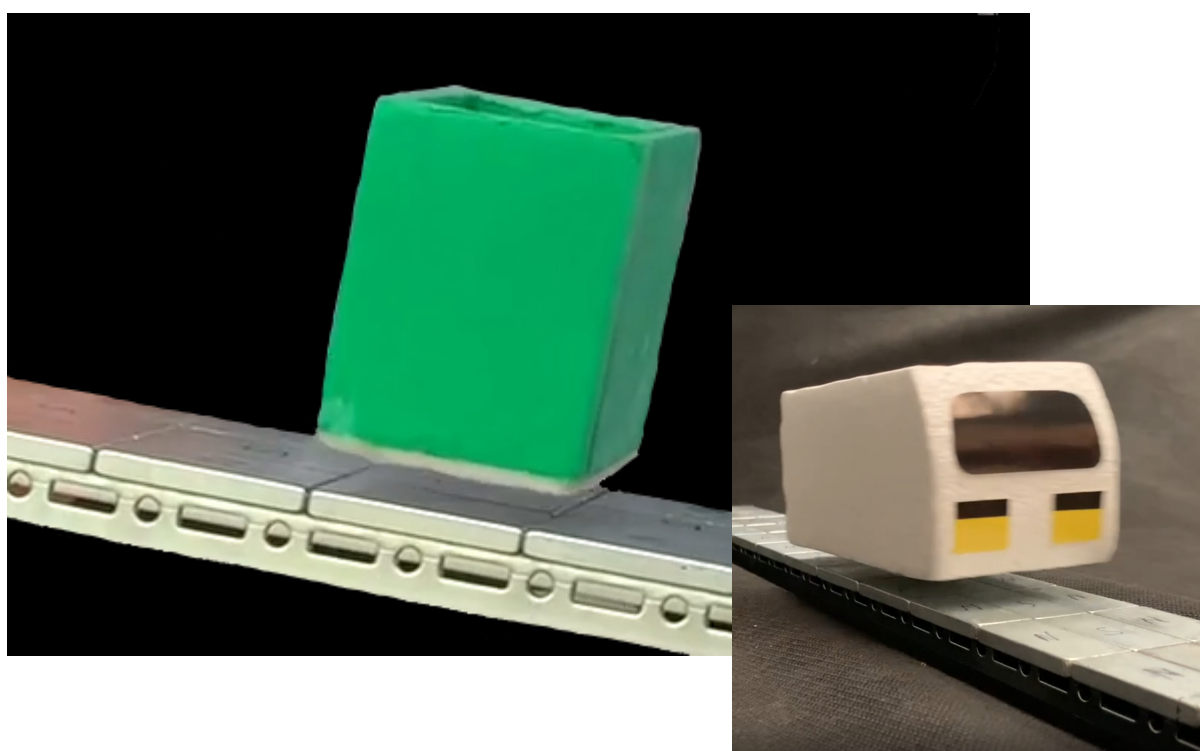


Treball de Recerca

# LEVITACIÓ SUPERCONDUCTORA I MOBILITAT

Comparativa entre tren superconductor urbà i tramvia



**Alumne: David Diestre Rubio**

Tutora: Esther Clotet Romeu

Vedruna Sagrat Cor

Tarragona, desembre 2021

## PRESENTACIÓ

El sorgiment del meu interès envers la superconductivitat es remunta a l'estiu del 2020. A principis de juliol va tenir lloc una sessió en línia conduïda per Francesc Díaz, vicerector de Recerca i Planificació Científica de la Universitat Rovira i Virgili, amb el propòsit de realitzar una petita introducció a la superconductivitat. Aquesta trobada *online* va ser una de les diverses que van tenir lloc durant el campus d'estiu de la URV d'aquell any, al qual jo em vaig apuntar.

Aquesta sessió i els coneixements que es van transmetre en ella em van fascinar fins al punt de voler dedicar aquest treball de recerca a la superconductivitat per a poder conèixer més sobre aquest fenomen.

En un principi, la idea era fer un estudi sobre els materials superconductors, fabricar-ne un i construir una maqueta de tren amb aquest per estudiar-ne el funcionament. Aquesta idea, però, era poc original donat que alumnes d'anys anteriors ja havien fet treballs similars.

Posteriorment, va sorgir la idea de fer un treball comparatiu entre els trens elèctrics i els trens superconductors en l'àmbit d'altres velocitats. Aquesta idea era més original i creativa, ja que no existeixen treballs amb uns objectius semblants.

No obstant això, finalment vaig decidir orientar els objectius a l'àmbit de la mobilitat i la sostenibilitat a les ciutats realitzant un estudi comparatiu entre els trens superconductors urbans i els tramvies elèctrics. Aquesta decisió va ser presa donada la rellevància actual del problema de la contaminació que provoca l'ús en excés del vehicle privat a les ciutats.

## **RESUMEN**

Este trabajo pretende estudiar las ventajas y desventajas del transporte superconductor en las ciudades con el objetivo de demostrar la viabilidad de los trenes levitantes como transporte urbano.

Para realizar este estudio se ha elaborado una comparativa con un transporte público sostenible ya presente en muchas ciudades, el tranvía. Se han construido dos maquetas, una de tren levitante (con imanes de neodimio y un superconductor) y una de tren eléctrico. Con éstas se han conducido una serie de experimentos; las pruebas con el superconductor se han llevado a cabo en la sede de Messer Group en Tarragona dada la necesidad de manipular nitrógeno líquido. El objetivo de estos controles ha sido estudiar para cada tren su eficiencia, el efecto de la fricción y los requerimientos de su infraestructura, entre otros.

Como resultado de la investigación, se han determinado las ventajas de los trenes superconductores entre las cuales destacan la eficiencia energética que comporta la ausencia de fricción con el suelo, una infraestructura ligera y poco invasiva, el impulso a la movilidad verde, su flexibilidad, la necesidad de poco mantenimiento, y su ruido reducido. Por el contrario, su mayor desventaja es el elevado coste económico de los materiales de construcción.

En conclusión se ha determinado que, a pesar de su coste, los trenes superconductores urbanos presentan gran potencial para una futura implantación en las metrópolis: proporcionan ahorro en mantenimiento y energía, se pueden adaptar a ciudades con una distribución irregular, y representan una alternativa viable al vehículo privado.

## **SUMMARY**

This study aims to find out the advantages and disadvantages of superconducting transport in cities to demonstrate the viability of levitating trains as urban transport.

To carry it out, a comparison has been made with a sustainable public transport already present in many cities, the tram. Two models have been built: one of a levitating train (with neodymium magnets and a superconductor), and one of an electric train. A series of experiments have been conducted using these models; the tests with the superconductor have been carried out at the headquarters of Messer Group in Tarragona, given the need to handle liquid nitrogen. In a nutshell, the objective of these demonstrations has been to study the efficiency, the effect of friction, and the requirements of the infrastructure for each train.

As a result of the investigation, it has been determined that the main advantages of superconducting trains are the energy efficiency that entails the absence of friction with the ground, its light and non-invasive infrastructure, the promotion of green mobility, its flexibility, the need for little maintenance, and its low noise. However, the most important of its disadvantages is the high economic cost of the materials required for its construction.

In conclusion, it has been determined that, despite their cost, urban superconducting trains have great potential for future implementation in cities as they provide savings in maintenance and energy, they can be adapted to cities with an irregular distribution, and they represent a viable alternative to the private vehicle.

## ÍNDEX

<b>1. OBJECTIUS</b>	<b>4</b>
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>5</b>
2.1. Introducció a la superconductivitat	5
2.1.1. Propietats	5
2.1.2. Funcionament	6
2.1.3. Tipus de superconductors	8
2.1.4. Aplicacions	10
2.2. Trens	10
2.2.1. Levitació magnètica	10
2.2.2. Elèctrics	14
2.3. Mobilitat i sostenibilitat	16
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
3.1. Recerca d'informació	17
3.2. Elaboració de les maquetes	17
3.2.1. Tren superconductor	18
3.2.2. Tren elèctric	22
3.3. Guia de proves i registres per a l'experimentació	24
3.3.1. Tren superconductor	24
3.3.2. Tren elèctric	28
3.4. Proves i experimentació	30
3.4.1. Tren superconductor - Experiència en el laboratori de Messer Group	30
3.4.2. Tren elèctric	30
3.5. Vídeos explicatius del treball de recerca	30
<b>4. RESULTATS</b>	<b>31</b>
4.1. Resultats de l'experimentació	31
4.1.1. Tren superconductor	31
4.1.2. Tren elèctric	36
4.2. Comparativa	39
4.2.1. Eficiència energètica	39
4.2.2. Infraestructura i mobilitat	40
4.2.3. Cost	41
4.2.4. Comparativa a escala real	42
4.3. Anàlisi i discussió de resultats	43
<b>5. CONCLUSIONS</b>	<b>44</b>
<b>6. AGRAÏMENTS</b>	<b>47</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>48</b>

## 1. OBJECTIUS

Per iniciar el present treball de recerca cal definir primer uns objectius ben estructurats enfocats a validar o desmentir la hipòtesi plantejada a continuació.

La hipòtesi de partida d'aquest treball és que, tot i que la implementació dels trens superconductors requereix grans inversions, l'estalvi energètic d'aquest transport, la simplicitat de la seva infraestructura i els continuats avenços en aquest camp l'acabaran convertint en una alternativa viable al tramvia elèctric i en una eina vital per ajudar a reduir l'ús de vehicles contaminants en les ciutats, fent de la mobilitat una qüestió més sostenible i eficient.

Els objectius de la realització d'aquest treball són:

- Investigar com funciona la tecnologia basada en la superconductivitat i com es pot aplicar al transport per ajudar davant el gran repte de la mobilitat al que s'enfronten les grans metròpolis.
- Preparar un experiment amb diferents proves per documentar resultats i extreure conclusions que d'una manera visual i empírica ajudin a entendre el funcionament, les propietats i els avantatges de cada tipus de tren (de levitació i elèctric).
- Comparar els trens superconductors urbans amb els tramvies actuals en termes d'eficiència energètica, capacitat, infraestructura, velocitat, cost i seguretat i determinar de manera justificada quins poden ser els beneficis i/o els inconvenients de la implantació de trens superconductors urbans a les ciutats en termes de mobilitat i sostenibilitat.

## 2. INTRODUCCIÓ

### 2.1. Introducció a la superconductivitat

L'any 1911, Heike Kamerlingh Onnes i Gilles Holst van observar que el mercuri no presentava resistència elèctrica per sota de 4,2 graus Kelvin. Arran d'aquest descobriment va sorgir un dels temes d'estudi més important de la física moderna, la superconductivitat. Aquest camp de recerca porta actiu més de cent anys i encara en queda molt per estudiar. (Per conèixer més sobre la història d'aquest fenomen consultar "Annex I: Història de la superconductivitat").

La superconductivitat, igual que el sorgiment de la vida o la consciència, és un exemple de fenomen emergent, en el qual el tot és major que la suma de les parts.

Els superconductors són materials que en ser sotmesos a baixes temperatures desenvolupen la superconductivitat, un estat en el qual presenten propietats magnètiques i de conductivitat fascinants i pròpies de la ciència-ficció.

Existeixen diversos tipus de superconductors i les seves propietats, tot i seguir un guió general, estan condicionades per la composició, la geometria i la mida d'aquests.

#### 2.1.1. Propietats

##### **Resistència nul·la**

La superconductivitat, com diu el seu nom, està relacionada amb la conductivitat.

La llei d'Ohm<sup>1</sup> explica que la diferència de potencial o el voltatge d'un corrent (V) és determinat pel producte entre la intensitat d'aquest (I) i la resistència del conductor (R).

Els conductors convencionals necessiten una diferència de potencial entre l'inici i el final del circuit per permetre el flux d'un corrent determinat i superar la barrera de la resistència.

La resistència<sup>2</sup>, alhora, depèn de la longitud (l) i superfície (s) del conductor i de la seva resistivitat (ρ), la qual és diferent en cada material. La conductivitat d'un material és la inversa d'aquesta resistivitat (1/ρ).

En la superconductivitat, la resistivitat és nul·la. Això significa que la **resistència és inexistent** i que, per tant, la diferència de potencial resulta en 0 i no es perd energia en el transport de corrent. Tal fet dóna a entendre perquè els superconductors s'anomenen d'aquesta manera, ja que, en ser 0 la resistivitat, la seva conductivitat és perfecta.

En estat superconductor, els electrons s'aparellen formant el que s'anomena parelles de Cooper. Aquestes parelles no consumeixen energia: ni col·lideixen entre elles ni amb els elements fixos del material, fet que explica la resistència nul·la dels superconductors.

---

<sup>1</sup> Llei d'Ohm:  $V = I \cdot R$

<sup>2</sup> Fórmula Resistència:  $R = \rho \cdot l/s$

→ ρ= resistivitat

→ l= longitud del segment

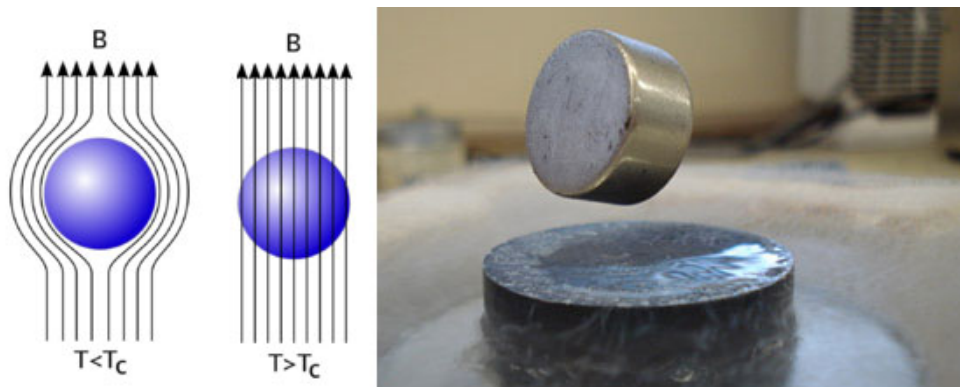
→ s= superfície del segment

L'efecte Joule provoca que en els conductors convencionals part de l'energia dels electrons es perdi i es dissipi en forma de calor per fricció amb el mateix conductor. En els superconductors l'efecte Joule és 0 donat que depèn de la resistència, la qual és nul·la en aquest tipus de materials.

Aquesta propietat dels superconductors ofereix un enorme avantatge en el seu ús. Ja que, a banda de no desaprofitat energia, els permet transportar intensitats molt més elevades de corrent que les físicament possibles per qualsevol conductor convencional de les mateixes dimensions. Això es deu al simple fet que un conductor convencional es fondria en experimentar les enormes quantitats de calor generades per l'efecte Joule.

### **Expulsió del camp magnètic**

L'efecte Meissner descriu que a una temperatura alta el superconductor és un conductor normal i permet que el camp magnètic el travessi. En canvi, explica que, quan es redueix la seva temperatura fins a un punt crític, el superconductor **expulsa del seu interior / apantalla el camp magnètic**. Això fa que en presència d'un imant, el qual genera un camp magnètic, aquests es repel·leixin fent que leviti (vegeu imatge 1).



Imatge 1: propietat dels superconductors d'expulsió del camp magnètic (efecte Meissner) i levitació <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/avances-en-superconductores/6000>

### **2.1.2. Funcionament**

Les parelles de Cooper només apareixen si l'energia que reben és menor que la màxima que poden suportar. És per això que perquè un superconductor desenvolupi superconductivitat els valors d'energia del seu sistema han de ser reduïts fins a cert punt complint les condicions esmentades a continuació:

#### ***Estar per sota d'una temperatura crítica (Tc) o temperatura de transició***

Per presentar les seves propietats característiques necessiten una certa estabilitat en el sistema. I a major temperatura més agitació i, per tant, menys estabilitat.

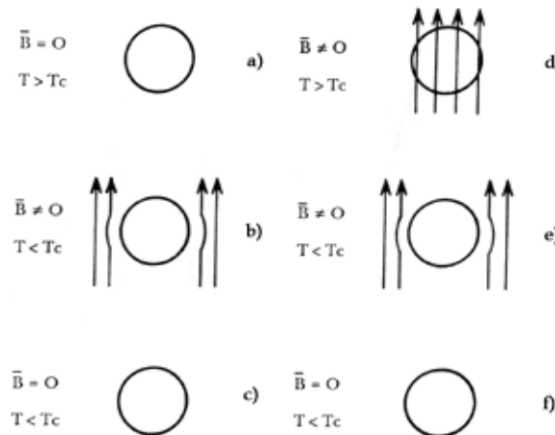
De moment, la superconductivitat requereix que els materials siguin refredats a temperatures molt baixes. És per això que el seu descobriment va lligat al desenvolupament de mètodes per assolir temperatures extremadament baixes.

El fet de crear un material que assolís superconductivitat en condicions estàndard significaria la revolució de la transmissió d'energia i l'ús dels superconductors en elements cada cop més quotidians.

**No ser envoltats per un camp magnètic major que el que són capaços de contrarestar, el qual s'anomena camp magnètic crític ( $B_c$ )**

El superconductor pot emmagatzemar un màxim de parelles de Cooper. I quan la intensitat del camp magnètic supera la capacitat de contrarestar un camp que té el nombre limitat de parelles de Cooper, la superconductivitat es trenca i el camp magnètic el travessa.

L'ordre en què el superconductor se sotmet a les condicions de camp magnètic i temperatura necessàries per entrar en estat superconductor no afecta el seu comportament, com es pot apreciar de manera esquemàtica en la imatge 2.

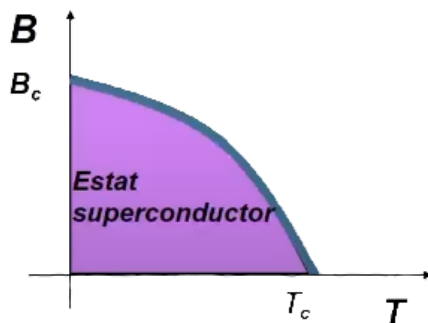


Imatge 2: esquema dels diferents ordres d'aplicació de  $T_c$  i  $B_c$  per assolir la superconductivitat <https://zaguan.unizar.es/record/31565/files/TAZ-PFC-2014-576.pdf>

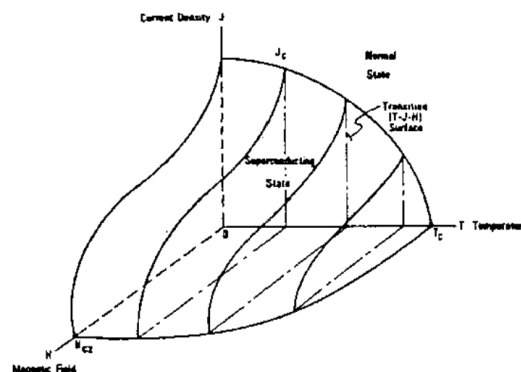
**No ser travessats per un corrent elèctric major que el que són capaços de contrarestar, el qual s'anomena corrent crític ( $J_c$ )**

En els àmbits del transport d'electricitat amb superconductors i la creació d'electroimants amb aquests materials s'ha de tenir en compte també el corrent crític, el qual determina el màxim corrent que pot transportar el superconductor sense que es trenquin les parelles de Cooper.

Com es pot observar als gràfics 1 i 2, entre els valors  $T_c$ ,  $B_c$  i  $J_c$  hi ha una relació de dependència.



Gràfic 1: relació entre  $T_c$  i  $B_c$   
<https://www.youtube.com/watch?v=N0N1fBXWwm0>



Gràfic 2: relació entre  $T_c$ ,  $B_c$  i  $J_c$   
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6288/07CAPITOL3.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

### 2.1.3. Tipus de superconductors

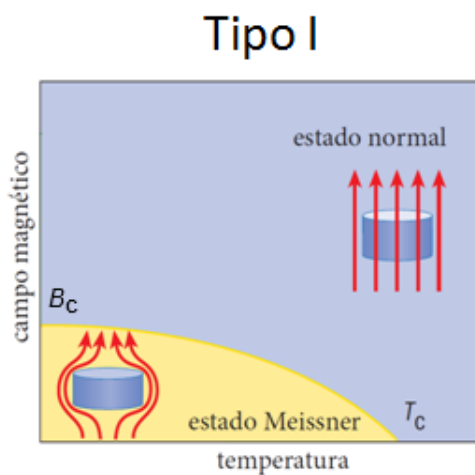
Actualment coneixem **dos tipus de superconductors**. El seu comportament és definit per la constant de Ginzburg-Landau<sup>3</sup>  $\kappa = \lambda / \xi$ .

Segons aquesta constant, si  $\kappa$  és menor que 0,71, el superconductor presentarà una energia de superfície positiva, tractant-se així d'un **superconductor de tipus I**. Per altra banda, si  $\kappa$  és major que 0,71, l'energia de superfície del superconductor serà negativa, característica pròpia dels **superconductors de tipus II**.

#### *Superconductors de tipus I*

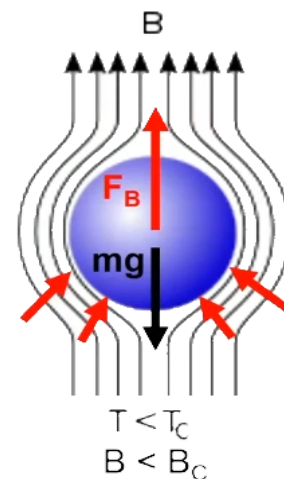
Els superconductors de tipus I acostumen a ser metalls dúctils amb altes temperatures de fusió com per exemple el plom, el zinc, el coure, l'estany, etc. Quan es compleixen les seves condicions crítiques presenten totes les qualitats descrites anteriorment: ofereixen resistència nul·la i expulsen els camps magnètics del seu interior creant les anomenades corrents d'apantallament, les quals són iguals i oposades al camp extern.

