

ELEVEM LA VELOCITAT

**Estudi sobre el magnetisme i creació d'un
model de tren Maglev**



Treball de Recerca 2022-2023

Bernard Figueras Geiszinger

Tutor: Lluís Alemany

Institut Josep Brugulat

Síntesi. En un món cada vegada més globalitzat i on es busquen constantment nous mètodes de transport més ràpids i eficients, les noves tecnologies són les eines cap al futur. *Elevem la velocitat* tracta sobre el magnetisme i dona un èmfasi cap a l'estructura interna dels imants, responent a la pregunta de com funcionen i les seves diferents qualitats.

El treball també va molt dirigit cap una de les seves aplicacions més característiques, els trens Maglev. On a la part pràctica es realitza el disseny i construcció pas a pas d'un model a escala propi.

Síntesis. En un mundo cada vez más globalizado y en el que se buscan constantemente nuevos métodos de transporte más rápidos y eficientes, las nuevas tecnologías son las herramientas hacia el futuro. *Elevem la velocitat* trata sobre el magnetismo y da un énfasis hacia la estructura interna de los imanes, respondiendo a la pregunta de cómo funcionan y sus diferentes cualidades.

El trabajo también va muy dirigido a una de sus aplicaciones más características, los trenes Maglev. Donde en la parte práctica se realiza el diseño y construcción paso a paso de un modelo a escala propio.

Synthesis. In an increasingly globalized world where faster and more efficient transport methods are constantly being sought, new technologies are the tools for the future. *Elevem la velocitat* talks about magnetism and gives an emphasis towards the internal structure of magnets, answering the question of how they work and their different qualities.

The project is also highly geared towards one of its most characteristic applications, the Maglev trains. Where in the practical part explains step-by-step the design and construction of a scale model.

Índex

1. Introducció	5
1.1. Motivació	5
1.2. Objectius	6
1.3. Metodologia	7
2. Marc Teòric	9
2.1. Principis del magnetisme	9
2.1.1. Imants	9
2.1.2. Camps magnètics	10
2.1.3. Tipus de magnetismes	14
2.1.4. Electroimants	15
2.1.5. Superconductivitat	18
2.2. Tren Maglev	19
2.2.1. Transport actual	19
2.2.2. Trens	20
2.2.3. Tren Maglev	21
2.2.3.1. Història	21
2.2.3.2. Funcionament	22
2.2.3.3. Beneficis i inconvenients	24
2.2.3.4. Exemples arreu del món	25
3. Marc Pràctic	26
3.1. Visió general	27
3.2. Punts a tenir en compte	27
3.3. Disseny 1	28
3.3.1. Imants	28
3.3.2. Levitació	29
3.3.3. Creació d'un electroimant	31

3.3.1. 1r electroimant	31
3.3.3.2. 2n electroimant	33
3.3.4. Propulsió	35
3.3.4.1. Realització	37
3.3.5. Problemes	38
3.3.5.1. Solució 1	38
3.3.5.2. Solució 2	39
3.3.5.3. Solució 3	39
3.4. Disseny 2	40
3.4.1. Levitació	42
3.4.2. Propulsió	43
3.4.3. Circuit	43
3.4.3.1. Composició	44
3.4.3.2. Funcionament	45
3.4.3.3. Programació	46
3.4.3.4. Realització	47
3.4.4. Problemes	47
3.4.4.1. Solució 1: circuit	48
3.4.4.2. Solució 2: reducció de la resistència	50
3.4.4.3. Solució 3: canvi de sensor	52
3.4.5. Últimes observacions i modificacions	54
3.5. Resultat final	55
3.6. Pressupost	56
4. Conclusions	57
5. Bibliografia i Webgrafia	60

1. Introducció

1.1. Motivació

La meva afició per la tecnologia em ve des de ben petit. Sempre m'ha agradat construir i crear tota mena de coses. És per això que des del principi tenia clar que volia centrar el projecte cap al muntatge i creació d'un objecte. El qual pugui tenir la característica de tenir una propietat útil en la societat actual.

Tot i això, també tenia ganes de posar pel mig un tema teòric que sempre m'ha fascinat i intrigat, que és el magnetisme.

Els imants són uns elements que sempre m'han intrigat. De petit els considerava màgia i encara ara em meravellen. Per aquest motiu he escollit aquest tema, per així entrar més en aquest món i poder entendre més profundament el seu funcionament i tots els beneficis que ens poden aportar. Ja que trobo que els imants són unes eines molt útils per fabricar tota classe d'invents. Crec que cada vegada agafaran més importància en el nostre dia a dia.

Un dels problemes que vaig tenir a l'hora de triar el tema del treball va ser la separació entre física i tecnologia. Tot i que m'agrada una mica més la tecnologia, la física també és un món que em fascina. Per això vaig decidir fer un tema on pogués barrejar les dues matèries. On la part teòrica estaria més basada cap als temes de la física i la part pràctica seria purament tecnològica

Tenint clar les idees principals: construcció, invent pràctic, magnetisme i a més tenir present una idea realista i possible. Vaig acabar decantant-me per fer un projecte encaminat a la investigació i creació d'un tren Maglev, el qual utilitza les propietats de la levitació electromagnètica per funcionar.

Tot sigui dit que al principi no em convenia del tot la idea, ja que no és una idea original (els trens Maglev porten en funcionament des de fa molts anys). I jo tinc la preferència de fer projectes més ambientats a idees meves, les quals no existeixen o almenys no en conec la seva presència. Per així assegurar de fer un treball més original. Però després d'investigar una mica, vaig veure el potencial de la idea i tot el que es podia aprendre sobre ell. Vaig veure que era una idea prou complexa i on hi

havien moltíssimes possibilitats a l'hora de realitzar-la. Fent que així hi pugui aportar el meu propi estil.

1.2. Objectius

La idea d'aquest treball és aprofundir més sobre les bases del magnetisme. M'agradaria entendre de forma més específica quina és la base dels imants i com tot això s'uneix amb l'electricitat i els electroimants.

Per altra banda, la finalitat pràctica i principal d'aquest projecte és crear un model de tren Maglev. Però també he afegit uns propòsits secundaris els quals s'aniran complint gradualment a mesura que es vagi avançant el treball. A més, la idea no és només crear un model de tren, sinó també provar diferents prototips i idees i veure quina és més funcional i pràctica.

Tot comença amb la creació d'un electroimant, i continua amb l'evolució constant del projecte. Tot i tenir una finalitat final, aquest treball no té destí fix. La intenció és desenvolupar-lo tant com el temps d'entrega permeti. Sempre es pot millorar i sempre es pot afegir noves característiques.

Els objectius teòrics són:

- Entendre com funcionen els imants
- Relacionar el moviment de corrent amb un electroimant
- Trobar diferents funcions del magnetisme
- Entendre les fórmules i aplicar-les de forma pràctica
- Explicar l'enginyeria dintre els trens Maglev
- Trobar la seva funcionalitat comparada amb els mitjans de transport convencionals

Els objectius pràctics són:

- Crear un electroimant
- Produir levitació
- Construir un prototip de tren Maglev

- Crear un circuit de vies magnètiques
- Fer que el prototip circuli per les vies
- Controlar la velocitat del tren
- Crear una sala de control d'on es pugui controlar tots els paràmetres del tren (velocitat, stops, direcció...)
- Controlar el paràmetres del tren amb una aplicació del mòbil via bluetooth

1.3. Metodologia

Per la realització de la primera part d'aquest treball, m'he basat majoritàriament en la recerca d'informació en línia. Els primers dies, vaig llegir molts articles i tota mena de notícies. També, hi ha vídeos de "YouTube" que m'han agradat molt i m'han ajudat a entendre millor diferents conceptes complicats sobre el magnetisme. I, tot i que es diu que s'ha de vigilar molt amb la informació d'aquesta aplicació, hi ha canals científics com Veritasium, QuantumFracture i Date un Vlog que m'han donat dades molt interessants i sempre de forma més entretinguda.

A més, apareixen conceptes que es van actualitzant constantment. Per exemple, cada vegada apareixen nous models de tren Maglev i es creen nous rècords de velocitats contínuament. També, encara ara hi ha moltes preguntes sobre el funcionament dels imants i a poc a poc es van fent nous descobriments Això ha fet que hagi hagut de consolidar les dades obtingudes amb moltes fonts d'informació diferents, per assegurar que tot estigui actualitzat.

Com ja he explicat abans, tinc una forma de treballar molt personal. M'agrada fer les coses al meu estil, sempre intentant trobar un mètode propi. Per això, tot i que vaig buscar molta informació teòrica de com funcionen els Maglev, en el moment d'adaptar el sistema de funcionament del tren a la meva maqueta em vaig negar a mirar cap exemple d'altres persones. Prefereixo buscar l'originalitat i veure què soc capaç de fer.

Això també s'aplica a l'hora de comprar certs materials. Per exemple, tenia la possibilitat de comprar electroimants directament. La qual cosa m'hagués permès tenir molta més força i precisió envers el moviment del tren. Però vaig preferir construir el meu propi. Intentant dependre el mínim possible de les coses ja fetes.

A més, m'agrada experimentar amb els materials. Necessito fer proves amb les diferents opcions de construcció que tinc a l'abast i buscar combinacions. Tot i tenir un pauta clara del treball, hi ha moments on m'estimo més improvisar i fer proves que no tenia previstes. També prefereixo avançar entre proves i errors, trobo que com més problemes tens el principi, més fàcil és superar la recta final.

Durant aquest treball, he utilitzat moltes eines i programes diferents. Abans de construir res, primer dissenyava la peça que volia amb Sketchup, un programa de disseny 2D i 3D. Allà, jo mateix creava de forma digital els diferents prototips. Abans Primerament, feia un dibuix 3D del prototip que volia. Això em permetia visualitzar com seria el resultat abans de construir res. Quan quedava satisfet amb les proporcions, dividia el model en peces 2D.

En tenir el disseny en un format planer, això el que em permetia era passar el fitxer del modelatge a un làser de fusta. Aquesta màquina era capaç de tallar amb una gran precisió les peces dissenyades anteriorment. Gràcies a això, el muntatge es va facilitar moltíssim.

També he fet servir altres aplicacions com Arduino i Crocodile Technology.

Totes aquestes eines les he utilitzat jo mateix. La majoria les he après amb tutorials de YouTube i altres com l'Sketchup, de forma autodidàctica.

2. Marc Teòric

2.1. Principis del magnetisme

2.1.1. Imants

Un imant és un objecte amb certes propietats físiques que li permeten produir camps magnètics. Aquests camps magnètics són el resultat de les forces “invisibles” que repelen o atrauen altres objectes amb les mateixes propietats o similars.

Els imants els podem separar en dues classificacions: permanents o temporals. Aquesta classificació dependrà de si l'objecte té la propietat magnètica de forma persistent o si tan sols la té quan entra en contacte amb un força magnètica externa.

Tots els imants es caracteritzen pel fet de tenir dos pols, un pol nord i un pol sud. Aquests indiquen la direcció del camp magnètic (de nord a sud).

Aquí és on entra una de les propietats més famoses dels imants, l'efecte d'atracció-repulsió. Aquest atribut explica els pols oposats s'atrauen, mentre que dos pols amb el mateix signe es repelen.

Una altra propietat interessant que tenen tots els imants, és que si en partim un per la meitat, sense importar la mida, cada peça resultant formarà els seus propis pols.

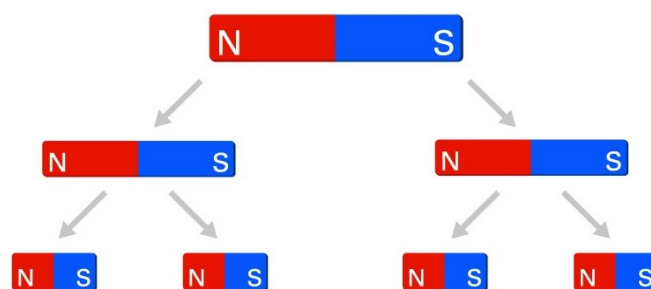


Figura 1. Representació del resultat al trencar un imant per la meitat.

Font: fundacioendesa.org

2.1.2. Camps magnètics

Els camps magnètics són l'espai on es manifesten les forces magnètiques, les famoses forces invisibles que donen les propietats d'atracció-repulsió als imants. En altres paraules, aquests camps mostren el fenomen físic on els electrons atrauen altres electrons amb "spin" oposat. Però d'aquest concepte ja en parlarem de forma més consistent més endavant.

També se'ls pot descriure com una magnitud vectorial i és representat amb la lletra B. La seva unitat en el Sistema Internacional és el Tesla, el qual es defineix com el camp magnètic que fa una força d'1 Newton sobre una càrrega d'1 coulomb¹ i es mou a 1 m/s perpendicularment a les línies del camp.

Tal com es mostra a la imatge, els camps són representats amb línies, les quals ens ajuden a entendre el seu recorregut. Aquestes línies són vectors i ens permeten veure i entendre la seva direcció, d'aquesta forma es poden observar que els camps van del pol Nord al Sud.

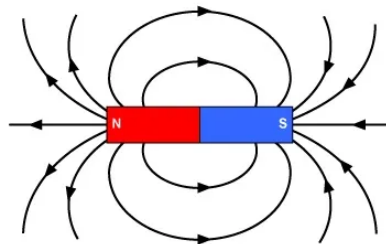


Figura 2. Esquema dels camps magnètics. Font: i2.wp.com

La densitat d'aquests vectors representa l'increment de la intensitat del camp magnètic. Com més juntes estiguin les línies, més energia vindrà de l'imant. Aquest valor també se'l coneix com la força de Lorentz, la qual descriu la força que rep una partícula carregada en moviment per part dels camps de l'imant.

Això es pot calcular gràcies a la fórmula:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

¹ 1 coulomb equival a 1 ampere per segon (1c = 1A * 1s)

La força dependrà de la càrrega (q), la velocitat que aquesta càrrega tingui (v), i el camp magnètic (B). Tots aquests valors són necessaris, ja que si algun d'aquest fos inexistent, la força passaria a ser nul·la.

A més, els valors de força, velocitat i intensitat dels camps són vectorials. Per saber la seva direcció de forma fàcil i visual s'utilitza la regla de la mà dreta.

Per fer això, es posa la mà de manera que el dit índex coincideixi amb el vector de velocitat i el dit del mig que s'acordi amb el del camp magnètic. El resultat obtingut serà la direcció del polze, el qual coincidirà amb el de la força.

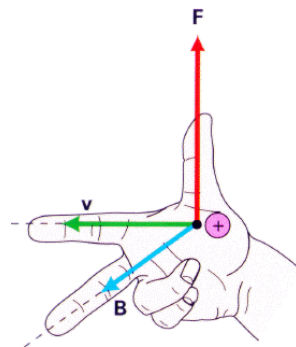


Figura 3. Representació de la regla de la mà dreta. Font: tumblr.com

Aquests camps magnètics provenen d'un nucli magnètic, d'un imant. I la pregunta ara és d'on surt aquesta propietat. D'on apareixen aquestes forces "invisibles"?

Per entendre això primer hem de tenir clar que el magnetisme i l'electricitat són dos conceptes que van agafats de la mà, els dos són el mateix concepte. Com bé va descobrir Faraday, un camp magnètic no és més que la transformació d'un camp elèctric quan un objecte elèctricament carregat es comença a moure.

Aquest concepte obre les portes a l'electromagnetisme, però ja en parlarem més endavant d'aquest tema. Ara tornem a la pregunta de com funcionen els camps magnètics.

Per entendre el funcionament, hem d'entrar en un món molt més petit, el món subatòmic. Allí trobem els electrons, unes partícules molt petites de càrrega negativa que formen part de l'àtom. Aquests, tenen una propietat anomenada moment intrínsec magnètic, que bàsicament significa que un electró produeix petits camps magnètics. Sabem que això és degut a una propietat quàntica anomenada "spin", però actualment poc se'n sap sobre aquest tema.

El valor magnètic que té cada electró és molt baix, tanmateix, com que cada objecte té milions d'electrons, la força augmenta.

Ara ens podria venir la pregunta de, si els camps magnètics provenen dels electrons, i tots els elements tenen electrons, com és que no tots els objectes són magnètics?

