

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Elèctrica

Títol: Estudi tècnic i energètic dels sistemes emprats en trens de levitació magnètica

Document: 1. Memòria

Alumne: Neus Ferrer Torres

Tutor: Joaquim Armengol Llobet

Departament: Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica

Àrea: Enginyeria de Sistemes i Automàtica

Convocatòria (mes/any): juny / 2020

ÍNDIX

1 INTRODUCCIÓ	5
1.1 Antecedents.....	5
1.2 Objecte	5
1.3 Especificacions i abast.....	6
2 MAGNETISME.....	7
2.1 Conceptes del magnetisme	7
2.1.1 Permeabilitat magnètica.....	9
2.1.2 Reluctància magnètica.....	11
2.1.3 Romanència magnètica i pèrdues per histèresi.....	11
2.1.4 Pèrdues per Foucault.....	12
2.2 Classificació dels materials magnètics	13
2.2.1 Materials diamagnètics	14
2.2.2 Materials paramagnètics	15
2.2.3 Materials ferromagnètics.....	16
2.2.4 Materials ntiferromagnètics	18
2.2.5 Materials ferrimagnètics	18
2.2.6 Materials superdiamagnetics o superconductors.....	19
2.2.7 Materials superparamagnetics	23
3 SISTEMES DE SUSPENSÍO O LEVITACÍO MAGNÈTICA	24
3.1 Levitació per atracció.....	24
3.2 Levitació per repulsió.....	24
3.3 Levitació per efecte Meissner o superconductivitat	25
4 FORÇA CREADA PER UN ELECTROIMANT	26
4.1 Transferència d'energia elèctrica a magnètica.....	26
4.2 Càlcul específic en el prototip de levitació per atracció	32
5 MATRIU HALBACH	34
5.1 Matrius Halbach lineals.....	34

5.2 Cilindres Halbach.....	35
5.3 Esferes Halbach	36
6 ESTABILITAT EN LA LEVITACIÓ AMB IMANTS PERMANENTS	37
6.1 Plantejament.....	37
6.2 Teorema de Earnshaw.....	37
6.3 Excepcions del teorema de Earnshaw	38
6.3.1 Teoria quàntica	38
6.3.2 Diamagnetisme	39
6.3.3 Efecte Meissner	39
6.3.4 Rotació	39
6.3.5 Realimentació	40
7 SISTEMES DE LEVITACIÓ	42
7.1 Suspensió electromagnètica EMS	42
7.1.1 Suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia integrada LGI	44
7.1.2 Suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia separada LGS.....	45
7.2 Suspensió electrodinàmica EDS.....	46
7.2.1 Suspensió electrodinàmica EDS amb electroimants superconductors SCM	47
7.2.2 Suspensió electrodinàmica EDS amb imants permanents PD o Inductrack	48
7.3 Suspensió electromagnètica híbrida HEMS	50
8 SISTEMES DE PROPULSIÓ	51
8.1 Motor lineal d'inducció o asíncron LIM	51
8.1.1 Motor lineal d'inducció o asíncron LIM amb primari curt SP	52
8.1.2 Motor lineal d'inducció o asíncron LIM amb primari llarg LP.....	53
8.2 Motor lineal síncron LSM	53
9 SISTEMA DE GUIA	56
9.1 Força magnètica de repulsió MRF	56
9.2 Força magnètica d'atracció MAF	57
9.3 Càlcul de la força de guia	58
10 SISTEMA DE TRANSFERÈNCIA D'ENERGIA AL TREN	60

10.1 Pantògraf P	60
10.2 Generador lineal LG.....	60
11 COMPARATIVA DE LES TÈCNiques DELS TRENS DE LEVITACIÓ MAGNÈTICA	61
11.1 Tècniques dels trens de levitació magnètica.....	61
11.2 Comparativa entre els diferents sistemes de levitació EMS i EDS	63
11.3 Classificació dels diferents models de trens Magelv	64
12 ANÀLISIS COMPARATIU DELS TRANSPORTS TRADICIONALS I TRENS MAGLEV ..	65
12.1 Bases de comparació	65
12.2 Consum en funció de la tipologia dels trens.....	66
12.3 Consum en funció de la tipologia de diversos mitjans de transport	69
12.4 Resultats de la comparativa.....	71
13 LEVITADOR PER ATRACCIÓ	74
13.1 Font d'alimentació externa i estabilitzador	76
13.2 Circuit de potència	77
13.3 Circuit de control.....	79
13.3.1 Implementació del control de tipus proporcional.....	80
13.3.2 Implementació del control de tipus derivatiu.....	83
13.4 Posada en marxa, assajos i mesures	86
13.5 Resultats.....	90
14 LEVITADOR PER REPULSIÓ	92
14.1 Font d'alimentació externa i estabilitzador	96
14.2 Circuit de potència	97
14.3 Circuit de control de l'eix vertical.....	97
14.4 Circuit de control dels eixos del pla.....	99
14.4.1 Sense control de tipus proporcional ni derivatiu	99
14.4.2 Implementació del control de tipus proporcional i derivatiu	101
14.5 Posada en marxa, assajos i mesures	102
14.6 Resultats.....	107
15 RESUM DEL PRESSUPOST.....	109

16 CONCLUSIONS	110
17 RELACIÓ DOCUMENTS	113
18 BIBLIOGRAFIA	114
19 GLOSSARI	116

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

L'esgotament d'energies no renovables, la contaminació mediambiental i la necessitat de mobilitat social, requereix la reducció de vehicles privats mitjançant estratègies d'eficiència en el transport públic.

Des de la seva invenció, un exponent dels mitjans de transport més eficients ha estat el tren. Per augmentar-ne la velocitat tot mantenint el rendiment, darrerament han aparegut trens de levitació magnètica, anomenats trens Maglev, que permeten el desplaçament amb poques pèrdues, ja que les úniques forces de fricció a vèncer són les aerodinàmiques tant en el frontal del tren, com sobretot en les seves parets laterals, provocades per la viscositat de l'aire.

Els Maglev poden assolir velocitats comparables a les dels avions amb molt menys consum energètic i sense cremar combustibles sòlids. A més, requereixen baixes despeses de manteniment ja que no desgasten per fricció ni rodes, ni vies, ni mecanismes de transmissió; minimitzen el soroll i el perill de descarrilar però, això sí, requereixen una inversió elevada en la seva infraestructura.

La complexitat en l'estudi de les seves tecnologies recau en el fet que cada model és diferent ja que utilitza una combinació específica dels sistemes utilitzats en la levitació, propulsió, centratge a la guia, sumat al fet que és un terreny en plena expansió on les tecnologies són de caire reservat.

1.2 Objecte

L'objecte del projecte és principalment l'estudi de les tècniques de levitació i la seva compatibilitat amb la propulsió i centratge dels Maglev.

També s'elabora una comparativa dels consums energètics entre els principals transports tradicionals.

Finalment es realitza i s'analitzen dos prototips de levitació que utilitzin tècniques similars. Es parteix del fet de mantenir suspès un objecte a l'aire no li provoca cap increment d'energia

potencial i, per tant, requereix una aportació mínima d'energia als electroimants que només es transforma en pèrdues. Cal remarcar que pràcticament la totalitat del consum energètic dels Maglev recau en la seva propulsió.

1.3 Especificacions i abast

Per tant, en la primera part del projecte es realitza un estudi previ dels materials magnètics, de l'electromagnetisme, del seu gran rendiment en la transmissió energètica, de les seves pèrdues i de les forces resultants que un electroimant pot aplicar a un material ferromagnètic.

També s'inclou un estudi comparatiu de totes les tècniques i els consums energètics de diferents Maglev, tant els ja implementats com els que estan en fase de proves, i es comparen els resultats d'aquests consums amb els dels altres mitjans de transport freqüents i n'extreu una sèrie de conclusions.

A més, es realitzaran prototips de diversos sistemes de levitació emprats en els trens Maglev, amb els respectius estudis comparatius de potència consumida i d'estabilitat en funció de perturbacions i canvis de massa.

2 MAGNETISME

Es té constància que ja al 500aC es va observar com el ferro era atret per un determinat tipus de pedra amb composició Fe_3O_4 que es va trobar a Magnèsia, per això aquest imant natural és va anomenar magnetita. A l'any 1000dC a Xina es començava a utilitzar una pedra imant com a brúixola i a l'any 1200 a Europa es van començar a utilitzar les brúixoles per la navegació. El primer científic que va estudiar els imants va ser en William Gilbert, al 1600, qui va deduir que la Terra tenia magnetisme. Al 1875 es van desenvolupar les teories electromagnètiques de Maxwell, amb l'ajuda de Charles Coulomb, Poisson, Oersted, Ampere, Henry, Faraday, Weber i Gauss.

Gràcies al avanç de la mecànica quàntica, a la dècada del 1920 va ser possible donar explicacions coherents al fenòmens magnètics dels materials.

2.1 Conceptes del magnetisme

La matèria consta d'àtoms, els quals contenen electrons que giren contínuament al voltant del seu nucli. Com que els electrons són càrregues en moviment, són afectats pels camps magnètics, orientant-se en funció del flux extern.

Quan el sentit de rotació, el número d'spin, d'una elevada quantitat d'electrons coincideix i, a més, els seus eixos de rotació són paral·lels, aquest material es magnetitza. Evidentment, si es divideix un imant per la meitat, cadascuna de les parts resultats es converteix en un nou imant ja que tots els dominis magnètics del material es comporten com a petits imants.

Es va descobrir que no només els imants tenen efectes magnètics sinó que un corrent elèctric, en passar per un conductor, crea al seu voltant un camp magnètic. I no només això, sinó que es va observar dos fenòmens naturals més, que donen idea de la conversió reversible i, per tant, d'elevat rendiment, entre energia elèctrica, magnètica i mecànica: al fer passar un corrent elèctric per dins d'un camp magnètic sorgien unes forces; i el moviment d'un conductor dins d'un camp magnètic crea una força electromotriu capaç de provocar un corrent elèctric.

Per conveni, es representa aquest magnetisme amb línies de força, anomenades flux magnètic i amb la direcció de nord a sud per fora l'imant i de sud a nord per dins.

Com es veu a la Figura 1, en un material desmagnetitzat, els dominis estan desordenats, de manera que els camps magnètics s'anul·len mútuament.

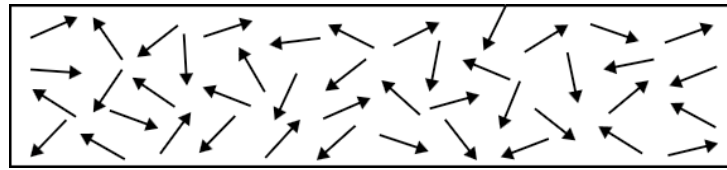


Figura 1. Material desmagnetitzat amb els dominis magnètics desordenats

Pel contrari, i com s'observa a la Figura 2, un material magnetitzat té els dominis magnètics ordenats, de manera que apunten cap a la mateixa direcció i els camps magnètics es sumen.

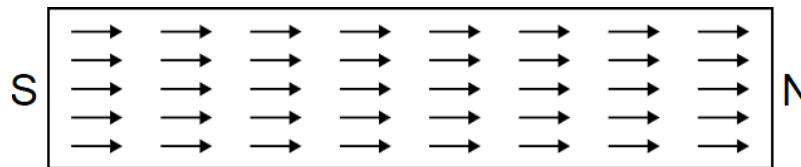


Figura 2. Material magnetitzat amb els dominis magnètics ordenats

Per tal de magnetitzar un material susceptible de ser-ho (paramagnètic) cal orientar els seus dominis magnètics o bé passant un imant per la superfície del material, o bé inserint el material a l'interior d'una bobina per on es fa passar un corrent elèctric. Per desmagnetitzar l'imant es pot escalfar, ja que d'aquesta manera els dominis vibraran i es desordenaran; es pot sotmetre a un camp magnètic que canviï ràpidament de polaritat; o bé es pot colpejar perquè els dominis perdin la seva orientació.

El camp magnètic d'un imant és l'espai del seu voltant on s'aprecien els efectes magnètics creats per l'imant.

El flux magnètic, Φ , vol representar el nombre de línies de força que hi ha en un circuit magnètic, que és el recorregut que fan les línies de força de la Figura 3.