Així doncs, si es compleixen les condicions necessàries poden assolir levitació superconductora (vegeu imatge 3). Ja que, a conseqüència de l'efecte Meissner, en col·locar un superconductor de tipus I sobre un imant s'indueixen corrents que expulsen el camp magnètic del seu interior. Això, com es pot apreciar a l'esquema de la imatge 4, provoca que el superconductor leviti a una distància tal que la força de repulsió dels corrents superconductors compensa el seu pes. Així i tot, la levitació d'un imant en aquest tipus de superconductors és **inestable** donat que no hi ha cap mena d'ancoratge que el sostingui de manera estable.



Imatge 3: esquema de l'estat superconductor en superconductors de tipus I

<https://francis.naukas.com/2018/09/17/el-angulo-magico-del-grafeno-mi-charla-naukas18/>



Imatge 4: representació de la levitació en superconductors de tipus I (inestable)

<https://www.youtube.com/watch?v=N0N1fBXWwm0>

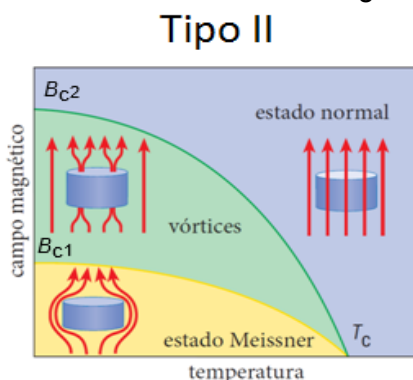
<sup>3</sup> "λ" és la longitud de penetració de London, que determina l'extensió dels Corrents d'Apantallament. "ξ" és la longitud de coherència, que estableix la llei exponencial segons la qual petites perturbacions de densitat d'electrons superconductors recuperen el seu valor d'equilibri.

## Superconductors de tipus II

Els superconductors de tipus II solen ser aliatges o metalls que posseeixen resistivitats grans en l'estat normal. Aquest tipus de superconductors, quan es compleixen les seves condicions crítiques, també presenten l'efecte Meissner amb camps magnètics petits (per sota de  $B_{c1}$ ). Però quan el camp magnètic supera una determinada magnitud (entre  $B_{c1}$  i  $B_{c2}$ ) s'entra en l'estat mixt: en el qual el superconductor permet que el camp el penetri parcialment formant vòrtexs<sup>4</sup> (vegeu imatges 5 i 6). Perquè pugui penetrar el camp magnètic es destrueix la superconductivitat en els vòrtexs. Per tant, en presència d'un corrent, els vòrtexs poden crear una resistència de manera que el superconductor ja no seria tampoc un conductor perfecte. Els vòrtexs poden ancorar-se en un superconductor a causa de defectes en la xarxa d'àtoms. Quan això passa el superconductor que està levitant sobre un imant també està ancorat i costa molt separar-los.

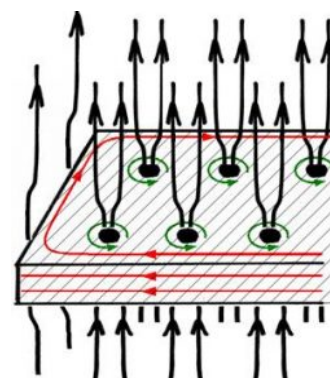
A causa de la formació dels vòrtexs, el camp magnètic no contraresta la gravetat sinó que ancora el superconductor en l'espai amb més o menys llibertat de moviment depenent de la geometria del camp magnètic. És a dir, si el camp magnètic és simètric com en un carril d'imants, el superconductor podrà desplaçar-se endavant i endarrere amb total llibertat a causa de la simetria del camp al llarg del recorregut. Al contrari, si se l'intenta desplaçar en una direcció que no sigui la lineal del carril, sigui lateralment o verticalment, oposarà resistència donat que el camp magnètic de la zona on es vol traslladar el superconductor no és igual que el que es presenta en la seva posició inicial.

Aquest ancoratge és degut a l'**efecte de memòria** present en superconductors de tipus II, mitjançant el qual aquests materials "recorden" el camp magnètic a què estan sotmesos. Aquest efecte origina l'enclavament de la pastilla superconductora en la posició en la qual es troba en el moment de refredar-se. És a dir, si un superconductor es deixa a una certa distància d'un imant, un cop aquest es refredi romandrà ancorat en la seva posició inicial. I de la mateixa manera, si s'aplica una força al superconductor mentre continua refredat aquest crearà una força oposada per mantenir-se en el camp magnètic en què es troba. El fenomen de l'ancoratge dels vòrtexs permet que es pugui **construir un tren superconductor** que leviti sobre una via magnètica sense descarrillar, sent capaç de prendre corbes més tancades i augmentant així la **seguretat** d'aquest tipus de transport.



Imatge 5: esquema de l'estat superconductor en superconductors de tipus II

<https://francis.naukas.com/2018/09/17/el-angulo-magico-del-grafeno-mi-charla-naukas18/>



Imatge 6: representació dels vòrtexs en superconductors de tipus II

<https://wp.icmm.csic.es/superconductividad/superconductividad/levitacion/vortices/>

<sup>4</sup> Els vòrtexs són com tubs pels quals passa el camp magnètic. S'anomenen vòrtex perquè el corrent del superconductor circula en moviment espiral de tal manera que permet el pas del camp magnètic.

A manera de resum, en un superconductor de tipus I les forces seran sempre repulsives a causa de l'efecte Meissner. Per altra banda, en un superconductor tipus II el sentit de la força depèn del sentit del desplaçament respecte d'una posició d'equilibri.

#### **2.1.4. Aplicacions**

Els superconductors de tipus I, a causa de l'existència d'un únic camp crític molt reduït per sobre del qual no presenten característiques superconductores, no posseeixen aplicació en la pràctica. En canvi, els superconductors de tipus II tenen nombroses aplicacions en l'actualitat i presenten un gran potencial per a créixer en ús en el futur.

Actualment, els electroimants més potents es fabriquen amb bobines de cables superconductors. Un exemple en són els imants que s'utilitzen en grans instal·lacions científiques com els acceleradors de partícules. No obstant això, un exemple més present en la societat és el seu ús en medicina en els aparells de ressonància magnètica nuclear. Els electroimants superconductors són també un component clau de generadors com els de plantes eòliques o hidràuliques, que transformen energia mecànica en electricitat. Això es deu al fet que disminueixen les pèrdues mecàniques en la producció d'energies alternatives i ajuden a reduir el pes i les dimensions dels motors. A més, també ajuden a dependre menys dels escassos imants convencionals.

No obstant això, l'àmbit de les aplicacions dels superconductors es troba en constant creixement. És per això que noves aplicacions rellevants per al problema de l'eficiència energètica es troben en continu estudi i desenvolupament. En són exemples: cables que condueixen l'electricitat sense pèrdues d'energia i trens de levitació magnètica.

## **2.2. Trens**

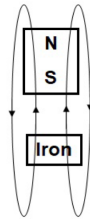
### **2.2.1. Levitació magnètica**

En l'àmbit de la mobilitat, els superconductors es poden utilitzar per construir trens que leviten sobre vies magnètiques. Aquests tipus de trens (encara en desenvolupament) poden arribar a altes velocitats, ja que eliminen la fricció amb el terra. En aquests transports, els superconductors es col·loquen als baixos o laterals del tren i poden fer-se servir en la levitació de dues maneres principals. Així i tot, també existeix un altre tipus de levitació magnètica que no emprava superconductors.

#### ***Levitació electromagnètica (EML)***

Aquest tipus de tren funciona basant-se en la força d'atracció que existeix entre un electroimant i un material ferromagnètic i **NO usa la superconductivitat** (vegeu imatge 7). En fer girar aquest electroimant sobre el seu eix a prou velocitat es generen corrents d'inducció magnètica en el metall de la via que produeixen un camp magnètic igual al de l'electroimant creant així forces repulsives que permeten la levitació. Un exemple actual és el Transrapid de Xangai, el qual es pot veure en la fotografia 1.

Electromagnetic  
EML  
Attraction forces



Imatge 7: esquema levitació electromagnètica  
[https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/html#fig\\_body\\_display\\_electronics-09-00978-f001](https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/html#fig_body_display_electronics-09-00978-f001)



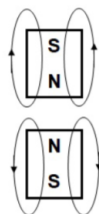
Fotografia 1: Transrapid de Xangai  
<https://wall.alphacoders.com/big.php?i=589122&lang=Spanish>

L'estabilització vertical, en aquest cas, només és possible amb un sistema de control actiu i un regulador adequadament ajustats, fet que fa més costosos i complexos aquests vehicles. Així i tot, la infraestructura d'aquest transport és més reduïda en comparació a la dels trens de levitació electrodinàmica (els quals es tractaran a continuació). No obstant això, l'energia consumida per aquest tren és elevada fet que només els fa aptes per a trajectes llargs i de velocitats altes.

### Levitació electrodinàmica (EDL)

En els vagons de trens d'aquest tipus **s'utilitzen superconductors** per generar camps magnètics<sup>5</sup> que fan que el vehicle leviti sobre vies de bobines magnètiques o electroimants aprofitant que els pols magnètics iguals es repel·leixen (vegeu imatge 8). Aquests mateixos electroimants generen també potents fluxos magnètics que acceleren o frenen el tren. L'exemple actual principal és el MagLev<sup>6</sup> del Japó, el qual es pot veure en la fotografia 2.

Electrodynamic  
EDL  
Repulsion forces



Imatge 8: esquema levitació electrodinàmica  
[https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/html#fig\\_body\\_display\\_electronics-09-00978-f001](https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/html#fig_body_display_electronics-09-00978-f001)



Fotografia 2: tren MagLev del Japó  
<https://www.jrailpass.com/blog/es/maglev-tren-bala>

<sup>5</sup> En enrotllar un cable superconductor a una bobina i subministrar-li un corrent inicial intens es poden generar camps magnètics molt potents. D'aquesta manera, els electroimants poden suportar major intensitat de corrent perquè els superconductors no experimenten l'efecte Joule. A més, donat que no presenten pèrdues d'energia, aquests electroimants només requereixen un corrent inicial i mantenir-se refrigerats per funcionar.

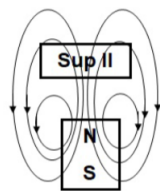
<sup>6</sup> MagLev és una combinació entre les paraules "magnetic" i "levitation"

Aquest tipus de tren, però, és molt costós i difícil de controlar. Per assolir la temperatura crítica dels electroimants superconductors usats en el tren es fa servir heli líquid, el qual requereix una gran quantitat d'energia per mantenir-se refrigerat. A més, les seves quilomètriques vies estan compostes per costosos electroimants normals que controlen el moviment del tren. D'afegit, fins que el tren no assoleix una velocitat prou elevada (150 km/h), ha de ser sustentat per una sèrie de rodes de cautxú. Un cop aquestes es retiren el tren levita a 10 cm d'alçada. Aquest transport és capaç d'assolir velocitats rècord de fins a 600 km/h, però és poc assequible per trajectes curts i rutes relativament poc transitades a causa del seu elevat consum i la complexitat de la seva infraestructura.

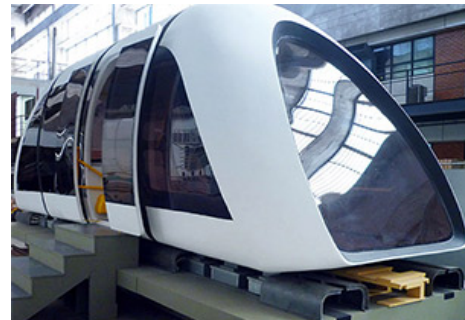
### **Levitació magnètica superconductora (SML)**

En aquest treball de recerca s'estudia el següent tipus de tren superconductor. Aquest es basa en la **levitació magnètica superconductora**. És a dir, utilitza directament la propietat dels superconductors d'anul·lar camps magnètics i quedar suspesos sobre aquests (vegeu imatge 9). Un exemple actual en el qual es fa servir aquest tipus de tecnologia és el prototip de tren urbà MagLev-Cobra que s'està desenvolupant al Brasil (vegeu fotografia 3).

Superconducting  
SML  
Stable forces

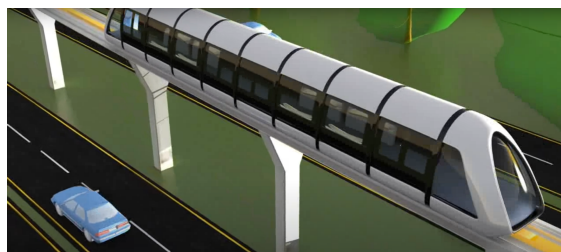


Imatge 9: esquema levitació magnètica superconductora  
[https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig\\_body\\_display\\_electronics-09-00978-f001](https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig_body_display_electronics-09-00978-f001)



Fotografia 3: MagLev-Cobra del Brasil  
<https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=19580>

Aquests models de tren superconductor fan servir un carril d'imants permanents<sup>7</sup> de neodimi i aprofiten l'ancoratge magnètic que proporcionen els **superconductors de tipus II** situats en els vagons per prescindir de qualsevol mena de guies o sistema sofisticat de control. Això els fa molt més barats i segurs i els permet transportar passatgers per les ciutats en **carrils elevats, simples i d'amplada reduïda** que minimitzen l'impacte en el tràfic i en la infraestructura de la ciutat com es pot apreciar en la imatge 10.



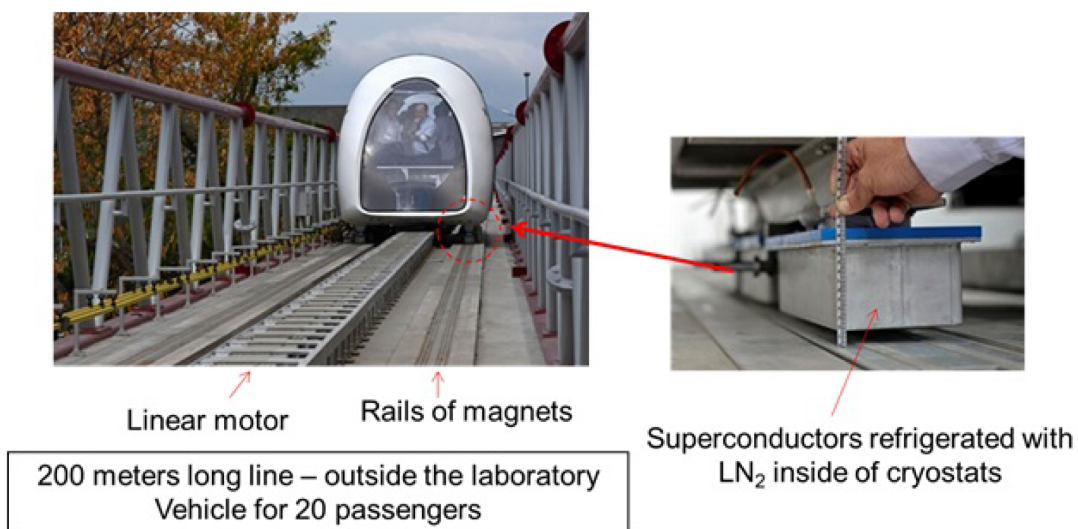
Imatge 10: infraestructura MagLev-Cobra del Brasil  
<https://www.youtube.com/watch?v=LiVjDkNFShQ>

<sup>7</sup> Els imants permanents no són més que materials ferromagnètics que conserven el seu estat de magnetització durant un llarg període de temps. Estan compostos per l'aliatge d'una sèrie de metalls. Un exemple quotidià són els imants de nevera.

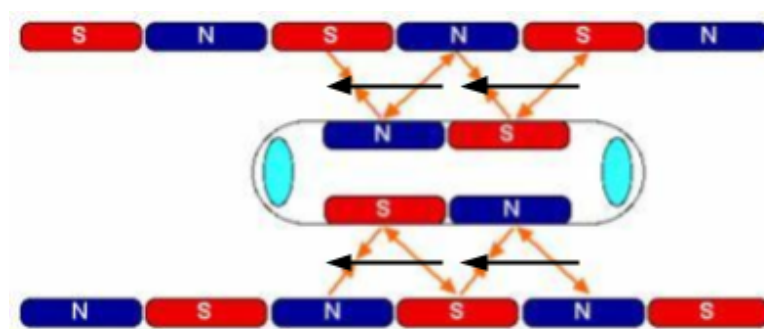
D'afegit, tot i que les baixes temperatures necessàries per al funcionament del superconductor es poden assolir mitjançant sistemes elèctrics que refrigeren líquid criogènic, aquests trens fan servir dipòsits de nitrogen líquid ben aïllats tèrmicament que es poden mantenir durant tota la jornada operativa.

Per impulsar aquests trens urbans de baixes velocitats s'utilitza un motor lineal de baixa acceleració (vegeu imatge 11). Aquest motor produeix una força lineal en el sentit de la seva longitud.

En el motor lineal, uns electroimants presents en el tren canvien contínuament la seva polaritat en funció de la posició del vehicle respecte a una guia d'imants permanents de polaritats intercalades. Aquest canvi de polaritat fa que els electroimants del tren sempre tinguin darrere un imant de polaritat igual a la seva i davant un de polaritat contrària, fet que genera una força resultant que espitja el tren cap endavant (vegeu imatge 12). El frenat del tren MagLev s'aconsegueix invertint la polaritat del corrent del motor lineal. Això crea una força en sentit contrari a l'avanç del tren.



Imatge 11: sistema de levitació i propulsió del MagLev-Cobra del Brasil  
<https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm>



Imatge 12: motor lineal

<https://projectbasedschool.universidadeuropea.es/Exposicion+Motor+Lineal+-+Canon+Electromagne>

## 2.2.2. Elèctrics

Actualment podem trobar gran quantitat de models de trens elèctrics en categories d'alta velocitat, transport de mercaderies i urbanes. El treball de recerca se centra en el tramvia per realitzar la comparativa amb el tren de levitació superconductora. Ja que aquest és característic d'un entorn urbà i de baixes velocitats com també ho és el model de tren superconductor que s'estudia en aquest treball. Un exemple de tramvia en circulació actualment pot ser el tramvia de Barcelona, el qual es pot veure en la fotografia 4.

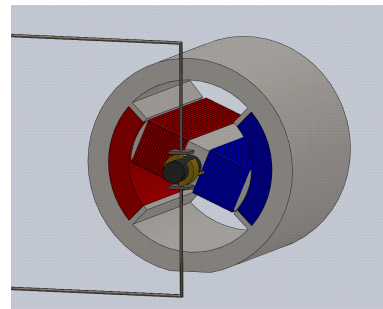
Els trens elèctrics transformen l'electricitat en moviment mecànic per fer girar unes rodes que els impulsen i mouen per unes vies metàl·liques que els serveixen com a guia.

Aquesta transformació d'energia a moviment és possible gràcies al motor elèctric. Un motor elèctric es compon de dues parts: una fixa nomenada estator i una mòbil coneguda com a rotor. La part estàtica consta de dos imants, un de polaritat positiva i l'altre de negativa. La part mòbil és un electroimant, el qual depenent del sentit del corrent canvia de polaritat. Donat que els pols oposats s'atrauen, si cada mitja volta de la part mòbil s'inverteix la polaritat d'aquesta canviant el sentit del corrent, es pot aconseguir un moviment rotatori continu que es pot transmetre a les rodes del tren (vegeu imatge 13).



Fotografia 4: tramvia de Barcelona

<https://www.barcelona.cat/mobilitat/ca/mitjans-d-e-transport/tramvia>



Imatge 13: representació d'un motor elèctric

<https://gifer.com/en/8pdM>

En funció del tipus de motor, l'estator i el rotor tindran diferents elements.

Podem trobar dos tipus principals de motors elèctrics segons el corrent elèctric amb què funcionen: motors de corrent continu i motors de corrent altern.

Des de la seva aparició els trens elèctrics utilitzaven motors de corrent continu. No obstant això, a causa de l'evolució dels motors de corrent altern i els seus sistemes electrònics de control, en els trens actuals es fa servir majoritàriament un tipus de motor alimentat per corrent altern<sup>8</sup> anomenat asíncron. Aquest tipus de motor de corrent altern és molt usat pel fet que és simple, requereix poc manteniment i té el preu més baix per la mateixa potència.

---

<sup>8</sup> El corrent altern es caracteritza per variar a intervals de temps en intensitat i en sentit. Els trens actuals utilitzen motors que funcionen amb aquest tipus de corrent perquè són més petits i econòmics.

