imán o un gancho magnético se suelten de su base de fijación.</p> <p>Si un objeto se cae, puede provocar lesiones graves.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La fuerza de sujeción indicada se alcanza únicamente en condiciones ideales. Actúe siempre garantizando un alto grado de seguridad.</li> <li>• No utilice los imanes en lugares en que puedan causar daños a otras personas en caso de defectos en el material.</li> </ul>

<b>Advertencia</b>	<b>Fragmentos metálicos</b>
	<p>Los imanes de neodimio son frágiles. Si dos imanes chocan, pueden saltar fragmentos.</p> <p>Los fragmentos afilados pueden salir despedidos a varios metros de distancia y causar lesiones oculares.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evite que los imanes choquen entre sí.</li> <li>• Si va a manipular imanes grandes, póngase unas gafas protectoras.</li> <li>• Asegúrese de que las personas a su alrededor estén protegidas de igual modo o se mantengan a una distancia prudente.</li> </ul>

### 3. Manejo y almacenamiento

<b>Atención</b>	<b>Campo magnético</b>
	<p>Los imanes generan un campo magnético fuerte y de gran alcance, por lo que algunos dispositivos podrían estropearse, como por ejemplo: televisores, ordenadores portátiles, discos duros, tarjetas de crédito, soportes de datos, relojes mecánicos, audífonos y altavoces.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenga los imanes alejados de todos aquellos objetos y dispositivos que puedan estropearse debido a campos magnéticos fuertes.</li> <li>• Tenga en cuenta nuestra tabla de distancias recomendadas: <a href="http://www.supermagnete.es/faq/distance">www.supermagnete.es/faq/distance</a></li> </ul>

<b>Atención</b>	<b>Inflamabilidad</b>
	<p>Si los imanes se mecanizan, el polvo de perforación se puede inflamar fácilmente.</p> <p>Evite este tipo de mecanizado de los imanes o utilice una herramienta adecuada y agua refrigerante en abundancia.</p>

<b>Atención</b>	<b>Alergia al níquel</b>
	<p>La mayoría de nuestros imanes contiene níquel, incluso los que no llevan revestimiento de níquel.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Algunas personas tienen reacciones alérgicas al entrar en contacto con el níquel.</li> <li>• Las alergias al níquel se pueden desarrollar debido al contacto continuado con objetos que contienen níquel.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evite que la piel entre en contacto con imanes de forma continuada.</li> <li>• No haga uso de imanes si ya tiene alergia al níquel.</li> </ul>

<b>Aviso</b>	<b>Efecto sobre las personas</b>
	<p>Según los conocimientos actuales, los campos magnéticos de imanes permanentes no tienen ningún efecto positivo o negativo apreciable sobre las personas. Es muy improbable que el campo magnético de un imán permanente pueda suponer un riesgo para la salud, pero no se puede excluir del todo.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por su seguridad, evite el contacto continuo con imanes.</li> <li>• Mantenga los imanes grandes al menos a un metro de distancia de su cuerpo.</li> </ul>

<p><b>Aviso</b></p> 	<p><b>Fragmentación del revestimiento</b></p> <p>La mayor parte de nuestros imanes de neodimio dispone de un revestimiento fino de níquel-cobre-níquel para protegerlos de la corrosión. Este revestimiento puede fragmentarse o resquebrajarse al ser golpeado o expuesto a grandes presiones. Esto provoca que los imanes se hagan más sensibles ante condiciones ambientales como la humedad, pudiendo llegar a oxidarse.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Separe los imanes grandes, especialmente las esferas, con ayuda de un trozo de cartón.</li> <li>• Evite que los imanes choquen entre sí, así como las cargas mecánicas continuadas (p. ej. impactos).</li> </ul>
<p><b>Aviso</b></p> 	<p><b>Oxidación, corrosión, herrumbre</b></p> <p>Los imanes de neodimio no tratados se oxidan muy rápidamente y se deshacen. La mayor parte de nuestros imanes dispone de un revestimiento fino de níquel-cobre-níquel para protegerlos de la corrosión. Este revestimiento también ofrece cierta protección frente a la corrosión, pero no resulta lo suficientemente resistente en caso de un uso continuado en espacios exteriores.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilice los imanes tan sólo en espacios interiores secos o protéjalos de las condiciones ambientales.</li> <li>• Evite dañar el revestimiento.</li> </ul>
<p><b>Aviso</b></p> 	<p><b>Resistencia a la temperatura</b></p> <p>Los imanes de neodimio tienen una temperatura de uso máxima de entre 80 y 200 °C. La mayor parte de los imanes de neodimio pierde parte de su fuerza de sujeción de manera permanente a partir de los 80 °C.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No utilice los imanes en aquellos lugares donde vayan a estar expuestos a temperaturas altas.</li> <li>• Si utiliza pegamento, evite endurecerlo con aire caliente.</li> </ul>
<p><b>Aviso</b></p> 	<p><b>Mecanizado</b></p> <p>Los imanes de neodimio son frágiles, termosensibles y se oxidan fácilmente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los imanes se pueden fragmentar si se utiliza una herramienta inadecuada a la hora de perforarlos o serrarlos.</li> <li>• Los imanes se pueden desmagnetizar como consecuencia del calor producido.</li> <li>• Si el revestimiento está dañado, el imán se oxida y se deshace.</li> </ul> <p>Evite la mecanización de imanes si no dispone de las máquinas y la experiencia necesarias. En su lugar, solicite una oferta para una producción a medida: <a href="http://www.supermagnete.es/custom_form.php">www.supermagnete.es/custom_form.php</a></p>