La qüestió aquí està a pensar en un electró com un petit imant. Ens hem d'imaginar cada objecte com el conjunt de milions d'electrons, milions de petits imants. El problema de la majoria d'elements, és que els electrons estan desordenats, cada un apunta en direccions diferents, i, mitjançant la llei d'atracció-repulsió, es cancel·len mútuament.

Per aconseguir un element magnètic, hem de tenir en compte la seva composició electrònica, com estan ubicats els seus electrons. Com hem dit abans, la qüestió de la majoria d'elements és que els electrons es contraresten mútuament, tenen tendència a fer parelles, així que hem de trobar una combinació on no es pugui produir aquesta cancel·lació. El secret està a obtenir orbitals que estan mig plens, on els electrons estiguin desparellant i així no es puguin anul·lar. És per això que hem de deixar de banda els extrems dels blocs principals de la taula periòdica i centrar-nos en les parts entremig, tal com es mostra en la imatge.

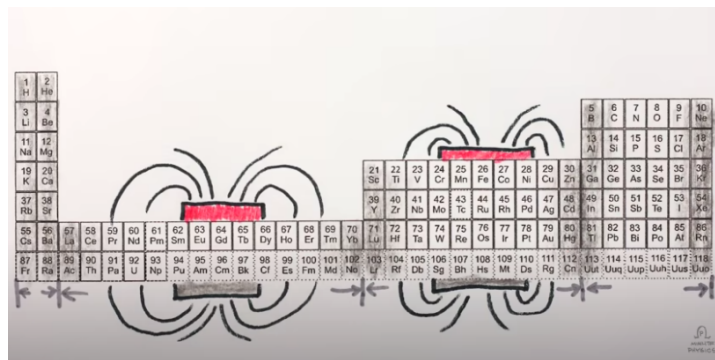


Figura 4. Dibuix d'una taula periòdica amb els elements magnètics marcats.

Font: youtube

Aquí podem trobar exemples com el Níquel, Cobalt, Ferro, Magnesi i Crom. Això vol dir que tots aquests elements són magnètics? No, per exemple el Crom no ho és. Aquí està el punt, perquè un àtom sigui magnètic, no significa que l'element ho sigui.

Encara falta ordenar una cosa més, i són els mateixos àtoms. Quan un conjunt d'àtoms magnèticament carregats s'uneixen per crear un element, normalment tenen dues opcions. Per una banda, es poden alinear tots en la mateixa direcció, i d'aquesta forma es convertiria en un material ferromagnètic. O, d'altra manera, es posicionen en direccions oposades, un element antiferromagnètic. Un element es convertirà en un o altre depenent de què li costi menys energia.

Una última objecció que hem de tenir en compte, és que tot i que un element sigui ferromagnètic, no significa que produeix un camp magnètic. Encara ens falta fer una última ordenació. Un objecte ferromagnètic es divideix en parts, anomenats dominis de Weiss. Aquests dominis són zones cristal·lines que van d'uns 0,001 a 0,00001 mm. Cada domini té la propietat que tots els àtoms apunten en la mateixa direcció, però cada domini va en una direcció diferent. Fent que, com passava amb els electrons, s'anul·lin els uns als altres.

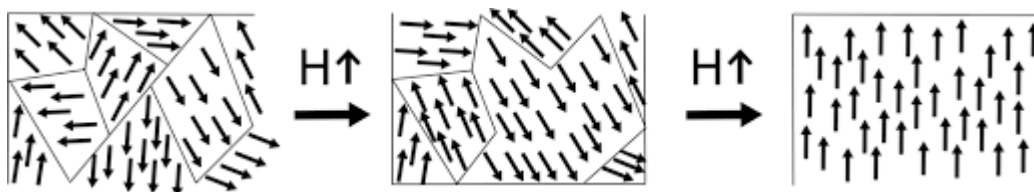


Figura 5. Dominis de Weiss. Font: Kripkit.com

Perquè totes les zones es posin d'acord, necessitem aplicar un camp magnètic sobre l'objecte. D'aquesta forma, tots els territoris es dirigiran conjuntament en direcció al camp magnètic extern. Si aquest camp és prou fort, l'objecte ferromagnètic es podria convertir en un imant permanent, fent que ja no tingui la necessitat d'estar en contacte amb un camp magnètic extern perquè els territoris acordin.

En resum, hem vist que obtenir un objecte magnètic no és fàcil. Dels 118 elements que hi ha en la taula periòdica, només n'hi ha tres que, a temperatura ambient, puguin tenir la propietat de convertir-se en imants permanents. Aquest són el ferro, el cobalt i el níquel.

2.1.3. Tipus de magnetismes

Una confusió molt comuna està en la definició de material magnètic. Un objecte magnètic és el que reacciona amb una força magnètica externa. No tots els objectes tenen la mateixa resposta en entrar en contacte amb un camp magnètic. Depenent de la seva configuració electrònica, un element respondrà d'una forma o altra a la força magnètica. Anteriorment, ja n'han aparegut alguns, però anem a fer una vista més detallada dels principals fenòmens provocats pel magnetisme.

- **Ferromagnetisme:** els elements amb aquesta propietat són els únics capaços de convertir-se en imants. Això és degut a, com hem explicat abans, al fet que tenen àtoms magnètics però dominis desordenats. Aquests, són estirats per la força magnètica i a la vegada, són magnetitzats. I si aquesta força magnètica és prou forta, la magnetització es pot mantenir sense ajuda externa. Exemples d'aquest són el ferro, el níquel i el cobalt.
- **Paramagnetisme:** És bastant semblant al ferromagnetisme tret que té un valor més baix. Aquests elements són estirats dèbilment per un imant, però en cap moment es poden convertir en tal. La gran majoria d'elements són paramagnètics. Per saber si un element ho és, hem de comprovar els seus electrons de valència. Si té almenys un electró desaparellat, aquest reaccionarà amb el camp magnètic de forma positiva. Exemples d'aquest són l'alumini, el calci i el potassi.
- **Diamagnetisme:** al contrari que els dos exemples anteriors, el diamagnetisme té la propietat de repel·lir les forces magnètiques. No importa si el pol de l'imant és nord o sud, sempre serà repel·lit. Per saber si un material és diamagnètic, també hem de mirar la seva configuració electrònica. Oposadament, al cas anterior, hem de buscar que tots els electrons estiguin emparellats. Exemples d'aquest són l'aigua, el coure i l'or.
Aquesta força acostuma a ser molt dèbil i poc visible. Però hi ha un mètode que permet augmentar-la considerablement. El secret està en fer ús de la superconductivitat i les seves propietats. No obstant d'això en parlarem més endavant.

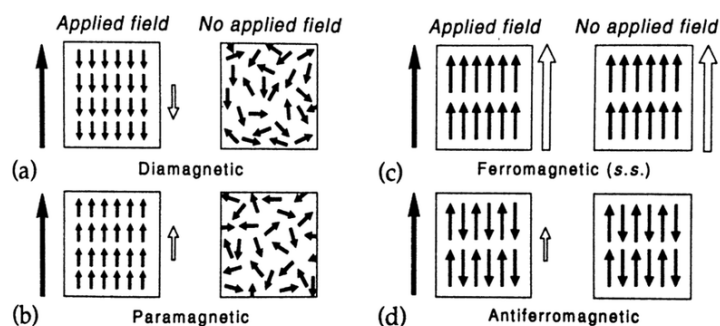


Figura 6. Representació del tipus de magnetismes. Font researchgate.net

2.1.4. Electroimants

Un electroimant, tal com indica el nom, és un imant que es crea a partir de corrents elèctrics. Això significa que només mantindrà les propietats magnètiques mentre el corrent sigui actiu. I aquest és un dels grans avantatges dels electroimants, que es poden activar i desactivar a voluntat.

El primer electroimant va ser creat per William Sturgeon² l'any 1824. El qual va enrotllar fil de coure en una ferradura de cavall. Aquest primer imant no era gaire potent i no va ser fins al 1930 que el disseny es va anar millorant fins al punt que es van fer més populars i utilitzats, sobretot a la indústria del telègraf.

Com es pot crear un electroimant? Tal com hem explicat anteriorment, un camp magnètic prové del moviment elèctric. Un corrent elèctric provoca un petit camp magnètic, tot i que en un nivell molt baix i quasi imperceptible. Aquest es pot representar amb la fórmula:

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

La (B) representa la intensitat del camp magnètic, cosa que es mesura en Tesles (T). Aquest valor està influenciat per dos variables, les quals són la intensitat del corrent (I) i la distància entre el corrent i l'objecte que interactua.

² William Sturgeon va ser un científic britànic que va néixer al 1783. A part de l'electroimant, també fou el primer en idear un motor elèctric pràctic.

Com més elevat sigui el corrent, més electrons circularan i més augmentarà la intensitat del camp magnètic.

La distància entre el pas de corrent i la partícula alterada pels camps d'aquesta es defineix com a $(2\pi R)$ i, a diferència de la intensitat, aquest influeix de forma inversament proporcional a la fórmula. Ja que com més distància hi hagi entre ells, menor serà la densitat entre els camps.

El signe (μ_0) representa la permeabilitat magnètica al buit, la qual és una constant serveix com a factor de conversió. Cosa que permet que les diferents unitats de la fórmula siguin compatibles. Aquesta constant té el valor de $4\pi * 10^{-7} \frac{T*m}{A}$.

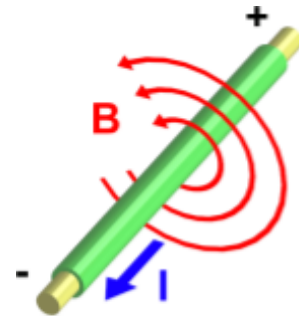


Figura 7. Representació del camp magnètic produït per una corrent. Font: wikipedia

La qüestió aquí és com es pot amplificar aquest camp.

La forma més senzilla és enrotllar el cable que condueix el corrent elèctric. D'aquesta forma, la força del camp augmenta de manera proporcional al nombre de voltes. D'aquest tipus d'electroïmant se l'anomena solenoide.

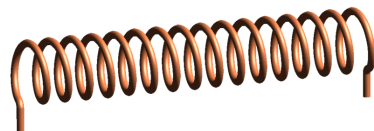


Figura 8. Solenoide Font: Wikipedia

Per augmentar encara més la intensitat magnètica d'un solenoide. S'enrotlla el fil conductor en un nucli d'un material ferromagnètic, el més comú és ferro dolç. D'aquesta forma, els camps magnètics produïts per l'espiral del corrent són capaços d'activar les propietats ferromagnètiques del ferro i crear un imant fins a 10 vegades més potent.

Tots aquests factors per incrementar la intensitat del camp es veuen reflectits en la fórmula següent:

$$B = N \frac{\mu I}{l}$$

Igual que en la fórmula anterior. La intensitat del camp magnètic (B) es relaciona de forma directament proporcional a la intensitat del corrent (I) i la permeabilitat magnètica (μ). En aquest cas, però, el valor de la permeabilitat depèn del nucli que se li afegeix al solenoide. Per saber el seu valor, s'ha d'utilitzar la fórmula següent: ($\mu = \mu_0 * \mu_r$) on μ_0 és la constant que hem vist a l'anterior equació i μ_r és un valor específic de cada element. Per exemple, el ferro dolç té un valor de 1500.

La (N) representa el nombre de voltes que fa el fil conductor.

En aquest cas, el diàmetre no redueix la intensitat magnètica, sinó la llargada del mateix solenoide. Com més llarg sigui, major seran les pèrdues d'energia provinents dels camps magnètics. Això es pot veure escrit a la funció com a (l).

El principal benefici de l'electroimant, a part de la capacitat d'activar-se i desactivar-se a plaer, és poder canviar la seva potència. Per fer això, tan sols fa falta modificar la intensitat del corrent. A més, es poden crear electroimants molt més intensos del que es podria fer amb un imant permanent. És per aquest motiu que són tan utilitzats en moltes d'indústries.

2.1.5. Superconductivitat

Un dels problemes que es troba amb els electroimants, és la resistència que ofereixen al pas el corrent. El cable de coure, tot i ser molt bon conductor, encara té un mínim de resistència que fa que l'energia s'escapi en forma de calor, a causa de l'efecte Joule. Tenint en compte que per crear un electroimant s'utilitza molts metres de coure, aquesta resistència augmenta. Això és perjudicial, ja que no et permet fer servir tot el potencial i força magnètica que es podria.

La solució aquí és fer ús de materials superconductors. Tal com indica el seu nom, aquests materials són capaços de cedir el pas dels electrons amb una resistència nul·la. Això permet un màxim aprofitament de l'energia i un augment considerable en la força dels camps magnètics.

Aquesta propietat tan pràctica que tenen certs elements en certes condicions, va ser descoberta per Heike Kamerlingh Onnes l'any 1911. El secret d'aquesta

característica està en la temperatura del material. Qualsevol element conductor, quan se li baixa la temperatura, s'aconsegueix reduir la seva resistència. El problema és que a causa d'impureses i altres problemes del cable, sempre hi ha una mínima resistència que no es pot superar. L'avantatge dels superconductors, és que no tenen aquest límit i poden arribar a absència de resistència. La temperatura que es necessita per arribar a aquest punt dependrà de cada material, però la majoria acostumen a estar uns pocs graus per sobre el 0 absolut, $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hi ha bastants exemples de materials superconductors. Cada un obté les seves propietats superconductores en diferents medis, depenent d'això s'utilitza un material o altre. Un exemple pot ser el liti, que el seu punt crític és a partir de 17° Kelvin o -256° Celsius. Però també hi ha el germani, titani, mercuri...

També existeixen aliatges superconductors, creades per aconseguir punts crítics més elevats. Un exemple és el cuprato que assoleix les seves propietats a -180°C .

Una de les aplicacions més conegudes que tenen els superconductors la de produir levitació. Això es deu a l'efecte Meissner, el qual permet crear materials altament diamagnètics gràcies a les propietats de la superconductivitat.

Quan un material amb aquesta propietat és refredat a la temperatura necessària, la resistència dels electrons desapareix. Això permet crear camps elèctrics a la superfície de l'objecte. Aquests, repel·leixen els camps magnètics provinents de l'exterior i així flotar el material.

El més interessant d'aquest efecte, a part del gran pes que és capaç d'aguantar, és la gran estabilitat que dona. Els camps magnètics que són repel·lits pel superconductor envolten el material i "l'atrapen" fent que la distància entre imant i l'objecte diamagnètic no canviï mai, com una mena de presó. Això resulta en objectes flotant per les parets i sostres.

Aquesta mateixa propietat és molt utilitzada en trens Maglev. Ja que necessiten molta força magnètica i una gran estabilitat.

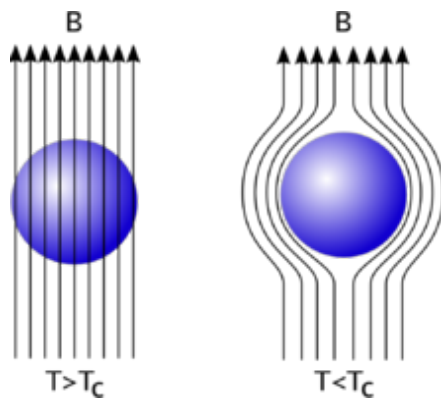
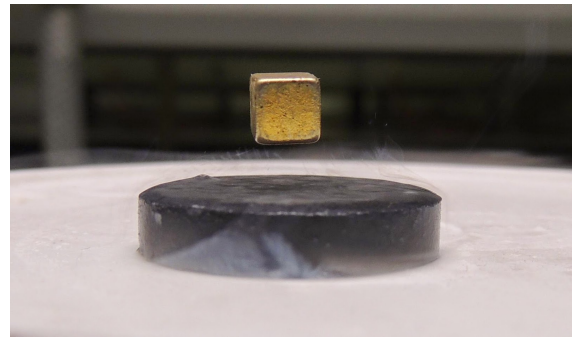


Figura 9. Reacció als camps magnètics d'un element superconductor i un altre que no. Font: aprendeciaytecnologia.com



Font 10. Objecte superconductor levitant. Font: ubuscenita.com

2.2. Tren Maglev

2.2.1. Transport actual

El transport és una de les activitats més comunes i importants dintre la nostra societat. I no només en l'actual, l'evolució del transport ha anat agafada de la mà amb l'evolució de la nostra espècie. Optimitzar els mètodes per viatjar ens ha permès obrir les portes al comerç en llocs on abans no es podia. Ens ha ajudat a anar d'un cantó a l'altre del món de forma més eficient. On abans es tardava setmanes a arribar en cavall, ara són tan sols unes hores gràcies al cotxe. La constant millora del transport ens ha ajudat a globalitzar més el món, fent així possible la disponibilitat global de tota mena de productes, serveis i coneixements.