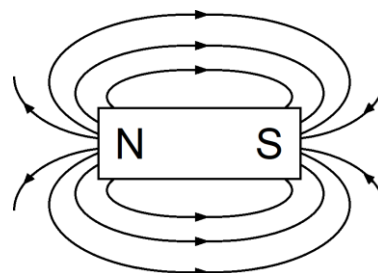


Figura 3. Línies del flux magnètic en un imant

La inducció magnètica o la densitat de flux magnètic, B , és la quantitat de línies de força que travessa una superfície perpendicular a elles, segons mostra l'Equació 1.

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{Eq. 1})$$

Si la superfície no es perpendicular, caldrà descomposar-la amb una part paral·lela i l'altre perpendicular, sent aquesta última la S de l'Equació 1. Així sempre es complirà la següent Equació 2.

$$\Phi = B \cdot S \quad (\text{Eq. 2})$$

2.1.1 Permeabilitat magnètica

La permeabilitat magnètica, μ , és la propietat d'un material de deixar passar línies de força a través seu, magnetitzant-se ell mateix per tal d'ajudar a que flueixin pel seu interior. Tal com es mostra a l'Equació 3, la permeabilitat magnètica relativa, μ_r , és la relació entre la permeabilitat d'un medi específic respecte la permeabilitat del buit, μ_0 , que és molt similar a la de l'aire i té un valor de $4\pi \cdot 10^{-7}$.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (\text{Eq. 3})$$

Per tant, un material amb una permeabilitat relativa inferior a la unitat, indica que es magnetitza amb més dificultat que el buit, per tant aquest material presenta una magnetització que s'oposa al camp que l'ha creat. Aquests materials s'anomenen diamagnètics. Pel contrari, un medi amb una permeabilitat magnètica relativa superior a la unitat indica que el material es magnetitza amb més facilitat que el buit, així que la magnetització es produeix en el mateix sentit que el camp que l'ha creat. Aquests materials s'anomenen paramagnètics i, si la permeabilitat relativa és molt elevada, ferromagnètics.

Així, un corrent elèctric crea un camp magnètic en base a la següent Equació 4, on H és l'excitació magnètica.

$$B = \mu \cdot H \quad (\text{Eq. 4})$$

L'excitació magnètica H és funció de la intensitat i d'altres diferents paràmetres depenent del sistema. A l'Equació 5 es mostra l'excitació magnètica en el cas d'un fil, on r és la distància fins al fil.

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (\text{Eq. 5})$$

L'excitació magnètica en una bobina es mostra a l'Equació 6, on R és el radi de la bobina i N és el número d'espines.

$$H = \frac{N \cdot I}{2 \cdot R} \quad (\text{Eq. 6})$$

L'excitació magnètica en un solenoide és la descrita en l'Equació 7, on N és el número d'espines i L la llargada del nucli magnètic del solenoide.

$$H = \frac{N \cdot I}{L} \quad (\text{Eq. 7})$$

La següent Equació 8 és la més utilitzada de totes ja que, en general, la llargada d'un circuit magnètic és superior al seu diàmetre i , per tant, la inducció magnètica queda de la següent manera.

$$B = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{L} \quad (\text{Eq. 8})$$

Però aquesta equació només és vàlida en circuits magnètics homogenis, fet que succeeix en molt poques ocasions, ja que tant un motor com un electroimant tenen, no només diferents seccions sinó un entreferro format per un altre material que és l'aire. En el cas del projecte, l'entreferro de l'imant és la distància que hi ha entre l'electroimant i l'objecte a atraure o repel·lir per tal de levitar. En aquests casos es treballa per reluctàncies per cada un dels diferents trams.

A més, la permeabilitat no és una constant, ja que arriba un moment en que pràcticament tots els electrons estan orientats, arribant a la seva inducció de saturació.

Aquest fet es pot apreciar al gràfic de magnetització d'un material de la Figura 4, el qual arriba a saturació magnètica amb 500A/m.

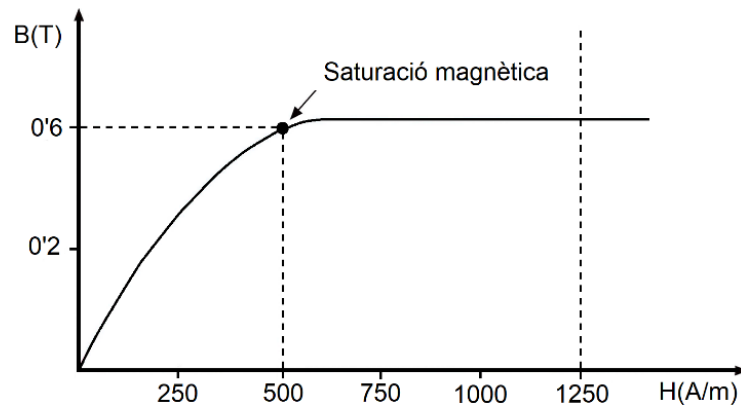


Figura 4. Corba de magnetització

2.1.2 Reluctància magnètica

La reluctància magnètica és la dificultat que ofereix un circuit magnètic per deixar passar el flux. És equivalent a la resistència d'un circuit elèctric i, per tant, és una constant que depèn de les característiques del tram magnètic en qüestió. Igual que la resistència és una constant, que relaciona la tensió i la intensitat en un circuit elèctric, la reluctància és una constant que relaciona la força magnetomotriu, f_{mm} , i el flux magnètic, tal com s'observa a l'Equació 9.

$$R = \frac{N \cdot I}{\Phi} = \frac{N \cdot I}{B \cdot S} = \frac{N \cdot I \cdot L}{N \cdot I \cdot \mu \cdot S} = \frac{L}{\mu \cdot S} \quad (\text{Eq. 9})$$

2.1.3 Romanència magnètica i pèrdues per histèresi

La romanència magnètica és la tendència a mantenir els dominis polaritzats en absència de camp magnètic extern. Si bé només per la construcció d'imants permanents es requereixen materials romanents, els quals mantenen pràcticament la totalitat de magnetització un cop anul·lat el camp magnètic del seu voltant, per tal de construir màquines elèctriques, electroimants, motors i generadors o transformadors, cal que el nucli magnètic del material utilitzat tingui una romanència mínima.

Els materials utilitzats per aquestes màquines són principalment el ferro dolç i la llauna d'acer al silici. El ferro amb carboni, l'acer, són materials inútils per construir màquines elèctriques, ja que la seva romanència només pot provocar pèrdues i escalfor. En canvi, el ferro dolç, que

no és més que ferro quasi absent de carboni, té una romanència mínima, i encara més aliatges com el ferro al silici, del qual es construeixen la major part de xapa per màquines elèctriques.

A la Figura 5 podem veure la reacció d'un material al sotmetre's a una intensitat magnètica variable. La tangent de la gràfica, en qualsevol punt, dóna la seva permeabilitat. Es pot observar que la permeabilitat no és constant, ja que si ho fos aquesta corba seria una recta que passa pel punt 0,0. El punt 2 s'acosta a la inducció de saturació i sol ser el punt de treball màxim de la xapa magnètica. Al punt 3 indica el magnetisme romanent del material en absència de camp magnètic extern, i es pretén que sigui el més baix possible. El punt 4 representa el camp magnètic invers necessari per desmagnetitzar tot el nucli i que cal generar amb una intensitat magnètica, anomenada coercitiva. Aquesta gràfica és simètrica, resultat d'aplicar un camp magnètic altern.

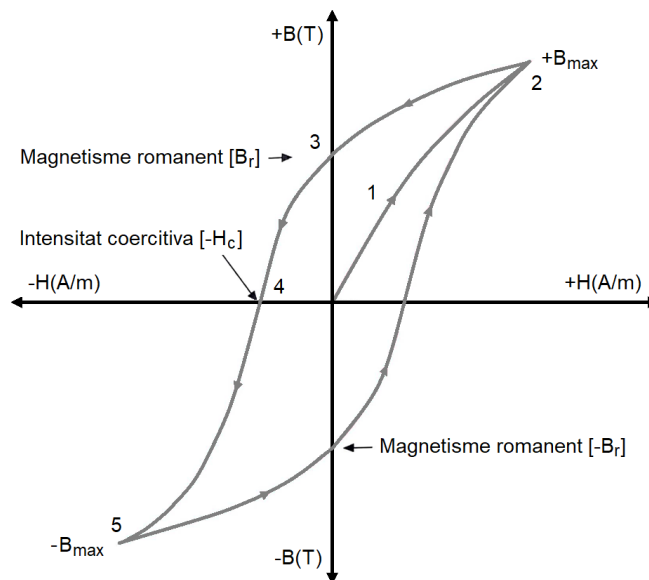


Figura 5. Cicle d'Histerèsi

L'àrea que descriu la gràfica es transforma en pèrdues per Histèresi. I és tant major com més romanència tingui el material o com més elevada sigui la freqüència de la intensitat magnètica que la genera. A altes freqüències, la xapa al silici no és suficient com per evitar que aquesta àrea creï unes pèrdues relatives molt elevades i cal utilitzar materials que, encara que no tinguin una permeabilitat (B/H) tant elevada, tingui una romanència molt més baixa.

2.1.4 Pèrdues per Foucault

A més de les pèrdues per Histèresis, explicades anteriorment, a l'hora de treballar amb freqüències alternes, com per exemple a l'hora de fer levitar un objecte activant i desactivant

un electroimant de forma contínua, apareixen les pèrdues per Foucault. Aquestes pèrdues són degudes a que els nuclis magnètics no són només bons conductors de les línies de força sinó que també ho són, inevitablement, de l'electricitat. Com es coneix, no només quan un conductor es mou dins d'un camp magnètic estàtic, sinó que també quan un conductor està quiet dins d'un camp magnètic variable, s'indueix una força electromotriu de valor estipulat per la llei de Faraday-Lenz, que es mostra a l'Equació 10.

$$F_{em} = - N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Eq. 10})$$

Si aquest conductor forma un determinat circuit elèctric, circula pel mateix unes intensitats determinades per la mateixa llei d'Ohm i que creen un camp magnètic que s'oposa al que l'ha creat. Si no és un cable elèctric, sinó que és una massa ferromagnètica, aquesta massa genera infinits circuits elèctrics. Aquest fet provoca són uns corrents paràsits circulars perpendiculars al flux magnètic. I aquests corrents provoquen les conseqüents pèrdues per efecte Joule. Per intentar evitar el màxim aquest fenomen, qualsevol circuit magnètic sotmès a un flux variable, es lamina amb fines làmines envernissades amb un gruix mínim, de manera que es tallin aquests corrents paràsits de Foucault. Tot i així, tal com mostra la Figura 6, encara es generen els corrents paràsits de Foucault de forma circular però amb un diàmetre màxim igual al gruix de la xapa.

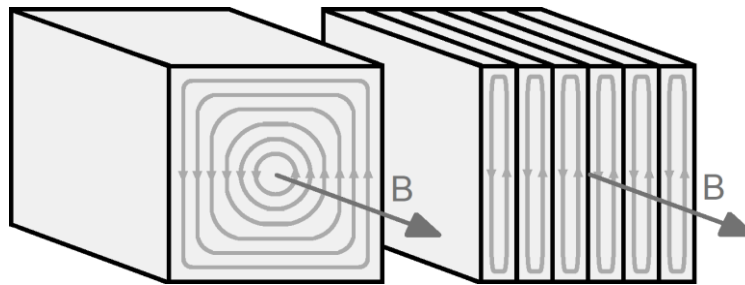


Figura 6. Corrents paràsits de Foucault en un material no laminat i un laminat

Com a conseqüència d'aquest fet, qualsevol sistema industrial de levitació de repulsió o d'atracció que requereixi de servosistema per mantenir amb equilibri estàtic el cos sotmès, requerirà d'electroimants amb un nucli de xapa magnètica.

2.2 Classificació dels materials magnètics

Els tres principals comportaments magnètics exhibits pels materials i els tres tipus principals de magnetisme són: diamagnetisme, paramagnetisme i ferromagnetisme.

2.2.1 Materials diamagnètics

La primera observació de la propietat diamagnètica va ser feta per en Faraday al 1846, al veure que un tros de bismut era repel·lit per qualsevol pol d'un imant.

Quan un material diamagnètic es col·loca a l'interior d'un camp magnètic, es magnetitza en sentit contrari al camp que l'envolta i, per tant, és menys conductor magnètic que l'aire, per tant una permeabilitat magnètica lleugerament més petita que la del buit, $\mu < \mu_0$ i $\mu_r < 1$, perquè dificulta el pas de les línies de força. Tal com es veu a la Figura 7, provoca que aquestes línies de força es separin i passin per l'aire o el buit. Per tant, la inducció magnètica al interior del material és inferior a la inducció al seu voltant.