## 4. Instrucciones para el transporte

<p><b>Atención</b></p> 	<p><b>Transporte aéreo</b></p> <p>Los campos magnéticos de los imanes embalados de manera inadecuada pueden alterar el funcionamiento de los dispositivos de navegación de los aviones. En el peor de los casos, se podría producir un accidente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En caso de transporte aéreo, envíe los imanes única y exclusivamente en embalajes con suficiente protección magnética.</li> <li>• Tenga en cuenta las normas correspondientes: <a href="http://www.supermagnete.es/faq/airfreight">www.supermagnete.es/faq/airfreight</a></li> </ul>
<p><b>Atención</b></p> 	<p><b>Envíos postales</b></p> <p>Los campos magnéticos de los imanes embalados de manera inadecuada pueden provocar daños en los dispositivos de clasificación postal, así como en las mercancías frágiles de otros embalajes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tenga en cuenta nuestros consejos para el envío: <a href="http://www.supermagnete.es/faq/shipping">www.supermagnete.es/faq/shipping</a></li> <li>• Utilice una caja con el suficiente espacio y coloque los imanes en el centro del embalaje con ayuda de material de relleno.</li> <li>• Coloque los imanes en el embalaje de manera que los campos magnéticos se neutralicen entre sí.</li> <li>• Utilice placas de acero para proteger del campo magnético, en caso necesario.</li> <li>• Para el transporte aéreo, se aplican normas más estrictas: tenga en cuenta las advertencias para el "transporte aéreo".</li> </ul>

## 5. Instrucciones para una correcta eliminación

Las cantidades pequeñas de imanes de neodimio gastados se pueden depositar en la basura común. Las cantidades mayores de imanes se deben llevar a los puntos de recogida de residuos metálicos.

## 6. Disposiciones legales

Nuestros imanes de neodimio no están destinados a la distribución/exportación a EEUU, Canadá y Japón. Por ello, queda expresamente prohibido exportar de manera directa o indirecta a los países indicados anteriormente los imanes de neodimio suministrados por nosotros o los productos finales elaborados con estos imanes.

**Código TARIC:** 8505 1110 65 0

**Origen:** China

Para más información sobre imanes, consulte la página  
**<https://www.supermagnete.es/faqs>**

**Fecha de los datos:** 03.07.2023

Documento III

Presupuestos

## 1. Introducció

En el presente documento se muestra el presupuesto del proyecto. Este está compuesto de tres unidades de obra diferenciadas.

Por una parte, la fase de diseño de las unidades de levitación, en el que se muestran los elementos empleados para la obtención del diseño final. Por otra parte, se muestra la unidad de obra que hace referencia a la fase de montaje y fabricación y por último, la unidad de obra correspondiente a la obtención de los datos reales de las unidades de levitación mediante la bancada de pruebas, junto a la unidad de obra de la adquisición de las piezas adaptadas para la bancada.

A lo largo del documento, se exponen tres tipos de cuadros, los unitarios, los de precios descompuestos y el de mediciones.

Por último, para el cuadro de precios descompuestos, se toma un 2 % en concepto de Costes Directos Complementarios y para el cálculo del presupuesto de inversión mostrado también en el cuadro de mediciones, se han tenido en cuenta un 13 % de Gastos Generales y un 6 % de Beneficio Industrial.

## 2. Cuadro de precios unitarios

### Cuadro de mano de obra

Núm.	Código	Denominación de la mano de obra	Precio unitario (€)
1	MO.001	Ingeniero técnico de diseño	15,000
2	MO.002	Ingeniero mecánico	15,000
3	MO.003	Ayudante de taller	12,000
<b>Total mano de obra:</b>			<b>4.110,00</b>