2.2.2. Trens

Els primers trens van ser creats fa dos-cents anys i consistien en una vagoneta estirada per cavalls o mules que viatjava per raïls i eren utilitzats principalment en la mineria. Tot i que també s'han trobat evidències de raïls construïts durant l'Imperi Romà. On usaven fustes per evitar que els carros acabessin atrapats en el fang. La primera locomotora de la història va ser construïda per Richard Trevithich en el 1804. Funcionava amb la força del vapor i es va fer servir exclusivament en zones

mineres de Gal·les. Però no va agafar gaire popularitat a causa del seu gran pes i el cost de producció i manteniment. No va ser fins al 1814 quan les locomotores van començar a fer-se populars en la societat. Tot a causa de l'enginyer anglès George Stephenson, que va optimitzar el disseny. Amb aquest nou model es va inaugurar la primera ruta pública de la història, que anava entre les dues ciutats angleses Stockton i Darlington. En el viatge hi van assistir 400 passatgers i el tren anava a una velocitat de 13 quilòmetres per hora, una rapidesa mai vista anteriorment. Gràcies a aquesta demostració, la popularitat d'aquest nou vehicle es va estendre ràpidament per Gran Bretanya. I més tard a tot el món. La primera línia ferroviària oficial va ser creada l'any 1826 i unia Liverpool amb Manchester. A la península espanyola, el primer ferrocarril es va posar en marxa en el 1848 entre les ciutats Barcelona i Mataró. En l'actualitat, el tren és un dels mètodes de transport més utilitzats. Gràcies a l'enorme extensió que alguns trens poden arribar a tenir, aquest vehicle és perfecte pel desplaçament de mercaderies. A més, és considerat un dels vehicles més segurs i que menys contaminen dins el món del transport.

2.2.3. Tren Maglev

El tren Maglev (sigles en anglès Magnetic Levitation), és un sistema de transport que fa ús de la força magnètica com a mètode de suspensió, guia i propulsió. Gràcies al funcionament basat en el magnetisme, aquest model redueix la fricció produïda per les rodes i d'aquesta forma augmenta considerablement la velocitat respecte als trens convencionals. Els més ràpids superen la velocitat de 500 Km/h.



Figura 11. Transrapid 05. Font: Wikipedia

2.2.3.1. Història

La idea d'un tren que funciona mitjançant l'ús d'imants ja rondava pel cap de diversos científics des de fa temps. Però la primera patent no va arribar fins al 1967 i va ser atorgada als científics nord-americans Gordon Danby i James Powell. Els

quals ja tenien experiència amb els imants, ja que els havien utilitzat per a la construcció de l'accelerador de partícules més potent del món en aquell temps.

Aquest primer disseny tenia pensat emprar electroimants superconductors com a mètode de suspensió pel tren. Com a forma de propulsió, en canvi, es volia fer ús d'una hèlice o un coet.

Gràcies a aquest treball, els dos físics van ser guardonats amb la Medalla Benjamin Franklin en enginyeria l'any 2000.

El primer tren Maglev que es va posar en funcionament va ser el Transrapid 05. Aquest va ser instal·lat a Hamburg el 1979 per l'Exposició de Transport Internacional. Va tenir tant d'èxit que van desmuntar-lo tres mesos més tard de quan l'exposició va acabar. En total, va transportar més de 50.000 passatgers

Actualment, només podem trobar trens Maglev en funcionament en països asiàtics com el Japó, Xina i Corea del Sud. Això és degut al gran cost de producció que té fer les rutes per aquests vehicles. Així i tot, en aquest continent, aquest mitjà de transport s'està fent molt popular i amb la constant millora de la tecnologia, és molt possible que d'aquí ben poc es puguin veure aquests trens circular a tot el món.

2.2.3.2. Funcionament

Hi ha molts tipus de dissenys diferents per un tren Maglev. Però tots es basen en el mateix concepte. La idea principal d'un Maglev és la levitació del vehicle utilitzant la força magnètica.

A partir d'aquí, s'usen electroimants per propulsar el tren. Cada cantó del tren està format per una fila d'imants intercalats entre positiu i negatiu. Paral·lelament a ells, a les vies, hi ha una altra fila d'electroimants, que també estan amb polaritats

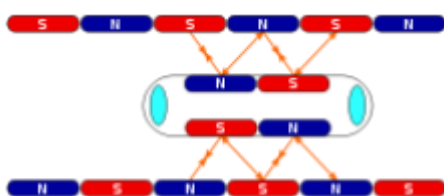


Figura 12. Representació del sistema de propulsió d'un Maglev. Font: Wikipedia

intercalades. Els imants del tren seran atrets pels de les vies. El truc aquí està a canviar la polaritat dels electroimants. Al fer això, les vies i el tren ja no s'atrauran, sinó que faran una acció de repulsió. Fent que el tren avanci fins al següent imant. Si aquesta acció es fa

contínuament, el tren també es mourà de forma contínua. Semblant al funcionament d'un motor elèctric.

Hi ha tres dissenys que són els més utilitzats en la indústria actual de Maglev, que bàsicament es diferencien per la forma que tenen per fer flotar.

Per una banda, tenim l'EMS (suspensió electromagnètica). Aquesta tecnologia utilitza un disseny en forma de "C" per col·locar electroimants sota les vies. Aquestes són fetes de ferro, fent que els electroimants generin una força d'atracció cap a elles, provocant així la levitació. A part d'aquests imants, també hi ha un grup, col·locat en els laterals, encarregat de donar estabilitat al vehicle

El principal desavantatge d'aquest mètode és l'alta precisió que requereix en la construcció de les vies. El tren circula a 15 mm d'elles i qualsevol imperfecció podria acabar en un desastre.

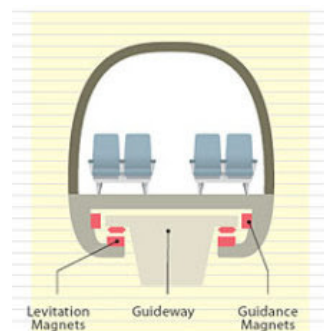


Figura 13. Representació del sistema EMS. Font: emt.18.blogspot.com

L'altre sistema és l'EDS (suspensió electrodinàmica). La principal característica d'aquest mètode és l'ús d'imants superconductors. La superconductivitat és una característica d'alguns elements que, si arriben a temperatures semblants al zero absolut (-273°C), obtenen la propietat de rebutjar, de forma completament simètrica, els camps magnètics rebuts. Això significa que no hi ha gens de fricció i l'estabilitat és molt alta³.

Aquest material superconductor és col·locat sota el tren i, a diferència del model EMS, les vies estan fetes amb electroimants. D'aquesta forma, els superconductors

³ D'aquest tema se'n parla més profundament en el capítol 2.1.5 *Superconductors*.

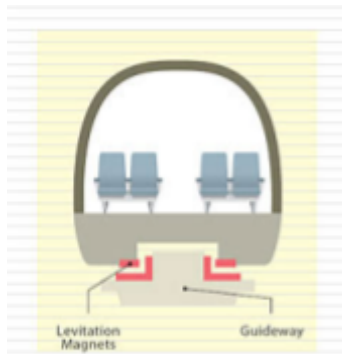


Figura 14. Representació del sistema EDS. Font: emt.18.blogspot.com

repelen els camps magnètics de les vies i a partir d'aquesta acció es produeix la levitació.

Aquesta levitació només és possible quan el tren viatja a certa velocitat. És per això, que el vehicle també compte amb l'ajuda de rodes. Aquestes, quan la força dels imants no és suficient, entren en contacte amb el terra i permeten al tren continuar movent-se.

La part positiva d'aquesta tecnologia és que la levitació és molt forta. El tren es troba a 15 cm de les vies. Fent d'aquesta manera que no hi hagi necessitat de ser mil·limètricament precís a l'hora de construir les vies. A més, gràcies a aquest sistema es poden arribar a velocitats més altes.

Tot i això, el model EMS és més popular que aquest. Això és degut al gran cost de construcció i manteniment que s'ha de fer amb l'EDS. El qual necessita un complex sistema de refrigeració per totes les vies a causa dels superconductors⁴. En canvi, l'EMS té un sistema més senzill i utilitza molts menys imants, ja que les vies no són magnètiques.

Per altra banda, l'EDS no és factible per a persones amb marcapassos i per persones amb targeta de crèdit. Això és degut als alts camps magnètics que provoca.

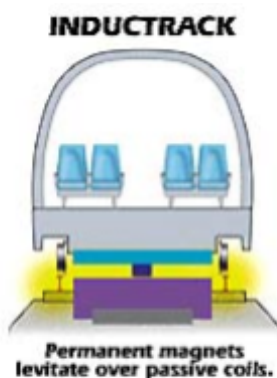


Figura 15. Representació del sistema Inductrack. Font: monorails.org

En últim lloc, tenim un sistema que s'ha fet bastant popular aquests últims anys, l'Indutrack. Aquest, fa servir imants permanents ordenats de forma especial per crear el camp magnètic més gran possible, que s'anomena Halbach. D'aquesta manera pot, de forma semblant a EDS, repel·lir el tren i fer-lo levitar, amb la diferència que en aquest sistema, els camps magnètics no van més enllà de sota el tren i no són perillosos per les persones.

⁴ Per refrigerar els superconductor, es magatzema heli líquid, que es troba a -269°C , i es distribueix entre els imants.

L'avantatge d'aquesta tecnologia respecta els altres mètodes està en la disminució de l'energia que s'utilitza. Com que es fan servir imants permanents, no fa falta gastar tanta energia, com si s'ha de fer amb l'ús d'electroimants. Tampoc són necessaris alts costos de manteniments, com passa amb els superconductors.

Malauradament, encara no existeix en el món cap model funcional, però s'estan fent progressos.

2.2.3.3. Beneficis i inconvenients

Com hem parlat abans, el principal inconvenient dels trens Maglev és l'alt cost que tenen. La infraestructura de les vies té un cost molt elevat, ja que es fa servir tecnologia avançada. A part d'això, es necessita una gran quantitat d'energia per mantenir-lo i posar el tren en funcionament.

Tot i això, també té molts avantatges respecte el transport convencional. La més important és que no contamina. Les energies que utilitza són bàsicament el magnetisme i l'electricitat. A més, consumeix un 50% menys d'energia que un avió comercial.

També s'ha de tenir en compte que és un transport d'alta capacitat, hi caben moltes persones i materials. Amb l'ús d'aquest vehicle, sobretot en llargues distàncies, es reduiria molt els gasos d'efecte hivernacle que d'altra manera provocarien els camions i cotxes particulars.

Una altre benefici és la nul·la contaminació sonora que provoca. És un transport totalment silenciós, molt pràctic tan a ciutats com al mig de la natura.

2.2.3.4. Exemples arreu del món

Com ja hem dit abans, hi ha pocs sistemes comercials que facin servir el mètode Maglev. S'utilitza principalment en països de l'Àsia de l'est. Tot i que l'avantatge principal d'aquests trens és la velocitat, només n'hi ha un en tot el món que es consideri tren bala⁵. Els altres són de baixa velocitat i com a molt arriben a velocitats de 100 Km/h.

⁵ Aquí es fa referència a trens oberts al públic. Hi ha uns quants Maglev d'alta velocitat més, però per ara estan tots en circuits de proves i restringits a les persones civils.

El Shanghai Maglev va ser el primer tren d'alta velocitat en utilitzar el sistema de levitació magnètica i actualment és l'únic que està operatiu. També anomenat Transrapid, la seva construcció va acabar l'any 2003. Utilitza tecnologia EMS i pot arribar als 430 Km/h. Té una ruta de 30 quilòmetres que va des de l'Aeroport Internacional de Shanghai Pudong fins a les afores d'aquesta mateixa ciutat. La ruta és curta i es tarda tan sols uns 7 minuts en completar-la. Tot i que des del 2010 que hi ha plans per allargar-la.

Tot i que encara és un prototip, el tren Maglev que ha sigut més tendència últimament és el que va presentar fa poc menys d'un any l'empresa China Railway Rolling Stock Corporation. Aquest tren ha arribat a una velocitat de més de 600 Km/h i permetrà fer la ruta entre Shanghai i Pekín en 3,5 hores. On es tardaria 5,5 hores en un tren bala actual i 3 en avió. Aquest transport utilitza el sistema EDS i és per això que pot arribar a aquest velocitat.

Un altre model que s'ha fet molt famós aquests últims anys és l'Hyperloop. Aquest concepte va ser popularitzat per Elon Musk l'any 2013. La idea consisteix en un tren que funciona amb un sistema Maglev, però amb l'afegit que es mou dins d'un tub de pressió baixa. D'aquesta forma desapareixeria la resistència de l'aire. Això, més tenint en compte que no hi ha fricció per part de les vies, aquest nou vehicle seria capaç de tenir eficiència energètica altíssima.

Tot i que l'empresa d'Elon Musk va fracassar en la creació d'aquest tren. Hi ha moltes altres empreses que han seguit els seus passos. La que més èxit està tenint és Virgin Hyperloop One. Aquesta empresa ja ha aconseguit crear un prototip capaç de transportar persones reals.

Tot i així, el preu de construcció és altíssim i encara no se sap quan serà factible la seva realització.



Figura 16. Tren Maglev Font. chinadaily.com

3. Marc Pràctic

Pel desenvolupament del marc pràctic, construiré una maqueta de tren Maglev totalment funcional. Això ho faré mostrant pas a pas la seva evolució i ensenyant els diferents camins i idees que aquest projecte ha anat agafant durant el transcurs del treball. A més, la idea no és tan sols la construcció d'un model a escala, sinó també la seva optimització.

Per aconseguir un resultat satisfactori, aquest treball el faré de forma gradual, aconseguint primer petits objectius secundaris per així arribar a l'objectiu final més fàcilment. Aquest són els mateixos que han sigut esmentats al principi del l'informe.

3.1. Visió general

Perquè el model compleixi els requisits per ser un tren Maglev, ha de complir que la levitació i la propulsió es duguin a terme gràcies a forces magnètiques, i per dur a terme aquesta tasca hi ha diferents mètodes. Els principals són l'EDS, l'EMS i l'Indutrack⁶. Jo em basaré en aquest últim per crear el meu model. Tot i que aquest sistema no s'utilitza gaire a la vida real, per mi és el més factible. Ja que, al ser un model petit, no necessito tanta força de levitació. Amb uns imants permanents serà suficient. D'aquest manera també m'estalvio de crear molts d'electroimants i el material i temps que comporta fer-los.

L'esquema bàsic d'aquest disseny consta d'un tren levitat per imants permanents i propulsat per electroimants.

3.2. Punts a tenir en compte

Durant la meva recerca d'informació pel projecte, vaig veure que hauria de tenir en compte diverses coses durant a l'hora de la construcció.

⁶ Aquest conceptes estan explicats a la pàg. 24

Primer de tot, la levitació magnètica és molt inestable. Els imants tenen la tendència a utilitzar sempre la força d'atracció. Per això, si se'ls vol utilitzar per repel·lir, s'ha de construir un suport per evitar que es girin.

Una altra cosa que s'ha de vigilar és el tipus de materials que s'utilitzen durant el procés. Com que treballa amb imants, s'han d'evitar els objectes ferromagnètics. Ja que poden alterar els camps i crear resistència indesitjada.

També és important reduir el pes del tren el màxim possible. D'aquesta forma la maqueta es podrà moure més fàcilment i no dependrà tant de la potència dels electroimants.

3.3. Disseny 1

El primer pas de tots és aconseguir que el tren s'elevi. Per fer això s'han de col·locar imants al tren i les vies, encarats tots al mateix pol. Ja sabia que això no seria suficient per estabilitzar el tren, així que també vaig dissenyar unes parets perquè acompanyin la direcció del tren. I així evitar que es bolqui.