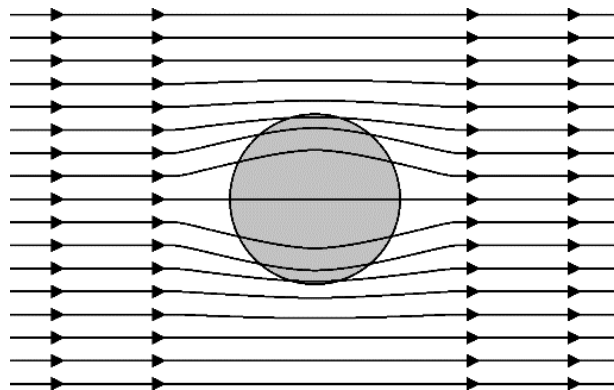


Figura 7. Comportament d'un material diamagnètic

El diamagnetisme és la resposta més lògica a un camp magnètic extern si es té en compte la llei de Lenz, ja que quan un àtom es sotmet a un camp magnètic extern, els moviments orbitals dels electrons tendeixen a canviar per oposar-se al camp que l'ha creat. Com a resultat, l'àtom és repel·lit des de qualsevol camp magnètic. Aquest fenomen es produeix en tots els materials però les magnituds que involucra són tant petites que qualsevol altre comportament magnètic que s'hi produeixi el farà imperceptible. Per tant, els materials diamagnètics són aquells que únicament presenten diamagnetisme.

Els materials diamagnètics són tots els elements no metàl·lics, excepte l'oxigen, com el bor, el carboni, el nitrogen, el fluor, el silici, el fòsfor, el sofre i el clor; alguns elements metàl·lics com el beril·li, el coure, el zinc, la plata, l'or, el mercuri, el plom i el més diamagnètic de tots a temperatura ambient, que és el bismut; tots els gasos nobles com l'heli, el neó, l'argó, el xenó; la majoria dels gasos diatòmics, a excepció del dioxigen, com el gas diatòmic hidrogen i el gas diatòmic de nitrogen; els sòlids iònics com el clorur de sodi i el clorur de potassi; la majoria de

substàncies amb enllaços covalents, en particular els compostos orgànics, i altres substàncies com l'aigua, l'amoníac, el quars, el grafit i la calcita.

Malauradament, encara que la permeabilitat sigui menor que la unitat, només ho és lleugerament i, per tant, la levitació per diamagnetisme és difícil d'aconseguir en materials a temperatura ambient ja que el seu efecte és extremadament dèbil. Només els materials superconductors tenen una permeabilitat força inferior a la unitat, permeten la levitació estable sense requerir energia, però per aconseguir-ho, requereixen una temperatura força propera al zero absolut i, per tant, s'ha d'aplicar molta energia per aconseguir-ho. Un superconductor és, en molts aspectes, com un àtom de mecànica quàntica però a escala macroscòpica i pot suportar corrents molt elevades.

2.2.2 Materials paramagnètics

Quan un material paramagnètic es col·loca a l'interior d'un camp magnètic, es magnetitza en el mateix sentit que el camp que l'envolta i, per tant, és més conductor magnètic que l'aire, així que té una permeabilitat magnètica lleugerament més elevada que la del buit, $\mu > \mu_0$ i $\mu_r > 1$, perquè facilita el pas de les línies de força. Tal com es veu a la Figura 8, provoca que línies de força, encara que hagin de fer una trajectòria més llarga, els sigui més fàcil passar per l'interior del material. Per tant, la inducció magnètica a l'interior del material és superior a la inducció al seu voltant. Quan s'aplica un camp magnètic extern, els àtoms o les molècules tendeixen a alinear-se en la seva direcció i el resultat és que es produeix magnetització.

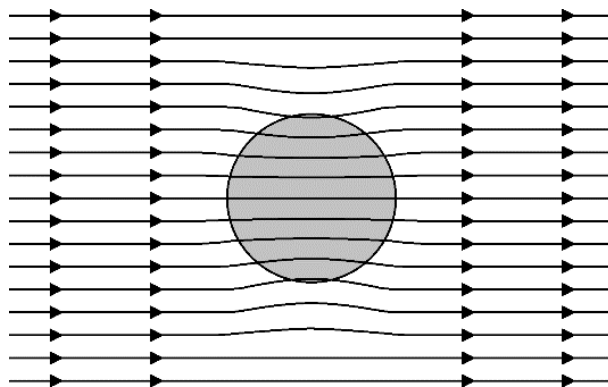


Figura 8. Comportament d'un material paramagnètic

En aquest cas les magnituds que involucren el paramagnetisme superen les del diamagnetisme, de manera que aquest últim efecte es pot negligir. Així que quan aquesta substància es sotmet a un camp magnètic extern hi ha, com sempre, el petit efecte

diamagnètic en els moviments orbitals dels electrons, que tendeixen a causar una repulsió, però també hi ha una tendència dels dipòls atòmics individuals a alinear-se amb el camp magnètic imposat, en comptes d'orientar-se al atzar.

Segons la llei de Lenz, pot semblar sorprenent que qualsevol material pugui ser atret per un camp magnètic, però de fet hi ha moltes substàncies d'aquestes. Els materials paramagnètics són la majoria dels elements metàl·lics com el liti, el sodi, el magnesi, l'alumini, el potassi, el calci, el titani, el vanadi, el molibdè i el platí; l'oxigen diatòmic; moltes sals i òxids d'elements de transició com l'òxid de ferro, el triclorur de ferro i el biclorur de manganès; alguns ions d'elements metàl·lics que en condicions normals no són paramagnètics i elements de les terres rares i els seus compostos, com l'urani, el praseodimi i el luteci.

Tot i així, el paramagnetisme és tant dèbil que molt sovint ni es nota, perquè l'agitació tèrmica dels àtoms a temperatura ambient tendeix a interrompre l'alineació. Aquests materials no tenen importància tecnològica a l'hora de fer diferents màquines elèctriques ni per fer sistemes de levitació.

2.2.3 Materials ferromagnètics

Els materials ferromagnètics són els millors conductors de les línies de força, ja que els moments magnètics dels seus electrons formen petits dominis, tal com es veu a la Figura 9, i els àtoms o molècules properes actuen de manera conjunta i s'alineen de forma fàcil en la direcció del camp magnètic extern i el resultat és la seva magnetització, molt més poderosa que en els materials paramagnètics.

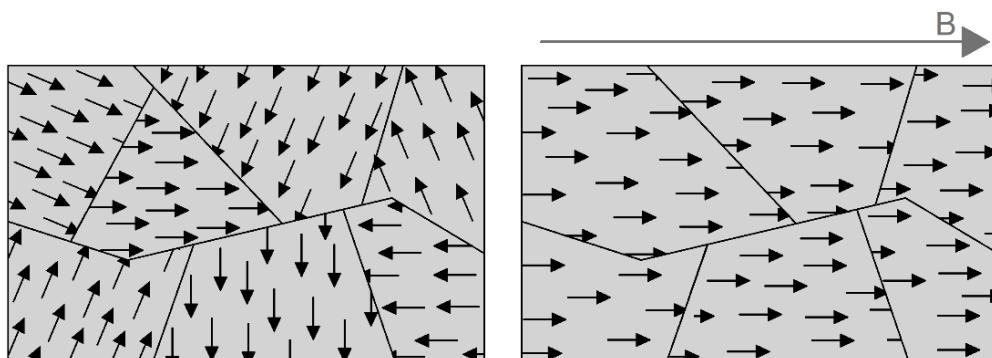


Figura 9. Dominis d'un material ferromagnètic

Així, la seva permeabilitat magnètica és molt superior a la del buit i la permeabilitat relativa és superior a 100, $\mu \gg \mu_0$ i $\mu_r > 100$. Es va arribar a pensar que el ferromagnetisme només era una

forma forta i persistent de paramagnetisme, però la força i la persistència del ferromagnetisme mostren que és el resultat d'un mecanisme completament diferent, un efecte que no existeix merament en substàncies paramagnètiques.

Mentre que el diamagnetisme i el paramagnetisme es deuen essencialment als camps atòmics resultats dels moviments orbitals dels electrons al voltant del nucli, el ferromagnetisme bàsicament es deu a la alineació dels eixos de "spin" intrínsecs dels electrons individuals. Un electró individual té una propietat quàntica coneguda com spin, que és diferent al gir d'un objecte macroscòpic i aquest gir, d'un mini corrent elèctric, genera un mini camp magnètic amb la direcció determinada per la llei del tirabuixó.

Tal com es veu a la Figura 10, les línies de força, encara que hagin de fer una trajectòria molt més llarga, els és més fàcil passar per l'interior el material. Per tant, la inducció magnètica al interior del material és molt superior a la inducció al seu voltant.

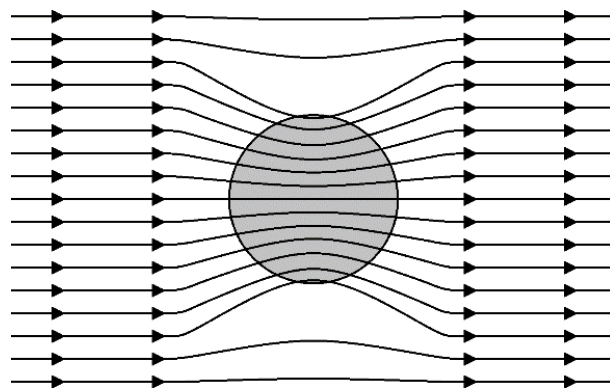


Figura 10. Comportament d'un material paramagnètic

Els materials ferromagnètics són el ferro, el cobalt i el níquel; són alguns elements de terres rares; bona part dels aliatges que contenen elements esmentats anteriorment; la majoria dels acers menys els acers inoxidable austenífics i excepcionalment s'han desenvolupat certs aliatges ferromagnètics en els quals cap dels elements que els formen ho és individualment, per exemple l'aliatge Heusler.

La mecànica quàntica proporciona una explicació: per les disposicions de cert tipus d'àtoms en estructura de gelosia de determinats sòlids, les distàncies dels electrons dins dels àtoms i entre els àtoms veïns són prou petites com perquè les funcions es solapin significativament. Com a resultat, hi ha una força d'acoblament eficaç molt forta entre ells a causa de la seva indistingibilitat. Això s'anomena interacció d'intercanvi i és purament un fenomen quàntic-

meccànic. En essència, la mecànica quàntica ens diu que hi ha una propensió a que s'intercanviïn les identitats dels electrons veïns, i això bloqueja les orientacions de spin dels electrons. Aquest fet és cert només en certes circumstàncies, també és possible que les interaccions d'intercanvi bloquegin els spins dels electrons veïns en direccions oposades, en aquest cas aquest comportament s'anomenaria antiferromagnetisme. Perquè funcioni la interacció d'intercanvi, les distàncies entre els electrons han de ser les justes i aquestes distàncies queden afectades per la temperatura. Hi ha una certa temperatura, anomenada temperatura de Curie, per sobre la qual es trenca el ferromagnetisme i el material passa a comportar-se com a paramagnètic.

2.2.4 Materials antiferromagnètics

Aquest comportament s'observa en alguns materials l'estructura dels quals està formada per dues subestructures intercalades. Com s'observa a la Figura 11, un cop magnetitzada, les seves subestructures són iguals però de sentit contrari. Com que la magnetització es compensa gairebé del tot, aquests materials actuen com els materials paramagnètics i presenten una magnetització positiva però molt feble. S'observa en determinats materials per sota de la temperatura de Néel, ja que per sobre es comporten com materials paramagnètics.

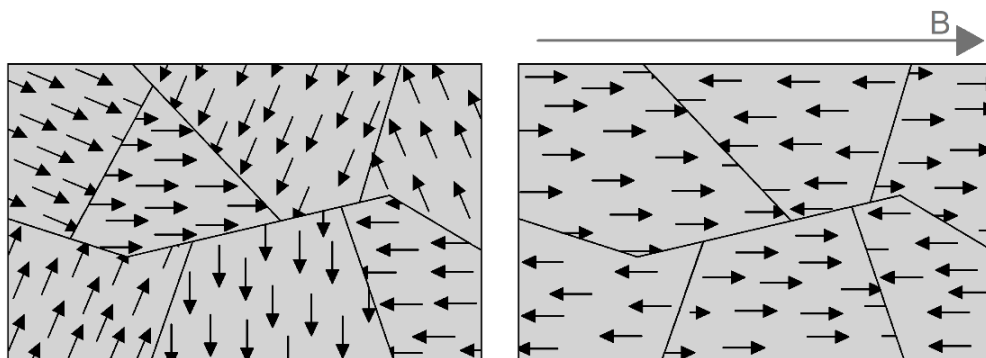


Figura 11. Dominis d'un material antiferromagnètic

Uns materials antiferromagnètics són el crom, la hermatita, el òxid de níquel i el ferro manganès.