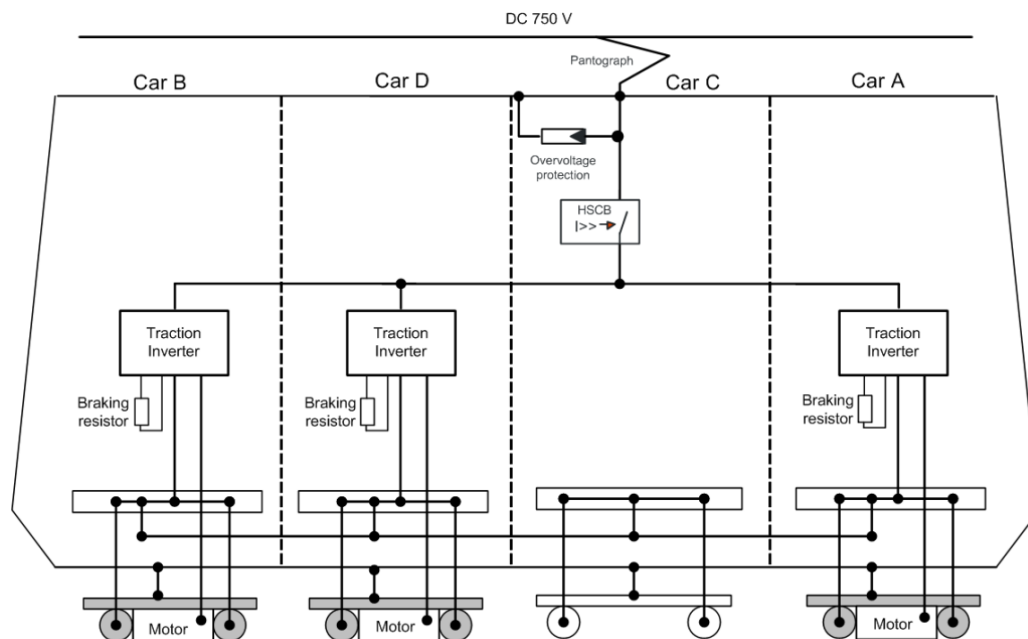
L'energia se subministra als trens a través d'una instal·lació de cables anomenada catenària, que és alimentada per una sèrie de centrals elèctriques disposades al llarg del recorregut. Els trens es connecten a la catenària mitjançant uns braços anomenats pantògrafs (vegeu fotografia 5). En la majoria dels tramvies el voltatge que passa per la catenària és de 750 V (volts) de corrent continu<sup>9</sup>. La catenària dels tramvies utilitza corrent continu perquè aquests trens van a menors velocitats i recorren distàncies més curtes, fet que fa innecessària la gran quantitat de voltatge de les catenàries amb corrent altern pròpies dels trens d'alta velocitat.



Fotografia 5: tren elèctric connectant-se a la catenària amb un pantògraf  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_electrificaci%C3%B3n\\_ferroviana](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_electrificaci%C3%B3n_ferroviana)

Els sistemes d'electrificació de les centrals subministren energia amb uns valors pràcticament constants. Per tant, adaptar la intensitat del corrent a les necessitats de la marxa és tasca independent de cada tren.

Això comporta que entre el sistema d'alimentació i el motor hi hagi sempre un circuit amb dispositius intermedis que realitzin el control del corrent (vegeu imatge 14). Un exemple d'aquests dispositius intermedis poden ser els inversors, els quals transformen el corrent continu de la catenària a l'altern necessari per al funcionament dels motors.



Imatge 14: esquema simplificat del circuit de control del corrent en el tramvia  
[https://drive.google.com/file/d/1CkvZTIUYjj01RqJOrVabfnCY7t2o\\_Qvb/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1CkvZTIUYjj01RqJOrVabfnCY7t2o_Qvb/view?usp=sharing)

<sup>9</sup> El corrent continu és un corrent d'intensitat i sentit constants.

### 2.3. Mobilitat i sostenibilitat

En l'àmbit de mobilitat tant els tramvies com els trens superconductors urbans són transports amb gran potencial de contribució a unes **ciutats més verdes i descongestionades**. Ja que poden **reduir l'ús del vehicle privat** i generar un important **estalvi energètic**. Ambdós tipus de transport consumeixen menys energia que els vehicles privats i de combustió i en ser 100% elèctrics no generen contaminació directa ni soroll. Així i tot, quan l'energia que utilitzen no prové de fonts renovables, produeixen contaminació indirecta en fer servir l'electricitat de centrals elèctriques contaminants. Aquesta contaminació, però, és molt menor que la causada pel vehicle de combustió i, a més, no és generada a l'interior de les ciutats.

La implementació d'aquests trens al sistema de transport públic permet disminuir el nombre d'emissions de gasos d'efecte hivernacle emesos pels vehicles amb motor de combustió que causen el canvi climàtic. A més, contribueix a la reducció de les emissions de partícules en suspensió i òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>), contaminants perillosos per la salut també generats en la combustió.

La **flexibilitat** que aporten aquests tipus de transports en la mobilitat de les persones dintre de grans ciutats fa que el seu ús tingui una gran demanda. A més, el cost baix dels bitllets o tarifes d'ús els fan encara més atractius davant el vehicle privat.

Així doncs aquests transports es poden considerar sostenibles donat que presenten avantatges en els àmbits social, econòmic i mediambiental.

### **3. METODOLOGIA**

Per assolir els objectius plantejats en aquest treball de recerca s'ha estructurat una metodologia en diverses etapes claus que han determinat el procediment a seguir durant tot el desenvolupament de l'estudi. A continuació es defineixen ordenadament aquestes etapes per donar a entendre tot el procés que ha conduït als resultats i les conclusions.

#### **3.1. Recerca d'informació**

Per obtenir informació sobre el tema d'aquest treball s'ha hagut de realitzar un extens procés de recerca. La comprensió de tots els conceptes tractats ha requerit un estudi profund donada la seva complexitat. Tots els procediments descrits a continuació han estat necessaris per a obtenir i sintetitzar informació sobre els superconductors de manera que qualsevol persona amb un coneixement mínim d'aquesta tecnologia pugui arribar a entendre aquest treball de recerca. El procés de recerca d'informació ha estat metòdicament organitzat en diverses parts o fases.

Primerament, per a saber contrastar les dades extretes en etapes de recerca posteriors, poder comprendre els superconductors i la seva història, i estudiar el funcionament dels trens MagLev i elèctric, s'ha dut a terme un procés a través del qual s'ha obtingut informació de pàgines web, blocs científics, treballs d'investigació i altres mitjans com vídeos, llibres i contactes. Aquest procés de recopilació de dades ha estat dut a terme amb l'objectiu de generar una base sobre la qual s'ha redactat posteriorment una primera part de la introducció.

Un cop conclosa aquesta primera part i adquirits uns coneixements bàsics s'ha realitzat una segona recerca d'informació a partir de paraules clau obtingudes en l'anterior etapa d'investigació amb l'objectiu d'aprofundir encara més en el tema i complementar la introducció amb dades noves que han facilitat l'evolució del treball i la comprensió dels temes tractats.

Finalment, s'ha realitzat una tercera fase de recerca focalitzada en l'obtenció d'informació específica i les aplicacions de la tecnologia de cada tipus de tren. Mitjançant aquesta última fase s'han comprès amb més profunditat el funcionament i les característiques dels trens elèctrics i de levitació magnètica superconductora. D'aquesta manera s'han obtingut dades reals i especificacions d'un model actual de tren elèctric i d'un prototip avançat de tren MagLev superconductor. Aquesta informació ha estat utilitzada per definir els experiments, així com per elaborar la comparativa i treballar les conclusions.

La referència bibliogràfica dels llibres, blocs científics, treballs d'investigació, documents, pàgines web i vídeos consultats es troba en l'apartat "7. BIBLIOGRAFIA".

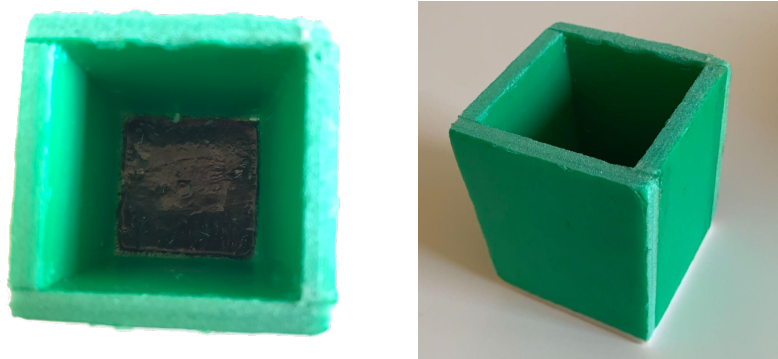
#### **3.2. Elaboració de les maquetes**

Un cop culminada la recerca d'informació sobre trens superconductors i elèctrics s'ha dissenyat una maqueta de cada tipus de transport per realitzar les proves que han facilitat l'estudi comparatiu. Els materials principals que s'han fet servir tant en la construcció de la maqueta com en el procés d'experimentació es troben en el document "Annex II: Fitxa de materials". Per a aconseguir els materials necessaris, elaborar amb més efectivitat i qualitat les maquetes, i gravar el seu procés de construcció s'han cercat diversos contactes entre els quals destaquen familiars i en Francesc Díaz (vicerector de Recerca i Planificació Científica de la Universitat Rovira i Virgili).

### 3.2.1. Tren superconductor

#### **Superconductor**

La pastilla de material superconductor de tipus II utilitzada en els experiments ha estat proporcionada per la URV (Universitat Rovira i Virgili) i està formada per una combinació de Y (itri), B (bari), Cu (coure), i O (oxigen) en la següent proporció  $YBa_2Cu_3O_7$ . Perquè aquest material es comporti com un superconductor és necessari refredar-lo a una temperatura inferior a  $-180\text{ }^\circ\text{C}$  (graus Celsius). La pastilla està fixada al fons d'un recipient / capseta de porexpan de 50 mm (mil·límetres) x 50 mm de base i 63 mm d'alçada el qual serveix per contenir el nitrogen líquid usat per refrigerar el superconductor per sota dels  $-180\text{ }^\circ\text{C}$  (concretament a  $-196\text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura d'ebullició del nitrogen) (vegeu fotografia 6). El superconductor és l'encarregat d'ancorar-se en el camp magnètic dels imants per fer levitar el tren.



Fotografia 6: superconductor utilitzat en els experiments (font pròpia)

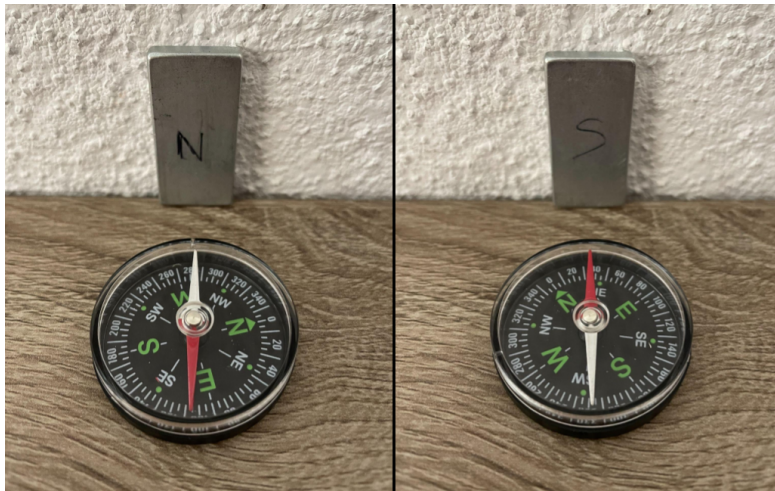
#### **Carril d'imants**

El procés de construcció del carril d'imants per aquesta maqueta ha resultat certament complicat. Donat que en aquest tipus de carrils el camp magnètic ha de ser simètric al llarg de tot el recorregut. Això implica que s'hagin d'unir imants pels pols iguals, cosa que resulta bastant complicada amb imants de neodimi de gran fragilitat i intens camp magnètic (15 quilos de força / imant). (Vegeu fotografia 7).



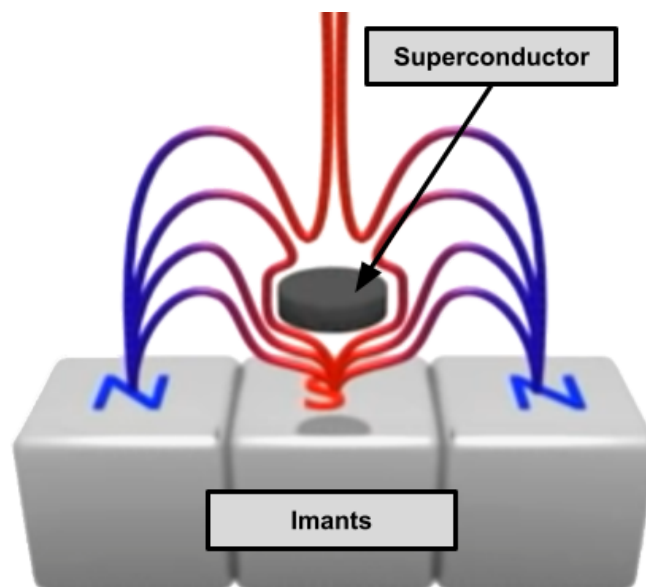
Fotografia 7: imants units per pols iguals (font pròpia)

Primer de tot s'ha començat per estudiar els imants, és a dir, identificar el pol nord i el pol sud de cadascun d'aquests. Per fer això s'ha fet servir una brúixola i un marcador. En ser enfocada a un imant, una brúixola sempre indica el pol contrari al qual és apropada. Per tant, com pols diferents s'atrauen, si s'apropa al pol nord de l'imant, la vareta magnetitzada de la brúixola serà atreta per la banda sud. Així doncs, fent-se servir d'aquest principi, s'ha anat indicant amb el marcador el pol nord i el pol sud de cada imant. Els pols estan disposats en els imants com es pot veure a la fotografia 8.



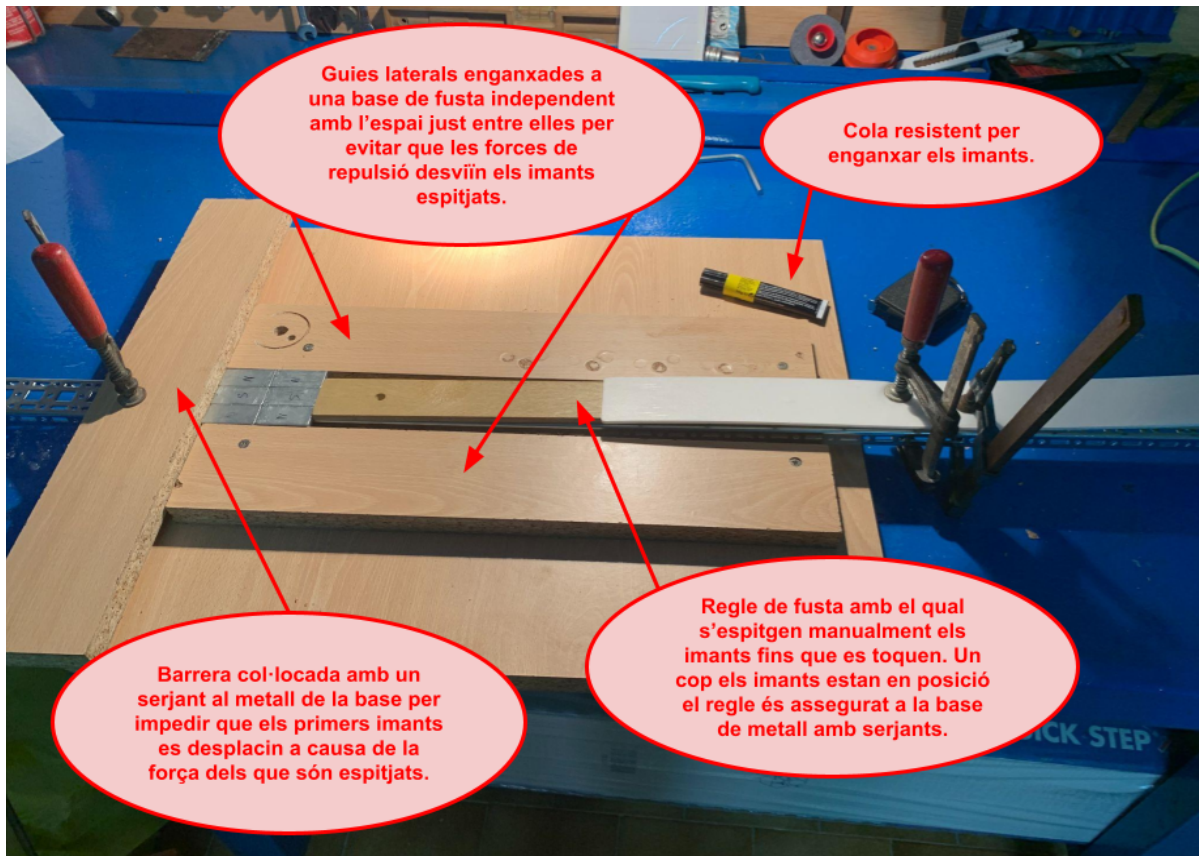
Fotografia 8: disposició dels pols en un dels imants de neodimi (font pròpia)

A continuació, abans de començar la construcció s'han cercat per Internet vídeos amb exemples de carrils superconductors elaborats per a maquetes. D'aquests vídeos s'ha extret la idea de carril que millor s'adapta als imants de neodimi que es posseeixen. Aquest model de carril es pot apreciar en l'esquema de la imatge 15.



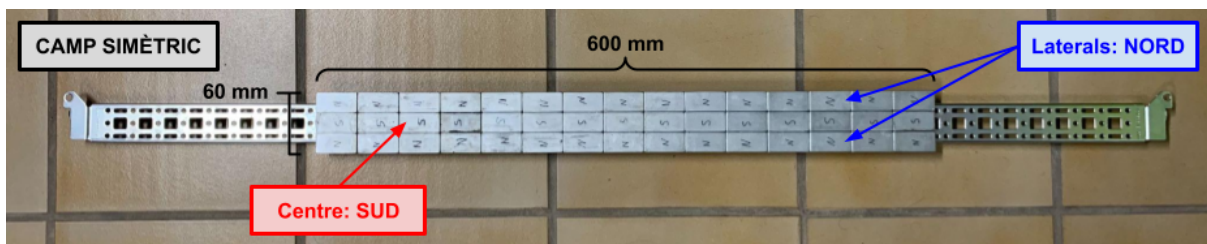
Imatge 15: esquema del model de carril d'imants escollit  
<https://youtu.be/GHtAwQXVsuk>

Un cop finalitzats tots els preparatius per a l'elaboració de la maqueta s'ha hagut de preparar, amb fusta, claus i serjants, una mena de guies que permetin mantenir els imants estàtics en la posició desitjada mentre la cola que els ha d'unir s'asseca. Aquestes guies (vegeu imatge 16) són necessàries pel fet que, tot i que els imants són atrets al metall de la base del carril, entre ells les forces repulsives i atractives són molt intenses. Això comporta que qualsevol desviació dels imants mentre són apropats entre ells o mentre se solidifica la cola podria resultar en un accident.



Imatge 16: guies per la unió dels imants (font pròpia)

Acabades de construir aquestes guies, amb molta cura, s'han anat unint, de dos en dos, grups de tres imants amb cola a la via. Un cop cada tanda d'imants ha estat assegurada en la seva posició s'ha deixat reposar la cola 20 minuts per a posteriorment retirar la subjecció que mantenia els imants en posició i repetir el procés fins a unir 15 grups de tres imants. El resultat final (vegeu imatge 17) ha estat una via amb una longitud total de 600 mm (mil·límetres), una amplada de 60 mm i un gruix de 5 mm.

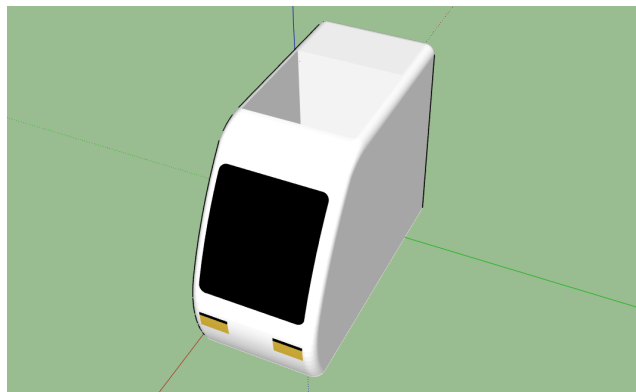


Imatge 17: prototip de maqueta final tren superconductor (font pròpia)

### ***Carcassa per al superconductor***

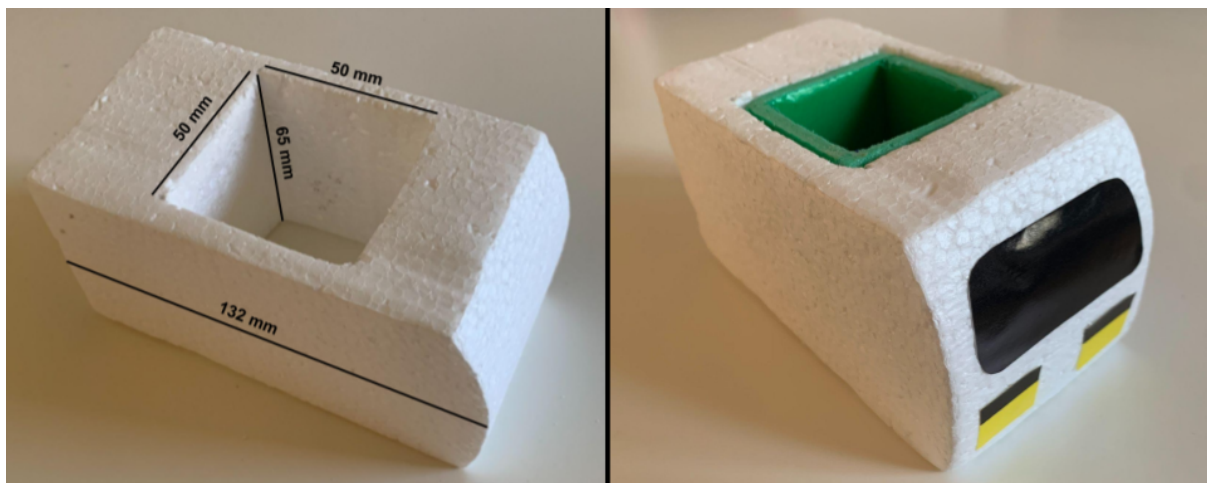
El següent component és una carcassa de poliestirè amb forma de tren per a donar una forma més aerodinàmica al superconductor i apreciar més visualment el seu potencial per a ser usat com a tren.