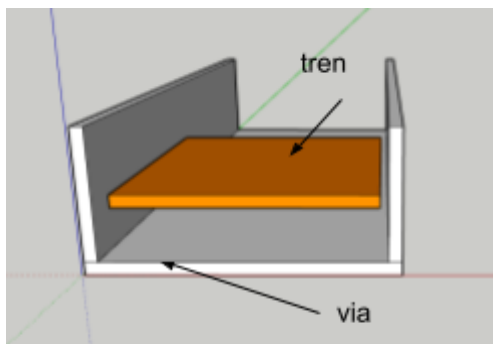


Figura 17. Primer disseny. Font: pròpia

En aquesta imatge es pot veure il·lustrada la idea del disseny. Com que tot just estava començant la idea és molt bàsica.

El tren tenia una mida de 6 cm d'amplada i 7 cm de llargada. Per evitar que hi hagués massa fricció, vaig separar les parets 1 mm per cada banda.

El disseny el vaig realitzar amb Sketchup, un programa de modelatge 2D i 3D. Tots els dibuixos que es veuen en la part pràctica són creats per mi utilitzant aquesta aplicació.

3.3.1. Imants

Per continuar amb el prototip necessitava imants permanents. Buscant informació vaig trobar una pàgina web anomenada *Supermagnete.es*. La qual és d'una empresa alemanya que s'especialitza en tot tipus d'imants.

Allà, hi ha una gran varietat de components magnètics. Seguint valoracions d'usuaris d'internet, vaig trobar aquests en concret:



Figura 18. Imants comprats.
Font: pròpia

- Imant de neodimi 45M⁷
- Forma prismàtica
- 15 x 4 x 4 mm
- Aguanta uns 1,7 Kg
- NdFeB⁸

El preu d'aquests imants varia depenent de la quantitat que encarregues Jo en vaig encarregar 100 i em va sortir a 54 €⁹.

3.3.2. Levitació

Ara que tenia els imants, ja podia començar amb les proves. Primer de tot vaig fer unes petites variacions al disseny per poder-hi col·locar els imants comprats recentment de manera més eficient. Els forats que es poden veure a la imatge tenen les mateixes dimensions que els imants i

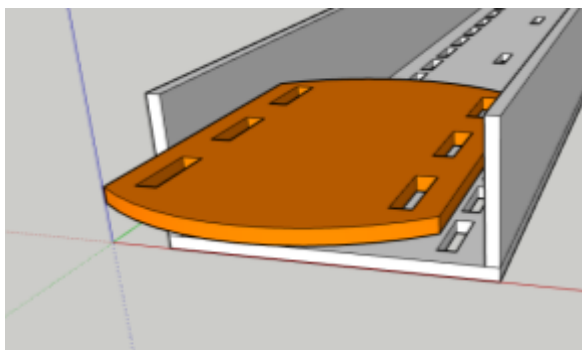


Figura 19. Disseny general. Font: pròpia

faciliten el seu muntatge i sujeció. La corba que hi ha en els dos extrems hi és simplement per motius estètics.

⁷ 45M ens indica les propietats de l'imant. 45 representa el nivell de magnetització, com més alt el nombre més fort serà l'imant. M ens indica la temperatura màxima que pot aguantar sense perdre les seves propietats. En aquest cas, pot arribar a 100°C.

⁸ Està creat a partir d'un aliatge de neodimi, ferro i bor.

⁹ El pressupost final es farà més endavant.

Com que en aquell moment la missió consistia tan sols en aconseguir una levitació per part del vagó, vaig fer el primer prototip de vies més petit. De forma que en el cas de no anar bé, no malgastés tant de material.

Això sí, al final de la via, vaig dissenyar un encaix perquè en la hipotètica situació que funcionés tot, pogués ajuntar la resta de les vies en la part ja creada.

Tot i que la meva idea inicial era col·locar només quatre imants en el tren, vaig posar en el disseny dos forats extrems en el cas de què els imants no fossin prou potents¹⁰.

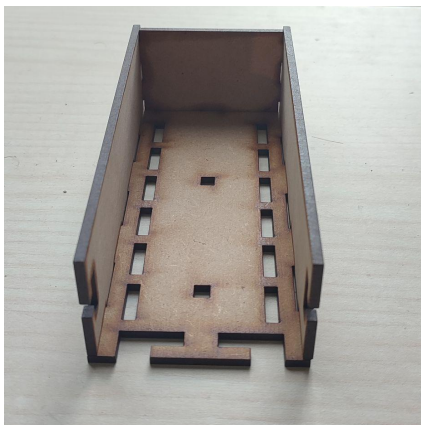


Figura 20. Vies. Font: pròpia

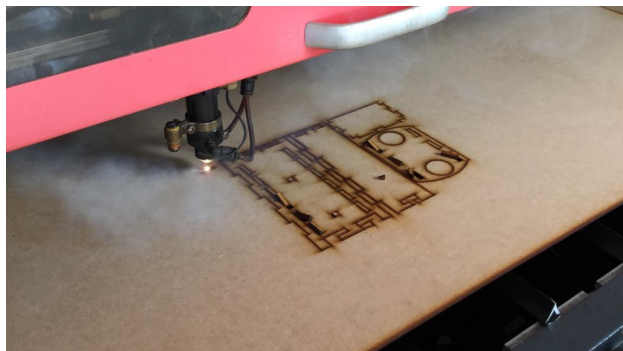


Figura 21. Disseny tallat per làser. Font: pròpia

Els dissenys que he anat fent durant aquest treball han sigut tots plasmats a la realitat gràcies a una màquina de tall làser. Aquesta, m'ha sigut prestada per l'empresa de *Fabulus laserwork&design*¹¹ de Cornellà del Terri.

Per fer les peces totes les peces d'aquest projecte vaig utilitzar un tauler de fusta DM¹² de 3 mm. Ja que és un material resistent, fàcil d'aconseguir i senzill de tallar amb el làser.

Després de tot el muntatge, vaig poder comprovar que el primer prototip havia sigut tot un èxit. El tren tenia una estabilitat molt bona.

Després de fer unes proves, vaig poder comprovar la gran força que tenien els imants. El vagó era capaç de suportar almenys 1,25 quilograms. Però malauradament no vaig poder incrementar el pes a causa de del poc espai que hi ha i la manca d'objectes per incrementar el pes.

¹⁰ Al final aquest tercer forat no va ser necessari i ja no apareix en els últims models

¹¹ Aquesta companyia va ser fundada al 2016 per membres de la meua família.

¹² Els taulers DM són panells lleugers fabricats amb fibres de fusta i resines sintètiques encolades i premsades a altres pressions.

Sense pes, el vehicle arriba als 3,3 centímetres d'altura. I a mesura que se li afegeix més pes, aquest valor baixa de forma exponencial.

També vaig poder veure personalment la importància de les parets. Sense elles, el tren es girava de forma quasi instantània.

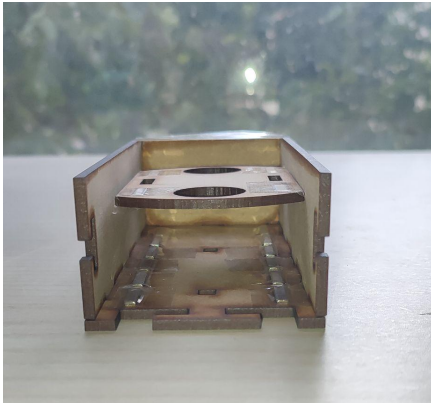


Figura. 22. Primera levitació. Font: pròpia

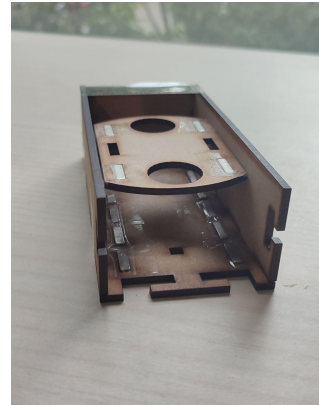


Figura. 23. Primera levitació. Font: pròpia

En aquest punt ja havia aconseguit la primera fase d'un tren Maglev, la levitació. El següent pas per completar era la propulsió, per això, tal com s'explica a la pàg. 22, era moment de construir un electroimant.

3.3.3. Creació d'un electroimant

A la part teòrica del treball ja he parlat d'aquest tipus d'imant i de com crear-ne un. En aquest apartat, construiré tres tipus d'electroimants diferents, cada un amb les seves característiques. Amb això vull mostrar l'evolució que hi hagut entre el primer i l'últim model, ensenyant les diferents optimitzacions de cada creació.

3.3.1. 1r electroimant

Per crear el primer electroimant, vaig utilitzar una rosca bastant gruixuda que vaig trobar per casa. En el cas del cable, l'empresa *Bobinatges Arme*¹³ va tenir l'amabilitat de regalar-me uns metres de fil de coure de 0,6 mm de diàmetre.

¹³ Empresa de Cornellà del Terri que es dedica a la fabricació de motors, generadors i transformadors elèctrics.

És important recalcar la importància del diàmetre del filament. Com més gruixut és, menys resistència ofereix i proporciona un millor flux d'intensitat. Però també s'ha de tenir en compte que com més ample és el cable, menys voltes se li poden donar, pel qual l'electroimant serà menys potent. Tot és qüestió d'equilibrar les dues balances. En el meu cas, els de *Bobinatge Arme* em van recomanar utilitzar el coure de 0,6 mm. Però no hi havia cap problema en canviar la mida a $\pm 0,1$ mm.

Com que no tenia gaire experiència amb electroimants, vaig decidir fer aquest primer prototip amb 175 voltes, tan sols per comprovar els resultats. La seva llargada era de 4 cm i tenia un diàmetre molt desigual.

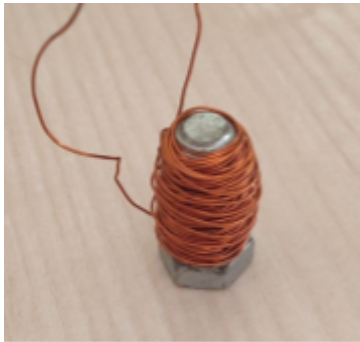


Figura 24. Primer electroimant.
Font: pròpia

Per donar-li energia, vaig fer ús d'una font d'alimentació que permetia canviar el valor de sortida del voltatge.

Fent proves vaig veure les diferents forces magnètiques que l'imant era capaç de produir depenent del voltatge que se li donava.

Amb 12 V podia aixecar una peça de 200 g, tot i que 9 V no eren suficients. Era interessant de veure les diferents combinacions possibles a partir del canvi de voltatge.

També vaig contemplar un dels principals problemes dels electroimants, el sobrecaentament. Tot i tenir un cable considerablement ample, la resistència encara es feia notar. A més, un factor que no havia tingut en compte era l'oposició al corrent produït per les voltes. Com més enrotllat el cable, més resistència en forma de calor apareixerà.

Tot això es deu a l'efecte Joule. Aquesta explica que en un conductor on hi passa electricitat, part de l'energia cinètica dels electrons que circulen es transforma en energia tèrmica. Aquest calentament (Q) dependrà de la resistència del conductor (R), la intensitat del corrent (I) i el temps en que aquests està en funcionament (t). I es calcula amb la fórmula següent:

$$Q = I^2 * R * t$$

Com que la resistència i el temps eren valors que no podia canviar, la millor solució per reduir l'escalfament del solenoide era baixant la intensitat. En el meu cas, vaig disminuir el voltatge, que és directament proporcional a la intensitat.

Fent més experiments vaig arribar a la conclusió que 5 V era un valor bastant acceptable.

Una aclariment, és que tot i que estigui parlant de voltatge, el valor que realment és més important per variar els camps magnètics d'un electroimant és la intensitat. El problema és que la font d'alimentació que feia servir per fer les proves només especificava el voltatge. Per aquest mateix motiu, no vaig fer els càlculs per saber la intensitat dels camps magnètics. Això es veurà més endavant quan faci servir una font d'energia més precisa.

Així que per ara es parlarà de la diferència de voltatge, ja que com més alt sigui aquest, major serà la intensitat de corrent.

3.3.3.2. 2n electroimant

Tot i que en l'anterior model els resultats van ser positius, la mida i el pes eren massa grans. A part d'això, el seu disseny no era simètric, provocant d'aquesta forma irregularitats en els camps magnètics.

Per aquest motiu, vaig decidir crear un segon electroimant per així optimitzar-lo de manera que fos més fàcil d'instal·lar en el tren.

Aquesta vegada, vaig utilitzar un nucli de ferro molt més petit. Ja que buscant més informació vaig trobar que per pujar la potència de l'imant era millor incrementar el nombre de voltes que la massa del nucli. Per això, el nou disseny constava de 300 voltes. També, per fer-lo d'una mida més compacta i senzill de fer servir, el vaig fer d'un diàmetre homogeni de 2,4 cm i li reduí la llargada a 2 cm.

Per assegurar que les voltes de coure no es desfessin, vaig posar una base circular de plàstic a cada costat i ho vaig assegurar tot amb cola instantània i cinta adhesiva.

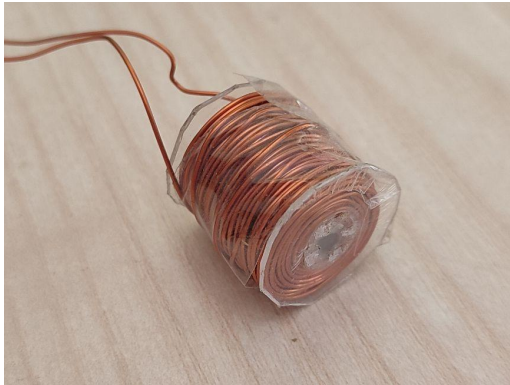


Figura 25. Segon electroimant. Font: pròpia

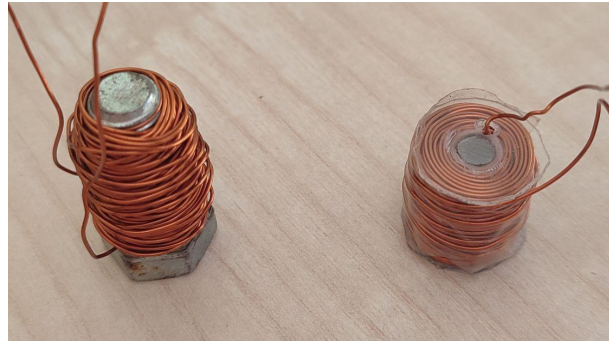


Figura 26. Comparació entre els dos models d'electroimant. Font: pròpia

La nova versió d'electroimant va tenir un resultat totalment positiu. Tot i tenir una mida més reduïda, la seva força magnètica va augmentar.

Això es pot comprovar utilitzant la fórmula de l'electroimant ($B = N \frac{\mu_0 I}{l}$). Tot i no saber el valor de la intensitat, per fer els càlculs vaig fer servir un valor comú de 1A. Això ens dona pel primer electroimant:

$$B_1 = 175 \frac{1500 * 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} * 1 A}{0,03 m} \simeq 10,996 T$$

I pel segon:

$$B_2 = 300 \frac{1500 * 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} * 1 A}{0,02 m} \simeq 28,274 T$$

Es pot veure una diferència significativa.

Tenint aquest pas acabat, només em quedava posar-me amb el tema de la propulsió per així completar tots els objectius secundaris.

3.3.4. Propulsió

Per fer les coses més simples i així no utilitzar tant de material, vaig decidir buscar un mètode de propulsió diferent del que s'utilitza en els trens reals¹⁴.

El meu mètode consisteix a col·locar una fila d'imants permanents al centre de les vies, tots en la mateixa orientació, i un electroimant sobre el vehicle. Les dues fonts magnètiques estaran situades paral·lelament i encarats al mateix pol.

L'electroimant serà breument activat tan sols quan estigui situat una mica més endavant d'un dels imants. Això provocarà una força de repulsió que obligarà el tren a avançar.

És important activar i desactivar l'electroimant en el moment indicat. Si no, podria provocar un efecte contrari al desitjat i frenar el tren. Per aquest motiu, usaré sensors per localitzar la posició del vehicle i activar-lo en el moment adequat. Però això ja està explicat més endavant a l'apartat de *circuit*.