2.2.5 Materials ferrimagnètics

Aquest comportament s'observa, com en el cas de l'antiferromagnetisme, en alguns materials l'estructura dels quals està formada per dues subestructures intercalades d'elevada resistivitat elèctrica, però en aquest cas les magnetitzacions no es compensen del tot. Com es mostra a

la Figura 12, el material es comporta com un material ferromagnètic però amb una magnetització significativament inferior. Per sobre la temperatura de Curie, un material ferrimagnètic passa a comportar-se com un material paramagnètic.

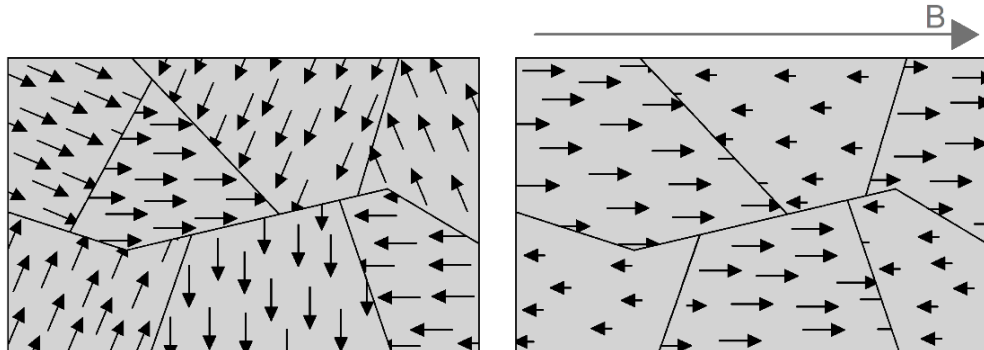


Figura 12. Dominis d'un material ferrimagnètic

La magnetita i les ferrites són un material ferrimagnètic. També ho són elements com l'alumini, el cobalt, el níquel, el manganès i el zinc.

2.2.6 Materials superdiamagnetics o superconductors

El superdiamagnetisme o diamagnetisme ideal, és una característica dels materials superconductors degut a l'anomenat efecte Meissner. Per sota d'una certa temperatura crítica, normalment propera a zero absolut, certs materials no deixen passar gens de flux magnètic, per tant tenen una permeabilitat gairebé nul·la, $\mu \rightarrow 0$, tal com es veu a la Figura 13.

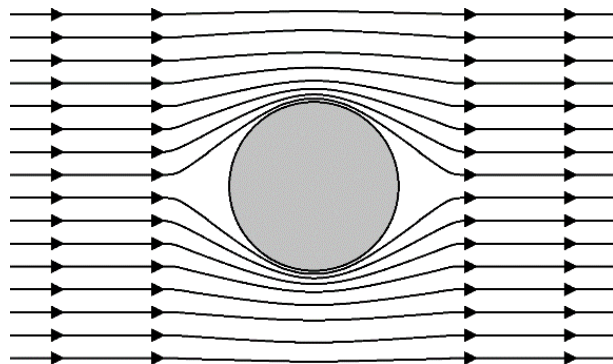


Figura 13. Comportament d'un material superdiamagnètic

Aquests materials permeten la levitació sense necessitat de servocontrol, per tant, una levitació sense requeriments d'energia, sinó fos perquè tota l'energia se l'endú la refrigeració.

Un exemple de materials superconductors a baixes temperatures són els metalls com el plom, l'estany, el zinc, el iridi, el zirconi, el vanadi, el mercuri, el titani, el liti, el tungstè, el bari, el cadmi, el crom i el beril·li; els no metalls o metal·loides com el fòsfor, el bor, el silici, el calci, el carboni, el sofre, l'arsènic, el brom, el bismut, el indi i el tali; diferents materials ceràmics o aliatges metàl·lics i alguns semiconductors modificats. Actualment s'ha descobert i s'ha fet famós un nou material anomenat grafè que, entre altres múltiples propietats, es comporta com un superconductor amb permeabilitats significatives a temperatura ambient.

Els superconductors són materials que condueixen l'electricitat sense resistència. Uns determinats conductors, sota certes condicions, pateixen una transició de fase on hi ha un canvi bruscat de propietats, un canvi en el comportament dels electrons. Com s'observa a la Figura 14, a temperatures altes són metalls normals, i en la seva transferència de corrent, els electrons es mouen, xoquen i perden energia que es dissipa en calor. Però per sota de la seva temperatura crítica, els electrons es comporten de manera molt diferent: formen parelles, anomenats parells de Cooper, que es combinen per formar un estat quàntic col·lectiu macroscòpic, formant l'estat superconductor, capaç de conduir sense resistència elèctrica. El tenir la mateixa càrrega, els electrons es repel·leixen, però a més estan interaccionant amb els ions positius del sòlid. L'acoblament entre els electrons i les vibracions dels ions dóna lloc a una interacció atractiva neta entre els electrons que formen les parelles.

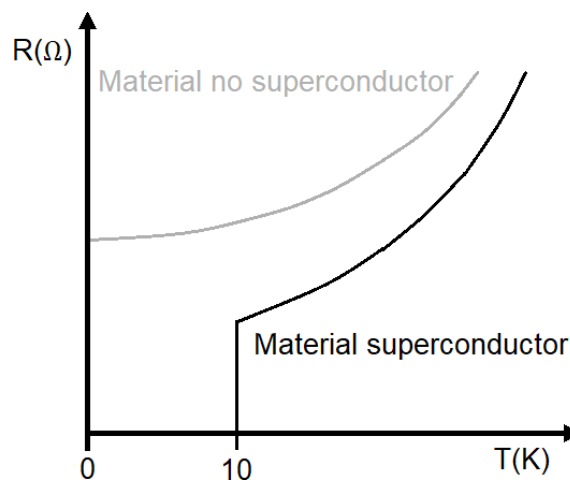


Figura 14. Material superconductor formant parells de Cooper a la temperatura crítica de 10K

Així, un material superconductor té dues propietats utilitzables: resistència i permeabilitat tendent a zero. Una resistència pràcticament nul·la permet generar una força magnetomotriu, producte de la intensitat pel número d'espines, amb molt poca tensió i, per tant, amb molt poca potència consumida. Electroimants bobinats i refrigerats en cables superconductors, permeten crear induccions molt intenses que tenen aplicacions de caràcter mèdic, com ressonàncies

magnètiques; de levitació, tant per atracció com per repulsió, utilitzada en els trens Maglev; en acceleradors de partícules, per tal de produir camps magnètics intensos, en format de quadripol, que tenen la missió de col·limar el feix per tal que les partícules no es separin, cosa que requereix una dissipació de molta energia en les bases de refrigeració dels conductors d'aquets electroimants. Una permeabilitat molt baixa permet la levitació estable, per diamagnetisme, sense requerir cap sistema de control.

Així doncs, l'efecte Meissner provoca que el superconductor expulsi les línies de força, ja que crea supercorrents a la massa del material magnètic que donen lloc a un camp magnètic oposat al de l'imant, generant una força de repulsió i fent que un dels dos leviti.

A la gràfica de la Figura 15 es reflecteixen les temperatures crítiques de diferents materials superconductors en funció de l'any de troballa.

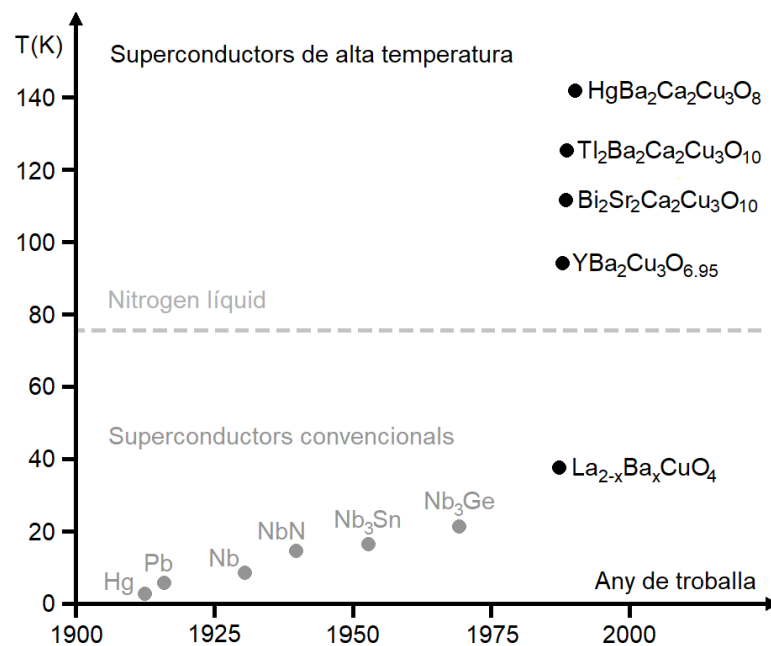


Figura 15. Temperatura crítica de diferents materials superconductors

A l'any 1986 es va descobrir superconductivitat a alta temperatura en els cuprats, que és una ceràmica d'òxid de coure, amb una temperatura crítica de 93K, que és -180°C . Fins llavors, els superconductors que es coneixien tenien temperatures crítiques properes als 0K i calia refredar-los amb heli líquid. Però quan es van descobrir els cuprats, aquestes temperatures van pujar de cop, fins a uns 135K, que és -138°C . Va ser un canvi important, perquè els superconductors a altes temperatures es pot refredar amb nitrogen líquid, que es troba a 77K, que és -196°C , i és molt més econòmic i més fàcil d'aconseguir que el heli líquid.

Encara no s'entén el mecanisme de la superconductivitat a alta temperatura i és un dels problemes més grans de la física actual. En aquests materials, la repulsió entre els electrons és molt forta i és anti-intuitiu que es formin parelles de Cooper a altes temperatures. La repulsió és tan forta que en ocasions els electrons es queden fixos i el material es comporta com un aïllant.

A la Figura 16 s'observa el diagrama de fase del cuprat, on a l'eix x canvia la composició i al y la temperatura. Canviant molt poc la composició, es passa d'un superconductor a un aïllant anti-ferromagnètic. A la fase anti-ferromagnètica els electrons s'organitzen de forma diferent al superconductor, no hi ha parells i el protagonista és el spin de l'electró, petit imant quàntic que pot apuntar en direccions diferents i es representa amb fletxes, que a aquesta fase s'orienta de forma alterna. A temperatures superiors a la de la superconductivitat, hi ha una regió anomenada Pseudogap, i el material és metàl·lic però les seves propietats són molt anòmales. No només és difícil d'entendre la superconductivitat dels cuprats sinó que ja costa d'entendre els cuprats quan són metalls.

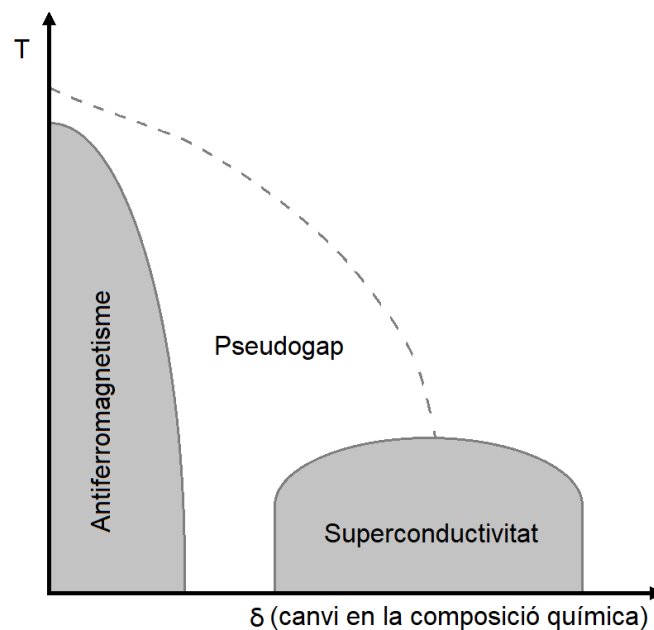


Figura 16. Canvi de temperatura en un cuprat en funció de la composició química

Al 2008 al Japó es va descobrir la segona família de superconductors a alta temperatura: els superconductors de ferro, compostos que a les seves capes atòmiques contenen ferro i arsènic o ferro i seleni. Com els cuprats, en el diagrama de fases dels superconductors de ferro es té una fase anti-ferromagnètica propera a la superconductora.