### Cuadro de maquinaria

Núm.	Código	Denominación de la maquinaria	Precio unitario (€)
1	MAQ.001	Ordenador WS 64GB/2Tb AMD Ryzen 9 5950X	2.250,000
2	MAQ.002	Magnetómetro Medidor de Gauss GU1 OCS.tec	750,000
3	MAQ.006	Sensor de distancia (OD2000-1301T15)	213,140
4	MAQ.010	Célula de carga RS PRO, 300kg, carcasa de Aleación de acero, 62,1 x 18 x 80 mm	159,800
5	MAQ.008	Fuente de alimentación (SM210-CP-150) con un coste de alquiler de 100€	100,000
6	MAQ.003	Mordaza grip/alicates en ángulo, recta Knipex, mordaza de 40 mm, longitud total 180 mm	52,750
7	MAQ.004	Herramienta montaje imanes Poliamida PA12 impresión 3D	40,000
8	MAQ.009	Calibre Vernier	21,720
9	MAQ.007	Sensor de corriente (L01Z300S05)	17,250
10	MAQ.005	Sensor de temperatura (E6386658P0001)	13,360
11	SW.002	Licencia Software Solidworks	0,989
12	SW.001	Licencia Software JMAG	0,286
13	SW.003	Licencia Software Matlab	0,098
<b>Total maquinaria:</b>			<b>4.194,92</b>

### Cuadro de materiales

Núm.	Código	Denominación del material	Precio unitario (€)
1	MAT.001	Acero laminado M400-50A	525,000
2	MAT.015	Mecanizados soportes	372,000
3	MAT.003	Bobina de conductor de cobre esmaltado 1.4 mm 60 m	90,000
4	MAT.005	Estructura para el arrollado del bobinado de Al 50x90x20 mm de espesor 13 mm	80,000
5	MAT.014	Cajón de madera 1150x50x25 cm	60,000
6	MAT.006	Cubierta de Al	60,000
7	MAT.017	Material viscoelástico	50,000
8	MAT.002	Imanes de neodimio NdFeB	40,000
9	MAT.008	Botas de seguridad resistente a golpes y rozaduras	39,880
10	MAT.013	Separadores de Poliamida PA12 impresión 3D	30,000
11	MAT.016	Mecanizados auxiliares	28,000
12	MAT.018	Guantes aislantes para trabajos eléctricos hasta 500 V (Clase 00)	22,900
13	MAT.010	Tablero de madera laminada 80x30x1.8 cm	16,990
14	MAT.009	DEX FIT Guantes Anticortes de Nivel 5 Cru553	15,090
15	MAT.007	Gafas de seguridad profesionales con protección lateral integrada, lentes transparentes, antivaho y con revestimiento de protección UV	13,990
16	MAT.004	Bobina de aislante 1.55 mm 60 m	10,000
17	MAT.012	Almohadilla antivibración Fabreka 2311151, 100 x 100 x 6mm de espesor 6mm	3,100
18	MAT.011	Tornillo Allen de cabeza cilíndrica RS PRO, M6 x 50mm, paso de rosca 1mm, de Acero Inoxidable	1,285
<b>Total materiales:</b>			<b>8.855,06</b>

### 3. Cuadro de precios descompuestos

Código	Designación	Rend	Ud	Precio unitario (€)	Importe (€)
<b><u>UO.001 Diseño de las unidades de levitación</u></b>					
Diseño de la unidad de levitación					
(Mano de obra)					
MO.001	Ingeniero técnico de diseño	150,000	h	15,000	2.250,00
(Maquinaria)					
MAQ.001	Ordenador WS 64GB/2Tb AMD Ryzen 9 5950X	1,000	ud	2.250,000	2.250,00
SW.001	Licencia Software JMAG	1.500,000	h	0,286	429,00
SW.002	Licencia Software Solidworks	100,000	h	0,989	98,90
SW.003	Licencia Software Matlab	500,000	h	0,098	49,00
	% Costes directos complementarios	2,000 %			101,54
<b>Costes directos</b>					<b>5.178,440</b>
<b><u>UO.002 Montaje y fabricación de las unidades de levitación</u></b>					
Montaje y fabricación de las unidades de levitación					
(Mano de obra)					
MO.002	Ingeniero mecánico	50,000	h	15,000	750,00
MO.003	Ayudante de taller	30,000	h	12,000	360,00
(Maquinaria)					
MAQ.002	Magnetómetro Medidor de Gauss GU1 OCS.tec	1,000	ud	750,000	750,00
MAQ.003	Alicates mordaza de 40 mm, longitud total 180 mm	1,000	ud	52,750	52,75
MAQ.004	Herramienta montaje imanes Poliamida PA12 impresión 3D	1,000	ud	40,000	40,00
(Materiales)					
MAT.001	Acero laminado M400-50A	6,000	ud	525,000	3.150,00
MAT.002	Imanes de neodimio NdFeB	30,000	ud	40,000	1.200,00
MAT.003	Bobina de conductor de cobre esmaltado 1.4 mm 60 m	16,000	ud	90,000	1.440,00
MAT.004	Bobina de aislante 1.55 mm 60 m	16,000	ud	10,000	160,00
MAT.005	Estructura bobinado de Al 50x90x20 mm de espesor 13 mm	16,000	ud	80,000	1.280,00
MAT.006	Cubierta de Al	6,000	ud	60,000	360,00
MAT.007	Gafas de seguridad profesionales con protección lateral integrada	3,000	ud	13,990	41,97
MAT.008	Botas de seguridad resistente a golpes y rozaduras	3,000	ud	39,880	119,64
MAT.009	DEX FIT Guantes Anticortes de Nivel 5 Cru553	3,000	ud	15,090	45,27
MAT.010	Tablero de madera laminada 80x30x1.8 cm	1,000	ud	16,990	16,99
MAT.011	Tornillo, cabeza cilíndrica, M6 x 50mm, paso de rosca 1mm, inox	1,000	ud	1,285	1,29
MAT.012	Almohadilla antivibración, 100 x 100 x 6mm de espesor 6mm	50,000	ud	3,100	155,00
MAT.013	Separadores de Poliamida PA12 impresión 3D	6,000	ud	30,000	180,00
MAT.014	Cajón de madera 150x50x25 cm	2,000	ud	60,000	120,00
	% Costes directos complementarios	2,000 %			204,46
<b>Costes directos</b>					<b>10.427,370</b>
<b><u>UO.003 Adquisición de piezas para la remodelación del banco de pruebas</u></b>					
Adquisición de piezas para la remodelación del banco de pruebas					
(Materiales)					
MAT.015	Mecanizados soportes	1,000	ud	372,000	372,00
MAT.016	Mecanizados auxiliares	5,000	ud	28,000	140,00
MAT.017	Material viscoelástico	1,000	ud	50,000	50,00
	% Costes directos complementarios	2,000 %			11,24
<b>Costes directos</b>					<b>573,240</b>