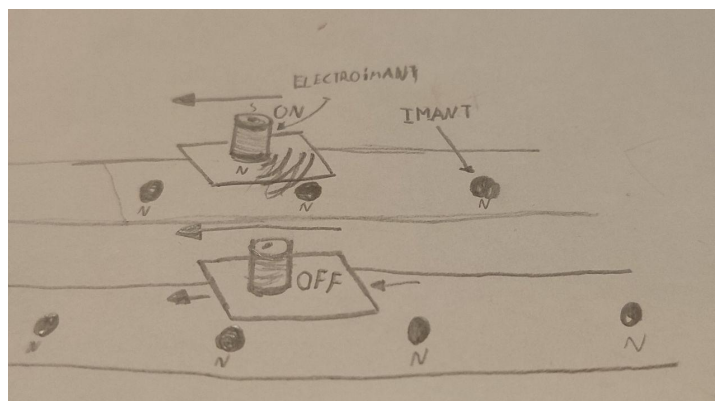


Figura 27. Esbós del sistema de propulsió. Font: pròpia

A part d'aquest mètode, però, vaig tenir en consideració altres opcions:

Una idea que vaig tenir era semblant a la utilitzada però intercanviant les posicions. La idea era crear un circuit d'electroimants a les vies i que els permanents fossin col·locats en el vagó.

¹⁴ S'explica quin és a la pàg. 22.

Un avantatge d'aquesta solució és que així s'evitaria haver de crear un circuit en el tren, on tant l'espai com el pes són limitats. I així fer totes les connexions a fora on hi ha les vies.

Així i tot, ho vaig acabar descartant per la complicació que hagués sigut crear tants electroimants i haver de fer un circuit amb tots ells. A més, ja vaig dissenyar el vagó prou gran perquè hi cabés una placa Arduino i tenint en compte la força dels imants permanents el pes no era un problema.

L'altre opció que havia passat pel meu cap era intercalar el sentit dels imants permanents de les vies. D'aquesta manera, quan els electroimants facin la força de repulsió cap a un imant, el del seu costat atraurà el mateix electroimant i augmentarà la potència de la propulsió.

Aquest mètode s'assembla més als dels trens Maglev reals, traient el punt que allà només es fan servir electroimants.

El principal avantatge d'aquest mètode és l'increment de potència utilitzant els mateixos materials. L'única qüestió és que seria més complicat de posar en funcionament. S'hauria de crear un circuit que permetés canviar la direcció del corrent i així invertir els pols magnètics. Tot i que crec que es podria arribar a fer, això no treu el punt de que és bastant més complex i difícil de fer en l'espai reduït del tren.

Per aquest motiu, vaig decidir continuar amb la idea més simple i barata. En el cas de necessitar més força, optaria per aquesta última idea.

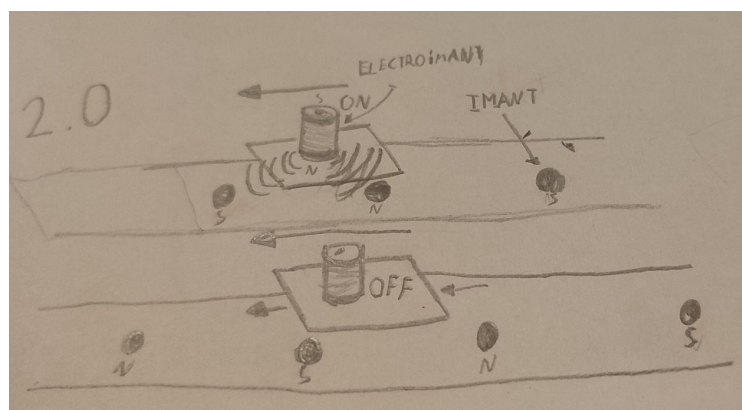


Figura 28. Esbós de propulsió alternatiu. Font: pròpia

3.3.4.1. Realització

A part de les dues fileres d'imants permanents que fan la funció de fer levitar el tren, vaig afegir una tercera filera en el centre per la funció de propulsió.

La separació entre ells era de 6 centímetres i tots estaven amb la cara nord mirant cap amunt. Per facilitar el seu muntatge vaig afegir uns forats de la mida i separació exacta al disseny de les vies.

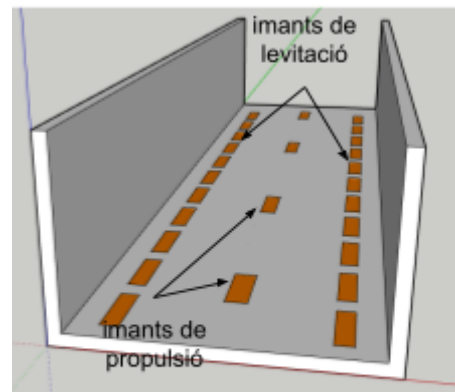


Figura 29. Disseny de les vies amb els imants.
Font: pròpia

Per la construcció del tren em vaig acabar decantant per afegir un segon electroimant al vehicle. D'aquesta manera obtindria més força i estabilitat. A part d'això, aquest fet també em permetria una col·locació del circuit intern al centre de forma més simple.

Els dos electroimants els vaig adherir al tren gràcies a uns forats, de la mateixa mida que els mateixos imants, que ja van ser preparats abans. Entre això i una mica de cinta adhesiva el prototip ja estava quasi acabat, tan sols faltava acabar de connectar els electroimants a la font d'alimentació.

Mitjançant una placa de prototips i cables, vaig unir els electroimants a la font. Aquest resultat no era el que jo volia com a circuit, però em serviria per fer les proves necessàries.

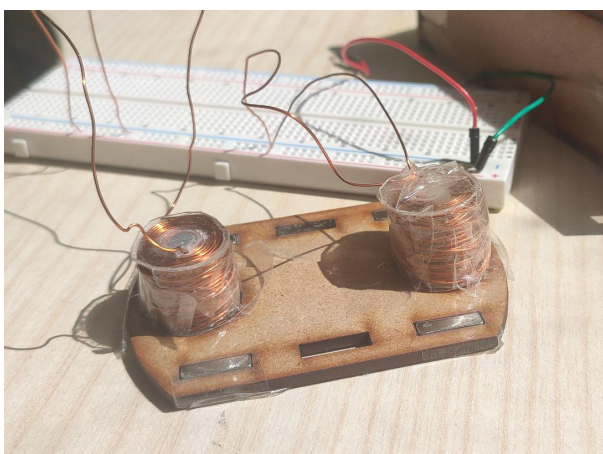


Figura 30. Primer model del tren. Font: pròpia

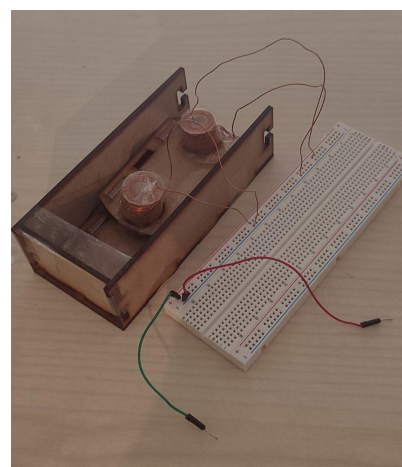


Figura 31. Model del tren. Font: pròpia

3.3.5. Problemes

Després de fer unes quantes proves i experiments vaig poder observar que el prototip no acabava de funcionar.

Segons semblava, el problema principal era que els electroimants no tenien la suficient potència per moure tota l'estructura de forma eficient. A més, feia la sensació que les forces dels camps magnètics eren irregulars i no permetien un moviment rectilini per part del tren.

3.3.5.1. Solució 1

Vaig assumir que tots els problemes eren a causa de la insuficient força dels electroimants. I aquí vaig veure el primer problema del disseny: hi havia massa distància entre els electroimants i els imants de les vies. En total la separació entre ells era de 3 cm.

La solució era simple, apropar més els imants entre si. Vaig posar un imant sobre els que ja hi havia a la via fent així que, per una banda, la distància fos més curta i per l'altra augmentar el camp magnètic.

Curiosament, després d'aquesta modificació la cosa va anar a pitjor.

Vaig descobrir que si poses un imant en contacte amb un electroimant, aquest es quedaran atrapats sense importar la polaritat. És a dir, si un imant de polaritat negativa s'acosta molt al cantó negatiu d'un electroimant, aquest seran igualment atrets.

La meva hipòtesi era que degut a algun factor, com podria ser la baixa intensitat, la forma dels camps magnètics o simplement perquè l'imant permanent tenia més potència, l'imant de les vies se sentia atret a la peça ferromagnètica del centre de l'electroimant.

Tot això feia que el tren es quedés atrapat sobre les vies i feia impossible la seva mobilització.

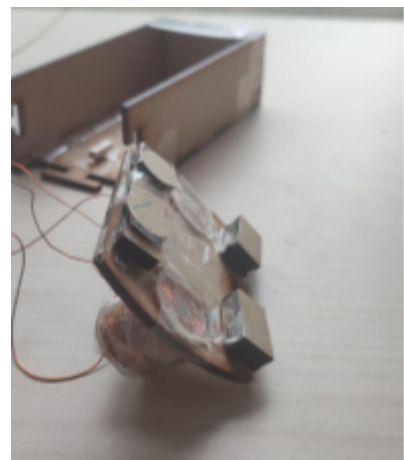


Figura 32. Tren amb suports. Font: pròpia

3.3.5.2. Solució 2

Fent proves vaig arribar a la conclusió que el cas anterior només sorgia quan l'imant estava en contacte directa amb l'electroimant, vaig decidir posar una mena de suport que evités aquesta situació.

El sistema era simple i una mica brut, però almenys em serviria per veure si la meua idea era correcta. La qual no ho era, i seguia sense anar bé.

Tot i que la idea de separar els imants entre ells si que funcionava, hi havia un problema molt més greu que se m'havia escapat.

Quan jo estava fent les proves, les feia dirigides a provar i valorar la propulsió quan l'electroimant estava activat. El punt que no havia tingut en compte estava en el moment de transició on l'electroimant no estava operatiu. Quan aquest es desactivava, feia que tots els camps magnètics que produïa desapareguessin. Provocant així que el material ferromagnètic del centre, el qual es magnetitzava gràcies a aquell camp, perdés les seves propietats magnètiques. I semblant a la qüestió anterior, això feia que el tren fos atret directament cap a les vies.

La solució era simple, m'havia de desfer de la peça de ferro. Cosa que no suposa del tot un problema, perquè el solenoide continuaria creant camps magnètics. Però en aquest cas serien més dèbils.

Per altra banda, també vaig donar més importància a una altra dificultat secundària que ja havia aparegut en proves anteriors. La suma de tots els camps magnètics produïts era molt irregular. Hi havia massa imants pel mig, provocant turbulències entre ells.

3.3.5.3. Solució 3

Primerament, vaig substituir l'electroimant per un solenoide. Gràcies a aquest canvi, ja no tindria problemes amb el nucli de ferro.

Aquest solenoide està format a partir de 150 voltes d'un fil de coure de 0,5 mm de gruix i 5 m de llargada. Té un diàmetre de 2 cm i una altura d'1 cm. Al no tenir



Figura 33. Tercer model d'electroimant. Font: pròpia

un nucli ferromagnètic, la seva força es va reduir dràsticament a menys de 0,1 T. Però almenys encara era capaç de propulsar.

Tot i aquest canvi, la cosa seguia sense funcionar. Continuaven havent-hi uns quants problemes.

Per una banda, el que ja havia comentat abans sobre les interferències magnètiques. Els imants estaven massa junts i els seu camps magnètics es barrejaven.

A més, per poder aprofitar al màxim la força de l'electroimant, els hauria de posar de manera que estiguessin com més a prop possible dels imants. Tot i això, la força semblava insuficient.

Tots aquests inconvenients no eren difícils de solucionar. El problema era que arreglar-los un per un no era gens pràctic ni eficaç. Calia una idea més dràstica. Per això em vaig decantar per fer un redisseny total.

3.4. Disseny 2

El problema de les interferències magnètiques era un dilema que havia aparegut en tots els model anteriors i que no havia sigut capaç d'arreglar. Per això el nou disseny estava pensat principalment per solucionar aquest problema.

Tinc els imants de les vies i els imants de propulsió. Els dos tipus són

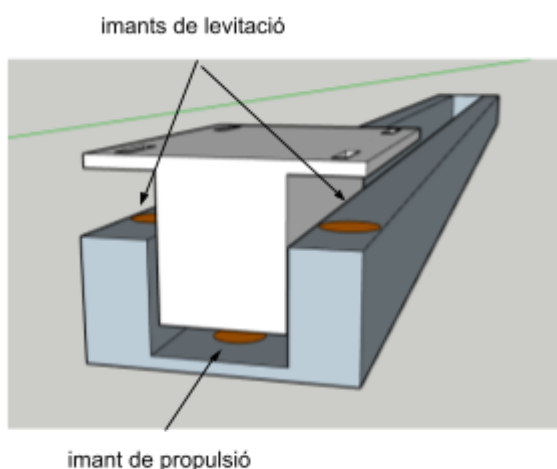


Figura 34. Nou disseny del tren i les vies. Font: Pròpia

indispensables, però no poden estar gaire junts. La dificultat estava en el fet que no tenia molt d'espai, el tren mesura uns 9x7 cm i per motius de materials no m'agradava la idea de fer-lo més gran. O sigui, no puc apartar els imants entre ells en cap direcció dels eixos x i y. Però encara em queda un altre eix, el z.

La meua idea es basava a crear unes vies de més d'un nivell. En una altura

estarien els imants de levitació i en una altra estarien els de propulsió.

Aquest disseny també em permetia desempallegar-me de les parets, ja que la seva funció d'estabilitat la feia de forma passiva el mateix tren.

Realment no importava quins imants estaven a dalt o quins a baix.

Jo em vaig decidir per el model de l'imatge per motius estètics i perquè m'ajudarien per una altra idea que havia tingut.

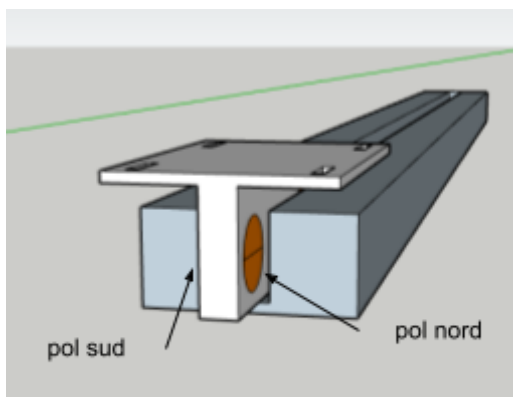


Figura 35. Nou disseny del tren i les vies. Font: pròpia

Fins al moment, havia utilitzat els electroimants de forma vertical, fent ús només d'un dels seus pols. Allò era un desaprofitament d'energia. Així que la idea per augmentar la força de propulsió era tan simple com girar el solenoide.

L'única diferència era que en aquest cas els imants de propulsió s'havien de col·locar a les parets i no en el terra. A

més, era important ajustar el gruix del disseny al del solenoide, que és d'1 cm.

Acabat això, ja es podia imprimir el nou disseny.

Com que encara estava tot en fase de proves, vaig començar imprimint unes vies més petites.

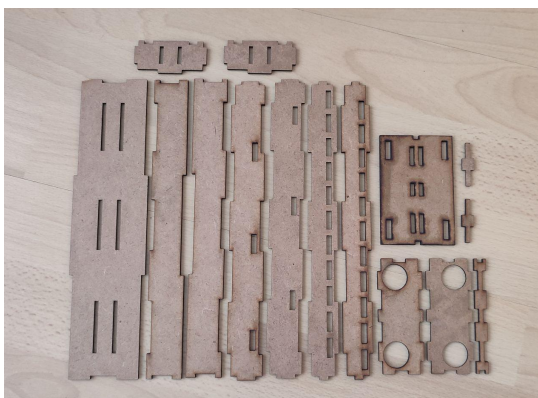


Figura 36. Peces tallades de les vies i el tren. Font: pròpia



Figura 37. Tren i vies muntades. Font: pròpia

Igual que en els models anteriors, vaig afegir forats de la mida exacta dels imants per així facilitar la seva col·locació a l'hora de muntar les vies.

3.4.1. Levitació

El sistema per fer flotar el tren és exactament el mateix que l'emprat anteriorment. En aquest, però, només se li sumava la complicació del fet que, per mantenir una bona estabilitat i alinear bé els solenoides, havia de ser molt més precís amb la distància de levitació.

El model anterior era capaç d'aixecar-se uns 3 cm. Però en aquest cas, afegint el pes dels electroimants, es mantenia suspès a 2 cm de les vies¹⁵.