Com es veu a la Figura 17, la diferència és que a l'estat anti-ferromagnètic dels cuprats, els spins s'orienten de forma alterna en les dos direccions del plà, mentre que en els superconductors de ferro s'orienten de forma alterna en una direcció, però no en l'altre.

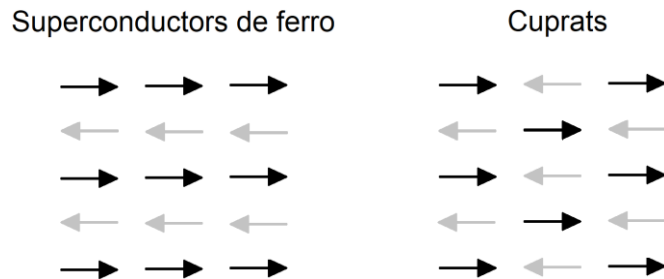


Figura 17. Orientació dels spins en un material superconductor de ferro i en els cuprats

L'altra diferència més important és que, mentre que la fase anti-ferromagnètica dels cuprats és aïllant, la dels superconductors de ferro és metàl·lica.

2.2.7 Materials superparamagnetics

El superparamagnetisme és un magnetisme que apareix en certes nanopartícules ferromagnètiques o ferrimagnètiques, on la magnetització canvia de sentit espontàniament i brusca, a causa de la temperatura. Com es reflecteix a la Figura 18, a conseqüència aparent és que el material es comporta com un material paramagnètic amb una magnetització lineal de magnitud superior.

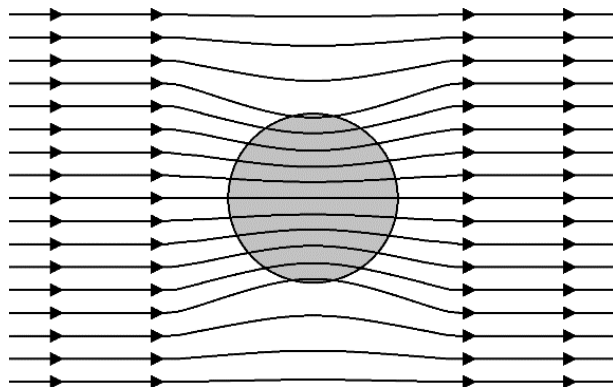


Figura 18. Comportament d'un material superdiamagnètic

3 SISTEMES DE SUSPENSÍO O LEVITACIÓ MAGNÈTICA

La levitació magnètica és el procés de levitar un objecte mitjançant camps magnètics, per tant superant la força gravitatòria d'un objecte aplicant un camp magnètic que la contraresti. Hi ha tres sistemes de levitació magnètica: levitació per atracció; levitació per repulsió; i levitació per efecte Meissner.

3.1 Levitació per atracció

Aquest és el sistema en que es basen els trens de levitació magnètica que estan en funcionament en l'actualitat i que s'anomenen EMS o suspensió electromagnètica.

El sistema d'atracció requereix electroimants amb un control de la distància d'entreferro mitjançant una cadena de realimentació específica formada per elements PD, de manera que permetin la compensació ràpida de perturbacions i que evitin oscil·lacions per ser estable en el eix vertical 'z' de l'espai. Aquest sistema comporta pèrdues energètiques en les bobines dels electroimants, tant per efecte Joule com per Histèresis i Foucault, degut a la seva commutació.

Un exemple d'aquest sistema és el prototip levitador per atracció del capítol 13 d'aquest projecte.

3.2 Levitació per repulsió

Aquest és el sistema en el que es basen els trens de levitació magnètica que actualment estan en fase de proves i desenvolupament i que s'anomenen EDS o suspensió electrodinàmica.

El sistema de repulsió no requereix tanta aportació energètica per la levitació però és totalment inestable en els tres eixos de l'espai. Tal com indica el teorema de Earnshaw, és matemàticament impossible aconseguir una levitació per repulsió mitjançant cap combinació i disposició d'imants permanents. No hi ha cap manera de fer levitar establement un imant més petit sobre un imant permanent o suspendre un imant o un material ferrós i, per tant, requereix servosistemes PD en els tres eixos de treball.

Un exemple d'aquest sistema és el prototip levitador per repulsió del capítol 14 d'aquest projecte.

3.3 Levitació per efecte Meissner o superconductivitat

L'efecte Meissner requereix materials amb una permeabilitat relativa gairebé nul·la pròpia dels superconductors, que a temperatures molt baixes impedeixen el pas de les línies de força pel seu interior. Materials diamagnètics com el coure, tenen permeabilitat relativa aproximada de 0'95 i aquest efecte no els permet sustentar la seva pròpia massa. Només alguns materials específics, a temperatures properes al 0 absolut, tenen aquesta permeabilitat tendent a 0. Per tant requereixen molta energia consumida per bombes de refrigeració i només tenen aplicacions pràctiques amb experiments físics a baixa escala Tot i que s'està investigant amb altres materials que permetin aquesta permeabilitat tant baixa a temperatures properes a les ambientals, fins ara no se'n ha trobat cap i, per tant, no es pot posar en pràctica aquest efecte en trens Maglev.

4 FORÇA CREADA PER UN ELECTROIMANT

A continuació es realitza un estudi bàsic que estableix la transferència energètica a partir d'un generador elèctric, a un electroimant.

4.1 Transferència d'energia elèctrica a magnètica

A la Figura 19 es mostra el circuit equivalent d'un electroimant, negligint la resistència interna de la font d'alimentació i negligint també les pèrdues per histèresis, Foucault i flux de dispersió.

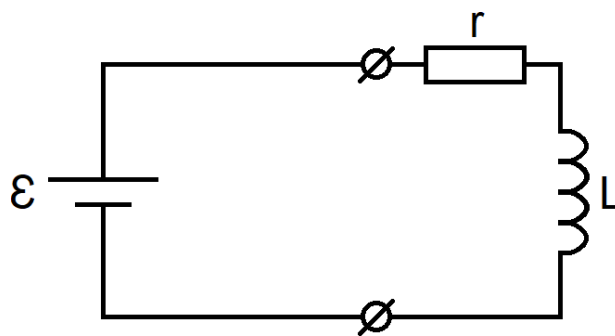


Figura 19. Circuit equivalent d'un electroimant

Fent un balanç de potències en aquest circuit s'obté la següent Equació 11.

$$p = v \cdot i = r \cdot i^2 + i \cdot \varepsilon \quad (\text{Eq. 11})$$

La bobina està generant una força contraelectromotriu, segons la llei de Faradai-Lenz, que té el valor que es mostra a l'Equació 12.

$$-\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Eq. 12})$$

De les dues equacions anteriors s'obté l'Equació 13, on la potència queda dividida en dos termes, les pèrdues per Joule i la potència magnètica.

$$p = r \cdot i^2 + i \cdot N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Eq. 13})$$

Com que la intensitat és variable, en cada diferencial de temps es transfereix diferent energia magnètica a l'electroimant. A l'Equació 14 es mostra que aquesta energia magnètica és directament proporcional a la intensitat que hi circula, el número d'espines de la bobina i el diferencial de flux.

$$dW_{mg} = P_{mg} \cdot dt = i \cdot N \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot dt = i \cdot N \cdot d\phi \quad (\text{Eq. 14})$$

Per altre banda, a l'Equació 15 es pot observar la inducció B generada en un solenoide, de N espines amb reluctància homogènia μ i de llargada de circuit magnètic L, en funció de l'excitació magnètica H.

$$B = N \cdot i \cdot \mu \cdot \frac{1}{L} = \mu \cdot H \Rightarrow H = \frac{N \cdot i}{L} \Rightarrow N \cdot i = H \cdot L \quad (\text{Eq. 15})$$

Es coneix que la inducció magnètica és la quantitat de línies de força que travessa una superfície perpendicular a elles, per tant la derivada del flux magnètic serà tal com descriu l'Equació 16.

$$\phi = B \cdot S \Rightarrow d\phi = S \cdot dB \quad (\text{Eq. 16})$$

Si es substitueixen les dues equacions anteriors dins l'Equació 14, s'obté la expressió que s'indica a l'Equació 17 que indica l'energia magnètica en cada interval de temps, on V és el volum del circuit magnètic.

$$dW_{mg} = H \cdot L \cdot S \cdot dB = H \cdot V \cdot dB \quad (\text{Eq. 17})$$

L'Equació 18 es veu indicada l'energia magnètica total emmagatzemada per totes les contribucions infinitesimals d'energia per unitat de volum en funció de l'integral circular del cicle d'histerèsis.

$$\int dW_{mg} = V \oint_c H dB \Rightarrow W_{mg} = V \oint_c H dB \quad (\text{Eq. 18})$$

El resultat de l'integral anterior s'observa a l'àrea de color gris de la gràfica de la corba de magnetització d'un material de la següent Figura 20, on es representa l'energia per unitat de volum.

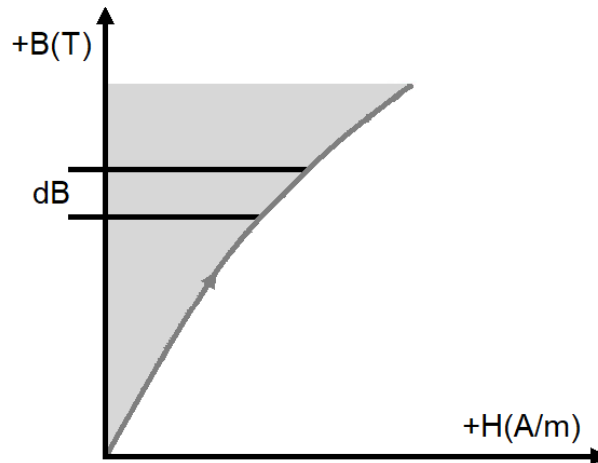


Figura 20. Densitat d'energia en un material magnètic

Però s'ha de tenir en compte que el material es magnetitza i desmagnetitza seguint el cicle tancat d'histèresi. L'àrea gris de la Figura 21 representa l'energia magnètica absorbida pel sistema quan es magnetitza el material.

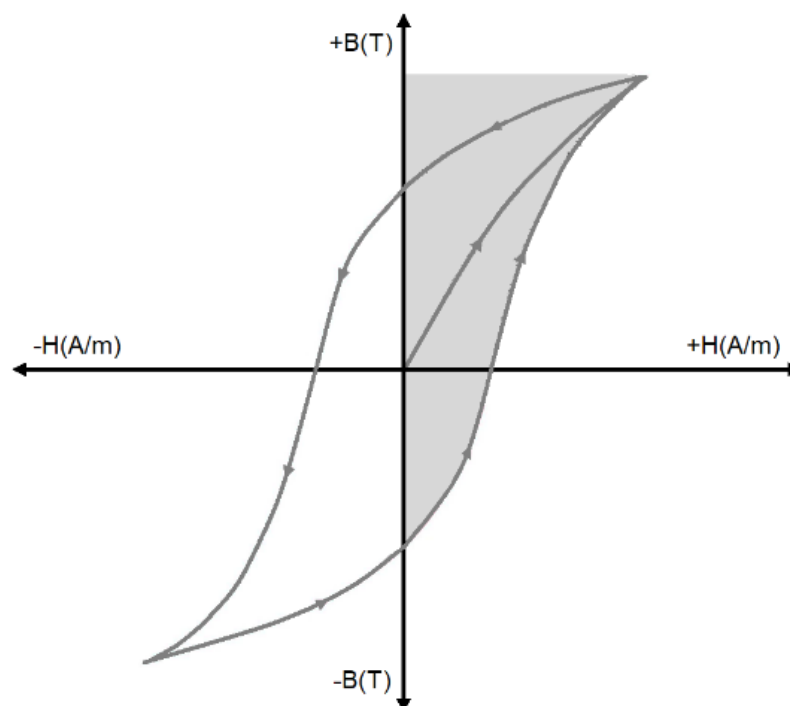


Figura 21. Energia absorbida quan es magnetitza el material

Per altre banda, l'àrea gris de la Figura 22, indica l'energia magnètica retornada pel sistema quan es desmagnetitza el material.