Per al disseny de la carcassa s'ha construït un model 3D amb l'aplicació SketchUp (vegeu imatge 18). La carcassa no ha estat impresa amb impressora 3D a causa de l'excessiu pes dels polímers que es necessitarien per la seva confecció. És per això que s'ha fet servir poliestirè. El resultat final del disseny 3D de la carcassa de la maqueta és en el següent arxiu: <[https://drive.google.com/file/d/1XlvXv704YUvbXn0\\_KuCbsJ393aNoIDo5/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1XlvXv704YUvbXn0_KuCbsJ393aNoIDo5/view?usp=sharing)>



Imatge 18: captura del model 3D de la carcassa del tren superconductor (font pròpia)

El poliestirè ha estat tallat amb eines de calor. Primerament, se li ha donat la seva forma base amb les eines de tall i paper de vidre. A continuació s'ha tallat i polit també una cavitat al centre de la carcassa de la mida de la capseta del superconductor per a poder encaixar-la-hi. I, finalment, també se li han posat uns adhesius per a donar-li un aspecte més semblant al d'un tren. (Vegeu imatge 19).



Imatge 19: model final de carcassa de poliestirè (font pròpia)

### 3.2.2. Tren elèctric

#### **Locomotora**

El model escala H0 (1:87) que es pot veure a la fotografia 9 s'ha utilitzat com a tren elèctric en la maqueta.



Fotografia 9: tren elèctric escala H0 (1:87) (font pròpia)

#### **Via**

El primer pas en la construcció d'aquesta maqueta ha estat elaborar un sistema en la base de fusta que ha permès inclinar-la gradualment en les proves on ha estat necessari. Això es pot veure en la fotografia 10.

Aquest sistema funciona d'una manera simple. La via és recolzada a terra per la cara on sobresurten els caragols. Si aquests es descaragolen, la inclinació de la via es veu alterada de manera que com més es descaragolen menys inclinació té aquesta.

El següent pas ha estat trobar la línia que divideix longitudinalment la fusta en dues parts iguals. Amb aquesta línia com a referència s'ha pogut determinar la posició dels raïls, els quals s'han clavats amb claus i un martell seguint aquesta guia. (Vegeu fotografia 11).



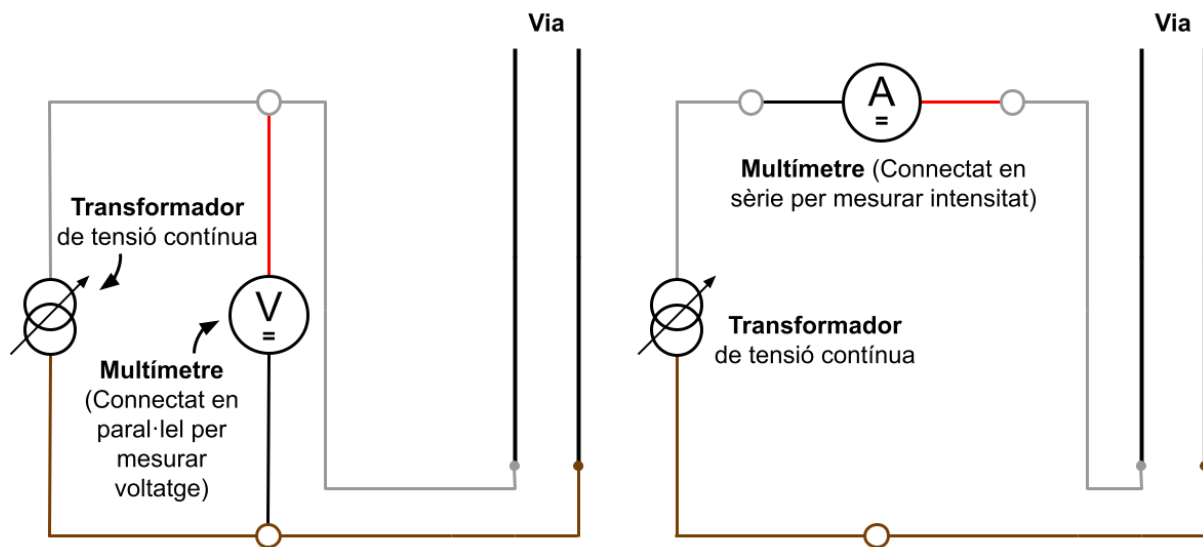
Fotografia 10: sistema d'inclinació de la via del tren elèctric (font pròpia)



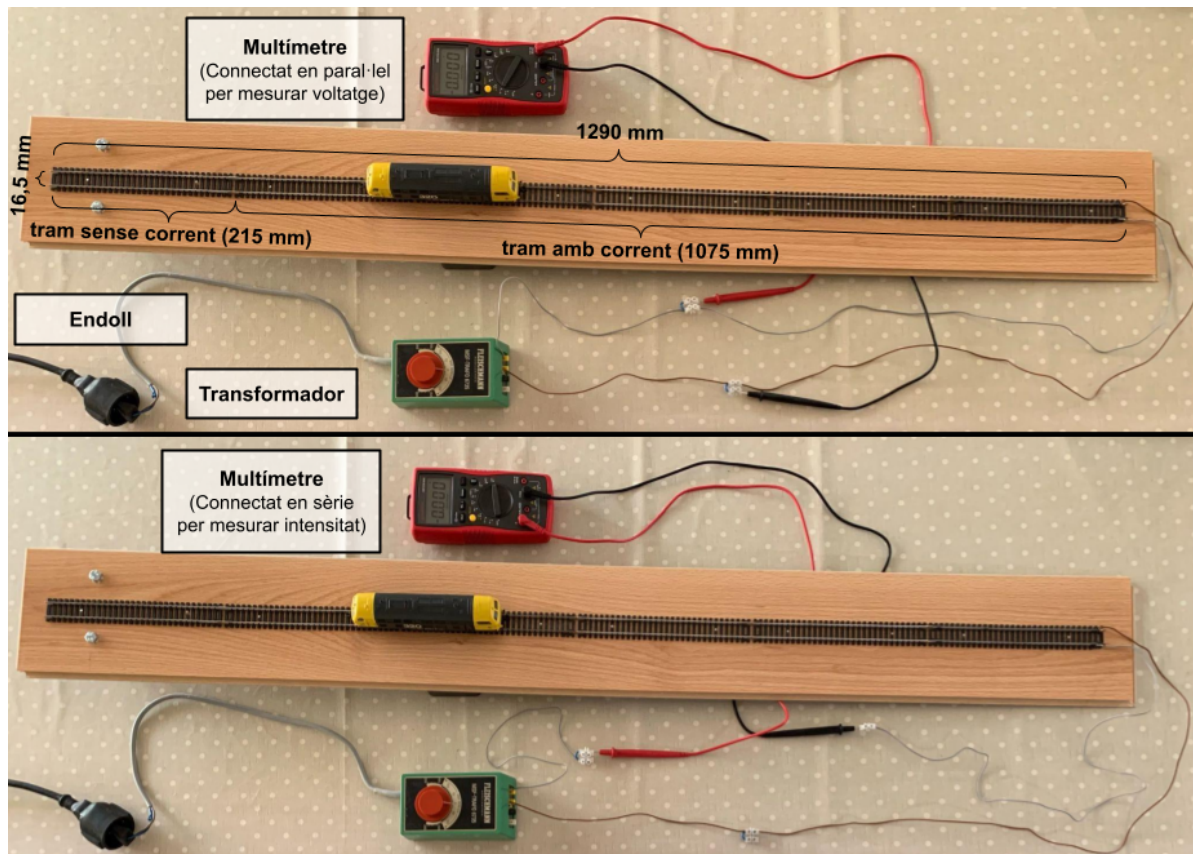
Fotografia 11: col·locació dels carrils a la fusta (font pròpia)

Aquests raïls han acabat mesurant un total de 1290 mm (mil·límetres) de llargada i cadascun d'ells ha estat connectat al següent mitjançant unions de coure per a poder conduir l'electricitat. Així i tot, l'últim raïl ha sigut connectat a l'anterior amb una unió de plàstic. Aquesta unió de plàstic ha estat implantada amb l'objectiu d'evitar que el tren es precipiti en apropar-se al final del carril. Això es deu a que el plàstic no és conductor, fet que provoca que en aquest últim tram el tren deixi de rebre corrent i es fredi.

Per últim, un cop elaborat el sistema d'inclinació i col·locada la via sobre la base, s'ha instal·lat el circuit que proporciona corrent a la via. Com es pot observar en l'esquema de la imatge 20, aquest circuit consta de diversos elements: un endoll per connectar-se al corrent; un transformador per regular el voltatge que arriba al circuit; i unes regletes per connectar el multímetre, ja sigui en sèrie per mesurar la intensitat del corrent, o bé en paral·lel per mesurar el voltatge. El resultat final es pot apreciar en la imatge 21.



Imatge 20: esquema del circuit elèctric (font pròpia)



Imatge 21: prototip de maqueta final tren elèctric (font pròpia)

### 3.3. Guia de proves i registres per a l'experimentació

Un cop les maquetes han estat fabricades i s'han tingut tots els materials a disposició (consultar Annex II: Fitxa de materials), s'ha procedit a definir les proves necessàries per extreure dades i realitzar càlculs que permetin posteriorment obtenir uns resultats i elaborar unes conclusions.

Totes les proves descrites a continuació **s'han realitzat un mínim de 2 cops** per assegurar que els resultats extrets no han estat producte d'un error o de l'atzar.

#### 3.3.1. Tren superconductor

Per comprendre millor el funcionament dels trens superconductors s'han realitzat un seguit de sis proves, les quals estan estructurades en tres apartats: objectiu, procediment i registres. Les proves es poden veure a continuació:

<b>Prova 1: Anclatge en superconductors de tipus II (prova d'observació)</b>
<p><u>Objectiu</u></p> <p>Es pretén observar el comportament d'anclatge del superconductor de tipus II en l'estat mixt (en presència de vòrtex) el qual va ser teoritzat per Alekséyevich Abrikósov<sup>10</sup>.</p>
<p><u>Procediment</u></p> <p>Per realitzar aquest experiment es col·loca entre la capseta del superconductor i el carril d'imants una peça aïllant de 4 mm (mil·límetres). Posteriorment, es refreda amb nitrogen líquid el superconductor. Seguidament, un cop aquest arriba a la seva temperatura crítica, s'aboca el nitrogen líquid fora de la capseta per poder manipular amb més facilitat el superconductor (aquest, un cop refredat, és capaç de mantenir-se sota la seva temperatura crítica un cert període de temps sense nitrogen líquid). A continuació se situa la capseta sobre el carril d'imants i s'intenta canviar, exercint-hi força, l'orientació i la inclinació d'aquesta amb l'objectiu d'observar si es queda ancorada en la nova posició o si es manté en la qual es trobava. Posteriorment, també es dona la volta al carril d'imants per observar amb més claredat l'efecte d'anclatge en veure que la capseta roman atrapada en la seva posició de totes maneres.</p> <p>En un altre apartat d'aquesta prova es col·loca el superconductor separat del carril i llavors s'aboca el nitrogen líquid a la capseta. Un cop refredat, el superconductor s'apropa al carril d'imants per veure si es produeix anclatge i, en el cas que es produeixi, observar la força d'aquest.</p>
<p><u>Registres</u></p> <p>Aquesta prova no presenta cap registre numèric, només s'anoten observacions.</p>

<sup>10</sup> Alekséyevich Abrikósov fou un acadèmic físic rus. L'any 2003 va ser premiat amb el Premi Nobel de Física per les seves contribucions a la teoria dels superconductors i superfluids.

## **Prova 2: Efecte de memòria i distància màxima superconductor-imants**

### Objectiu

Es pretén observar físicament l'efecte de memòria en el superconductor i determinar la distància màxima respecte dels imants a la que aquest superconductor en concret pot quedar ancorat.

### Procediment

Per realitzar aquest experiment es col·loca prèviament al refredament del superconductor una peça aïllant de 4 mm (mil·límetres) de gruix entre aquest i el carril d'imants. Posteriorment, s'aboca el nitrogen líquid al recipient del superconductor i en un o dos minuts, un cop aquest està per sota de la seva temperatura crítica, es retira la peça aïllant i s'aboca el nitrogen fora del contenidor. A continuació es repeteix el mateix procés cada cop afegint 4 mm més a la separació fins que el superconductor no pot quedar-se ancorat a causa de la magnitud de la distància entre els imants i aquest.

### Registres

S'anoten en una taula les diferents distàncies estudiades en les quals el superconductor ha estat capaç de quedar ancorat i la qualitat del seu ancoratge. A continuació es calcula la densitat de flux en tesles que els imants proporcionen a cada distància estudiada i s'elabora un gràfic per relacionar la distància i la densitat de flux i indicar visualment a quines distàncies és més estable l'ancoratge.

(L'expressió per calcular la densitat de flux en tesles proporcionada pels imants en relació amb la distància està en el document: "Annex III: Càlculs i expressions").

## **Prova 3: Efecte del tren superconductor sobre el carril**

### Objectiu

Es pretén determinar si el tren superconductor, tot i no estar en contacte amb els imants, exerceix alguna força sobre el carril quan es troba sobre aquest. Si el tren exerceix força sobre el carril, també s'ha d'estudiar aquesta força.

### Procediment

En aquesta prova es col·loquen dos imants sobre la bàscula. Entre els imants i la bàscula hi ha un aïllant que els separa 12 mm (mil·límetres). Llavors es procedeix a tarar la bàscula. Primerament, es col·loca sobre els imants la capseta del superconductor en estat normal i es mesura el pes marcat en la bàscula. A continuació, es col·loca un altre aïllant de 4 mm sobre els imants i damunt d'aquest se situa la capseta. Seguidament, s'aboca nitrogen líquid al superconductor i quan aquest s'ha refredat es retira l'aïllant que el separa dels imants i es buida la capseta de nitrogen líquid. Finalment, es torna a prendre nota del pes marcat a la bàscula.

### Registres

Un cop es retira l'aïllant entre el superconductor i els imants i es buida la capseta de nitrogen es mira si la bàscula marca 0 o si pel contrari el valor que indica ha canviat. En el cas que el valor no sigui 0 s'ha d'estudiar si la capseta pesa el mateix levitant que sense levitar o si la força que aquesta exerceix sobre el carril és diferent en ambdós casos.

**Prova 4: Comportament del superconductor davant irregularitats al carril (prova d'observació)**

Objectiu

Es pretén analitzar el comportament del superconductor davant la presència d'irregularitats en el carril d'imants i observar la flexibilitat que poden arribar a tenir els carrils dels trens superconductors.

Procediment

En aquesta prova s'altera el carril d'imants col·locant un parell d'imants per sobre de la via formant una irregularitat en el carril. A continuació es col·loca la capseta sobre un aïllant de 8 mm (mil·límetres) que la separa de la via. Llavors s'aboca el nitrogen líquid a la capseta del superconductor. Un cop el superconductor s'ha refredat es buida la capseta de nitrogen líquid i se li dóna una empenta en direcció a la irregularitat creada anteriorment.

Registres

Aquesta prova no presenta cap registre numèric, només s'anoten observacions.

**Prova 5: Pes màxim suportat**

Objectiu

Es pretén estudiar el pes màxim que pot suportar el superconductor.

Procediment

En aquesta prova, com a la prova 4, es col·loquen dos imants sobre la bàscula. Entre els imants i la bàscula hi ha un aïllant que els separa 12 mm (mil·límetres). Llavors es procedeix a tarar la bàscula. A continuació es col·loca un altre aïllant de 4 mm sobre els imants i damunt d'aquest se situa la capseta. Seguidament, s'aboca nitrogen líquid al superconductor i quan aquest s'ha refredat es retira l'aïllant que el separa dels imants i es buida la capseta de nitrogen líquid. Llavors, s'exerceix força a la capseta per apropar-la als imants i s'observa el pes que marca la bàscula quan el superconductor es troba al límit de tocar els imants.

Registres

En aquesta prova es pren nota de la massa que és capaç d'aguantar el superconductor abans d'entrar en contacte amb el carril i es calcula quantes vegades pot el superconductor suportar el seu propi pes.

## Prova 6: Fregament amb l'aire

### Objectiu

Es pretén mesurar la magnitud dels efectes de la força de fricció de l'aire amb el tren.

### Procediment

En aquesta prova es col·loca la carcassa de poliestirè al voltant de la capseta del superconductor per donar al tren una forma més aerodinàmica. A continuació es col·loca un aïllant de 4 mm (mil·límetres) entre el tren i el carril i s'aboca nitrogen líquid a la capseta del superconductor. Quan aquest s'ha refredat se li dóna una lleugera empenta cap endavant i es grava en *slow-motion* com avança al llarg de la via amb una càmera estàtica. Aquest procediment és repetit cinc cops per assegurar la certesa de les dades.

### Registres

Amb les gravacions obtingudes de l'experiment, es mesura en cadascuna la velocitat del tren en un punt proper a l'inici de la via " $V_0$ " i posteriorment es mesura la seva velocitat en un punt proper al final d'aquesta " $V$ ". Això es fa definint dos punts molt propers entre si a l'inici i dos al final i els petits intervals de temps que els separen per calcular respectivament ambdues velocitats fent servir l'expressió següent:  $V = \frac{X - X_0}{t}$  on " $V$ " és la velocitat en el punt escollit, " $X$ " és l'espai final, " $X_0$ " és l'espai inicial i " $t$ " és el temps que tarda el tren a desplaçar-se de l'espai inicial al final. (En aquest experiment " $X_0$ " = 0 m (metres) i " $X$ " = 0,01 m). Amb aquestes velocitats inicial i final i l'interval de temps que hi ha entre elles es poden calcular posteriorment les acceleracions negatives de la força de fregament amb la següent expressió de la cinemàtica:  $a = \frac{V - V_0}{t}$  on " $V$ " és la velocitat final, " $V_0$ " és la velocitat inicial, " $t$ " és el temps que tarda el tren a passar de " $V_0$ " a " $V$ " i " $a$ " és l'acceleració. Un cop s'ha calculat l'efecte del fregament del tren en cada gravació es fa una mitjana aritmètica entre totes les acceleracions obtingudes per trobar l'acceleració estimada de la força de fregament quan el tren viatja a les velocitats reduïdes a les quals s'ha dut a terme l'experiment. (Per trobar els temps s'ha estudiat la relació entre els fotogrames de la gravació i el temps).

### 3.3.2. Tren elèctric

Per estudiar més a fons el tren elèctric s'ha dut a terme un conjunt de tres proves estructurades de la mateixa manera que les del tren superconductor (objectiu, procediment i registres):

<b>Prova 1: Pendent màxim</b>
<u>Objectiu</u> Es pretén determinar el pendent màxim que pot pujar el tren elèctric i observar l'augment progressiu de la dificultat del tren per realitzar una pujada cada cop més pronunciada.
<u>Procediment</u> Per a dur a terme aquest experiment es defineix en el carril l'inici i el final d'un tram de 700 mm (mil·límetres) de longitud. Primerament, es fa avançar el tren a la potència màxima del transformador des de l'inici fins al final del tram en horitzontal. A continuació es crea un pendent del 5% en el carril amb l'ajuda dels caragols instal·lats en la fusta i es torna a fer avançar el tren amb la mateixa potència durant el tram sencer. Aquest mateix procés es realitza repetidament incrementant el pendent en un 5% cada cop, fent servir els caragols i altres objectes fins que el tren no sigui capaç d'avançar. Per calcular l'alçada a la qual els caragols i les peces han d'elevat la fusta es fa servir la següent expressió: $x = \sqrt{\frac{1300^2 \cdot y^2}{10000 + y^2}}$ on "1300" és el punt en mm del tauler de fusta sota d'on es col·loquen les peces, "y" és el percentatge de pendent que es vol obtenir i "x" és l'alçada de les peces en mm. (La demostració d'aquesta equació està en el document: "Annex III: Càlculs i expressions"). Els intervals en què el tren avança per la pujada són gravats amb una càmera estàtica. I el multímetre està connectat en sèrie per mesurar la intensitat en ampers (A).
<u>Registres</u> Un cop s'ha realitzat l'experiment, s'estudien les gravacions i s'elabora una taula que relaciona els temps que tarda el tren a recórrer el tram de 700 mm i els pendents que ha hagut de superar. A continuació, partint d'aquesta taula es crea un gràfic. Per completar l'estudi d'aquesta qüestió, també es pren nota i s'elabora un gràfic de la relació entre les intensitats requerides pel tren i els pendents.

## **Prova 2: Resistència total del conjunt**

### Objectiu

Es pretén determinar la resistència total del circuit del tren elèctric, el qual engloba tots els elements definits en l'apartat "3.2.2. Tren elèctric".

### Procediment

Per a dur a terme aquest experiment es fa avançar el tren per la via aplicant-li diversos voltatges amb el transformador i mesurant amb el multímetre en sèrie les seves respectives intensitats: En primer lloc, s'aplica un voltatge de 5,30 V (volts), a continuació de 7,70 V, seguidament de 12,20 V i finalment de 17,70 V.

### Registres

Amb els voltatges aplicats i les seves respectives intensitats s'elabora una taula que serveix per crear un gràfic que relaciona aquests dos valors. Els punts que formen aquest gràfic no es troben totalment alineats per culpa de l'error experimental. És per això que un cop s'ha elaborat el gràfic es crea una recta de regressió<sup>11</sup> de la qual es pot extreure la resistència del circuit calculant el seu pendent a partir de la següent expressió  $R = \frac{V}{I}$  on "V" "I" i "R" són el voltatge, la intensitat i la resistència aproximats respectivament.