Les proves van ser molt satisfactòries. Tan sols vaig haver de tornar a tallar una part de les vies. Les quals estaven massa juntes i causaven fricció.

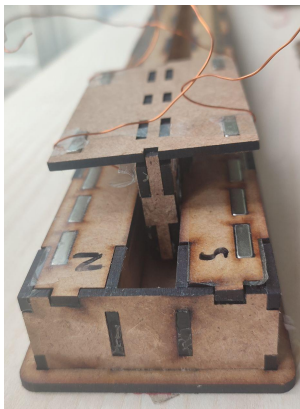


Figura 38. Nou model levitant. Font: pròpia

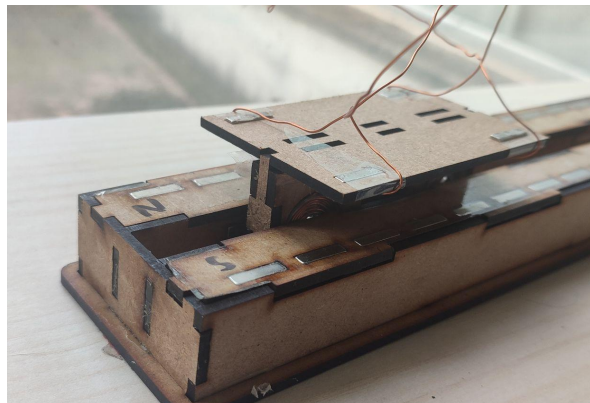


Figura 39. Nou model levitant. Font: pròpia

¹⁵ En aquell moment per fer les proves, només vaig tenir en compte aquest pes, però més tard ja vaig afegir altres components pel mesurament del model final.

3.4.2. Propulsió

Aquest sistema per moure el tren també s'assemblava molt al ja utilitzat en el passat. A les vies, hi havien posats una filera d'imants, els quals es trobaven separats per 6 cm. El mètode per propulsar també era el mateix.

L'única diferència estava en la posició del solenoide.

A l'hora de fer les proves, vaig tenir uns petits problemes menors que van causar que només pogués fer ús d'un dels dos electroimants. Així i tot, el resultat va ser totalment positiu. A diferència de l'anterior model, amb aquest era possible desplaçar el tren.

També vaig trobar certes coses a tenir en compte. Fins aquell moment, la idea era fer servir la repulsió entre forces magnètiques per produir el moviment. Però vaig veure que era molt millor fer ús de la propietat d'atracció magnètica. D'aquesta manera, la força augmentava considerablement.



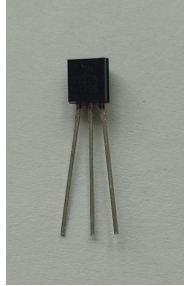
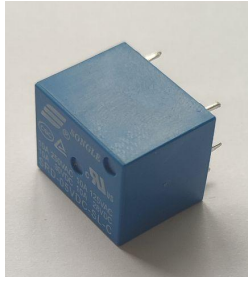
També vaig arribar a la conclusió que la distància de 6 cm en que estaven separats els imants podia ser massa gran. Per no haver de necessitar més imants, cosa que era el material que més escassejava, vaig decidir afegir un tercer solenoide en el tren. Aquest estaria entremig dels dos ja presents i funcionarien de forma intermitent amb els altres. Així quan uns estiguin massa separats per ser atrets per l'imant, aquest tercer farà la feina d'avançar el tren.

En aquell moment, el tren es movia amb la meva ajuda. Ja que activava i desactivava els electroimants a voluntat. Però això no és pràctic ni passa a la vida real. Així que em tocava automatitzar el tren.

3.4.3. Circuit

La idea general d'aquest circuit consisteix a activar els solenoides en el moment exacte que es precisa. Per fer això, vaig utilitzar un sensor per saber la posició dels imants. Aquesta informació va dirigida a un microcontrolador, que és l'encarregat d'activar i desactivar els interruptors i així activar els electroimants.

3.4.3.1. Composició

Microcontrolador	Vaig utilitzar una placa Arduino Uno, ja que era amb la que tenia més experiència	
Electroimants	Els construïts anteriorment	
Font d'energia	3 bateries de dron 1s connectades en sèrie, les quals donen un voltatge d'11,1 volts i 650 mAh. Aquesta decisió es va basar en el poc pes que tenen les bateries de dron.	
Interruptor 1	Transistor 2N222, compatible amb Arduino	
Interruptor 2	Relé SRD-05VDC-SL-C, el tenia per casa	

Interrupctor 3	KAN-8, el tenia per casa	
Sensor	Sensor Infraroig, perfecte pel seguiment de línies negres	
Activador	LED vermella	
Resistències	220Ω i 330Ω	

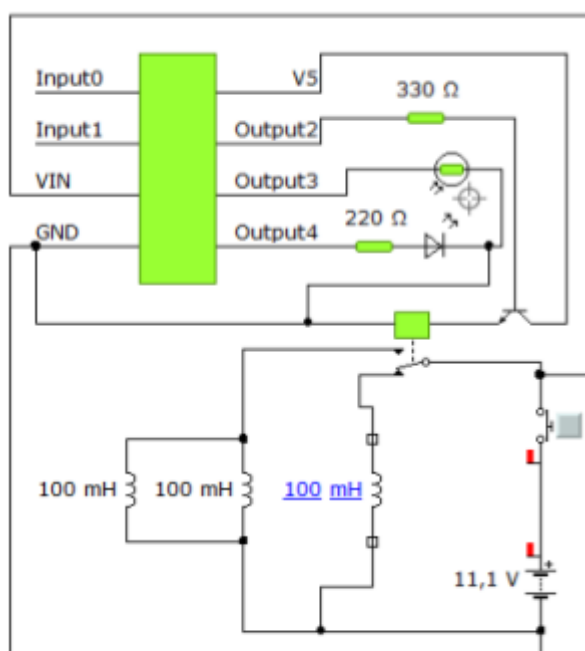


Figura 40. Diagrama del circuit. Font: pròpia

3.4.3.2. Funcionament

Al llarg de les vies, pintaré unes línies negres en els punts exactes on vull que s'activin els electroimants. El sensor infraroig (Pin3) serà capaç de localitzar els segments, ja que les seves ones no reboten en aquell color.

En el moment que aquesta informació sigui enviada a l'Arduino,

aquest estarà programat per enviar un senyal a la base del transistor (Pin2). Això farà que el circuit quedi tancat i arribi energia cap al relé. Provocant així que la seva bobina s'activi i redistribueixi el flux d'electrons cap als altres electroimants.

Quan això passi, també s'enviarà un senyal al LED (Pin4) per poder-ho visualitzar més.

Les resistències serveixen per protegir el transistor i el LED de corrents elevats i que així no es facin malbé.

La funció del tercer interruptor és simplement facilitar la desconexió de les bateries.

Bàsicament, el circuit dona un corrent constant als dos electroimants en paral·lel. Però quan es detecta una línia negra, l'electricitat agafa un altre camí per activar tan sols el solenoide que està sol.

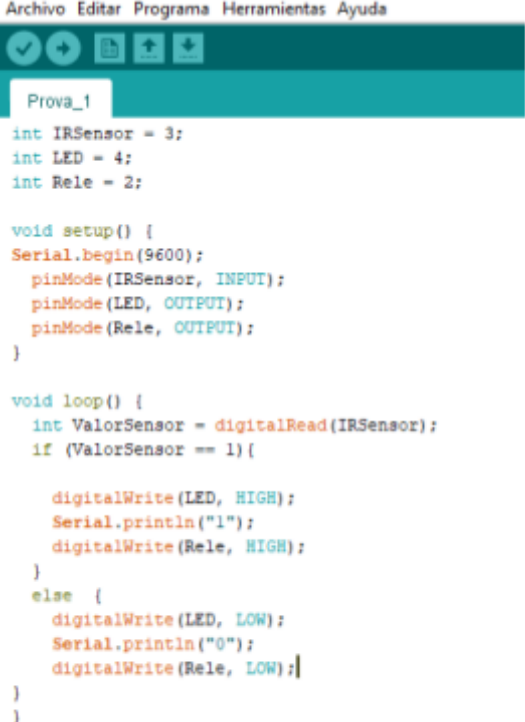
3.4.3.3. Programació

La programació és simple. El sensor infraroig envia constantment valors binaris a l'Arduino. Si detecta alguna cosa, el valor serà 1. En el cas de no veure res, el nombre serà 0.

Com que el color negre absorbeix les ones, el sensor infraroig no rebrà la informació, creant la il·lusió que no ha detectat res. Per això el nombre que ens interessa és 0, que equival a no rebre cap valor.

Quan això passi, enviarem un valor *HIGH* al transistor (Pin2). Això es farà gràcies a la funció *If*. Paral·lelament a això, també enviarà un altre valor *HIGH* cap al LED (Pin4), i així es podrà saber de manera més visual si la detecció del sensor ha sigut correcte.

En el cas que el senyal sigui 1, s'enviaria el valor *LOW* en els dos pins.



```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Prova_1
int IRSensor = 3;
int LED = 4;
int Rele = 2;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(IRSensor, INPUT);
  pinMode(LED, OUTPUT);
  pinMode(Rele, OUTPUT);
}

void loop() {
  int ValorSensor = digitalRead(IRSensor);
  if (ValorSensor == 1){

    digitalWrite(LED, HIGH);
    Serial.println("1");
    digitalWrite(Rele, HIGH);
  }
  else {
    digitalWrite(LED, LOW);
    Serial.println("0");
    digitalWrite(Rele, LOW);
  }
}
```

Figura 50. Codi d'Arduino. Font: pròpia

Amb només aquestes línies el tren hauria de ser capaç de moure's per les vies.

En el principi del programa també es pot veure la funció `Serial.begin()`¹⁶, el que fa això és obrir un port en sèrie per enviar dades de l'Arduino a l'ordinador. En aquest cas l'utilitzo per rebre el valors 0 i 1 del sensor infraroig. Per transmetre la informació utilitzo la funció `Serial.println()`¹⁷,

3.4.3.4. Realització

En tenir el circuit i la programació clara, era hora de plasmar el model a la realitat. El procés de construcció no va tenir massa dificultat. Algunes cremades a causa del soldador, però poca cosa més.

Tocava veure si el model funcionava.

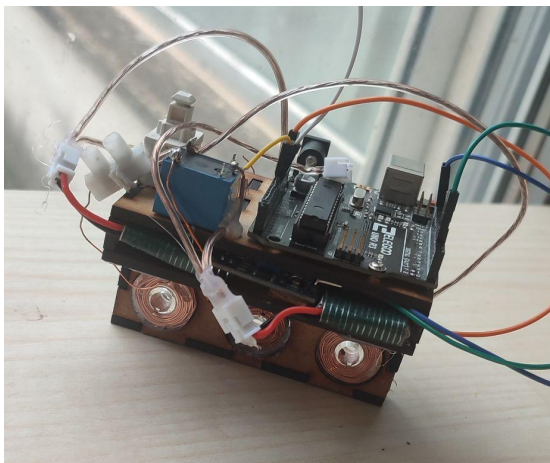


Figura 51. Model amb el circuit. Font: pròpia

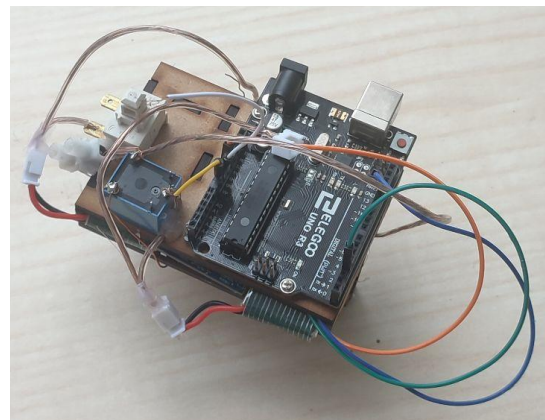


Figura 52. Model amb el circuit. Font: pròpia

3.4.4. Problemes

En connectar les bateries i col·locar el tren sobre la via, ja vaig veure des d'un principi que la cosa no funcionava. No només perquè el tren no es movia, sinó també en conseqüència del fum que sortia de les bateries.

A causa d'algun curtcircuit en les connexions, les piles van patir un sobreescalfament, provocant així un incendi intern i inutilitzant-les per complet. No

¹⁶ Entre parèntesis es posa la velocitat de transmissió de dades que volem. La més utilitzada és 9600.

¹⁷ Entre parèntesis es posa la informació que es vol transmetre al port de l'ordinador.

només això, sinó que, a causa de la falla en el circuit, també se'm va espatllar la placa Arduino.

3.4.4.1. Solució 1: circuit

Estava clar que alguna cosa en el circuit no funcionava. El problema, era no tenia ni idea de què podia ser, ja que no tinc gaire experiència en aquest tema.

Tot i que la meua metodologia de treball és la de fer un projecte propi, on tot el creat hagi vingut de les meves idees, em vaig veure obligat a buscar per internet exemples de circuits d'altres persones.

Vaig trobar un vídeo que explicava la manera de connectar solenoides a una placa Arduino, cosa que és més difícil del que pensava.

La dificultat principal d'utilitzar solenoide en un circuit, és que aquest actuen com una bobina. El que provoca això és que, quan passa electricitat per l'electroimant, aquest n'acumula una part. I més tard, quan ja deixen de passar electrons pel mig, el solenoide descarrega tota l'energia.

El més probable és que el curtcircuit que vaig provocar va ser degut a això. Per sort, hi ha una solució molt fàcil. Tan sols s'ha de col·locar un díode paral·lelament als solenoides. D'aquesta manera, el component no deixa passar l'energia acumulada en la bobina.

Fent proves també vaig veure que aquest mètode també soluciona la qüestió del sobreescalfament. Gràcies al díode, l'electroimant no es calenta tant. Fins al punt que quasi no es nota el canvi de temperatura respecte a quan està apagat.

El vídeo també recomanava utilitzar un transistor MOSFET. Aquest component té un funcionament molt semblant al transistor que havia fet servir abans, amb la diferència que, aquest és de més qualitat i va millor per treballar en diferents voltatges.

I aquí està l'altre punt, la idea de fer servir una sola font d'alimentació per la placa Arduino i els solenoides a la vegada era una mica temerosa i ingènua. Tot i que els dos s'alimenten d'un voltatge semblant, la intensitat en què treballen és molt

diferent. Per una banda, els electroimants necessiten una intensitat de corrent com més alta millor. En canvi, l'Arduino treballa en valors molt més petits.

Això va provocar un altre curtcircuit dintre la placa.

Aquí la solució està a fer ús de dues fonts d'alimentació diferents.

Després de veure el circuit que sortia en el vídeo, el vaig modificar una mica per aplicar-lo a les meves necessitats.

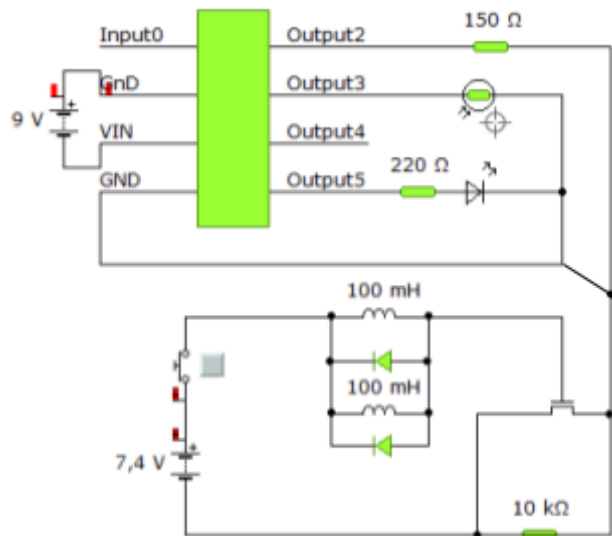


Figura 52. Diagrama del circuit millorat. Font: pròpia

Un punt a tenir en compte d'aquest circuit és la importància de connectar l'extrem negatiu de la bateria dels solenoides amb el GND de la placa. Tot i sonar contradictori el que havia dit abans, d'utilitzar diferents fonts d'energia per cada cosa, això és molt important. Aquesta connexió permet sincronitzar el valor 0 de les dues bateries. Sense això, el circuit no funcionaria.

També és rellevant posar una resistència entre el MOSFET i l'Arduino. Així s'evita el sobreescalfament de la placa.