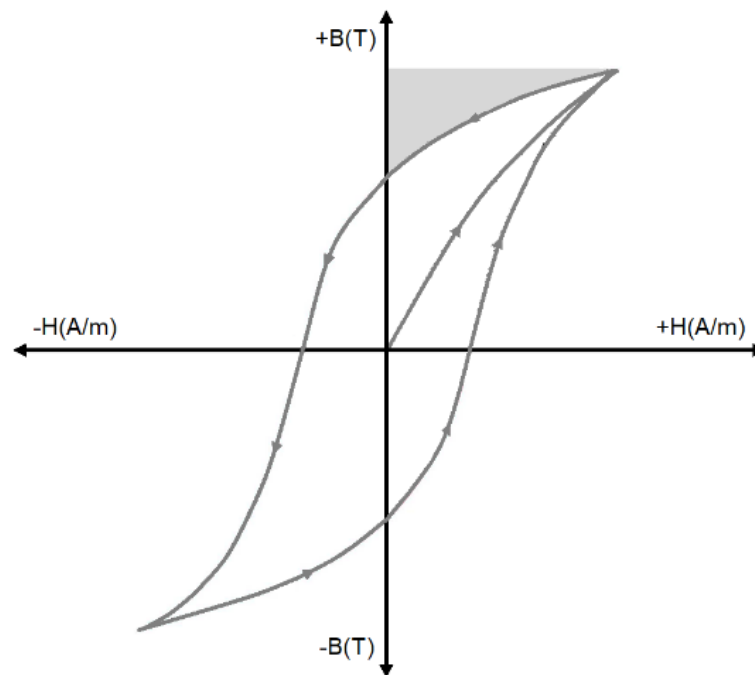


Figura 22. Energia retornada quan es desmagnetitza el material

Per tant, l'àrea gris del interior del cicle de la Figura 23, és energia entregada però no retornada, per tant representa les pèrdues per histèresi, resultat de la dissipació en calor per la fricció dels micro-dipòls interns del material.

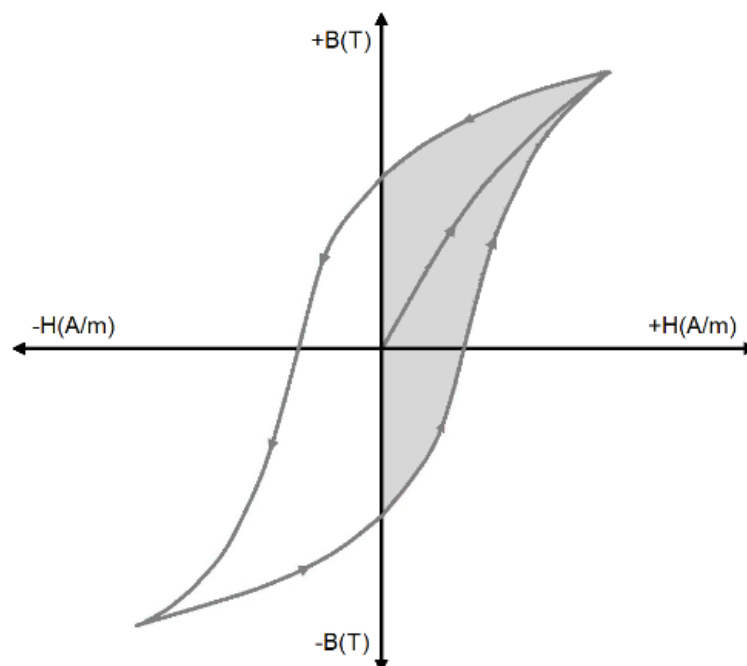


Figura 23. Energia perduda per Histèresi

En un electroimant alimentat en corrent altern o un alimentat en corrent continu, ja que hi haurà una commutació d'encendre i apagar, i en funció de la freqüència amb que s'alimenta, a més d'aquestes pèrdues per histèresis, que caldrà compensar amb aliatges d'acer al silici, també hi haurà unes pèrdues pels corrents paràsits de Foucault que es generen en tota la massa del material de forma concèntrica i perpendicular als conductors, raó per la qual es lamina el material.

Així doncs, si bé en teoria per mantenir un objecte en levitació no es requereix de cap energia, ja que no s'augmenta l'energia potencial de l'objecte en qüestió, tota l'energia que caldrà aportar a l'electroimant es transforma únicament en pèrdues que són, per ordre d'importància: efecte Joule, histèresis, Foucault i flux de dispersió.

Però, en el cas específic de levitació, el circuit magnètic per on circulen les línies de força és totalment heterogeni, com es pot veure a la Figura 24.

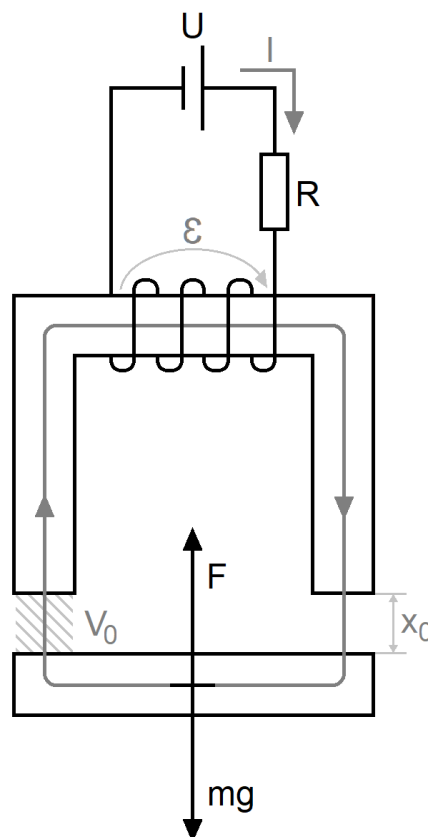


Figura 24. Electroimant

En aquest cas la reluctància de l'entreferro, determinada per la part d'aire, és molt superior a la reluctància dels trams fèrrics i, per tant, es pot negligir la part del circuit magnètic format pel ferro.

La permeabilitat en el buit és constant, μ_0 , i com que el buit no té romanència i l'aire pràcticament tampoc, les pèrdues per histèresis es podran negligir. En aquest cas, l'àrea grisa de la Figura 25, representa la densitat d'energia requerida.

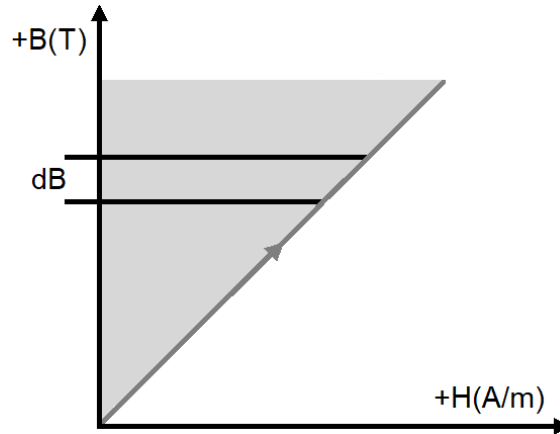


Figura 25. Permeabilitat de l'aire

I per tant, en levitació, la inducció magnètica varia linealment en funció de la intensitat de camp, tal com mostra l'Equació 19.

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (\text{Eq. 19})$$

De dels dues equacions anteriors, s'obté l'energia emmagatzemada pel camp magnètic en un electroimant que s'indica a l'Equació 20.

$$W_{\text{mg}} = V \oint_c \frac{B}{\mu_0} dB = V \cdot \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \quad (\text{Eq. 20})$$

Per calcular la força, és parteix de la definició de treball indicada a l'Equació 21.

$$dW = F \cdot dx_0 \Rightarrow F = \frac{dW}{dx_0} \quad (\text{Eq. 21})$$

I en conseqüència, en resulta l'Equació 22.

$$F = \frac{d}{dx_0} \cdot \left(V \cdot \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \right) \quad (\text{Eq. 22})$$

El volum de l'entreferro, V_0 , es determina mitjançant l'Equació 23.

$$V_0 = S_{Fe} \cdot 2 \cdot x_0 \quad (\text{Eq. 23})$$

A l'Equació 24 es mostra la força d'atracció.

$$F = \frac{d}{dx_0} \cdot \left(S_{Fe} \cdot 2 \cdot x_0 \cdot \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \right) = \frac{d}{dx_0} \cdot \left(\frac{S_{Fe} \cdot x_0 \cdot B^2}{\mu_0} \right) = \frac{B^2 \cdot S_{Fe}}{\mu_0} \cdot \frac{d}{dx_0} \cdot (x_0) = \frac{B^2 \cdot S_{Fe}}{\mu_0} \quad (\text{Eq. 24})$$

La inducció magnètica o densitat de flux magnètic, B , és la que s'observa a l'Equació 25.

$$B = N \cdot I \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{2 \cdot x_0} \quad (\text{Eq. 25})$$

Substituint amb les tres equacions anteriors, a l'Equació 26 s'indica la força d'atracció.

$$F = \frac{(N \cdot I \cdot \mu_0 / 2 \cdot x_0)^2 \cdot S_{Fe}}{\mu_0} = \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0^2 \cdot S_{Fe}}{2^2 \cdot x_0^2 \cdot \mu_0} = \frac{1}{4} \cdot \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{Fe} \cdot I^2}{x_0^2} \quad (\text{Eq. 26})$$

Si es vol aconseguir que un sistema leviti, en tot moment s'ha de mantenir una força magnètica igual a la força que exerceix la gravetat sobre la barra. Per tant, en tot moment s'hauria de complir l'Equació 27, que s'ha obtingut substituint la força de la gravetat a l'equació anterior.

$$m \cdot g = \frac{1}{4} \cdot \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{Fe} \cdot I^2}{x_0^2} \quad (\text{Eq. 27})$$

4.2 Càlcul específic en el prototip de levitació per atracció

Pel prototip de levitació per atracció s'ha utilitzat l'electroimant LS-P50/27 amb les següents característiques: 12V/8Ω, però com s'alimenta a 14V la intensitat d'excitació és de 1,75A; diàmetre de 50mm, per tant un radi de 0,025m, i 30.000 voltes.

S'ha observat empíricament que quan es fa levitar l'objecte de 30g, la distància d'entreferro és de gairebé 15mm.

Com que el radi de l'electroimant és de 0,025m, la superfície per on circula el flux magnètic és la calculada mitjançant l'Equació 28.

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{0,025}{2}\right)^2 = 4,909 \cdot 10^{-4} \text{m}^2 \quad (\text{Eq. 28})$$

Utilitzant anterior Equació 27 es pot conèixer el valor màxim de la massa a levitar amb un entreferro concret. Com es pot observar, l'Equació 29 indica que amb un entreferro de 15mm es pot fer levitar un cos amb una massa màxima de 35g.

$$m = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{Fe} \cdot I^2}{4 \cdot x_0^2 \cdot g} = \frac{24.000^2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4,909 \cdot 10^{-4} \cdot 1,75^2}{4 \cdot 0,015^2 \cdot 9,81} = 30,81\text{g} \quad (\text{Eq. 29})$$

Així doncs, es conclou que el desenvolupament i els càlculs són correctes, ja que a la pràctica s'ha aconseguit fer levitar una massa de 30g amb un entreferro d'uns 15mm. Si s'ajusta el punt de levitació per un entreferro de la meitat de la distància anterior, la massa que pot suportar, passaria a ser 123,35g, que és 4 vegades més elevada que l'anterior.

5 MATRIU HALBACH

La matriu Halbach va ser dissenyada al 1980 i és una disposició concreta d'imants que augmenta l'espai del camp magnètic, i per tant augmenta la força magnètica, a un costat i gairebé l'elimina al costat oposat.

5.1 Matrius Halbach lineals

Tal com es mostra en el diagrama de la Figura 26, la superposició de tres imants amb polaritat indicada a dalt a l'esquerra, amb dos imants amb la polaritat indicada a dalt a la dreta, dóna com a resultat l'estructura indicada a baix, anul·lant les línies de força de la part inferior i reforçant les de la part superior.