Código	Designación	Rend	Ud	Precio unitario (€)	Importe (€)
<b>UO.004 Caracterización de las unidades de levitación magnéticas</b>					
Caracterización de las unidades de levitación magnéticas					
(Mano de obra)					
MO.001	Ingeniero técnico de diseño	50,000	h	15,000	750,00
(Maquinaria)					
MAQ.005	Sensor de temperatura (E6386658P0001)	1,000	ud	13,360	13,36
MAQ.006	Sensor de distancia (OD2000-1301T15)	1,000	ud	213,140	213,14
MAQ.007	Sensor de corriente (L01Z300S05)	1,000	ud	17,250	17,25
MAQ.008	Fuente de alimentación (SM210-CP-150)	1,000	h	100,000	100,00
MAQ.009	Calibre Vernier	1,000	ud	21,720	21,72
MAQ.010	Célula de carga RS PRO, 62,1 x 18 x 80 mm	1,000	ud	159,800	159,80
(Materiales)					
MAT.018	Guantes aislantes para trabajos eléctricos hasta 500 V	1,000	ud	22,900	22,90
	% Costes directos complementarios	2,000	%		25,96
<b>Costes directos</b>					<b>1.324,130</b>

#### 4. Cuadro de mediciones

Capítulo	Importe	%
Capítulo 1 Diseño de las unidades de levitación.....	5.178,44	30,94
Capítulo 2 Montaje y fabricación de las unidades de levitación.....	10.427,37	62,30
Capítulo 3 Adquisición de piezas para la remodelación del banco de pruebas.....	573,24	3,42
Capítulo 4 Caracterización de las unidades de levitación magnéticas.....	559,13	3,34
<b>Presupuesto de ejecución material .....</b>	<b>16.738,18</b>	
13% de gastos generales.....	2.175,96	
6% de beneficio industrial.....	1.004,29	
Suma .....	19.918,43	
21% IVA.....	4.182,87	
<b>Presupuesto de ejecución por contrata .....</b>	<b>24.101,30</b>	
<b>Honorarios de Ingeniero</b>		
Proyecto	5,00% sobre PEM .....	836,91
IVA	21% sobre honorarios de Proyecto .....	175,75
	Total honorarios de Proyecto .....	1.012,66
Dirección de obra	5,00% sobre PEM .....	836,91
IVA	21% sobre honorarios de Dirección de obra .....	175,75
	Total honorarios de Dirección de obra .....	1.012,66
	<b>Total honorarios de Ingeniero .....</b>	<b>2.025,32</b>
	<b>Total honorarios .....</b>	<b>2.025,32</b>
	<b>Total presupuesto general .....</b>	<b>26.126,62</b>

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de VEINTISEIS MIL CIENTO VEINTISEIS EUROS CON SESENTA Y DOS CÉNTIMOS.

Documento IV

Pliego de condiciones

## 1. Pliego de Condiciones Generales

### 1.1. Objeto y Alcance del Pliego

El propósito de este documento es establecer los requisitos técnicos mínimos que deben cumplirse en el desarrollo de un sistema de levitación magnética para un prototipo de Hyperloop.

En este sentido, se detallarán las condiciones técnicas y facultativas que deben tenerse en cuenta para la correcta ejecución del proyecto, definiendo las responsabilidades de las partes involucradas en el proceso.