Una altra cosa que vaig fer malament en el model anterior va ser muntar el circuit directament al tren. Normalment, faig proves en una protoboard abans de passar a la versió definitiva. Malauradament, l'emoció d'acabar i la confiança em van fer una mala passada. Però aquesta falla no el vaig fer dues vegades.

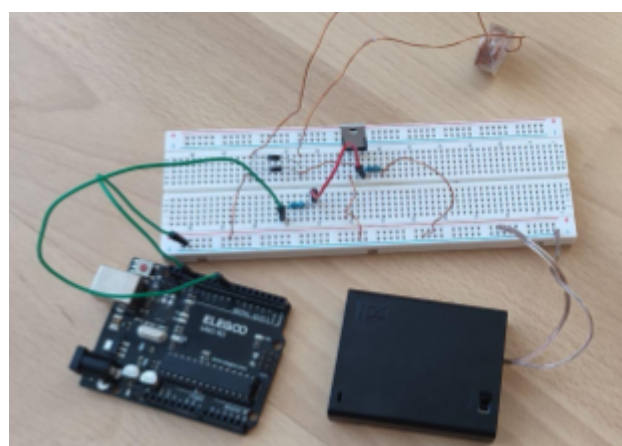


Figura 53. Circuit en la protoboard. Font: pròpia

Fent proves a la protoboard vaig veure que el circuit era tot un èxit. Tot funcionava tal com volia¹⁸.

Després de muntar les connexions sobre el tren, pensant que ja quasi havia acabat, em vaig adonar d'una altra falla. Aquest cop el problema estava relacionat amb el moviment del tren i la resistència que això produïa.

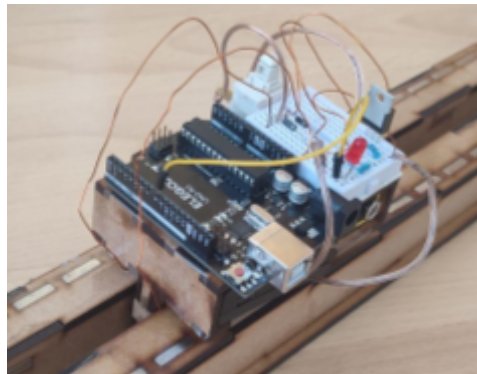


Figura 54. Circuit aplicat en el tren. Font: pròpia

3.4.4.2. Solució 2: reducció de la resistència

En posar el tren sobre les vies vaig comprovar que no es movia o que li costava molt. En tot cas, necessitava la meua ajuda externa per moure's d'un extrem a l'altre. Després d'investigar una mica, vaig arribar a la conclusió que això es devia a dos factors. Per una banda, hi havia la resistència produïda en un punt pel fregament del tren amb les vies. I per altre, vaig veure que els mateixos imants de levitació creaven una petita resistència que no deixava accelerar al tren.

[Vídeo]<https://drive.google.com/file/d/1jVzfmTsDLEK6xiqTYZ3Z9rb4KP3nPfvh/view?usp=sharing>

Aquest últim problema, era causat per la separació entre els imants de les vies, que massa gran. En alguna ocasió ja havia comentat sobre el rebuig que tenen els imants a encarar-se amb un pol equivalent. Faran tot el possible perquè això no passi. El que feia jo per aconseguir levitació, era evitar que trobessin un camí de

¹⁸ La font d'energia que faig servir pel circuit en la protoboard i posteriorment en el tren, són dues piles en serie de 1,5V. Aquest canvi es deu a que les bateries utilitzades abans, van quedar destruïdes a causa del curtcircuit.

sortida, els obligava a repel·lir-se entre ells, per això el motiu de les parets. El punt està en el fet que, a causa de la gran separació entre els imants de les vies, els imants del tren troben una sortida i tendeixen a ser atrets per l'espai entremig dels productors magnètics de les vies.

Bàsicament, això es podria visualitzar com si en l'espai entremig hi hagués un petit imant que té una polaritat negativa. Aquest, produeix una petita atracció cap al tren, provocant així que freni una mica.

Aquest fregament és molt notori sobretot quan el tren ha d'accelerar a partir d'un estat de repòs. Quan agafa velocitat, ja no es nota tant.

La solució d'aquest problema era molt simple, havia de redissenyar les vies perquè tinguessin una menor separació entre imants.

A més, vaig decidir reduir també la separació entre els imants de propulsió. Per així estar segur que els solenoides tinguessin prou força per moure el tren fins al següent imant.

Aquest canvi va provocar que la llargada de les vies es reduís de 79 a 51 cm.



Figura 56. Peces de la via



Figura 57. Nou model de via

Després de solucionar aquest problema, tocava mirar el tema del fregament.

En el vídeo a continuació es pot veure com el tren toca les vies. No només això, sinó que la seva estabilitat era molt poc consistent.

[Vídeo]<https://drive.google.com/file/d/1jTLQctPA43NowxeRwmLrdnZUwEa0DDkO/vi>
[ew?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1jTLQctPA43NowxeRwmLrdnZUwEa0DDkO/view?usp=sharing)



Figura 58. Suport fet de Lego. Font: Pròpia

La idea que em va venir el cap va ser la de construir un suport que estigués fixat al tren i negués el moviment

dreta-esquerra del vehicle. Per evitar el fregament, els suport estaria fet amb rodes que es guiarien per les parets exteriors de les vies.

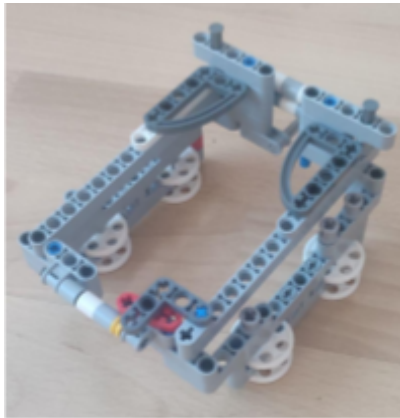
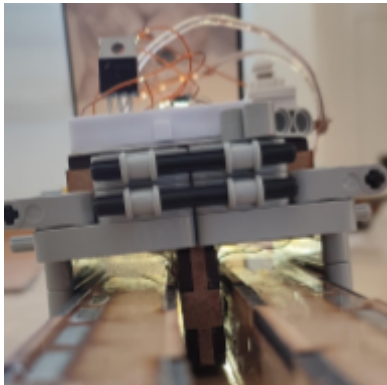


Figura 59. Suport fet de Lego. Font: pròpia

Com que no tenia gaire material, vaig decidir fer el suport amb peces de Lego. Cosa que realment em va facilitar molt la construcció, ja que podia muntar i desmuntar a voluntat.

Com es pot veure en la imatge següent, ja no havia contacte entre el tren i les vies. A més, en el vídeo es pot veure com el model circulava amb molt poca resistència, sobretot si es compara amb el vídeo on el tren circula sense suport.



Font 60. Tren amb el suport. Font: pròpia

[Vídeo]https://drive.google.com/file/d/1jvl-vL5_zfv8ZUeZLbeGTVsr5A8AFCKe/view?usp=sharing

3.4.4.3. Solució 3: canvi de sensor

Aquest va ser una petita modificació que vaig fer en el final del projecte. Fins ara estava utilitzant un sensor infraroig per detectar línies negres i d'aquesta forma ubicar el tren entre les vies. El problema d'aquest mètode és la poca fiabilitat dels valors rebuts pel sensor. Aquest, es veu molt influenciat pel canvi de llum, el seu angle i la tonalitat del negre a detectar. I, tenint en compte que es necessita una gran precisió per fer funcionar el tren, no em podia permetre aquestes variables.

Buscant exemples d'altres persones, vaig trobar una peça que era molt usada en aquestes situacions. El sensor en qüestió és un transistor d'efecte *hall*, que és capaç de detectar camps magnètics de forma molt precisa.

Tot i ser un transistor, té un funcionament molt semblant a un sensor i se'l pot connectar de la mateixa manera que l'infraroig.

Perquè funcioni, és molt important la seva posició. Aquest sensor detecta un imant al passar just per sobre d'ell. És per això que el valor rebut pel transistor serà positiu

(1) només durant els 15 mm que té l'imant de llargada. La distància entre imants també és de 15 mm.

Per fer propulsar el tren, anteriorment ja he explicat que necessito activar els solenoides quan estan en el punt entremig de dos imants, i s'han de mantenir fins arribar al centre d'un d'ells. Aquesta distància també és de 15 mm.

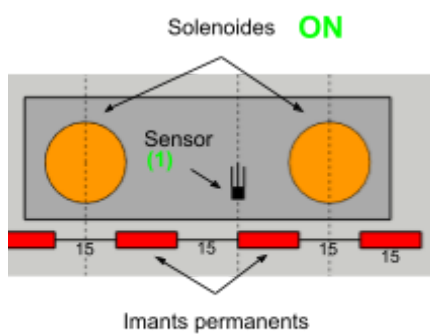


Figura 61. Esquema del funcionament de la propulsió. Font: pròpia

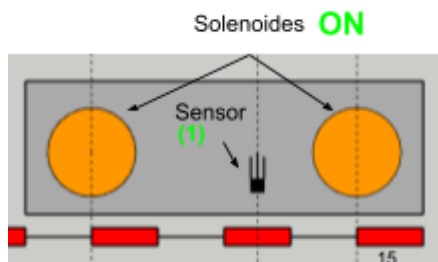


Figura 62. Esquema del funcionament de la propulsió. Font: pròpia

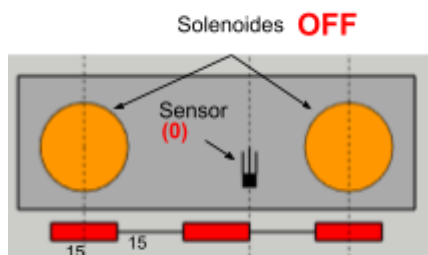


Figura 63. Esquema del funcionament de la propulsió. Font: pròpia

Tal com es veu a la imatge, quan el transistor detecta l'imant, envia un senyal als electroimants perquè s'activin. Aquest senyal durarà fins que el sensor surti de l'imant.

Com es pot veure, aquest disseny s'adapta perfectament a les mides del tren. Comparat amb el mètode anterior, aquest sistema permet una precisió superior i, a més, no és necessari crear ni afegir res components externs. Com era el cas de les línies negres.

3.4.5. Últimes observacions i modificacions

Amb els canvis realitzats la cosa pintava molt millor. En aplicar les diferents solucions plantejades al model final, semblava que totes encaixaven. Tot funcionava com hauria de funcionar, però el tren seguí sense avançar: la resistència s'havia reduït al mínim, el sensor tenia una precisió mil·limètrica i el circuit anava bé.

Fent proves vaig veure que realment tot funcionava, els electroimants s'activaven i desactivaven quan tocava. Però la força magnètica no era suficient per moure el tren.

Això es devia a dos factors: el model pesava massa o els electroimants no emetien prou força.

El tema augmentar la força magnètica ja s'havia tocat anteriorment. Tal com indica la fórmula de camp magnètic en solenoides, es pot modificar el camp alterant el nombre d'espines o la intensitat. En aquest cas, modificar la mida dels electroimants hauria complicat molt la reestructuració tant del tren com de les vies. Pel que la idea seria augmentar la intensitat.

El problema és que això xoca amb l'altre punt, el del pes. La gran majoria de la càrrega en el model provenia de les bateries. Això era així, ja que com més gran la font d'alimentació, més energia dona.

La dificultat aquí estava a augmentar la intensitat sense modificar el valor del pes.

Per trobar una solució, primerament era necessari calcular de forma precisa la quantitat d'ampers necessària per funcionar el tren.

Per fer això vaig fer ús d'un transformador, gràcies, el qual podia canviar a voluntat el valor de la intensitat.

A partir d'aquí vaig poder observar que la mínima quantitat d'ampers que necessitava era uns 50A.

Com que no m'era possible aconseguir una bateria d'aquestes dimensions que fos prou petita perquè es pogués col·locar sobre el tren. Vaig decidir fer un estil de tren més semblant a un tramvia i posar la bateria a fora del vagó, en aquest cas vaig utilitzar el mateix transformador. D'aquesta manera, no només augmenta la força dels electroimants, sinó que també es redueix el pes que provocava les piles.