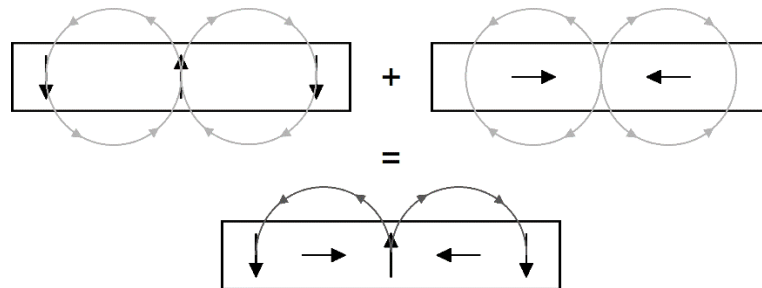


Figura 26. Fonament de la matriu lineal Halbach

A la disposició de la Figura 27 es mostra com l'espai de camp magnètic que es requereix per tancar les línies de força, és superior a dalt que a baix. Evidentment, aquesta configuració es pot prolongar indefinidament. Si a més a més, a la part inferior es col·loca un material ferromagnètic, encara s'augmenta més aquest efecte, ja que es disminueix la reluctància a la part inferior.

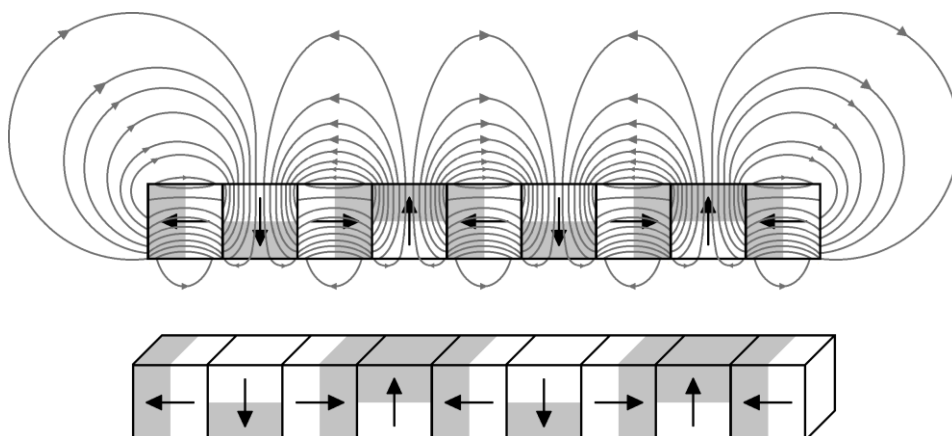


Figura 27. Diagrama del flux magnètic en una matriu lineal Halbach

Els avantatges de distribuir el flux unilateral són: que el camp és el doble en el costat on hi ha el flux i no hi ha pèrdues de camp magnètic al costat contrari, fet que ajuda al confinament del camp, solució eficaça a l'hora de dissenyar de les estructures magnètiques.

S'utilitzen tant en motors d'inducció; com en bobines d'altaveus; com pels imants de Wiggler, que són utilitzats en els quadripols magnètics dels sincrotrons d'acceleradors de partícules i també en làsers d'electrons lliures; i també en els sistemes de llançament dels coets Inductrack i en els trens Maglev Inductrack.

5.2 Cilindres Halbach

Un cilindre Halbach és un cilindre magnetitzat compost de material ferromagnètic que, en el cas ideal, produeix un intens camp magnètic confinat completament dins del cilindre i un camp nul a l'exterior. Els cilindres també es poden magnetitzar de manera que tot el camp magnètic es trobi a l'exterior i un camp nul a l'interior. A la Figura 28 es mostren varies distribucions de magnetització.

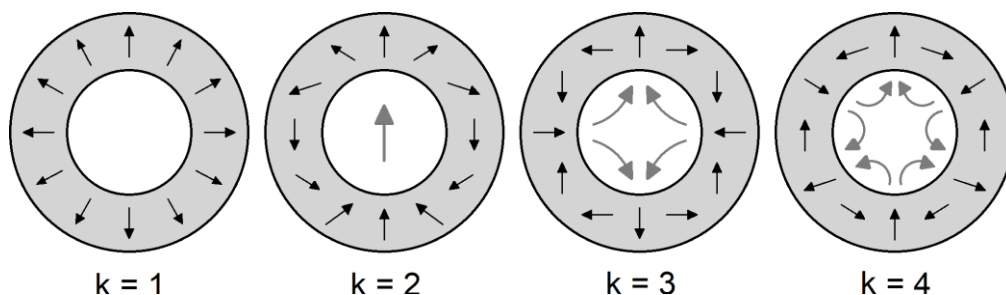


Figura 28. Cilindre ferromagnètic mostrant varis patrons de magnetització i camp magnètic

Idealment aquestes estructures es construeixen amb un cilindre de material magnètic de longitud infinita amb la direcció de magnetització variant contínuament. El flux magnètic produït per aquest disseny ideal seria perfectament uniforme i estaria solament confinat dins o fora del cilindre. A la pràctica, el cilindre és finit, fet que produeix que el camp magnètic no sigui uniforme. La dificultat de fabricar un cilindre amb una magnetització variable contínuament, fa que normalment el disseny es parteixi en segments.

Els cilindres Halbach s'utilitzen també en motors d'inducció, que són de corrent altern, i en motors sense escobretes, que són de corrent continu. En els motors sense escobretes es solen utilitzar dissenys cilíndrics en els que tot el flux es limita al centre de l'orifici, com el tipus $k=4$ de la Figura 28 en el cas d'un rotor de tres parells de pols. Aquests dissenys de motors

amb blindatge automàtic són més eficients i produeixen un parell més elevat que els dissenys de motors convencionals, ja que el parell és proporcional al producte del flux per la intensitat.

5.3 Esferes Halbach

L'esfera Halbach és el resultat d'estendre a tres dimensions els patrons de distribució magnètica bidimensional del cilindre Halbach. Aquest disseny té un camp molt uniforme al seu interior, ja que no es veu afectat per l'afecte final que preval en el disseny del cilindre de longitud finita.

6 ESTABILITAT EN LA LEVITACIÓ AMB IMANTS PERMANENTS

Una de les preguntes més comunes sobre els imants permanents és si existeix o no, una configuració estable i estàtica dels imants permanents capaç de fer levitar un objecte indefinidament.

Evidentment, la levitació en sí no és el problema, perquè molts imants tenen camps suficientment forts per aixecar el seu propi pes. El punt d'equilibri tampoc és un problema, perquè hi ha una configuració en el límit entre caure i pujar. El problema és la estabilitat, ja que segons el teorema de Earnshaw que es descriu a continuació, l'equilibri per repulsió o atracció és intrínsecament inestable i, per tant, per aconseguir un levitador estable cal una força restauradora que contraresti qualsevol desplaçament fora del punt d'equilibri.

6.1 Plantejament

S'ha de ser meticulós a l'hora de plantejar aquesta pregunta perquè hi ha diversos tipus de comportaments magnètics per diferents substàncies i en diferents circumstàncies. Es pot obtenir una levitació estable amb un superconductor, que és realment un cos diamagnètic perfecte. De fet, fins i tot a temperatura ambient, és possible utilitzar la propietat diamagnètica d'una substància com el bismut per aconseguir la estabilitat passiva en la levitació magnètica, però en aquest cas el paramagnetisme és massa dèbil per fer la levitació real i, perquè aquest efecte sigui realment efectiu, cal utilitzar substàncies diamagnètiques a temperatures tant baixes que requereixen un consum energètic dels aparells refrigerants massa elevat com per fer-lo factible pràcticament.

A la pràctica, tots els trens Maglev es basen en fenòmens d'atracció i repulsió magnètica, ja sigui amb imants permanents com amb electroimants superconductors, per poder dur a terme la levitació de les grans masses que representen cada un dels vagons del tren.

6.2 Teorema de Earnshaw

Al 1842 Samuel Earnshaw va demostrar el que actualment s'anomena teorema de Earnshaw, que afirma, matemàticament, que és impossible fer levitació magnètica estable per atracció o repulsió de pols de forma passiva, mitjançant cap disposició ni cap configuració estable de càrregues magnètiques permanents.

Aquest teorema exclou el fenomen del diamagnetisme perquè el camp diamagnètic s'adapta constantment als canvis del camp magnètic extern. Aquesta és la raó per la qual és possible la levitació estable diamagnètica, i els materials superconductors en són l'exemple.

El teorema de Earnshaw segueix de prop la llei de Gauss, fet que explica la generalitat de la seva aplicabilitat. Per considerar el cas més simple, si es desitja organitzar un conjunt de partícules carregades de tal manera que s'estableixi una regió de contenció estable per un electró, cal un punt a l'espai buit, de manera que el vector de força en totes les parts en la superfície d'una regió incremental que envolta el punt, tiri cap a l'interior del cos.

D'acord amb la llei de Gauss, la integral del vector de força sobre qualsevol superfície tancada és igual a la carrega continguda dins la superfície. Per tant, la integral de la força sobre qualsevol superfície tancada en el espai buit és zero, el que implica que si forces apunten cap a dins en algunes parts de la superfície, han d'apuntar cap a fora en altres parts. Suposant que es tingués una força resultants nul·la sobre tota la superfície, el cos tampoc resultaria estable perquè no hi ha cap força restauradora que es pugui oposar a qualsevol pertorbació, per mínima que sigui. Segons la llei de Gauss, l'únic punt que podria ser un punt d'equilibri estable per un electró, és un punt on resideix una càrrega positiva, per tant seria el cas d'un protó.

6.3 Excepcions del teorema de Earnshaw

Si no es necessita una configuració estàtica, és possible obtenir una levitació quasi estable amb imants permanents, girant l'objecte levitat i utilitzant els moments d'inèrcia per compensar la inestabilitat. S'han construït diversos dispositius interessants d'aquest tipus. Aquesta levitació, en comptes d'estable, és diu casi estable perquè la rotació de l'objecte que levita produeix l'emissió d'energia en forma d'ones electromagnètiques, de manera que aquesta pèrdua d'energia farà aturar el sistema i passarà a ser inestable.

Com que el teorema fa certes suposicions, el resultat pot evitar-se sota certes condicions. Així que les excepcions del teorema de Earnshaw són descrites a continuació.

6.3.1 Teoria quàntica

El teorema només està basat en la física clàssica i no té en compte la mecànica quàntica. A nivell atòmic hi ha una classe de levitació que succeeix a través de les forces de repulsió entre

les partícules, però aquest efecte és tant petit que generalment no es considera levitació magnètica.

6.3.2 Diamagnetisme

El teorema no s'aplica als materials diamagnètics, els quals tenen una permeabilitat relativa inferior a la unitat. Per tant, no es comporten com imants estàndards, sinó que tendeixen a repel·lir qualsevol flux magnètic, en qualsevol posició del material i, per tant, absorbeix qualsevol pertorbació del sistema. En el material diamagnètic s'indueixen corrents de Foucault que repelen el flux magnètic.

6.3.3 Efecte Meissner

En conductors refredats per sota la seva temperatura crítica, que es troba al voltant dels 0K, s'observa un cas especial de diamagnetisme on es tornen superconductors, els quals tenen una resistència interna nul·la. Arriben a tenir una permeabilitat relativa de zero, fet que els converteix en materials diamagnètics perfectes. Els permet mantenir un camp magnètic que repel·leix qualsevol font externa de flux magnètic.

6.3.4 Rotació

Un altre sistema per vèncer el teorema de Earnshaw és compensar la inestabilitat de l'objecte levitador mitjançant una energia cinètica de rotació, que té el valor que s'indica a l'Equació 30.

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (\text{Eq. 30})$$

El Levitron és un sistema patentat format per dos imants permanents, que actuen per repulsió: un imant permanent estable en forma d'anell toroïdal, que crea un llit magnètic amb un imant permanent de dimensions més reduïdes i alt moment d'inèrcia, que situa el centre d'aquest llit, un cop a adquirit una determinada velocitat angular. Aquesta energia cinètica de rotació li permet compensar petites pertorbacions externes i el manté en suspensió mentre la velocitat angular sigui suficient. No obstant, la rotació del levitador genera energia electromagnètica a l'aire que fa minvar l'energia cinètica inicial, per tant la duració de l'estabilitat és limitada.

A la Figura 29 es mostra l'estructura del Levitron descrit anteriorment i els camps magnètics que aquest genera formen un llit magnètic que permet realitzar la levitació.