## **Prova 3: Pèrdua de tensió en la via**

### Objectiu

Es pretén observar l'efecte de la pèrdua de tensió (voltatge) al llarg de la via a causa de la resistència d'aquesta.

### Procediment

En aquest experiment es col·loca el multímetre en paral·lel i amb una de les seves puntes tocant un raïl per estudiar el voltatge que travessa el circuit. A continuació es fa avançar el tren al llarg de la via subministrant-li un voltatge de 7,7 V (volts) amb el transformador mentre una càmera grava l'experiment.

### Registres

Un cop finalitzat el procediment s'analitza el vídeo gravat per observar com la tensió va disminuint a mesura que el tren s'allunya del punt de subministrament d'electricitat.

<sup>11</sup> Una recta de regressió és una recta que s'intenta ajustar el màxim possible als punts desalineats (normalment a causa de l'error experimental) d'un gràfic.

### **3.4. Proves i experimentació**

#### **3.4.1. Tren superconductor - Experiència en el laboratori de Messer Group**

Per a realitzar els experiments amb èxit s'ha hagut de contactar amb Messer Group, un fabricant i proveïdor de gasos industrials que, entre altres coses, extreu nitrogen de l'atmosfera i el liqua. El mànager de producció de Messer, José Manuel Montoro, s'ha ofert per proporcionar les instal·lacions, el nitrogen líquid i els equips de seguretat necessaris per dur a terme els experiments. A banda, també ha proporcionat assistència com a expert en la manipulació del nitrogen líquid.

La planta de producció d'aquesta empresa, on s'ha acordat dur a terme els experiments, està situada al polígon industrial nord de Tarragona.

Així doncs, el dijous 12 d'agost es van realitzar els experiments a Messer Group, on el José Manuel Montoro havia preparat una taula amb tot el necessari i va donar una explicació sobre les normes de seguretat abans de començar. Un cop conclosa aquesta introducció es va procedir a abocar nitrogen líquid al superconductor i posar-lo al carril per veure si tot funcionava correctament.

Posteriorment, al ja haver observat el correcte funcionament del superconductor i el carril, es va procedir a realitzar i gravar un per un tots els experiments seguint el guió proposat en l'apartat "3.3.1. Tren superconductor". Així i tot, com no va donar temps a finalitzar totes les proves, es van tornar a visitar les instal·lacions de Messer Group el dia següent.

Un cop acabats els experiments, abans de marxar, el José Manuel Montoro va dur a terme una petita demostració per observar físicament algunes de les propietats del nitrogen líquid i va fer també una breu explicació sobre el funcionament de la planta.

#### **3.4.2. Tren elèctric**

Uns dies més tard, el dilluns 16 d'agost, es van dur a terme els experiments definits a l'apartat "3.3.2. Tren elèctric", al menjador del propi domicili. Primerament es va preparar la zona de treball. A continuació, es va endollar la maqueta i es va fer una primera prova per comprovar que tot funcionava correctament. Finalment, es va procedir a realitzar i gravar les proves.

### **3.5. Vídeos explicatius del treball de recerca**

Posteriorment al desenvolupament de les proves s'ha elaborat una sèrie de vídeos explicatius d'aquestes amb l'ajuda del programa d'edició audiovisual *Adobe Premiere Pro*. Per la comoditat del lector, s'ha cregut convenient posar l'enllaç del vídeo de cada prova al seu respectiu apartat de resultats.

Els vídeos també es poden trobar en la carpeta "Annex IV: Proves".

## 4. RESULTATS

### 4.1. Resultats de l'experimentació

Un cop elaborades les maquetes, preparat el registre de proves i acabats d'enllestir tots els preparatius s'ha passat a la fase d'experimentació. Durant aquest procés s'han realitzat totes les proves previstes i s'ha pres nota de tota la informació obtinguda d'aquestes. (Els vídeos explicatius i els fulls de càlcul necessaris per als experiments es troben a la carpeta "Annex IV: Proves").

Cal tenir en compte que les dades obtingudes a través de les proves realitzades no són extrapolables a la realitat. Així i tot, aquesta fase d'experimentació ha servit per observar de primera mà tot l'estudiat a la recerca i transportar a la realitat les idees tractades anteriorment en el treball de manera teòrica.

#### 4.1.1. Tren superconductor

##### Prova 1: Anclatge en superconductors de tipus II (prova d'observació)

###### Registres

Aquesta prova no presenta cap registre numèric. (Vegeu l'observació de la prova en la fotografia 12).



Fotografia 12: observació prova 1 tren superconductor (font pròpia)

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:

<[https://drive.google.com/file/d/1SUdQy7K7BZVm2Mq485VTJmez03HvB\\_7V/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1SUdQy7K7BZVm2Mq485VTJmez03HvB_7V/view?usp=sharing)>).

###### Anàlisi i observacions

S'han observat amb més detall les propietats de l'ancoratge del superconductor al carril i s'ha vist que l'ancoratge manté el superconductor atrapat en el camp magnètic i el sosté encara que estigui boca avall o de costat.

Donat que el camp magnètic de la via és simètric linealment, l'ancoratge no ha ofert resistència a moviments longitudinals, però sí que ha presentat resistència a desplaçaments laterals o verticals que modificarien la posició del superconductor respecte el camp magnètic en què es troba ancorat.

També s'ha observat que el superconductor s'ha pogut ancorar al carril tot i haver estat refredat prèviament fora d'aquest. Així i tot, aquest ancoratge ha resultat ser realment dèbil.

Aquesta prova ha estat important per a demostrar la seguretat de l'ancoratge del tren superconductor davant forces externes, com per exemple les experimentades durant la presa de corbes més tancades que en els trens elèctrics convencionals.

## Prova 2: Efecte de memòria i distància màxima superconductor-imants

### Registres

En aquesta prova, amb una densitat de flux de 0,141 T (tesles) i una distància de 4 mm (mil·límetres) entre el carril i el superconductor, l'ancoratge s'ha realitzat amb efectivitat i ha estat molt fort.

Amb una densitat de flux de 0,096 T i una distància de 8 mm també s'ha generat un ancoratge fort i ferm, tot i que no amb tanta resistència com l'anterior.

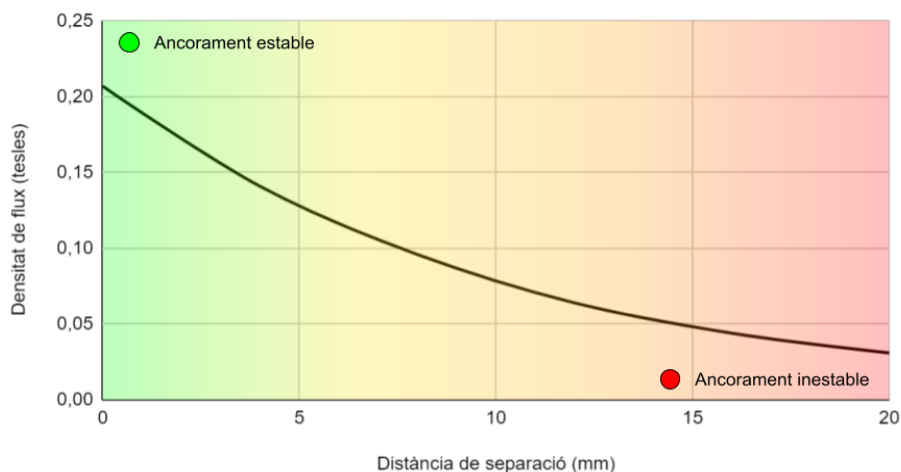
Amb una densitat de flux de 0,064 T i una distància de 12 mm, l'ancoratge ha estat produït amb èxit, però ha estat molt feble.

Amb una densitat de flux de 0,044 T i 16 mm de separació, l'ancoratge s'ha realitzat, però la seva baixa intensitat ha fet que el superconductor cedeixi 1 mm d'alçada i es quedi a 15 mm.

Finalment, en realitzar l'experiment amb una densitat de flux de 0,031 T i 20 mm de separació, s'ha trobat que el límit d'aquest es troba en 15 mm. Ja que en retirar-se l'aïllant un cop refredat el superconductor, aquest ha cedit 5 mm quedant-se altre cop a una distància de 15 mm respecte del carril.

A partir d'aquestes dades s'ha elaborat una representació gràfica per relacionar la distància de separació entre els imants i el superconductor, la densitat de flux i l'estabilitat de l'ancoratge. (Vegeu gràfic 3).

Densitat de flux (tesles) en base a Distància de separació (mm)



Gràfic 3: relació entre la distància de separació en mm, la densitat de flux en T i l'estabilitat de l'ancoratge (font pròpia)

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:

<<https://drive.google.com/file/d/19Fr8o7OFe-yhAiR7lI2tpfgREDERY0MW/view?usp=sharing>>.

Es pot accedir als fulls de càlcul utilitzats mitjançant aquests enllaços:

<[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1KNLAPurghmZT9aO3CsZSv\\_xwLICFX5CEW89PPeK3AOe8/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1KNLAPurghmZT9aO3CsZSv_xwLICFX5CEW89PPeK3AOe8/edit?usp=sharing)>

<<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1kyW4j7xvTtLPNWpQ1skzFbTmkxMYpDqb/edit?usp=sharing&oid=108390360172108024263&rtpof=true&sd=true>>).

### Anàlisi i observacions

Dels resultats d'aquest experiment s'ha extret que l'ancoratge és més fort com més a prop dels imants es trobi el superconductor. Això explica per què els trens de levitació magnètica superconductora (SML) com el MagLev-Cobra leviten a una alçada reduïda d'aproximadament 10 mm.

### **Prova 3: Efecte del tren superconductor sobre el carril**

#### Registres

Quan la capseta ha estat pesada sense nitrogen líquid la bàscula ha marcat 31 g (grams). Un cop s'ha refredat el superconductor, s'ha retirat l'aïllant entre el superconductor i els imants i s'ha buidat la capseta de nitrogen la bàscula ha marcat també 31 g.

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:  
<[https://drive.google.com/file/d/14emBfuGg78G\\_zr1pkMHI4Cv\\_BQn0fU4y/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14emBfuGg78G_zr1pkMHI4Cv_BQn0fU4y/view?usp=sharing)>).

#### Anàlisi i observacions

D'aquesta prova s'ha deduït que el superconductor exerceix la mateixa força sobre la via quan està levitant que si hi estigués en contacte. Per tant, el carril d'imants ha de suportar tot el pes del superconductor encara que aquest no hi entri en contacte. Aquesta dada és molt important a tenir en compte per al disseny de la infraestructura encarregada de sustentar el tren.

### **Prova 4: Comportament del superconductor davant irregularitats al carril (prova d'observació)**

#### Registres

Aquesta prova no presenta cap registre numèric. (Vegeu l'observació de la prova en la fotografia 13).



Fotografia 13: observació prova 4 tren superconductor (font pròpia)

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:  
<[https://drive.google.com/file/d/1Btpa9sX3d8\\_1NtyaU7EAR5Ap8a8XqWfd/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1Btpa9sX3d8_1NtyaU7EAR5Ap8a8XqWfd/view?usp=sharing)>).

#### Anàlisi i observacions

S'ha observat que aquests trens són capaços de superar amb èxit importants irregularitats en la via. D'aquest fet es pot deduir la gran flexibilitat que presenten els trens de levitació magnètica superconductora a l'hora de ser implantats en les ciutats.

### **Prova 5: Pes màxim suportat**

#### Registres

En aquesta prova s'ha pres nota de la massa màxima que ha estat capaç de suportar el superconductor abans d'entrar en contacte amb el carril partint d'un ancoratge a 4 mm (mil·límetres) entre aquest i els imants. La massa màxima suportada ha estat d'aproximadament 900 g (grams), fet que implica que aquest petit superconductor de menys de 30 g ha estat capaç de suportar uns 30 cops el seu propi pes.

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:

<<https://drive.google.com/file/d/1WeYxEM-eRNv69OW7h7nDh9k29rKN8ff6/view?usp=sharing>>).

#### Anàlisi i observacions

D'aquesta prova es pot extreure que el superconductor presenta una gran viabilitat per ser utilitzat en el transport, ja que amb una quantitat relativament reduïda d'aquest es pot mantenir en levitació estable un cos d'una massa molt superior com pot ser un tren de passatgers.

### **Prova 6: Fregament amb l'aire**

#### Registres

Fent servir les expressions preparades prèviament en un full de càlcul i la relació entre els fotogrames i el temps de les gravacions realitzades a càmera lenta s'ha arribat al resultat que l'acceleració aplicada al tren pel fregament amb l'aire quan aquest viatja a 0,1476m/s (metres / segon) és d'aproximadament  $-0,0048 \text{ m/s}^2$  (metres / segon<sup>2</sup>). (Vegeu taula 1).

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:

<<https://drive.google.com/file/d/13N1gtTEALeMGGL6Nmz1pTzNHh6xXeNum/view?usp=sharing>>.

Es pot accedir al full de càlcul utilitzat mitjançant aquest enllaç:

<[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1kBDw\\_8Gyw-9GzbFUdGauYzFNp16VMuaayIPPMIYJaKg/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1kBDw_8Gyw-9GzbFUdGauYzFNp16VMuaayIPPMIYJaKg/edit?usp=sharing)>).

#### Anàlisi i observacions

Tot i que les dimensions de la maqueta i la seva velocitat (magnituds de les quals depèn el valor de la resistència amb l'aire) en els experiments no són similars a la realitat, s'ha observat mitjançant aquesta prova que el fregament amb l'aire és molt reduït en trens superconductors urbans aerodinàmics i de velocitats moderades.

Pel que fa a aquesta prova hauria estat òptim estudiar la relació entre el fregament i la velocitat, ja que la força de fregament augmenta amb la velocitat. No obstant això, no s'han pogut realitzar estudis amb velocitats més elevades donada la limitació de fotogrames de la càmera i la reduïda longitud del carril. Per altra banda, tampoc s'ha pogut estudiar el fregament a velocitats més reduïdes donada la precisió necessària per a la mesura de la fricció, la qual no seria estudiada amb prou exactitud a causa dels petits defectes presents en el carril elaborat de manera casolana.

1s vida real = 225 fotogrames en el video			
<b>Espai inicial tram 1 (m)</b>	<b>Espai final tram 1 (m)</b>	<b>Temps tram 1 (s)</b>	<b>Fotogrames tram 1</b>
0	0,01	0,071111111111	16
0	0,01	0,057777777778	13
0	0,01	0,08	18
0	0,01	0,057777777778	13
0	0,01	0,062222222222	14
<b>Espai inicial tram 2 (m)</b>	<b>Espai final tram 2 (m)</b>	<b>Temps tram 2 (s)</b>	<b>Fotogrames tram 2</b>
0	0,01	0,08	18
0	0,01	0,062222222222	14
0	0,01	0,093333333333	21
0	0,01	0,062222222222	14
0	0,01	0,066666666667	15
<b>Velocitat inicial (m/s)</b>	<b>Velocitat final (m/s)</b>	<b>Temps tram 1-2 (s)</b>	<b>Fotogrames tram 1-2</b>
0,140625	0,125	3,0533333333	687
0,173077	0,1607142857	2,6266666667	591
0,125000	0,1071428571	3,3377777778	751
0,173077	0,1607142857	2,6	585
0,160714	0,15	2,6044444444	586
<b>Acceleració (m/s<sup>2</sup>)</b>			
-0,005117358079			
-0,004706587828			
-0,005350009511			
-0,004754860524			
-0,004113846904			
<b>Velocitat mitjana del tren en els experiments (m/s)</b>	<b>Acceleració estimada de la força de fregament (m/s<sup>2</sup>)</b>		
0,147606456	-0,004808532569		

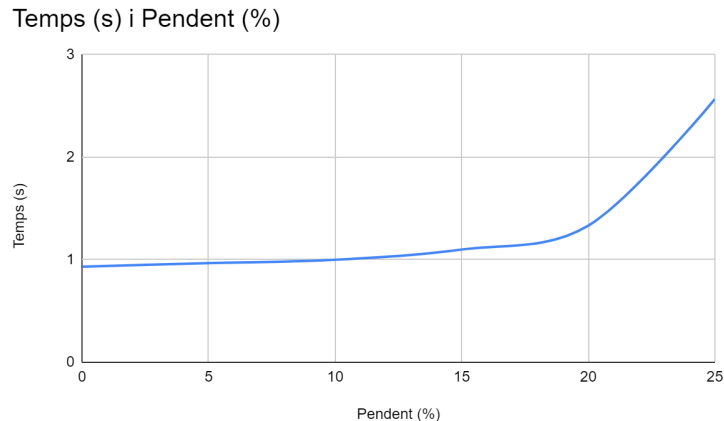
Taula 1: full de càlcul "Prova 6: Fregament amb l'aire" (font pròpia)

## 4.1.2. Tren elèctric

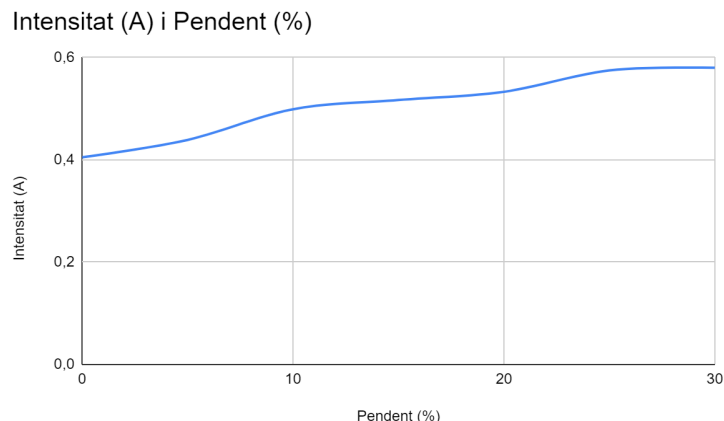
### Prova 1: Pendent màxim

#### Registres

Un cop s'ha realitzat l'experiment s'han elaborat dues representacions gràfiques: una que expressa la relació entre el pendent i el temps que tarda el tren a recórrer el tram de 700 mm (mil·límetres) (gràfic 4) i una altra que relaciona el pendent amb la intensitat de corrent present durant en el recorregut del tren per aquest mateix tram (gràfic 5).



Gràfic 4: relació entre el pendent i la durada del recorregut del tram de 700 mm (font pròpia)



Gràfic 5: relació entre el pendent i la intensitat mesurada (font pròpia)

En arribar a un pendent del 30%, el tren ha estat incapaç de realitzar la pujada donat que les rodes no han tingut prou subjectió i han començat a lliscar sobre la via.

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:

<<https://drive.google.com/file/d/1gLkOf6p7PJZh7wG45CPFLNBU1Ec9b2wu/view?usp=sharing>>.

Es pot accedir al full de càlcul utilitzat mitjançant aquest enllaç:

<<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1vUEnI576TXsqsC0l6jEsua9MS1EfTgWWMdbJqcBTo31c/edit?usp=sharing>>).

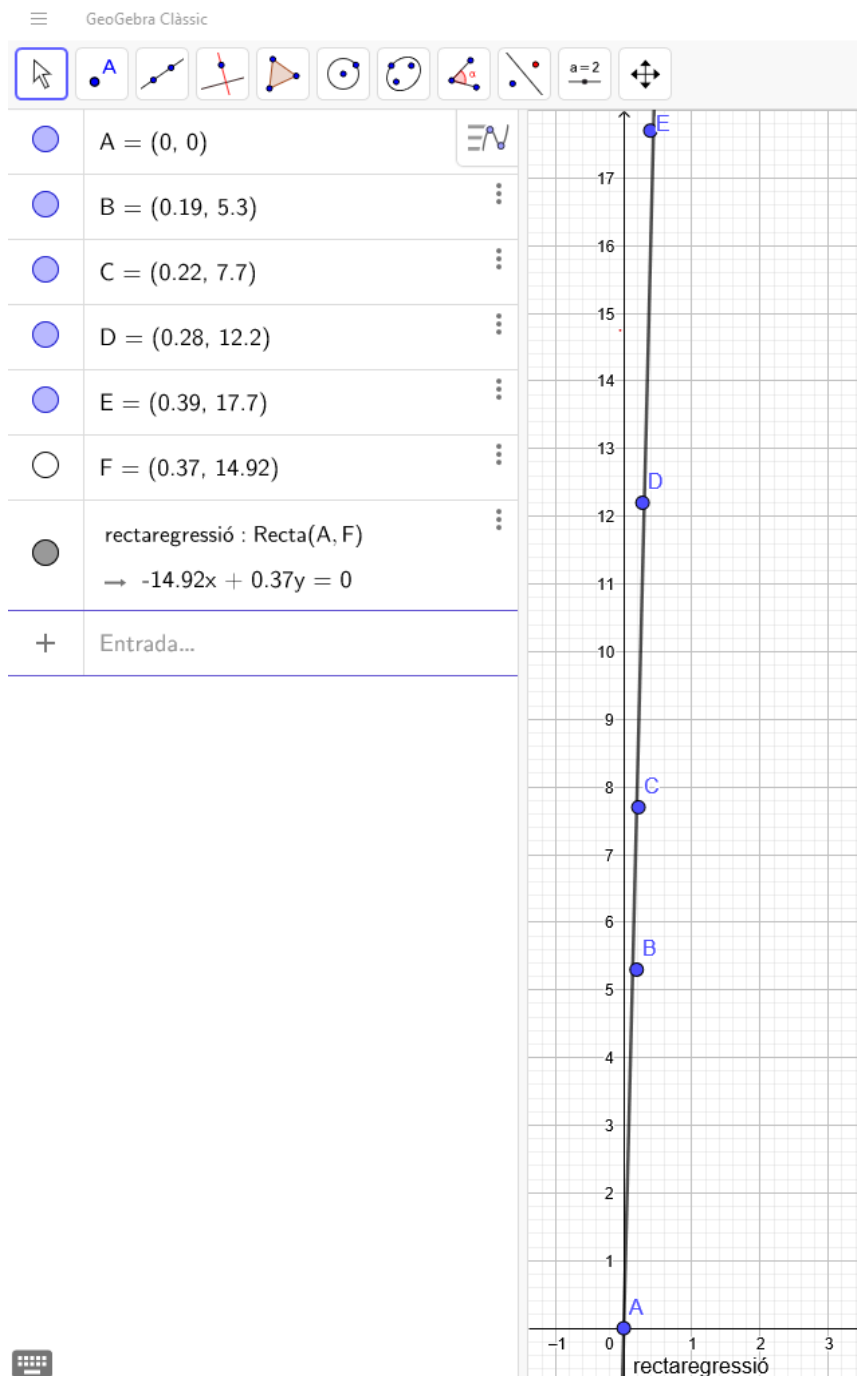
#### Anàlisi i observacions

En aquesta prova s'ha observat que a major pendent més dificultat té el tren per recórrer la via, fet que implica una velocitat més lenta, un consum més elevat de corrent i una major inestabilitat. És per això que els trens elèctrics circulen per pendents màxims molt reduïts (4%).