Es responsabilidad del Contratista asegurarse de que los aspectos constructivos del sistema de levitación, incluyendo la fabricación y selección de materiales, cumplan con las últimas normas de diseño, reglamentos y técnicas aplicables. Por lo tanto, este documento no tiene la intención de recopilar dichos detalles.

En relación a los diferentes agentes del proyecto, se establecen:

- Promotor: se refiere al equipo directivo de Hyperloop UPV, quienes son los responsables de encargar el proyecto al contratista y, por ende, al proyectista.
- Proyectista: Francisco Baixauli Barbero, ingeniero en tecnologías industriales, es el responsable del diseño del sistema de levitación magnética de acuerdo con las especificaciones impuestas por el equipo de Hyperloop UPV.
- Contratista: Ricardo González Barranca, capitán del equipo Hyperloop UPV, asume la responsabilidad de garantizar que la ejecución y fabricación del sistema de levitación se realicen conforme al diseño definitivo propuesto en la memoria descriptiva del proyecto y respaldado por los planos adjuntos en el anexo.

### 1.2. Documentación del Proyecto

El presente proyecto se compone de los siguientes documentos:

- Documento 1: MEMORIA DESCRIPTIVA.
- Documento 2: ANEXOS.
- Documento 3: PRESUPUESTOS.
- Documento 4: PLIEGO DE CONDICIONES.
- Documento 5: PLANOS.

Se consideran documentos contractuales aquellos que forman parte del contrato y deben cumplirse obligatoriamente, salvo modificaciones debidamente autorizadas. Los documentos contractuales son:

- Documento 2: ANEXOS.

- Documento 3: PRESUPUESTOS.
- Documento 4: PLIEGO DE CONDICIONES.
- Documento 5: PLANOS.

Los demás documentos son informativos y, aunque no forman parte del contrato, complementan a los documentos mencionados anteriormente.

En consecuencia, el Contratista no puede argumentar cambios en las condiciones del contrato basándose en información contenida en los documentos informativos, excepto en los casos en que aparezcan en cualquiera de los documentos contractuales.

El Contratista es responsable de los errores que puedan surgir por no obtener suficiente información directa para rectificar o ratificar el contenido de los documentos contractuales del proyecto.

## 2. Pliego de Condiciones Técnicas

Para la realización del proyecto, el promotor y el contratista proporcionarán al proyectista todas las especificaciones que el sistema de levitación debe cumplir, de acuerdo con las necesidades del proyecto principal: el diseño de un prototipo de Hyperloop.

Además, el proyectista deberá mantener informado al promotor sobre el progreso del proyecto y presentar un informe final detallando los resultados obtenidos y los pasos seguidos.

### 2.1. Documentos de Soporte

En esta sección se establece el contenido mínimo acordado por los diferentes agentes involucrados en el proyecto para los distintos documentos proporcionados:

- **Documento 1: MEMORIA DESCRIPTIVA:** Define los objetivos del proyecto, las especificaciones técnicas del sistema en el que se debe integrar, y el proceso de diseño seguido. También incluye los procesos de fabricación y montaje realizados, así como los resultados obtenidos en el banco de pruebas.
- **Documento 2: ANEXOS:** Incluye todos los documentos debidamente referenciados en los demás documentos del proyecto.
- **Documento 3: PRESUPUESTOS:** Cuantifica el costo económico del proyecto desglosado en diferentes partidas.
- **Documento 4: PLIEGO DE CONDICIONES:** Establece las responsabilidades y derechos de cada uno de los agentes que participan en el proyecto, y establece un marco legal común.

- **Documento 5: PLANOS:** Contiene los planos proporcionados por el promotor para respaldar las especificaciones técnicas del proyecto, así como los planos que definen el diseño definitivo del bobinado del motor.

## 2.2. Disposiciones Legales

El proyecto deberá llevarse a cabo de acuerdo con los siguientes reglamentos y normativas:

- Real Decreto 842/2002: Reglamento electrotécnico de baja tensión.
- Real Decreto 1066/2001: Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.
- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Norma UNE-EN 10020:2001: Definición y clasificación de los tipos de acero.
- Norma UNE-EN 10106:2016: Chapas y bandas magnéticas, laminadas en frío, de grano no orientado en estado final de suministro.
- Norma UNE 157001:2014: Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un documento técnico.

## 3. Pliego de Condiciones Facultativas

En esta sección se describen los diferentes agentes que participan en el proyecto, así como las obligaciones y responsabilidades de cada uno de ellos.

### 3.1. Promotor

El promotor del proyecto es el equipo directivo de Hyperloop UPV, quienes encargan este proyecto al contratista y, por consiguiente, al proyectista.