3.5. Resultat final

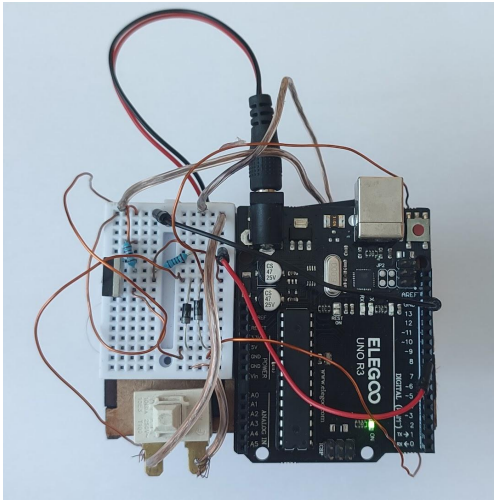


Figura 64. Model final. Font: pròpia

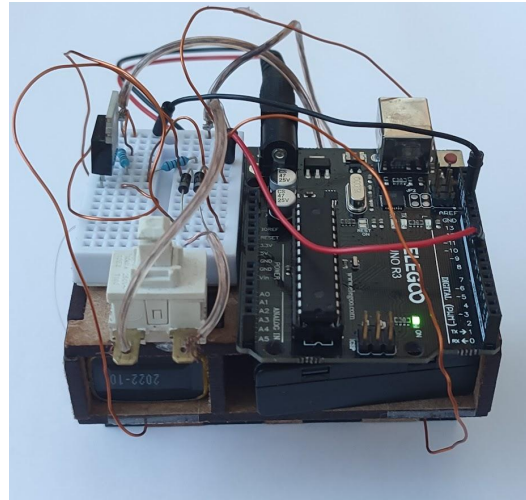


Figura 65. Model final. Font: pròpia

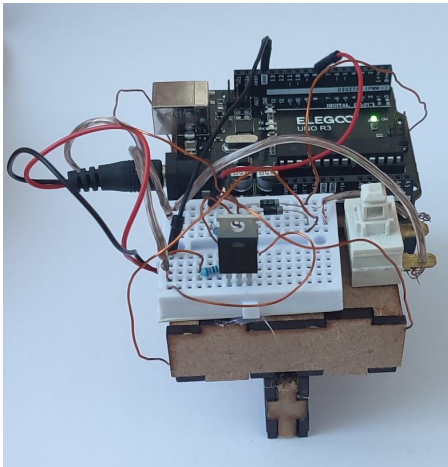


Figura 66. Model final. Font: pròpia

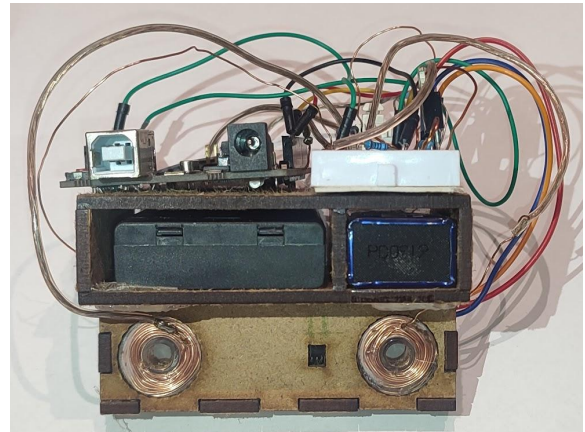


Figura 67. Model final. Font: pròpia

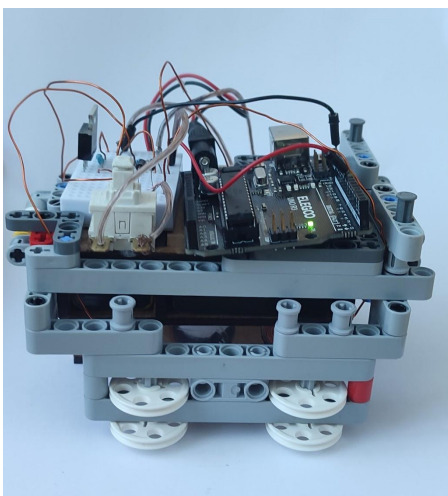


Figura 68. Model final amb el suport. Font: pròpia

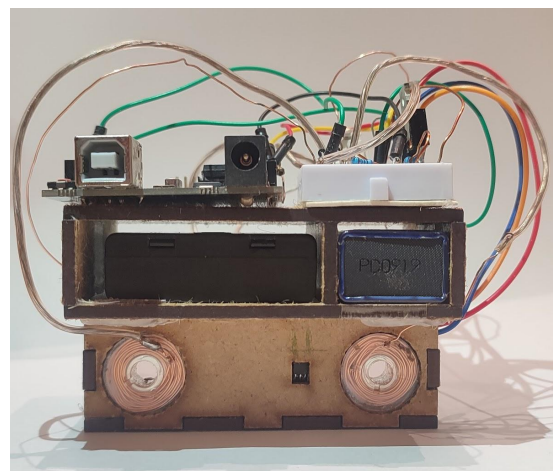


Figura 69. Model final. Font: pròpia

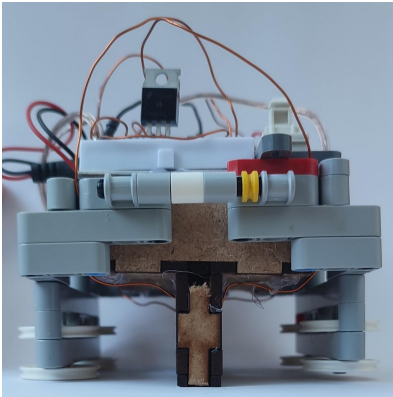


Figura 70. Model final amb el suport. Font: pròpia

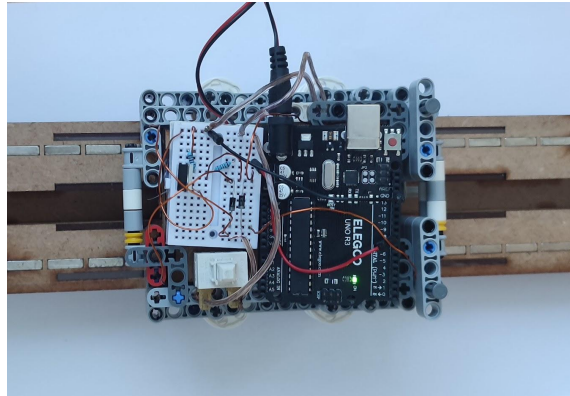


Figura 71. Model final sobre les vies. Font: pròpia

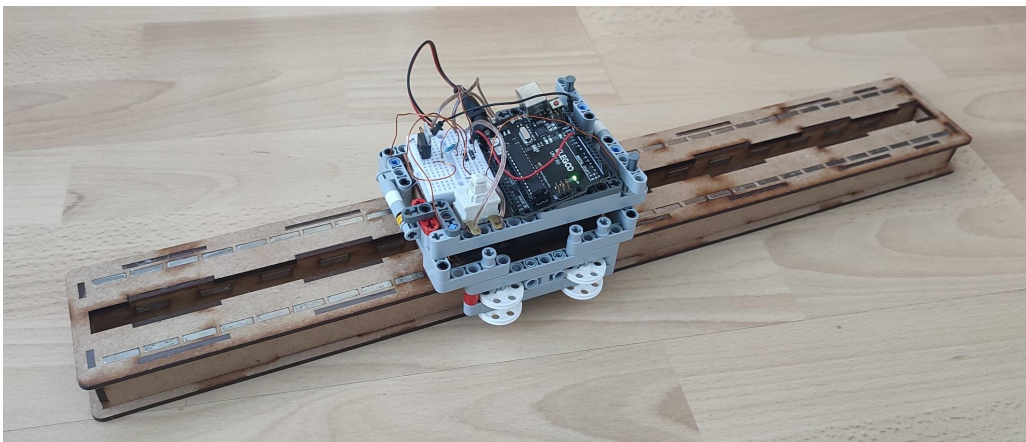


Figura 72. Model final sobre les vies. Font: pròpia

[Vídeo]: <https://youtu.be/QLd-abGv9tc>

3.6. Pressupost

Component	Unitats	Preu per unitat	Preu
Imants	100	0,54 €	54 €
Piles	2	2 €	4 €
Placa Arduino	1	19,50 €	19,50 €
Transistor <i>hall</i>	1	0,65 €	0,65 €
MOSFET	1	0,91 €	0,91€
Total:			79,06 €

Altres components com els cables, resistències, fustes i coure no els he afegit en el pressupost perquè, o bé ja els tenia per casa, o els he aconseguit de forma gratuïta.

4. Conclusions

Durant el procés d'aquest projecte, he pogut comprovar les diferents adversitats a l'hora de treballar amb imants. Tot i això, el camí ha sigut satisfactori i "s'ha pogut arribar a la finalitat desitjada".

Abans de començar aquest treball, em vaig posar uns propòsits a seguir. Aquest estan dividits entre teòrics i pràctics i són els següents:

- Entendre com funcionen els imants
- Relacionar el moviment de corrent amb un electroimant
- Entendre les fórmules i aplicar-les de forma pràctica
- Trobar diferents funcions del magnetisme
- Explicar l'enginyeria dintre els trens Maglev
- Trobar la seva funcionalitat comparada amb els mitjans de transport convencionals

Els objectius pràctics són:

- Crear un electroimant
- Produir levitació
- Construir un prototip de tren Maglev
- Crear un circuit de vies magnètiques
- Fer que el prototip circuli per les vies
- Controlar la velocitat del tren
- Crear una sala de control d'on es pugui controlar tots els paràmetres del tren (velocitat, stops, direcció...)
- Controlar els paràmetres del tren amb una aplicació del mòbil via bluetooth

Per la part teòrica, trobo que he complert totes les metes previstes.

He explicat el funcionament intern dels imants permanents. Els quals obtenen els seus camps magnètics a partir del moviment o "spin" dels seus electrons. Aquest, segueixen una sèrie de condicions per evitar que les diferents forces magnètiques

de l'element es cancel·lin entre ells. Aquestes condicions no es troben fàcilment, per això es troben molt pocs elements amb propietats magnètiques.

A part dels permanents, també he comentat sobre el no permanents, també coneguts com a solenoides i electroimants. Aquest són creats amplificant el camp magnètic que crea el pas del corrent. Per fer això, hi ha diferents mètodes, com poden ser el de donar voltes al cable que dona pas a l'energia, augmentar la intensitat o posar un objecte ferromagnètic que amplifiqui el senyal.

Per fer aquest augment de força en els camps. He utilitzat una sèrie de fórmules que m'han ajudat. Aquestes, també les he aplicat en el treball pràctic. El qual també era un objectiu.

Per trobar diferents funcions dels objectes magnètics, em vaig trobar inevitablement amb l'ús en què està principalment centrat aquest projecte, els trens Maglev. D'ells, he explicat el seu funcionament i he comparat els diferents mètodes que existeixen per fer moure aquest vehicle. També, i per acabar amb l'última meta, vaig detallar els avantatges i inconvenients que presenta aquest mètode de transport comparat amb els tradicionals. On he arribat a la conclusió de què, tot i que presenta molts beneficis, és una inversió. Això a causa del seu elevat preu de construcció. Així i tot, totes les seves aportacions com la gran velocitat, la reducció d'energia ampliada i poca contaminació que provoca; són motius suficients per a seguir amb la seva investigació per arribar a trobar una tecnologia que faci més factible el seu ús.

Tot i haver complert la majoria d'objectius pràctics, no els he pogut acabar tots.

La cosa a començat molt bé amb la creació d'un electroimant. No només un, sinó varis. El qual m'ha permès comparar-los entre si i poder entendre més les seves característiques.

La levitació magnètica tampoc ha sigut cap problema, ja que s'ha pogut realitzar amb bastant facilitat.

En el procés, he creat diferents models de trens Maglev. Cada un d'ells millor que l'anterior. I això és una cosa que he posat en els objectius i que dono molta importància, la constant millora. M'he trobat amb molts problemes durant el camí, però sempre han resultat en una optimització del tren, vies, circuit...

Així i tot, m'hauria agradat poder fer més millores. En els propòsits apareixen conceptes com controlar la velocitat, crear una sala de control i digitalitzar aquesta sala. Tot això són idees que vaig tenir en el principi i que no he pogut realitzar per temps, cosa que és culpa la meua. Jo crec que tots aquests objectius són possibles, el problema és que no em vaig organitzar prou bé el temps. És possible que els acabin fent més endavant per mi mateix.

Tot i això, he complert amb l'objectiu més important, que era el de construir un model de tren Maglev funcional. Aquest era el punt principal d'aquest projecte.

A causa de la constant millora dels models, el resultat final té un aspecte molt diferent del que jo tenia al cap al principi. Les meves primeres idees tenien una forma semblant a la d'un tren bala real. Per culpa del poc espai del tren, vaig haver de prioritzar la funcionalitat a l'estètica.

Durant aquest treball, m'he mantingut bastant ferm a la meua metodologia inicial de fer-ho tot al meu estil. Però a causa de la complicació de certs punts del projecte i la meua manca d'experiència en alguns temes. M'he vist obligat a demanar ajuda a experts i buscar exemples d'altres persones. Aquest és el cas del circuit, el qual vaig tenir moltíssims problemes i gràcies a l'ajuda que em van oferir, vaig poder continuar.

Tot i això, no trobo que sigui res negatiu. El contrari, aquesta és una forma d'avançar en el coneixement d'un mateix.

Si és veritat que, fent les coses amb proves i errors, com a mi m'agrada, trobo que hi he dedicat més temps i materials. Tot i que en el treball no es vegi, he fet més de 20 sessions d'utilitzar el làser. He tallat molts models que tan sols tenien pocs centímetres de diferència entre els uns i els altres.

Així i tot, crec que això m'ha ajudat molt, sobretot en el principi. Abans de començar el treball, jo no tenia cap experiència amb imants ni tallar amb làsers. Fent proves i errors m'ha permès obtenir molta experiència, la qual he aplicat en els models finals.

En conclusió, tot i que no he pogut acatar tots els objectius proposats, si he aconseguit complir amb l'objectiu principal de construir el tren Maglev.

5. Bibliografia i Webgrafia

Cassandra, M. (2020, novembre 16). How does Hyperloop work?. *Alphr*.

<https://www.alphr.com/technology/1006815/how-hyperloop-works-launch-magnetic-levitation/#:~:text=EMS%20uses%20electronically%20controlled%20electromagnets,t hat%20makes%20the%20carriages%20levitate>

Centro Bioenergético. (31 de març de 2022). *El magnetismo*.

<http://centrobioenergetica.squarespace.com/magnetismo/2012/4/15/el-magnetismo.html#:~:text=Los%20electrones%20son%20el%20origen,cualquiera%20de%20dos%20direcciones%20puestas>

Concepto. (21 de març de 2022). *Campo magnético*.

<https://concepto.de/campo-magnetico/>

Cool Stuff. (2020, novembre 2). *3D Printed Electromagnetic Train (Part 1 Prototype)*

[Vídeo]. <https://www.youtube.com/watch?v=jPTEnfChvW0&list=LL&index=3>

CPI. (15 d'abril de 2022). *Los 8 beneficios de preferir el tren como modo de transporte ferroviario*.

<https://www.infraestructurapublica.cl/los-8-beneficios-de-preferir-el-tren-como-modo-de-transporte-ferroviario/>

Date un Voltio. (2016, maig 11). *¿Qué es un superconductor?* [Vídeo].

<https://www.youtube.com/watch?v=t9JF8LAlcxA>

Electroimán. (12 d'abril de 2022). En *Wikipedia*.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Electroim%C3%A1n>

Electromagnet. (12 d'abril de 2022). En *Wikipedia*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnet>

Electromagnetism. (2000). En *Britannica*. Recuperat el 19 de gener de 2022 de <https://www.britannica.com/science/electromagnetism/Coulombs-law>

Elektromagnet. (12 d'abril de 2022). En *Wikipedia*.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnet>

Emt.blogspot. (17 d'abril de 2022). *Maglev suspension systems*.
<http://emt18.blogspot.com/2008/10/maglev-suspension-systems.html>

Energy. (15 d'abril de 2022). *How maglev works*.
<https://www.energy.gov/articles/how-maglev-works>

Fundación Endesa. (18 de gener de 2022). *Electromagnetismo*.
<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-el-electromagnetismo>

George Stephenson. (15 d'abril de 2022). En *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/George_Stephenson

HyperPhysics. (29 de juliol de 2022). *Magnetic Field Strength*.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/magfield.html>

Inglot, M. (2019, març 20). *Control a Solenoid with an Arduino (Tutorial)* [Vídeo].
<https://www.youtube.com/watch?v=nwVRMU9grSI&list=LL&index=2&t=933s>

Ima Magnets. (6 d'abril de 2022). *Diferencias entre materiales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos*.
<https://imamagnets.com/blog/diferencias-entre-materiales-ferromagneticos-paramagnetico-y-diamagneticos/>

Ima Magnets. (6 d'abril de 2022). *¿Qué es el ferromagnetismo?*.
<https://imamagnets.com/blog/que-es-el-ferromagnetismo/>

Ima Magnets. (6 d'abril de 2022). *¿Qué es el paramagnetismo?*.

<https://imamagnets.com/blog/que-es-el-paramagnetismo/>

JavifonsCCH. (2020, abril 29). *Magnetismo (Parte 5). Comprende las ecuaciones del electroimán ¡FÁCIL!* [Vídeo].

<https://www.youtube.com/watch?v=5Wk5mg-pFJM>

Magnetic levitation. (19 de gener de 2022). En *Wikipedia*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_levitation

Maglev. (15 d'abril de 2022). En *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev>

Mundo Primaria. (15 d'abril de 2022). *La historia del ferrocarril*.

<https://www.mundoprimaria.com/lecturas-para-ninos-primaria/historia-ferrocarril#:~:text=El%20primer%20tren%20se%20fabric%C3%B3.en%201804%20por%20Richard%20Trevithich>

Northeast Maglev. (15 d'abril de 2022). *Innovación de transportación: història maglev en el mundo*.

<https://northeastmaglev.com/2019/07/16/innovacion-de-transportacion-historia-maglev-en-el-mundo/?lang=es>

Northeast Maglev. (17 d'abril de 2022). *Beneficios del entorno*.

<https://northeastmaglev.com/beneficios-del-entorno/?lang=es#1527779803737-34904123-57a3>

Pérez, E. (2021, juliol 22). El nuevo Maglev hace su debut en China. *Xataka*.

<https://www.xataka.com/vehiculos/nuevo-maglev-hace-su-debut-china-tren-rapido-mundo-levitacion-magnetica-capaz-alcanzar-600-km-h>

Reich, H. (2013, setembre 27). *MAGNETS: How do they work?*. [Vídeo].

<https://www.youtube.com/watch?v=hFAOXdXZ5TM>

Regulator Cetrisa. (8 de gener de 2022). *Principios del magnetismo*.
<https://www.regulator-cetrisa.com/noticias/principios-del-magnetismo/>

Richard Trevithick. (15 d'abril de 2022). En *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Trevithick

Stanton, T. (2021, octubre 21). *Electromagnetic Rail Launcher* [Vídeo].
<https://www.youtube.com/watch?v=4TGb3MsSjE&list=LL&index=7&t=273s>

The B1M. (2018, juliol 11). Hyperloop Explained. [Vídeo].
<https://www.youtube.com/watch?v=zcikLQZI5wQ>

Transportation. (2000). En *Britannica*. Recuperat el 19 de gener de 2022 de
<https://www.britannica.com/technology/transportation-technology>

Train. (15 d'abril de 2022). En *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Train>

Tren de levitación magnética. (15 d'abril de 2022). En *Wikipedia*.
https://es.wikipedia.org/wiki/Tren_de_levitaci%C3%B3n_magn%C3%A9tica

Torre, F. (2013). *Unidad 1: Introducción al magnetismo*.
<https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/16744/21502-19%20ACCIONAMIEN%20TOS%20ELECTROMECC%81NICOS%20Introducci%C3%B3n%20al%20magnetismo.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

UCLA. (2013, novembre 8). *Paramagnetism and Diamagnetism*. [Vídeo].
<https://www.youtube.com/watch?v=u36QpPvEh2c>

Zitzewitz, P. Haase, D. Harper, P. Kilgo, M. (2015). *Physics: principles & problems*. McGraw-Hill Education.