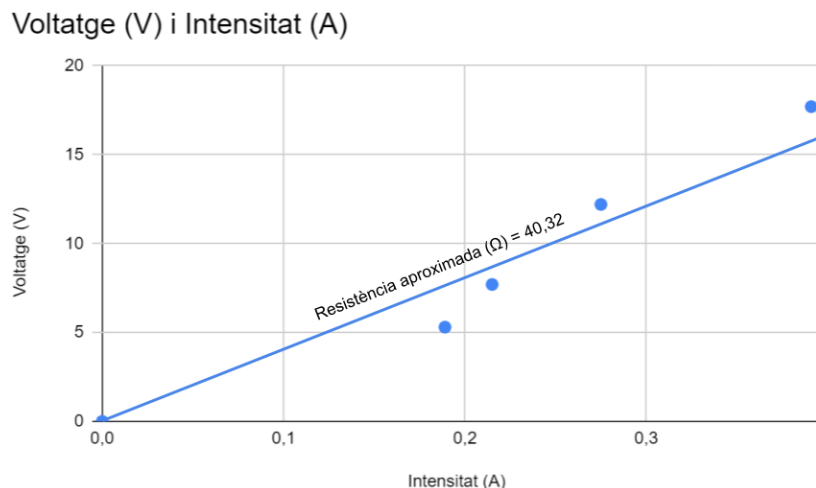
## Prova 2: Resistència total del conjunt

### Registres

Amb els voltatges aplicats i les seves respectives intensitats s'ha elaborat una taula que ha servit per crear un gràfic. Amb els punts del gràfic generat s'ha trobat una recta de regressió i el pendent d'aquesta (la resistència) fent servir el programa GeoGebra (vegeu imatge 22 i gràfic 6).



Imatge 22: ús del programa GeoGebra per trobar la recta de regressió i el seu pendent (font pròpia)



Gràfic 6: relació entre la intensitat i el voltatge i càlcul aproximat de la resistència (font pròpia)

La resistència aproximada ha resultat ser de 40,32  $\Omega$  (ohms).

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:

<<https://drive.google.com/file/d/1I-tPyllgGGCdR2OkgBi8C8xNWLdobD5m/view?usp=sharing>>.

Es pot accedir al full de càlcul utilitzat mitjançant aquest enllaç:

<<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1F0FHm2nsKXmjwSmlxNai5L2ue9hIf7by09NbpcRmnnl/edit?usp=sharing>>).

#### Anàlisi i observacions

El resultat obtingut en aquesta prova no es pot traslladar a la realitat, ja que els sistemes elèctrics presents en la maqueta usada són molt més simples que en un tren real i els recursos per prendre les mesures han estat limitats.

Així i tot, s'ha pogut observar una gran diferència entre els punts marcats al gràfic i la mateixa recta de regressió. Aquest fet porta a deduir la presència d'un sistema regulador de corrent integrat en el tren, el qual també és present en els trens elèctrics reals tot i que amb una major complexitat.

### **Prova 3: Pèrdua de tensió en la via**

#### Registres

En observar el vídeo s'ha vist com en avançar el tren per un tram d'aproximadament 600 mm el voltatge del circuit ha caigut progressivament de 5,15 V (volts) a 4,97 V.

(El vídeo explicatiu de la prova es troba en el següent enllaç:

<<https://drive.google.com/file/d/1D-ZSxCx0SYAShy6WY8r8NbAuBODcl0AH/view?usp=sharing>>).

#### Anàlisi i observacions

En aquesta prova s'ha observat que la tensió va disminuint lentament a mesura que el tren s'allunya del punt de subministrament d'electricitat. Això justifica perquè es necessiten diversos punts de subministrament al llarg del recorregut del tren que subministrin més corrent del necessari per mantenir un nivell mínim de tensió (voltatge) en tots els punts de la via.

## 4.2. Comparativa

Un cop sintetitzats els resultats extrets de les proves s'ha elaborat l'apartat de comparativa, en el qual s'han mostrat les diferències entre els tramvies i els trens de levitació magnètica superconductora estudiats. Aquesta comparativa s'ha dividit en diversos apartats i ha servit per estudiar els avantatges de cada tipus de tren utilitzant tant informació extreta dels experiments com documentació d'Internet.

L'obtenció d'informació sobre els consums i altres especificacions de tramvies elèctrics i trens MagLev ha estat una tasca complicada donat que aquestes dades poden arribar a ser confidencials i només s'ha pogut extreure una quantitat reduïda d'informació d'articles científics i especificacions comercials.

### 4.2.1. Eficiència energètica

Els trens de levitació magnètica superconductora (SML) com el MagLev-Cobra no requereixen cap mena de contacte amb els rails i, com s'ha pogut observar en l'experimentació, concretament en la prova 6 del tren superconductor, la força de fricció de l'aire amb el tren superconductor és molt reduïda<sup>12</sup>.

Els superconductors utilitzats per assolir la levitació estan disposats a l'interior de criòstats i, per tant, el consum de nitrogen líquid és extremadament baix (20 L / 250 kg / 12 h) ("L" són litres, "kg" són quilos i "h" són hores). Per alimentar el motor lineal i propulsar el tren es necessita energia elèctrica, la quantitat de la qual és reduïda a causa de factors com la poca resistència de l'aire i les baixes velocitats del tren degudes al seu ús urbà. Aquesta energia és emmagatzemada en bateries a l'interior del tren que es carreguen durant les parades i fora dels horaris de transport. A més, el subministrament energètic del tren pot provenir de fonts renovables com l'energia solar.

Al contrari, els trens elèctrics urbans com el tramvia no necessiten cap recurs extern per funcionar com el nitrogen líquid que utilitza el tren MagLev. Així i tot, necessiten un subministrament elèctric permanent mitjançant la catenària. I, com s'ha pogut observar en la prova 3 del tren elèctric, a causa de la pèrdua de tensió entre punts de subministrament per l'efecte Joule, la catenària que alimenta al tren ha de transportar una quantitat de corrent elèctric major que la necessària per al seu funcionament.

D'afegit, el procés de transformació d'energia elèctrica a mecànica que ocorre en el motor no és 100% eficient, fet que comporta encara més pèrdua energètica.

A més, tot i que el fregament amb el terra és essencial perquè el tren pugui rodar per la superfície de les vies sense lliscar, aquest també fa que es necessiti molta més força i, per tant, energia per iniciar moviment en el tren i mantenir-lo. Un altre factor important és que els tramvies han de realitzar més frenades i arrencades que l'habitual per influències externes com el tràfic i els semàfors, fet que genera una major despesa energètica i deteriorament dels motors.

A la imatge 23 es veu reflectida l'eficiència energètica dels trens MagLev-Cobra, la qual representa menys de la meitat de consum per passatger que un tren metropolità (tramvia) o un metro i gairebé un terç del consum d'un autobús. D'afegit també es pot destacar el fet que els cotxes privats consumeixen una xifra d'energia per passatger més de trenta cops superior a la dels trens MagLev.

---

<sup>12</sup> L'aerodinàmica del tren i la velocitat d'aquest tenen un pes important en l'efecte de l'aire.

Transportation System	Energy Consumption (kWh/pass.km)
Cars (1.3 passengers)	0.768
Padron Bus (80 passengers)	0.074
Metropolitan train (300 passengers)	0.054
Subway train (225 passengers)	0.051
MagLev <sup>2</sup> -Cobra (20 passengers)	0.025

Imatge 23: consum energètic normalitzat dels sistemes de transport urbà  
[https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig\\_body\\_display\\_electronics-09-00978-f001](https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig_body_display_electronics-09-00978-f001)

#### 4.2.2. Infraestructura i mobilitat

Els trens elèctrics com el tramvia, a causa del seu pes, es construeixen principalment per línies arran de terra, fet que influeix en el tràfic, la mobilitat i la seguretat dels vianants. A més, la catenària del tramvia genera un impacte visual negatiu a la ciutat.

Per altra banda, els metros, un altre tipus de tren elèctric urbà, no influeixen en el tràfic, ja que circulen sota terra. Així i tot, les seves línies són complexes i costoses i no totes les ciutats disposen del terreny adequat per a la seva construcció.

En la prova 3 del tren superconductor s'ha observat que el pes del tren MagLev es transmet a la via totalment. Així i tot, atès que el vehicle MagLev-Cobra no necessita rodes ni motors de rotació, és més lleuger que els trens esmentats anteriorment (gairebé 7 cops menys pes per passatger que un tramvia). Això el permet circular per carrils elevats i sustentats per una infraestructura poc invasiva que no perjudiqui el funcionament diari de la ciutat. A més, en vehicles tradicionals, la càrrega es concentra en el punt de contacte entre la roda i el carril. Per altra banda, en els vehicles MagLev es distribueix la càrrega. Per tant, els esforços en l'estructura de suport es redueixen, cosa que implica una infraestructura més lleugera i econòmica.

El MagLev-Cobra està format per mòduls d'1,5 m de llargada sustentats per superconductors que, com s'ha observat a la prova 5 del tren superconductor, poden suportar quantitats de pes molt superiors al seu propi. Tals mòduls es poden acoblar els uns als altres variant la llargada del tren. Aquest tret proporciona un alt grau de flexibilitat, ja que la llargada del tren pot ser modificada depenent de la demanda i freqüència de cada ruta. D'afegit, la força i seguretat de l'ancoratge dels superconductors (proprietats que s'han pogut observar en les proves 1 i 4 del tren superconductor), i l'absència de rodes que contactin amb la via proporcionen al MagLev-Cobra una major flexibilitat pel que fa a corbes tancades. D'aquesta manera, la secció transversal d'aquest tipus de trens representa la meitat de l'habitual en trens convencionals permetent corbes pràcticament circulars.

Al contrari, per culpa de la limitació del contacte entre la roda i la via present en els trens elèctrics, les corbes en aquest tipus de trens i la velocitat a la qual les prenen es veuen força limitades.

Un altre punt important de la comparativa pel que fa a la flexibilitat del transport és el pendent màxim que pot suportar cada tren. Quan el transport es basa en la fricció (tramvia elèctric), el declivi màxim d'una pista és del 4%, ja que, com s'ha observat en la prova 1 del tren elèctric, a major inclinació major és la pèrdua de tracció de les rodes del tren. La tracció lineal del motor dels vehicles MagLev SML permet, per contra, desplaçaments per pendents del 10%, percentatge limitat només per la comoditat dels passatgers.

També, gràcies a la força del motor lineal i el pes reduït dels trens MagLev, aquests poden viatjar a altes velocitats durant més temps que un tren convencional, sent capaços d'accelerar i desaccelerar més ràpidament. I ho fan de forma silenciosa. Un dels avantatges d'aquest transport per a les ciutats és el poc soroll que fa en evitar la fricció amb les vies.











#### 4.2.3. Cost

Pel que fa al cost i els recursos necessaris per a la construcció de xarxes de trens MagLev-Cobra a les ciutats, apareixen una sèrie de reptes d'assoliment més complicat. Ja que aquests vehicles requereixen infraestructures totalment noves i les instal·lacions són cares.

Per construir línies funcionals de trens MagLev SML es necessitaria una quantitat important d'obres i recursos per muntar les estacions, la xarxa de subministrament elèctric i de nitrogen líquid, els suports elevats del carril, etc. També s'hauria d'invertir una gran quantitat de diners en l'obtenció de materials costosos com són els superconductors o els nombrosos imants de neodimi utilitzats en el carril i la part fixa del motor lineal<sup>13</sup>.

Així i tot, aquest elevat cost s'acabaria amortitzant per l'estalvi en energia i manteniment. I és que gràcies a l'ús del motor lineal se simplifica el disseny de la màquina, s'eliminen directament jocs mecànics, i s'eliminen fonts potencials d'error com acoblaments, corretges, o altres transmissions mecàniques. Això fa que en els trens MagLev només sigui necessari mantenir l'electrònica, mentre que en un ferrocarril d'avui dia cal cuidar també la mecànica.

A la imatge 24 es poden apreciar algunes de les principals diferències entre trens MagLev i trens elèctrics.

		MagLev	Wheel-Rail
CONSTRUCTION	Cost of the levitating / rolling stock		
	Cost and time of civil construction		
	Acceleration and braking time Total travel time		
OPERATION	Operational costs: maintenance and fuel		
	Environmental impact: audible noise, CO <sub>2</sub> emission		

Imatge 24: algunes de les principals diferències entre trens MagLev i trens elèctrics  
[https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig\\_body\\_display\\_electronics-09-00978-f001](https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig_body_display_electronics-09-00978-f001)

<sup>13</sup> La part fixa del motor lineal es troba a la via i es tracta d'una sèrie d'imants permanents de neodimi que s'intercalen entre nord i sud.

#### 4.2.4. Comparativa a escala real

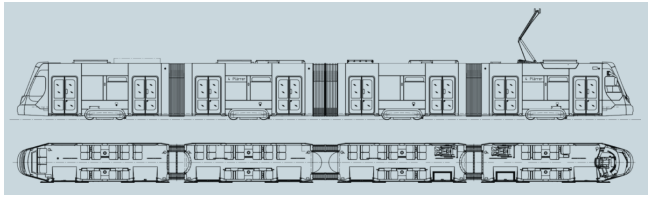
Per complementar la comparativa s'ha partit d'una sèrie d'especificacions obtingudes de documents extrets d'Internet.

Per al tren elèctric s'ha cercat informació d'un tramvia Siemens model Avenio, ja que aquest model de tramvia és utilitzat en gran quantitat de ciutats arreu del món. Per altra banda, en el cas del tren superconductor, s'ha estudiat el prototip construït a Brasil de tren de levitació magnètica superconductora MagLev-Cobra, donat que aquest és un dels més avançats actualment i es troba en fase de comercialització.

Amb la informació extreta d'aquests documents s'ha elaborat una taula comparativa que relaciona diversos aspectes d'ambdós tipus de trens.

	Tramvia Siemens Avenio de 4 vagons (vegeu imatge 25)	MagLev-Cobra Brasil 1 mòdul (vegeu imatges 26 i 27)
Dimensions del tren	Amplada = 2,3 m (metres) Llargada = 36,85 m Alçada = 2,8 m	Amplada = 2,3 m Llargada = 1,5 m Alçada = 2,8 m
Passatgers	4 per m <sup>2</sup> (metres <sup>2</sup> )	6 per m <sup>2</sup>
Total de passatgers	218 inclosos 62 seients	8 inclosos 4 seients
Soroll	75-78 dB (decibels)	molt reduït
Velocitat	70 km/h (quilòmetres/hora) màxima	10 km/h creuer (prototip) ~70 km/h creuer 100 km/h màxima (opció comercial futura)
Pendent màxim	4%	10%
Tipus de motor	Rotatiu	Lineal
Subministrament enèrgic	catenària 750V DC (corrent continu)	bateries recarregades durant les parades
Pes	45 t (tones) buit / 55 t ple	240 kg (quilos) buit / 800 kg ple (prototip 2008)
Suport	16 rodes (4 rodes per vagó)	4 criòstats (cada criòstat sustenta 250 kg i consumeix 20 L (litres) de nitrogen líquid per jornada) (vegeu imatge 28)
Carril	Dos raïls metàl·lics separats 143,5 cm (centímetres)	Dos raïls d'imants de (5 x 5 x 10) cm <sup>3</sup> de neodimi separats 175 cm

Cal remarcar la dificultat present en el procés d'obtenció d'especificacions dels models de tren a escala real. Aquesta limitació es deu a la confidencialitat i privacitat que envolten les dades requerides per la comparativa. És per això que només s'ha pogut extreure una quantitat reduïda d'informació.

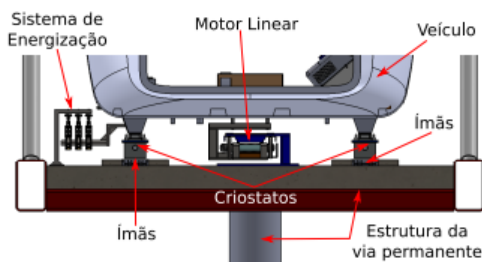


Imatge 25: esquema del tramvia Siemens Avenio de 4 vagons

<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:feb80f67-6556-4a08-beb2-864a0322b94e/siemens-mobility-avenio-nuremberg-datasheet-en-online.pdf>

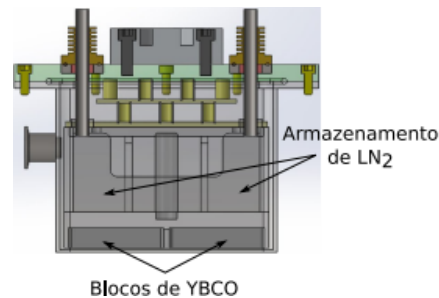


Imatge 26: mòdul MagLev-Cobra Brasil  
[https://www.researchgate.net/publication/267626127\\_A\\_Full-Scale\\_Module\\_of\\_the\\_MagLev-Cobra\\_HTS-Superconducting\\_Vehicle](https://www.researchgate.net/publication/267626127_A_Full-Scale_Module_of_the_MagLev-Cobra_HTS-Superconducting_Vehicle)



Imatge 27: esquema de l'estructura del tren MagLev-Cobra del Brasil

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/3JHGDswHRxq773Nf6nv7HpK/?format=pdf&lang=pt>



Imatge 28: criòstat

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/3JHGDswHRxq773Nf6nv7HpK/?format=pdf&lang=pt>

### 4.3. Anàlisi i discussió de resultats

Finalitzada l'obtenció de tots els resultats de l'experimentació i la comparativa s'ha vist convenient elaborar-ne una breu reflexió. Primerament, cal fer l'incís que amb aquest treball no es pretén ni molt menys proposar el tren superconductor com a substitut d'altres transports elèctrics urbans com el tramvia o el metro, ja que aquests contribueixen també a la reducció del tràfic a les ciutats i a la sostenibilitat del transport públic a les metròpolis.

Tal com s'ha exposat en la comparativa, el cost dels materials necessaris per a la construcció dels trens MagLev SML comporta un gran repte per al seu ús futur. Per tant, al principi només ciutats amb una situació econòmica benestant i gran volum de població requeriran i podran permetre's aquesta mena de transport públic.

No obstant això, juntament amb altres propostes de transport urbà verd com el mateix tramvia, els trens superconductors poden contribuir a la reducció de les emissions de contaminants emeses per vehicles amb motors de combustió. A més, també poden suposar una solució a les constants regulacions del vehicle privat a les ciutats i a problemes com la contaminació acústica o la mala qualitat de l'aire.

I és que la permissivitat que proporciona l'estructura poc invasiva dels vehicles MagLev facilita la seva convivència en una mateixa ciutat amb tota mena de mitjans de transport. D'afegit, la flexibilitat d'aquest vehicle també permet la seva implantació en ciutats poc estructurades en les que la construcció de sistemes de transport com el tramvia o el metro és més complicada.

Així doncs, el tren MagLev representa principalment una eina més en la causa de la sostenibilitat present en aquest món en constant creixement on la mobilitat i la salut són or.

## 5. CONCLUSIONS

Per donar compliment al primer objectiu d'investigar com funciona i com es pot aplicar al transport la tecnologia basada en la superconductivitat, s'ha realitzat un ampli procés de recerca el qual s'ha anat concretant amb el temps. D'aquesta manera s'ha obtingut la informació necessària per a la comprensió del funcionament dels superconductors. Entre aquests coneixements en destaquen diversos de molt interessants. Un d'ells es tracta de la propietat d'ancoratge dels superconductors de tipus II, la qual és essencial per a l'ús d'aquests en la construcció de trens levitants urbans. Aquesta propietat s'ha comprès mitjançant l'estudi del fenomen d'aparició dels vòrtexs en els superconductors de tipus II, ja que aquests són els responsables de l'ancoratge magnètic. També ha estat atractiu informar-se sobre l'efecte Meissner, mitjançant el qual s'assoleix l'estat superconductor.