Es responsabilidad del promotor definir adecuadamente las especificaciones sobre las cuales se debe diseñar el sistema de levitación magnética. Por lo tanto, el promotor será responsable de cualquier fallo en dichas especificaciones que resulte en retrasos en la finalización del proyecto o en un sobre coste del mismo.

El promotor tiene derecho a solicitar información al contratista y al proyectista sobre el progreso del proyecto, incluso antes de la fecha de entrega.

### 3.2. Contratista

La responsabilidad del contratista recae en Ricardo González Barranca.

Es responsabilidad del contratista asegurarse de que la fabricación del sistema de levitación se realice de acuerdo con lo establecido en los documentos del proyecto.

Al igual que el promotor, el contratista tiene derecho a consultar el estado del proyecto e incluso a rescindir el avance del mismo de acuerdo con las cláusulas que se expondrán más adelante.

### 3.3. Projectista

El projectista es Francisco Baixauli Barbero.

Es responsabilidad del projectista resolver cualquier incoherencia que surja durante el desarrollo del proyecto, ya sea en relación con el proceso de fabricación o no. Por lo tanto, cualquier sobrecoste relacionado con una mala interpretación o aplicación de las especificaciones técnicas establecidas por el promotor será responsabilidad del projectista.

El projectista tiene derecho a realizar el diseño de acuerdo con su criterio profesional, sin verse influenciado por las presiones o intereses del promotor o del contratista, siempre y cuando no vayan en contra de las especificaciones técnicas del proyecto.

### 3.4. Plazos y Entrega del Proyecto

Los plazos de ejecución y la fecha de inicio del diseño están definidos en el contrato y deben cumplirse obligatoriamente por el projectista. Sin embargo, se mencionan nuevamente en este documento:

- Fecha de inicio del proyecto: 17/10/2022
- Fecha de finalización del proyecto: 26/05/2023

El projectista tiene derecho a solicitar una extensión de los plazos de entrega, siempre que esté debidamente justificado. Esta solicitud debe ser aceptada por el contratista, quien asumirá la responsabilidad de los retrasos ante el promotor del proyecto.