A més, s'ha obtingut informació sobre tots els tipus de trens basats en la superconductivitat i sobre els trens elèctrics. Amb aquestes dades s'ha pogut determinar que el tren MagLev a estudiar seria el de levitació magnètica superconductora (SML), ja que aquest destaca sobre els altres trens superconductors en termes d'eficiència, infraestructura i cost. Així doncs, el primer estudi d'aquestes característiques ha servit per encarar el treball i començar a fer-se una idea del gran potencial dels vehicles MagLev SML per a la contribució a la mobilitat sostenible en les ciutats.

Per assolir el següent objectiu del treball, amb els coneixements extrets de la fase de recerca inicial, s'han dissenyat i elaborat dues maquetes: una per estudiar el tren superconductor i l'altra pel tren elèctric. Cal destacar que per treballar amb la maqueta del tren superconductor s'han utilitzat materials i recursos característics com potents imants de neodimi, una peça superconductora de composició  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  i nitrogen líquid per refrigerar el superconductor fins a la seva temperatura crítica. Així i tot, no s'ha disposat ni dels recursos ni del temps per recrear un motor lineal, ja que l'ús d'aquest requereix una gran precisió en la construcció de la maqueta, una disposició més elaborada dels imants, i coneixements d'electricitat, electrònica i programació per a crear una carcassa amb electroimants intel·ligents. Aquesta possible millora del model a escala seria, però, definitivament important a tenir en compte en una futura continuació del treball.

No obstant això, tot i la simplicitat de les maquetes treballades, aquestes han complert la seva funció a l'hora de realitzar els experiments preparats.

Les proves amb el superconductor han servit per estudiar i observar l'efecte Meissner i el fenomen d'ancoratge del superconductor en el camp magnètic entre d'altres. A través d'aquestes observacions s'ha determinat que l'ancoratge és molt intens a distàncies curtes entre el superconductor i el carril i que proporciona resistència 0 a l'avenç lineal del tren mentre que contraresta intensament qualsevol força que intenta separar el vehicle del carril sigui verticalment o lateralment. D'afegit, també s'ha observat, tot i que amb imprecisió, el reduït impacte que té la fricció amb l'aire en l'avenç del tren.

Mitjançant les proves amb el tren elèctric s'ha pogut estudiar el consum d'aquest i s'ha identificat l'existent disminució del voltatge present a mesura que el tren s'allunya del punt de subministrament. A més, també s'ha observat que, a certa inclinació, els transports basats en fricció com el tren elèctric no tenen suficient subjecció i comencen a lliscar, fet que limita les zones per les quals es poden desplaçar els tramvies.

Pel que fa al tercer i últim objectiu d'aquest treball, amb tots els resultats obtinguts a l'experimentació i les dades extretes de l'estudi dels models a escala real, s'ha dut a terme una comparativa per relacionar els aspectes més rellevants de cada tipus de tren (MagLev urbà i tramvia elèctric). A través d'aquesta comparativa s'han determinat els avantatges i desavantatges d'ambdós tipus de trens.

Per una banda, s'ha deduït que, donada la raresa dels superconductors i els imants de neodimi, el cost dels materials necessaris per a la construcció de trens MagLev SML és molt elevat. A més, la instal·lació de les seves infraestructures, ja siguin elevades amb pilars per sobre del tràfic o a nivell de terra, i la necessitat d'un subministrament (reduït) de nitrogen líquid suposaria també un gran repte econòmic i civil per a les ciutats. Al contrari, moltes ciutats disposen ja de serveis de tramvies o metros en funcionament, cosa que redueix la probabilitat d'inversions en transport superconductor.

Per altra banda, s'ha determinat que els trens MagLev, a causa de l'absència de fricció entre els mòduls i la via, necessiten molt menys manteniment que els elèctrics. A més, en ser gairebé set vegades més lleugers que els tramvies, es poden construir en carrils elevats i simples que no interfereixin en el trànsit. D'afegit, els trens MagLev urbans com el MagLev-Cobra consumeixen aproximadament la meitat d'energia que un tren elèctric urbà. Un altre avantatge dels trens superconductors que s'ha determinat en la comparativa és la seva flexibilitat. I és que els trens MagLev, com que no fan servir la fricció amb el terra com a mitjà de propulsió, presenten molta més permissivitat a l'hora de prendre corbes tancades o pujar pendents pronunciats. Això últim dota als trens SML d'una major capacitat per adaptar-se a la distribució de qualsevol ciutat.

En aquest treball s'ha deduït que el cost de la instal·lació d'infraestructures de trens MagLev suposa un gran repte per a la implantació d'aquest tipus de transports en les futures ciutats. No obstant això, aquest hàndicap s'ha contrastat amb tots els avantatges que aquest model de transport suposaria per a la sostenibilitat i la mobilitat. Això ha portat a validar la hipòtesi plantejada al començament del treball que "tot i que la implementació dels trens superconductors requereix grans inversions, l'estalvi energètic d'aquest transport, la simplicitat de la seva infraestructura i els continuats avenços en aquest camp l'acabaran convertint en una alternativa viable al tramvia elèctric i en una eina vital per ajudar a reduir l'ús de vehicles contaminants en les ciutats fent de la mobilitat una qüestió més sostenible i eficient." Així doncs, s'ha determinat que, tot i els reptes econòmics que presenta la instal·lació de línies de trens MagLev SML, aquest és un transport que presenta un gran potencial per al futur donat que és verd, flexible, fàcil de mantenir, i beneficiós per la mobilitat, la salut, el medi ambient i, a llarg termini, també per l'economia.

Per finalitzar aquest apartat de conclusions, es considera necessari destacar que al llarg del desenvolupament del treball han aparegut diverses limitacions. Aquestes dificultats han afectat directament al desenvolupament del treball i en destaquen: l'estat actual de desenvolupament de la tecnologia SML, la falta d'instruments de mesura avançats per obtenir resultats numèrics, la falta de temps per aprofundir encara més en la recerca, la falta de la tecnologia i les especificacions necessàries per a la construcció de models a escala que representin amb precisió la realitat, la confidencialitat de les especificacions sobre models reals, etc.

Són, però, aquestes limitacions les que obren camí a noves línies d'investigació a partir de la branca general estudiada en aquest treball de recerca.

Per una banda, destaca la via d'investigació que obre el fet que la tecnologia SML encara es trobi en desenvolupament. I és que amb futurs estudis més complexos es pot augmentar encara més l'eficiència d'aquest tipus de transport. Una de les arrels d'aquesta via consisteix en la recerca de materials superconductors assequibles econòmicament que assolixin l'estat superconductor a temperatura ambient i pressions baixes. El descobriment i l'estudi de les propietats d'aquests nous materials pot ajudar a optimitzar els trens MagLev urbans i reduir el consum atribuït a la liquació i exportació del nitrogen que s'utilitza per refrigerar els superconductors presents als baixos del tren.

Un altre punt d'investigació molt important que pot donar continuïtat a aquest treball és la realització d'estudis econòmics i civils orientats al desenvolupament d'un pla factible per a la implantació d'aquest transport a una ciutat. Aquesta branca d'investigació hauria d'aprofundir en temes de difícil accés i treball com són la distribució i organització de la instal·lació d'un sistema de trens MagLev SML, l'estimació dels costos d'aquest sistema, els materials necessaris per a la seva construcció, les mesures legals requerides per a les obres, l'impacte en la vida diària a les ciutats, les campanyes d'informació i preparació necessàries per a convèncer a la ciutadania del seu ús, etc.

## 6. AGRAÏMENTS

En aquest apartat es vol fer especial menció com a agraïment als senyors Francesc Díaz i José Manuel Montoro.

En Francesc Díaz és el vicerector de Recerca i Planificació Científica de la Universitat Rovira i Virgili. Gràcies a la sessió sobre superconductors que va conduir *online* l'estiu del 2020, va sorgir la meva motivació per a aquest treball de recerca. A més, el senyor Francesc Díaz em va proporcionar respostes a diversos dubtes que em van sorgir durant l'etapa de recerca inicial del treball, quan encara no estava familiaritzat amb el tema. I, per últim, però no menys important, em va deixar el material superconductor que posteriorment vaig fer servir en la fase d'experimentació. Aquesta va ser una gesta rellevant, ja que el cost dels materials superconductors es troba, en l'actualitat, certament elevat.

En José Manuel Montoro, per altra banda, és el mànager de producció de Messer Group, un fabricant i proveïdor de gasos industrials que, entre altres coses, extreu nitrogen de l'atmosfera i el liqua. Gràcies a la seva generositat vaig poder disposar de les instal·lacions, el nitrogen líquid i els equips de seguretat necessaris per dur a terme els experiments. A més, també va proporcionar assistència com a expert en la manipulació del nitrogen líquid. Com a agraïment pel seu temps i la seva col·laboració he decidit donar-li el carril d'imants utilitzat en els experiments perquè pugui realitzar demostracions sobre la superconductivitat als grups d'estudiants que visitin la fàbrica.

## 7. BIBLIOGRAFIA

### **Llibres**

JOHN BLUNDELL STEPHEN. *Superconductivity. A very short introduction*. Very short introductions; 204. 1ª. edició. Oxford: Oxford University Press, 2009.

### **Pàgines web**

DIVULGACIÓN SUPERCONDUCTIVIDAD. *Superconductividad (ICMM-CSIC)*  
<<https://wp.icmm.csic.es/superconductividad/investigacion/historia/>> [data de consulta 11 març 2021]

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI. *Superconductivitat i sostenibilitat*  
<<https://youtu.be/N0N1fBXWwm0>> [data de consulta 29 març 2021]

JAPAN RAIL PASS. *El Maglev japonés, el tren bala más rápido del mundo*  
<<https://www.jrailpass.com/blog/es/maglev-tren-bala>> [data de consulta 1 abril 2021]

VÍA LIBRE. *Pruebas en Brasil de un tren de levitación magnética*  
<<https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=19580>> [data de consulta 1 abril 2021]

TRENVISTA. *¿Cómo se mueve un tren eléctrico?*  
<<https://www.trenvista.net/formacion/escuela-trenvista/como-se-mueve-un-tren-electrico/>> [data de consulta 3 abril 2021]

ENDESA. *El transformador eléctrico*  
<<https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>> [data de consulta 3 abril 2021]

ENERGIA SOLAR. *Què és el corrent altern (CA)?*  
<<https://ca.demotor.net/electricitat/corrent-electric/corrent-altern>> [data de consulta 3 abril 2021]

ENCICLOPÈDIA.CAT. *Motor elèctric*  
<<https://www.encyclopedia.cat/ec-gec-0125049.xml>> [data de consulta 3 abril 2021]

ELECRAIL. *Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica*  
<[http://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/M2-ElecRail\\_%20Rendimientos\\_cadena.pdf](http://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/M2-ElecRail_%20Rendimientos_cadena.pdf)> [data de consulta 4 abril 2021]

LA BOUTIQUE DEL IMÁN. *Imanes de neodimio*  
<<http://www.laboutiquedeliman.com/neodimio.html>> [data de consulta 9 juny 2021]

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI. *Vicerector de Recerca i Planificació Científica*  
<<https://www.urv.cat/ca/universitat/estructura/govern/consell-direccio/vicerector-recerca/>> [data de consulta 11 juny 2021]

HERALDO. *El primer superconductor del mundo que opera a temperatura ambiente*  
<<https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2020/10/19/el-primer-superconductor-del-mundo-que-opera-a-temperatura-ambiente-1400508.html>> [data de consulta 9 juliol 2021]

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA - UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA, INSTITUTO DE CIENCIA DE MATERIALES DE ARAGÓN. *Realización de Experimentos Divulgativos sobre el Fenómeno de la Superconductividad*  
<<https://zagan.unizar.es/record/31565/files/TAZ-PFC-2014-576.pdf>> [data de consulta 9 juliol 2021]

MULTIDISCIPLINARY DIGITAL PUBLISHING INSTITUTE. *The Vital Contribution of MagLev Vehicles for the Mobility in Smart Cities*  
<[https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig\\_body\\_display\\_electronics-09-00978-f001](https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/978/htm#fig_body_display_electronics-09-00978-f001)> [data de consulta 12 juliol 2021]

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, INSTITUT DE CIÈNCIA DE MATERIALS DE BARCELONA. *Capítulo 3: Tipos de superconductores*  
<<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6288/07CAPITOL3.pdf?sequence=7&isAllowed=y>> [data de consulta 14 juliol 2021]

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR ZACATECAS SUR. *Protocolo de investigación - Tren de levitación magnética*  
<<https://www.slideshare.net/germancasas50/protoclo-de-investigacin-tren-de-levitacin-magnetica>> [data de consulta 15 juliol 2021]

THE ACTION LAB. *Quantum Locking Will Blow Your Mind—How Does it Work?*  
<<https://www.youtube.com/watch?v=8GY4m022tgo>> [data de consulta 2 agost 2021]

SUPERMAGNETE. *Indicaciones de seguridad para imanes de neodimio*  
<<https://www.supermagnete.es/safety-neodymium>> [data de consulta 5 agost 2021]

LA BOUTIQUE DEL IMÁN. *Imanes de neodimio*  
<<https://drive.google.com/file/d/1l-Uc5i3cHcrNYn4Ca-xBfbM7ITUf-Jnl/view?usp=sharing>> [data de consulta 5 agost 2021]

MESSER GROUP. *Ficha técnica nitrógeno*  
<<https://studylib.es/doc/4563585/ficha-t%C3%A9cnica-nitr%C3%B3geno>> [data de consulta 5 agost 2021]

WOWLAB. *The Awesome Levitating Train*  
<<https://youtu.be/GHtAwQXVsuk>> [data de consulta 11 agost 2021]

GABRIEL PERREN. *Estudio De Las Aplicaciones Prácticas De La Levitación Magnética (Trenes Maglev)*  
<<https://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/MagLev.pdf>> [data de consulta 1 setembre 2021]

TELEFÓNICA. *Maglev: cómo funcionan los trenes de levitación magnética*  
<<https://blogthinkbig.com/maglev-trenes-levitacion-magnetica>> [data de consulta 1 setembre 2021]

ECO-VECTOR. *Maglev-cobra: an urban transportation system For highly populated cities*  
<<https://journals.eco-vector.com/transsyst/article/view/7593>> [data de consulta 4 setembre 2021]

ROLL2RAIL. *New Dependable Rolling Stock For A More Sustainable, Intelligent And Comfortable Rail Transport In Europe*  
<[https://drive.google.com/file/d/1CkvZTIUYjj01RgJOrVabfnCY7t2o\\_Qvb/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1CkvZTIUYjj01RgJOrVabfnCY7t2o_Qvb/view?usp=sharing)>  
[data de consulta 4 setembre 2021]

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA. *Projeto MagLev Cobra - Levitação Supercondutora para Transporte Urbano*  
<<https://www.scielo.br/j/rbef/a/3JHGDswHRxq773Nf6nv7HpK/?format=pdf&lang=pt>> [data de consulta 4 setembre 2021]

RESEARCHGATE. *A Full-Scale Module of the Maglev-Cobra HTS-Superconducting Vehicle*  
<[https://www.researchgate.net/publication/267626127\\_A\\_Full-Scale\\_Module\\_of\\_the\\_Maglev-Cobra\\_HTS-Superconducting\\_Vehicle](https://www.researchgate.net/publication/267626127_A_Full-Scale_Module_of_the_Maglev-Cobra_HTS-Superconducting_Vehicle)> [data de consulta 4 setembre 2021]

VERITASIIUM. *Electromagnetic Levitation Quadcopter*  
<<https://www.youtube.com/watch?v=pCON4zfMzjU>> [data de consulta 4 setembre 2021]

SIEMENS. *Avenio Tram – Nuremberg, Germany*  
<<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:feb80f67-6556-4a08-beb2-864a0322b94e/siemens-mobility-avenio-nuremberg-datasheet-en-online.pdf>> [data de consulta 4 setembre 2021]

COPPE UFRJ. *Maglev-Cobra: Tren de levitación magnética*  
<<https://www.youtube.com/watch?v=LiVjDkNFShQ>> [data de consulta 19 setembre 2021]

DIPUTACIÓ DE BARCELONA. *L'ecocalculadora del Tram*  
<<https://www.sostenible.cat/article/lecocalculadora-del-tram>> [data de consulta 19 octubre 2021]

## ANNEXOS

### 1. Annex I: Història de la superconductivitat

#### ***Descobriments***

L'any 1823, Michael Faraday va realitzar una sèrie d'experiments mitjançant els quals va descobrir que els gasos es podien liquidar. Va adonar-se que, en descompondre hidrat de clor ( $\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$ ) en un recipient tancat, la pressió generada per la reacció generava clor ( $\text{Cl}_2$ ) líquid. Gràcies al descobriment que els elements químics prèviament coneguts només com a gasosos podien canviar a estat líquid, Faraday es va preguntar si també es podrien liquidar altres gasos fent servir aquesta tècnica. Aquest fet va portar que, mitjançant futurs avenços, es poguessin liquidar altres gasos, els quals ens proporcionarien les baixes temperatures necessàries per descobrir la superconductivitat.

Faraday, però, no va poder liquidar certs gasos com l'oxigen, l'hidrogen i el nitrogen amb aquesta tècnica i els va anomenar gasos permanents. Així i tot, l'any 1860 el físic Thomas Andrews, qui va estudiar la liquidació dels gasos, va determinar que els gasos permanents podien ser liquidats, i que simplement els experiments de Faraday no aconseguiren generar la suficient pressió per elevar el punt d'ebullició d'aquests a temperatura ambient.

Era qüestió de temps que s'aconseguissin liquidar aquests gasos en una contínua carrera per assolir temperatures mai abans vistes. Al llarg del temps es van aconseguir liquidar el nitrogen i l'oxigen, i més endavant l'hidrogen.

Tot i això, el recentment descobert heli encara es resistia a ser liquidat. Fins que, finalment, Heike Kamerlingh Onnes va aconseguir liquidar l'heli, fet que va obrir la possibilitat d'assolir temperatures properes al zero absolut. Va ser aquest mateix científic qui, juntament amb Gilles Holst, **l'any 1911, va descobrir la superconductivitat** en observar que el mercuri no presentava resistència elèctrica per sota de 4,2 graus Kelvin.

#### ***Superconductivitat***

Poc després del seu descobriment, Kamerlingh es va adonar que amb cables superconductors enrotllats en bobines es poden generar camps magnètics que no necessitin cap font d'energia per funcionar deguda l'absència de l'efecte Joule. Per exemple, els escàners d'imatge per ressonància magnètica fan servir aquesta tecnologia per funcionar.

Però no va ser fins a l'any 1933 que Walter Meissner i Robert Ochsenfeld van descobrir que els superconductors expulsaven el camp magnètic.

La superconductivitat, però, es va descobrir en una època en què encara no disposàvem dels coneixements per entendre-la. I va ser determinada per Richard Feynman com el problema teòric més important de l'època. Personatges com Einstein, Bohr, Heisenberg, Feynman, i molts més el van intentar resoldre sense èxit.

L'any 1935 els germans London van descriure les dues propietats bàsiques dels superconductors: resistència zero i expulsió del camp magnètic.

El 1957 John Bardeen, Leon Cooper i Robert Schrieffer desenvolupen la seva teoria BCS (Bardeen Cooper Schrieffer), la qual explica que, en estat superconductor, els electrons s'aparellen formant el que s'anomena parelles de Cooper.

Arran d'aquesta teoria sorgeix el concepte de *gap superconductor*, el qual correspon a l'energia necessària per trencar una parella de Cooper. La teoria BCS també explica que a major *gap*, major temperatura crítica.

Tot i la importància de la teoria BCS, aquesta era essencialment una teoria descriptiva i no podia predir ni la temperatura crítica ni el valor del *gap* ni la diferència entre uns superconductors i altres. Als anys seixanta Yakov Eliashberg a la Unió Soviètica i Mc Millan als EUA van millorar la teoria BCS desenvolupant models que van ser capaços de descriure diferències entre compostos encara que requerien càlculs numèrics elaborats. Seguia sense estar clar, però, on buscar superconductors amb temperatura crítica més alta.

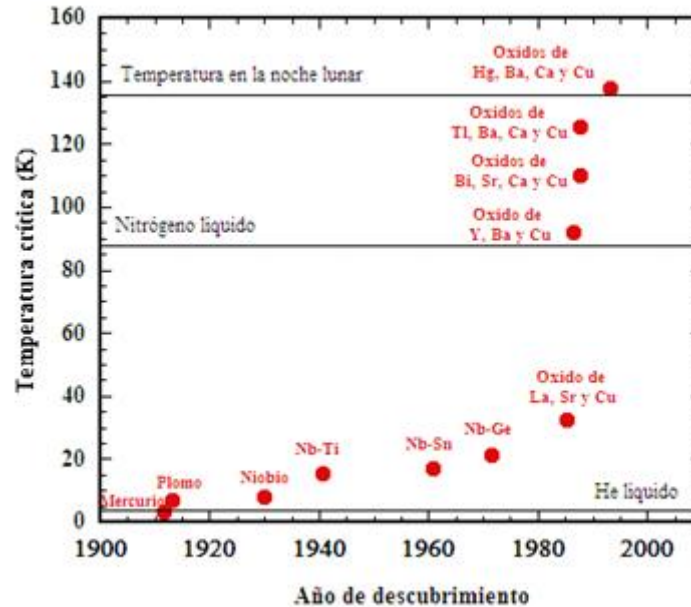
En el mateix any que es va proposar BCS, Alekséyevich Abrikósov va predir la possibilitat que en alguns superconductors existís un estat mixt entre un camp magnètic crític 1 ( $B_{c1}$ ) i un camp magnètic crític 2 ( $B_{c2}$ ) on el material seguís sent superconductor, però es permetessin passar algunes línies de camp magnètic a través dels **vòrtexs**. No obstant això, no va ser fins a l'any 1986 que se'n va demostrar l'existència. Aquests superconductors es van anomenar superconductors de tipus II. El comportament d'aquest nou grup desafia la teoria BCS, ja que no pot ser explicat per aquesta.