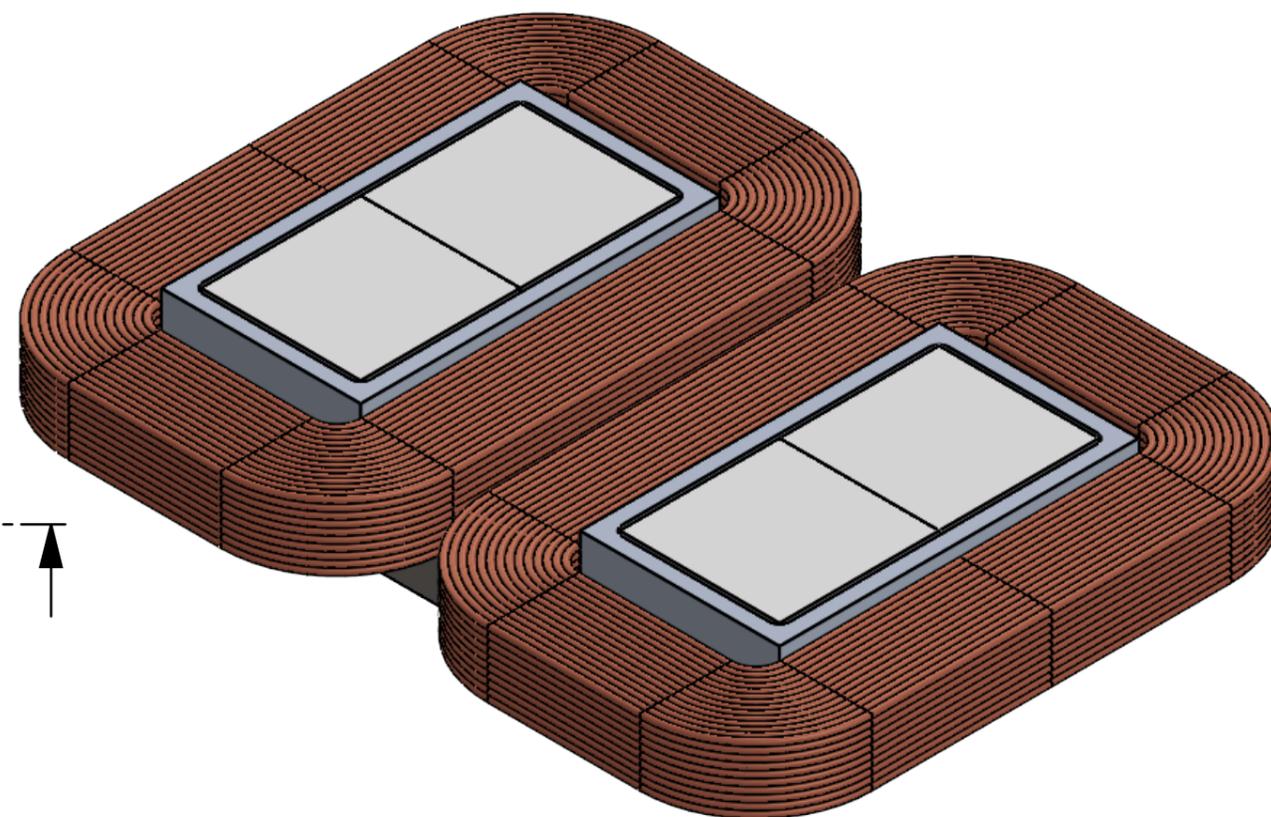
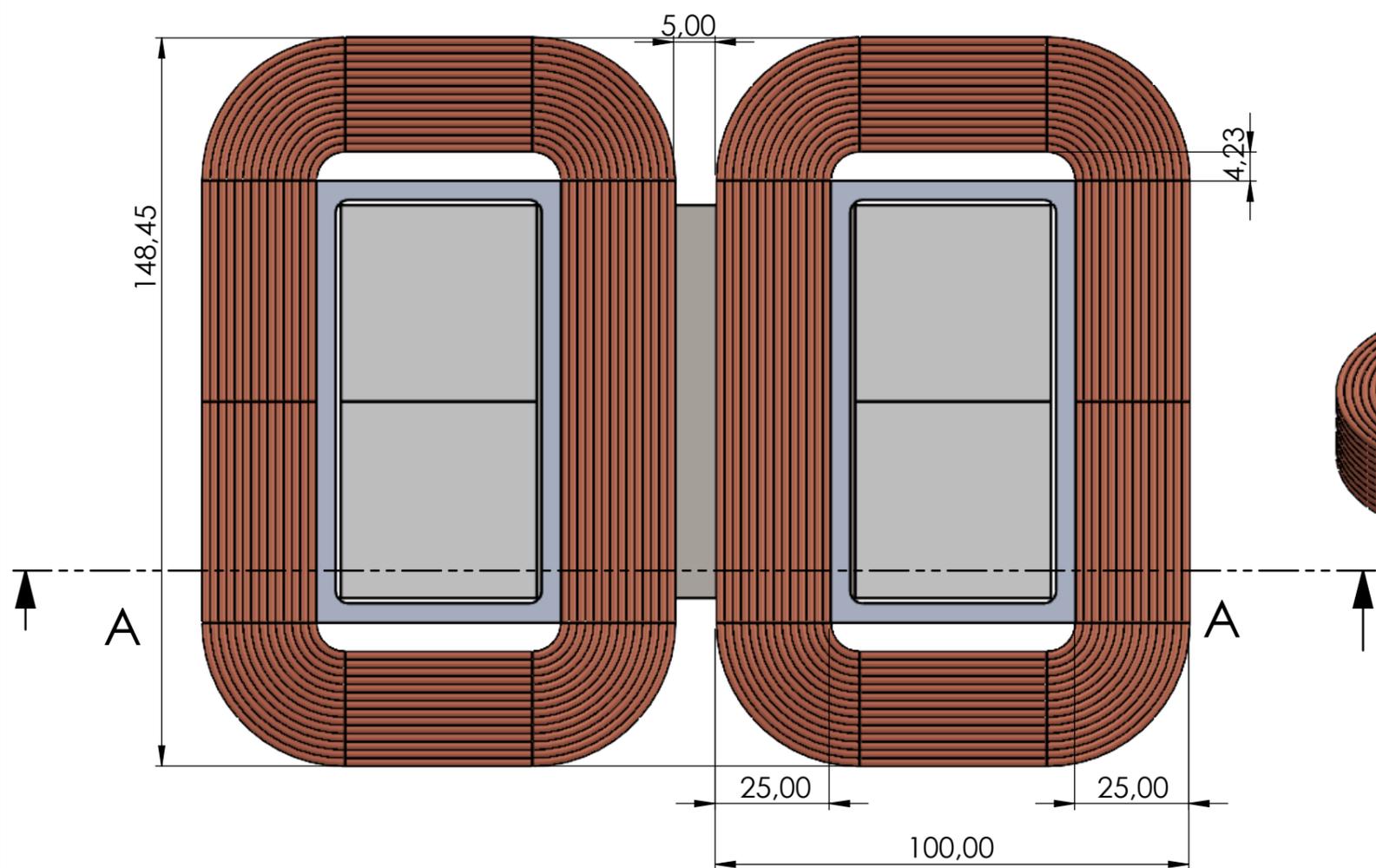
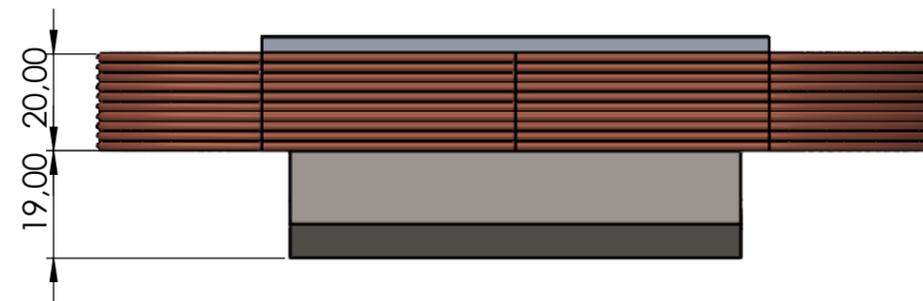
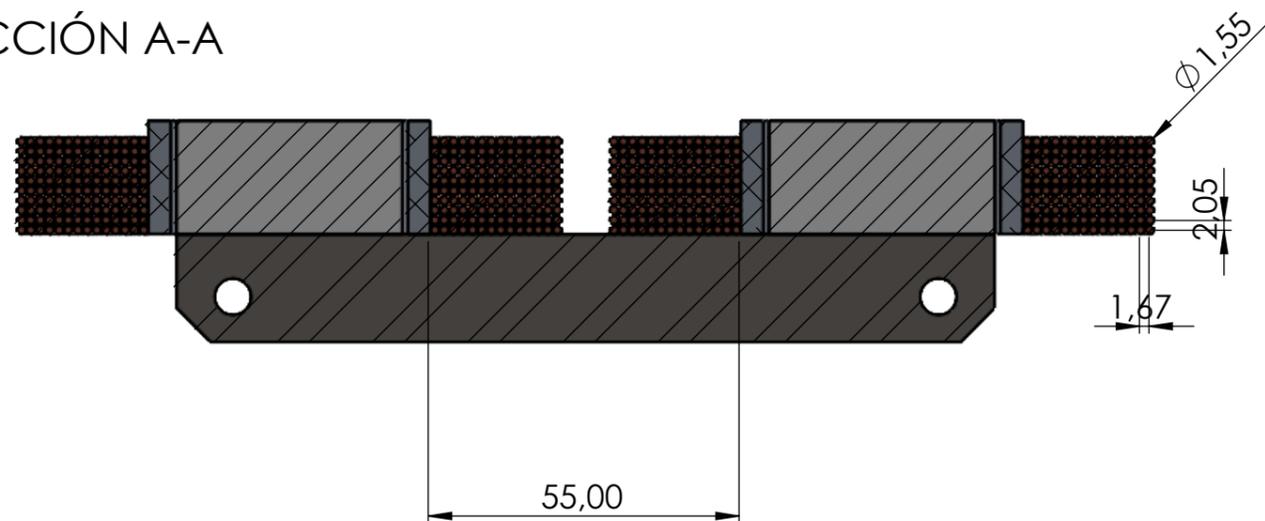
### 3.5. Garantía

El diseño del bobinado tiene una garantía de 1 año a partir de la entrega del proyecto al cliente. Por lo tanto, cualquier falla en el diseño será responsabilidad del projectista, quien deberá proceder a realizar un rediseño. En ningún caso el projectista será responsable de los costos de fabricación del bobinado nuevamente.

Documento V

Planos

SECCIÓN A-A



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



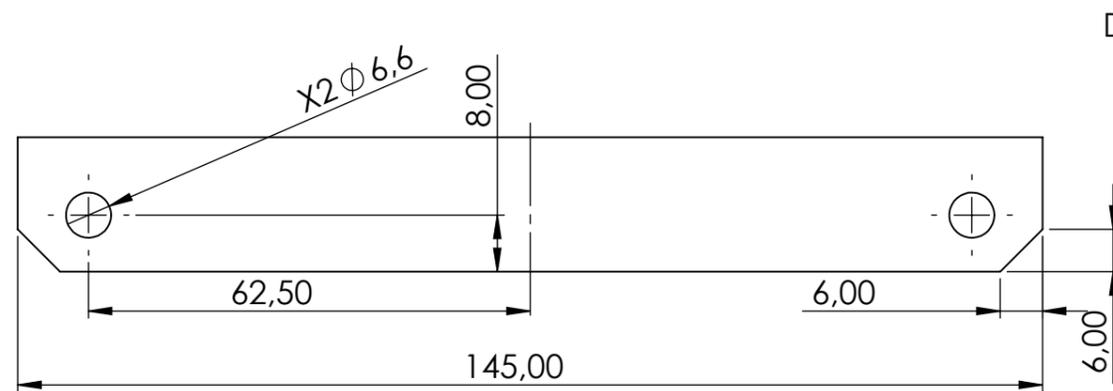
Proyecto:  
PROYECTO DE UN SISTEMA DE LEVITACIÓN VERTICAL PARA UN PROTOTIPO HYPERLOOP

Plano:  
Módulo de levitación vertical

Autor:  
Francisco Baixauli Barbero

Fecha:  
Enero 2022

Escala:  
1:1



Dirección de laminación