Durant els anys 60 i 70 nombrosos químics i físics van unir els seus esforços en la recerca de superconductors amb temperatures crítiques grans (vegeu gràfic 7). Va ser doncs quan Bernd Matthias va descobrir el  $Nb_3Sn$ : un superconductor de tipus II amb una temperatura crítica de 18,5 K (graus Kelvin) i un camp magnètic crític gran.

Més tard, l'any 1986 Johannes Georg Bednorz i Karl Müller van fer un altre pas endavant amb el descobriment del  $LaSrCuO$ , amb una temperatura crítica de 36 K.

L'any següent, Paul Chu va aconseguir pujar la temperatura crítica a 93 K amb el  $YBaCuO$  per sobre del punt d'ebullició del nitrogen, fet que va fer molt més econòmic l'aplicació de la superconductivitat, ja que liquidar aquest gas és 1.000 cops més barat que liquidar heli.

Aquest superconductor (**YBaCuO**) és l'utilitzat tant en l'experimentació realitzada en aquest treball de recerca com en els models actuals de tren de levitació magnètica urbans.



Gràfic 7: relació entre materials superconductors, any de descobriment i temperatura crítica  
<http://www.isqch.unizar-csic.es/ISQCHportal/levitacionConSuperconductores.do>

Posteriorment a aquest fet s'han descobert molts més superconductors d'alta temperatura amb l'òxid de coure com a element comú denominats "cuprats", gràcies als quals s'ha assolit una temperatura crítica rècord de 160 K. Per altra banda, l'any 2019 es va descobrir el LaH<sub>10</sub>: un superhidrur amb una temperatura crítica de només -23 °C (graus Celsius) o 250,15 K.

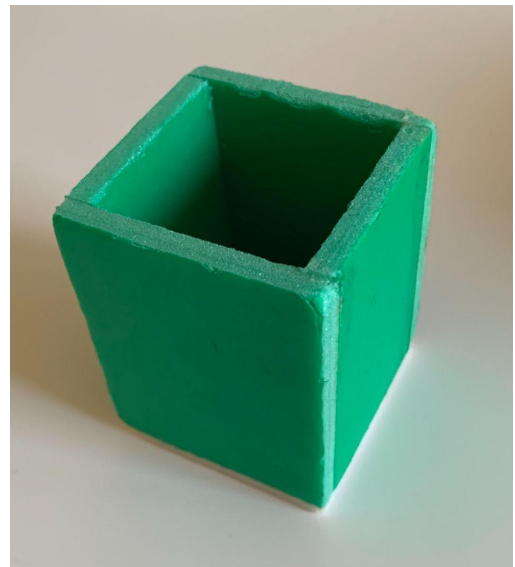
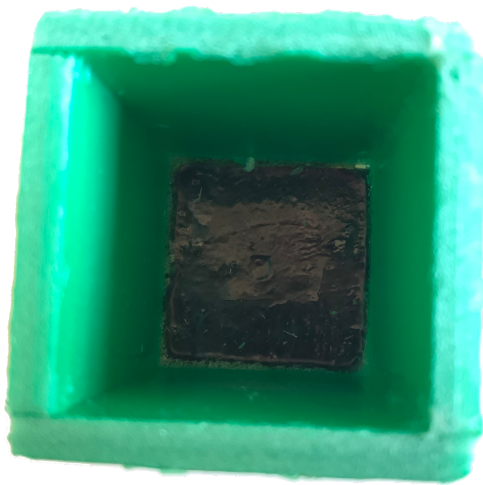
Així i tot, molt recentment, una barreja microscòpica de carboni, hidrogen i sofre sotmesa a una pressió de 267 gigapascals, 2,6 milions de vegades la pressió atmosfèrica al nivell del mar, ha aconseguit desenvolupar la superconductivitat a una temperatura d'aproximadament 15 °C.

Com s'ha pogut apreciar, la recerca de nous materials superconductors és un camp molt actiu i, com que encara no tenim una teoria predictiva, cada any es descobreixen materials interessants. Per tant, per poder desenvolupar tot el potencial dels superconductors, necessitem encara superar certs reptes relacionats amb els paràmetres crítics dels superconductors i amb la mateixa producció dels materials.

## 2. Annex II: Fitxa de materials

### ***Superconductor (Demanat a la URV)***

La pastilla de material superconductor, proporcionada per la URV (Universitat Rovira i Virgili), està formada per una combinació de Y (itri), B (bari), Cu (coure) i O (oxigen) en la següent proporció  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . Perquè aquest material es comporti com un superconductor és necessari refredar-lo a una temperatura inferior a  $-180\text{ }^\circ\text{C}$  (graus Celsius). La pastilla està fixada al fons d'un recipient de porexpan de 50 mm (mil·límetres) x 50 mm de base i 63 mm d'alçada el qual serveix per contenir el nitrogen líquid (vegeu fotografia 14). El superconductor és l'encarregat de contrarestar el camp magnètic dels imants per fer levitar el tren.



Fotografia 14: superconductor utilitzat en els experiments (font pròpia)

## Nitrogen líquid

El nitrogen líquid ( $N_2$ ) es troba contingut, mentre no està en ús, en un recipient aïllant per a conservar la seva temperatura d'aproximadament 77 K (graus Kelvin) o  $-196\text{ }^\circ\text{C}$  (graus Celsius) (vegeu fotografia 15). Aquest gas líquid compleix amb els requisits per baixar la temperatura de la pastilla fins al punt que aquesta és capaç d'assolir la seva temperatura crítica i, per tant, desenvolupar l'estat superconductor.



Fotografia 15: nitrogen líquid cedit per Messer Group (font pròpia)

D'afegit, a causa de la baixa temperatura del nitrogen líquid i les seves propietats, s'han tingut en compte certes mesures de seguretat a l'hora de manipular-lo durant el procés d'experimentació amb la maqueta. Aquestes normes queden recollides en el següent document: <<https://studylib.es/doc/4563585/ficha-t%C3%A9cnica-nitr%C3%B3geno>>.

Com a indicacions de seguretat més rellevants destaquen:



Evitar el contacte directe amb nitrogen líquid, ja que aquest produeix fortes cremades criogèniques i congelació.



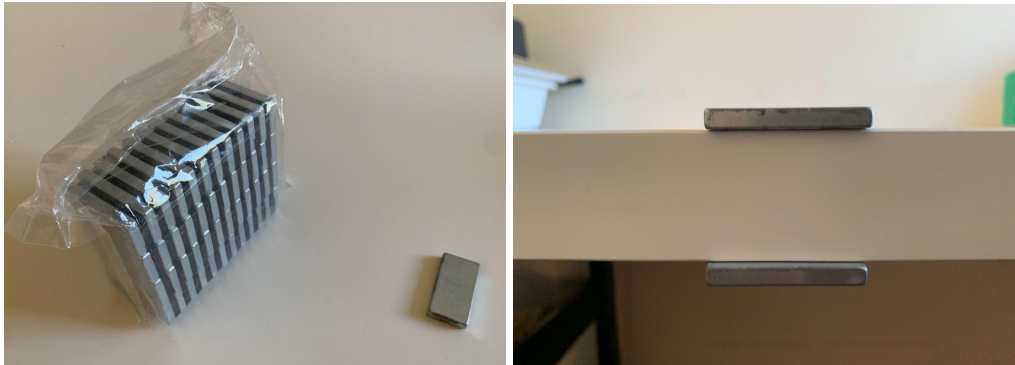
Evitar grans concentracions de nitrogen en ambients tancats, ja que pot desplaçar l'aire dels pulmons i causar sufocació violenta.



Per manipular el nitrogen s'han d'utilitzar l'equip i els accessoris de seguretat personal necessaris, d'acord amb els reglaments internacionals de seguretat.

### **Imants de neodimi - 50 blocs de 40 mm (mil·límetres) x 20 mm x 5 mm**

Els imants de neodimi (Nd-Fe-B) serveixen com a carril pel tren superconductor, ja que creen el camp magnètic que fa que el vehicle pugui levitar. Aquest tipus d'imants ha estat triat pel fet que són els més potents dels imants permanents i proporcionen una inducció magnètica d'1,195 T (tesles) i una força de subjecció de 15 kg (quilos) cadascun. (Vegeu fotografia 16).



Fotografia 16: imants de neodimi (50 blocs de 40 mm x 20 mm x 5 mm) (font pròpia)

Per estudiar la intensitat del camp magnètic dels imants s'ha fet servir el següent document Excel, el qual s'ha extret d'Internet i es pot trobar en el document "Annex IV: Proves":

<<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1kyW4j7xvTtLPNWpQ1skzFbTmkxMYpDqb/edit?usp=sharing&ouid=108390360172108024263&rtpof=true&sd=true>>.

A causa de l'elevada força d'aquests imants i les seves propietats, s'han tingut en compte certes mesures de seguretat a l'hora de manipular-los durant la construcció de la maqueta. Aquestes normes queden recollides en el següent document:

<<https://www.supermagnete.es/safety-neodymium>>.

Com a indicacions de seguretat més rellevants destaquen:



Evitar contusions per la gran força d'atracció dels imants.



Evitar apropar els imants a dispositius electrònics, targetes de crèdit, etc. Ja que el seu potent camp magnètic els pot malbaratar.



Els imants disposen d'un revestiment que els protegeix de la corrosió. S'ha d'evitar que l'imant rebi cops o sigui utilitzat amb continuïtat a espais exteriors per no desgastar aquest revestiment.

Per més informació i especificacions sobre els imants de neodimi consultar el PDF adjuntat: <<https://drive.google.com/file/d/1I-Uc5i3cHcrNYn4Ca-xBfbM7ITUf-Jnl/view?usp=sharing>>.

### ***Poliestirè***

La carcassa de la maqueta de tren de levitació magnètica superconductora ha estat construïda amb poliestirè. Ja que aquest material és fàcil de manipular i molt lleuger. (Vegeu fotografia 17).



Fotografia 17: cilindre de poliestirè 150 mm (mil·límetres) x 150 mm x 7 mm (font pròpia)

### ***Utensilis de tall pel poliestirè***

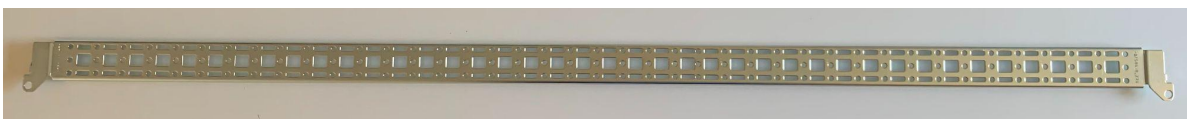
S'han usat per tallar el poliestirè i donar forma a la carcassa. Aquests utensilis escalfen vares o fils metàl·lics a altes temperatures i fan servir la calor per tallar-lo amb precisió i sense trencar-lo. (Vegeu fotografia 18).



Fotografia 18: utensilis de tall pel poliestirè (font pròpia)

### ***Suport metàl·lic***

Aquesta peça de metall de 40 mm (mil·límetres) d'amplada i 1066 mm de llargada és la base sobre la qual s'han col·locat els imants que formen al carril del tren superconductor. (Vegeu fotografia 19).



Fotografia 19: suport metàl·lic 40 mm x 1066 mm (font pròpia)

### **Bàscula**

Aquesta eina s'ha usat en el procés d'experimentació per mesurar les masses / forces requerides. (Vegeu fotografia 20).



Fotografia 20: bàscula (font pròpia)

### **Aïllants**

Les següents peces de metacrilat de 4 mm (mil·límetres) de gruix s'han fet servir en els experiments com a separació entre el tren superconductor i el carril, i entre els imants i la bàscula. (Vegeu fotografia 21).



Fotografia 21: aïllants de 4 mm de gruix (font pròpia)

### ***Càmera tèrmica***

La següent càmera tèrmica s'ha usat per observar el canvi de temperatura en el sistema del tren superconductor un cop s'ha abocat el nitrogen líquid. Per treballar requereix un *smartphone* amb sistema operatiu Android on hi ha instal·lada l'aplicació que la fa funcionar. (Vegeu fotografia 22).



Fotografia 22: càmera tèrmica (font pròpia)

### ***Tren elèctric escala H0***

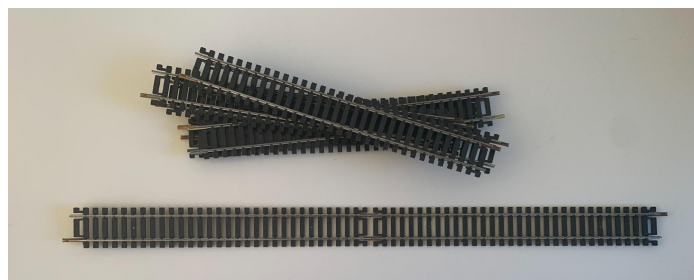
El tren elèctric escala H0 (1:87) s'ha utilitzat com a model de tren elèctric en la maqueta. (Vegeu fotografia 23).



Fotografia 23: tren elèctric escala H0 (1:87) (font pròpia)

### ***Vies de tren elèctric (6 vies de 215 mm x 16,5 mm)***

Mitjançant aquestes vies de 16,5 mm (mil·límetres) d'amplada, el tren elèctric es pot desplaçar. Els mateixos carrils són els que condueixen el corrent a la locomotora. (Vegeu fotografia 24).



Fotografia 24: vies de tren elèctric (6 vies de 215 mm x 16,5 mm) (font pròpia)

## **Multímetre**

Amb l'ajuda d'aquest aparell s'han pogut mesurar la intensitat i el voltatge del circuit del tren elèctric. Per mesurar la intensitat es fa servir el seu amperímetre i s'ha de connectar en sèrie. En canvi, per mesurar el voltatge es fa servir el seu voltímetre i es connecta en paral·lel. (Vegeu fotografia 25).



Fotografia 25: multímetre (font pròpia)

## **Transformador**

El transformador forma part del circuit del tren elèctric i és utilitzat per ajustar els valors de tensió i d'intensitat de corrent subministrat als necessaris per a la maqueta de tren elèctric. El transformador emprat proporciona de 0 V (volts) a 17,70 V de tensió i corrent continu (quan l'agulla del transformador marca el 50 aquest proporciona 5,30 V de tensió, quan marca 100 proporciona 7,70 V, quan marca 150 en proporciona 12,20 i quan marca 200, 17,70). (Vegeu fotografia 26).



Fotografia 26: transformador 0 V - 17,70 V (font pròpia)

## **Tauler de fusta**

Aquest tauler de fusta de 156 mm (mil·límetres) d'amplada i 1384 mm de llargada constitueix la base de la maqueta del tren elèctric. (Vegeu fotografia 27).



Fotografia 27: tauler de fusta de 156 mm x 1384 mm (font pròpia)

### 3. Annex III: Càlculs i expressions

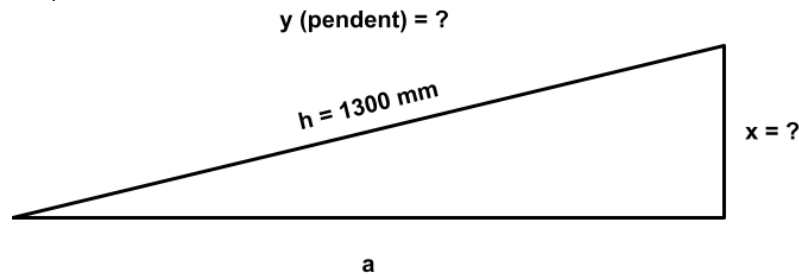
**Desenvolupament de l'expressió per calcular l'alçada a la qual elevar l'extrem final de la via en relació amb el pendent d'aquesta en la prova 1 del tren elèctric. (equació 1)**

Teorema de Pitàgores:  $h^2 = a^2 + x^2$

Fórmula del pendent:  $y = \frac{x \cdot 100}{a}$

$$a = \frac{x \cdot 100}{y}$$

(vegeu imatge 29)



Imatge 29: representació d'un triangle qualsevol per visualitzar les dades utilitzades en l'equació

$$1300^2 = \left(\frac{x \cdot 100}{y}\right)^2 + x^2$$

$$1300^2 = \frac{10000 \cdot x^2}{y^2} + x^2$$

$$1300^2 = \frac{10000 \cdot x^2}{y^2} + \frac{x^2 \cdot y^2}{y^2}$$

$$1300^2 = \frac{(10000 + y^2) \cdot x^2}{y^2}$$

$$\frac{1300^2 \cdot y^2}{10000 + y^2} = x^2$$

$$\sqrt{\frac{1300^2 \cdot y^2}{10000 + y^2}} = x$$

$$x = \sqrt{\frac{1300^2 \cdot y^2}{10000 + y^2}}$$

Equació 1: equació per calcular l'alçada "x" a la qual elevar l'extrem final de la via "1300" en relació amb el pendent d'aquesta "y" (font pròpia)

## Càlcul de la densitat de flux en tesles proporcionada pels imants en relació amb la distància en la prova 1 del tren superconductor

Els càlculs realitzats per obtenir la densitat de flux en la prova 1 han estat elaborats a partir del següent document Excel extret d'Internet el qual també es pot trobar en el document "Annex IV: Proves":

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1kyW4j7xvTtLPNWpQ1skzFbTmkxMYpDqb/edit?usp=sharing&ouid=108390360172108024263&rtpof=true&sd=true>.

A continuació, en les taules 2, 3, 4, 5 i 6, es pot veure en el quadre verd el resultat en tesles (T) per cada distància en mil·límetres (mm):

### Separació de 4 mm

Block/Cube													
L	W	D	L	W	D	Grade	Br	Coating	Distance z	zTot.	Br/Pi	arctan1	arctan2
40	20	5	0,04	0,02	0,005	N35	1,17	0,00065	4	0,00465	0,37242257	1,082651	0,705075
mm	mm	mm	m	m	m			T	mm	m			

Flux density at a distance z to the block/cube	
B(z)	0,141
	Tesla
	1406
	Gauss

$$B = \frac{B_r}{\pi} \cdot \left( \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}}\right) \right)$$

Taula 2: càlcul de la densitat de flux en tesles a 4 mm de separació dels imants de neodimi

### Separació de 8 mm

Block/Cube													
L	W	D	L	W	D	Grade	Br	Coating	Distance z	zTot.	Br/Pi	arctan1	arctan2
40	20	5	0,04	0,02	0,005	N35	1,17	0,00065	8	0,00865	0,37242257	0,767266	0,509944
mm	mm	mm	m	m	m			T	mm	m			

Flux density at a distance z to the block/cube	
B(z)	0,096
	Tesla
	958
	Gauss

$$B = \frac{B_r}{\pi} \cdot \left( \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}}\right) \right)$$

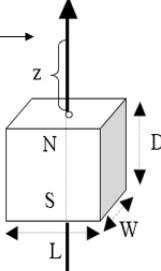
Taula 3: càlcul de la densitat de flux en tesles a 8 mm de separació dels imants de neodimi

### Separació de 12 mm

Block/Cube													
L	W	D	L	W	D	Grade	Br	Coating	Distance z	zTot.	Br/Pi	arctan1	arctan2
40	20	5	0,04	0,02	0,005	N35	1,17	0,00065	12	0,01265	0,37242257	0,551669	0,378585
mm	mm	mm	m	m	m		T	m	mm	m			

Flux density at a distance z to the block/cube		
B(z)		
0,064	645	
Tesla	Gauss	



$$B = \frac{B_r}{\pi} \cdot \left( \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}}\right) \right)$$

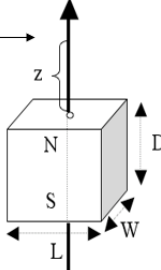
Taula 4: càlcul de la densitat de flux en tesles a 12 mm de separació dels imants de neodimi

### Separació de 16 mm

Block/Cube													
L	W	D	L	W	D	Grade	Br	Coating	Distance z	zTot.	Br/Pi	arctan1	arctan2
40	20	5	0,04	0,02	0,005	N35	1,17	0,00065	16	0,01665	0,37242257	0,406829	0,288524
mm	mm	mm	m	m	m		T	m	mm	m			

Flux density at a distance z to the block/cube		
B(z)		
0,044	441	
Tesla	Gauss	



$$B = \frac{B_r}{\pi} \cdot \left( \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}}\right) \right)$$

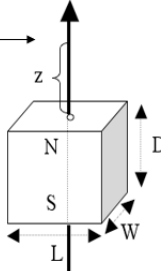
Taula 5: càlcul de la densitat de flux en tesles a 16 mm de separació dels imants de neodimi

### Separació de 20 mm

Block/Cube													
L	W	D	L	W	D	Grade	Br	Coating	Distance z	zTot.	Br/Pi	arctan1	arctan2
40	20	5	0,04	0,02	0,005	N35	1,17	0,00065	20	0,02065	0,37242257	0,308073	0,225252
mm	mm	mm	m	m	m		T	m	mm	m			

Flux density at a distance z to the block/cube		
B(z)		
0,031	308	
Tesla	Gauss	



$$B = \frac{B_r}{\pi} \cdot \left( \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L \cdot W}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}}\right) \right)$$

Taula 6: càlcul de la densitat de flux en tesles a 20 mm de separació dels imants de neodimi

## 4. Annex IV: Proves

Aquest annex conté el recull de les gravacions i els fulls de càlcul resultants dels experiments realitzats amb les maquetes. L'Annex IV es troba contingut en la següent carpeta:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1czJNCLfB3gkXQwSww2B5FvmfXzdPzUED?usp=sharing>>