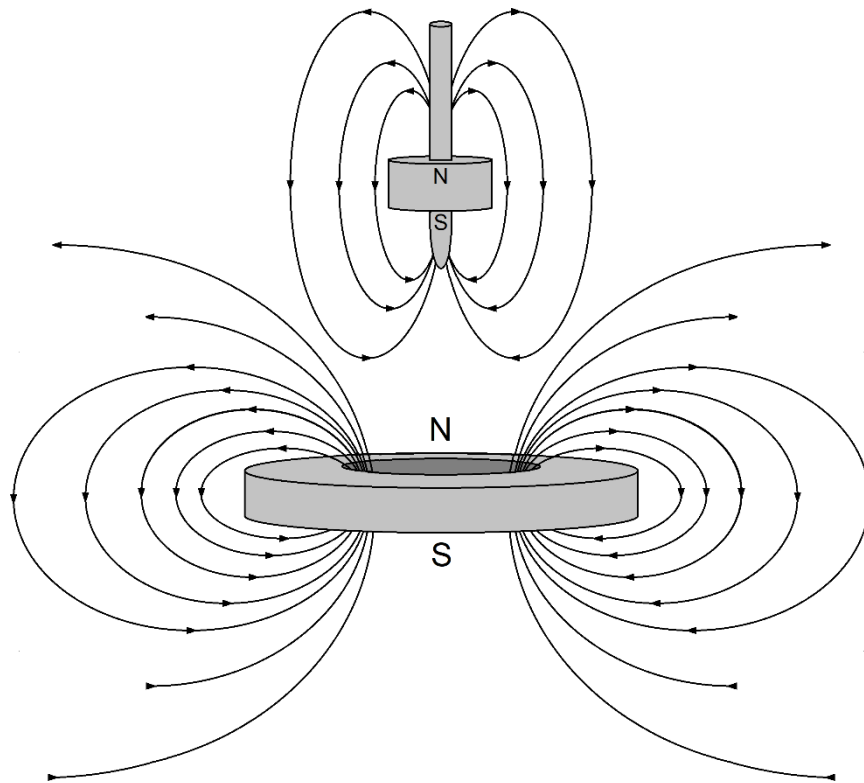


Figura 29. Funcionament del Levitron

El prototip implementat al capítol 14 d'aquest document, que treballa per repulsió, té moltes similituds amb el Levitron, no obstant aconseguir mantenir el levitador estable i sense rotació de forma indefinida mitjançant una realimentació amb electroimants correctors, descrita a continuació.

6.3.5 Realimentació

En aquest mètode es detecta la posició de l'imant levitador per controlar la intensitat de camp dels electroimants, que compensen dinàmicament el flux magnètic per tal de corregir la desviació causada per qualsevol mínima pertorbació. Aquest és específicament el mètode utilitzat en els dos prototips del projecte.

Per realitzar una levitació per atracció, s'ha de tenir en compte que si el cos a levitar s'acosta massa a l'electroimant, s'ha de reduir el corrent d'aquest, i si el cos s'allunya, aquest corrent ha d'augmentar. Així, s'ha de calcular la posició del cos a levitar, i depenent d'aquesta és pot determinar la intensitat que ha de rebre l'electroimant. Per evitar oscil·lacions, s'ha d'utilitzar

la taxa de canvi de posició, o sigui la diferencial de la posició respecte el temps, per tant caldrà una realimentació de tipus derivativa.

El control per realitzar una levitació per repulsió és molt més complex. El cos que levita es pot moure en qualsevol direcció, per tant, el control passarà de ser d'una dimensió, a ser de tres dimensions. L'aplicació d'aquesta classe de levitació és molt interessant pels nous sistemes Maglev EDS. El sistema de detecció de posició ha de constar de diferents sensors d'efecte Hall que s'han col·loquen a cadascun dels electroimants del sistema. Cada parell electroimant i el seu circuit de control de la intensitat, funcionen com un sistema independent per controlar la levitació en el seu respectiu eix del pla. El sensor d'efecte Hall és un dispositiu que detecta el flux magnètic i la seva orientació. El circuit està configurat de manera que si es detecta un augment del flux magnètic, el sistema donarà energia a la respectiva parella d'electroimant per tal de repel·lir el cos a l'electroimant més proper i atraure'l en el més llunyà. Així que aquest sistema simula electrònicament l'efecte Meissner, repel·lint els pols nord i sud d'un imant. El circuit també ha de constar de diferents amplificadors operacionals i realimentacions de tipus proporcional i derivativa, per tal de respondre a la pertorbació tant de la posició com de la velocitat del cos que levita.

7 SISTEMES DE LEVITACIÓ

Cada model de tren en concret utilitza diferents sistemes, tant per la levitació, com de propulsió, com de centratge a la guia. Pel que fa els mètodes utilitzats a la levitació, es poden dividir bàsicament en tres sistemes o tecnologies: la suspensió electromagnètica EMS, la suspensió electrodinàmica EDS i la suspensió electromagnètica híbrida HEMS.

El sistema de suspensió electromagnètica EMS, pot integrar simultàniament la guia i en aquest cas s'anomena sistema LGI. Quan la levitació i la guia treballen per separat, s'anomena sistema LGS.

El sistema de suspensió electrodinàmica EDS es pot realitzar mitjançant els innovadors electroimants superconductors, que cal refrigerar a molt baixes temperatures, capaços de subministrar induccions magnètiques molt elevades. En aquest cas s'anomena sistema SCM. Però darrerament, el nou sistema Inductrack aconsegueix resultats similars mitjançant imants permanents disposats amb matrius Halbach, que permeten concentrar el flux magnètic a la cara de la via, on s'obtenen també grans concentracions de flux, i anul·lar-la a la cara dels passatgers. Aquest sistema és l'anomenat PM.

7.1 Suspensió electromagnètica EMS

La tècnica de suspensió electromagnètica, anomenada també EMS o sistema alemany, consisteix amb una estructura de tren que disposa la seva part inferior per sota el nivell de la via. La base del tren és dissenyada en forma de "C" per assegurar que els vagons no surtin de la via, de manera que el seu descarrilament és pràcticament impossible.

La levitació es realitza a partir de la força d'atracció magnètica entre la guia i els electroimants del tren. Quan s'activen els electroimants, es genera una força d'atracció entre el tren i la via que, degut a aquesta forma de construcció, el fa levitar.

Aquesta metodologia és inherentment inestable a causa de la característica del magnetisme. Per evitar que hi hagi contacte entre el tren i la via, és indispensable un sistema de control de la distància d'entreferro amb una resposta molt ràpida de tipus proporcional i derivatiu que, mitjançant l'ús d'un sensor d'efecte Hall a cada electroimant, mantingui un entreferro uniforme d'aproximadament 10mm.

Com que la força d'atracció és inversament proporcional al quadrat de la distància del entreferro, cal anul·lar de forma instantània l'alimentació de les bobines quan s'apropa més del compte i la torni a connectar quan la distància sigui superior aproximadament a 11mm. Aquesta distància tant minsa d'entreferro entre la via i els electroimants de suport del tren, permet que el tren es mantingui uns 150mm per sobre de la part superior de la guia.

Com que el EMS utilitza un entreferro molt petit, a mesura que la velocitat augmenta, el control d'aquest tram regulat, que és la distància d'entreferro, es fa més crític i, encara que es reguli immediatament el corrent que circula pels electroimants, provoca vibracions considerables amb el perill que comporta que el tren fregui a la guia i per tant no pot assolir velocitats tant elevades com el sistema EDS. A més, la distància d'entreferro entre el tren i la via no es pot augmentar sense fer el sistema energèticament molt costós.

El cost d'implementació de les instal·lacions del sistema EMS és molt elevat, ja que requereix una enorme precisió durant la construcció de la via, doncs una petita desviació podria ser catastròfica. A més, s'ha d'implementar enormes quantitats de conductors que representen l'estator desplegat al llarg de la via. Aquest estator s'ha d'alimentar mitjançant la construcció de diverses subestacions, amb els seus corresponents variadors de freqüència i sistemes de radiocontrol. En conseqüència, el cost per metre lineal d'un tram de via convencional és molt més econòmic que el d'un tren de levitació magnètica.

El principal avantatge del mètode EMS és que no requereix sistemes de refrigeració amb compressors de gran potència per refrigerar els electroimants perquè, en general, no s'utilitzen electroimants superconductors. Aquesta possibilitat d'utilització d'electroimants convencionals fa el sistema més factible d'implementar, per això actualment són els únics que estan en funcionament comercial. Actualment hi ha diversos informes que indiquen la utilització de electroimants superconductors, que són els utilitzats en el sistema EDS.

El sistema EMS, a diferència del EDS, permet levitar a baixa velocitat o fins i tot aturat, per això els vagons no requereixen rodes. A més, a aquestes baixes velocitats, el consum energètic per metre lineal es redueix. En cas de fallida energètica, el tren EMS incorpora bateries de recanvi per tal que el tren no rasqui als rails.

La intensitat magnètica o inducció dins el tren és baixa, així que és segur per la gent amb marcapassos i pels aparells electrònics com targetes de crèdit o discs durs. Aquesta intensitat magnètica a l'interior dels vagons és comparable amb la del camp magnètic de la Terra i,

evidentment, menor que la emesa per els motors universals incorporats en molts aparells electrodomèstics.

Dins la suspensió electromagnètica EMS hi ha dos tipus de tecnologies de levitació: la levitació i guia integrada LGI i la levitació i guia separada LGS.

7.1.1 Suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia integrada LGI

El sistema de levitació i guia integrada LGI, que es mostra a la secció i detall la Figura 30, és adequat per un funcionament de baix cost i relativa baixa velocitat perquè es redueix la quantitat d'electroimants i controladors.

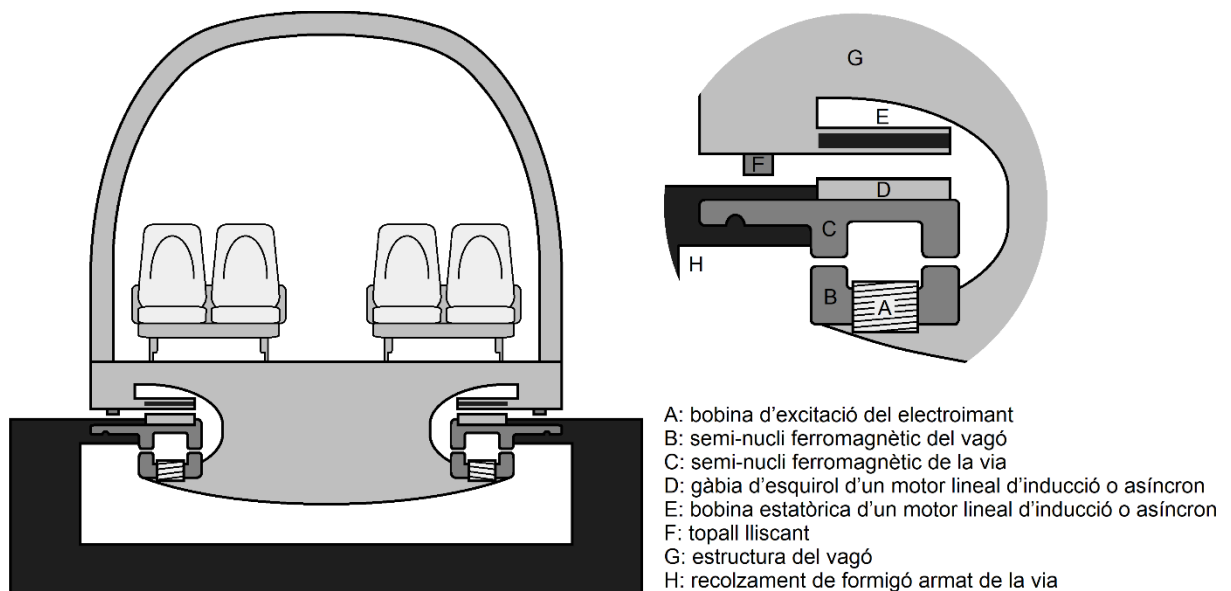


Figura 30. Suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia integrada

El centratge a la guia es genera automàticament per la forma dels nuclis magnètics "B" i "C" que pretenen minimitzar les reluctàncies. Es redueix el consum necessari per regular aquests dos trams de control, ja que amb un sol electroimant s'aconsegueixen els dos propòsits, donat que representa un menor cost energètic. El problema és que a mesura que augmenta la velocitat i el tren va adquirint inèrcia, la interferència entre la levitació i la guia augmenta i és difícil controlar la levitació i la guia simultàniament.

La propulsió es realitza a partir de les bobines "E" i les barres curtcircuitades "D", que treballen a mode de gàbia d'esquirol. De manera que el rotor d'un motor convencional actua d'estator lineal a la via. I l'estator d'un motor d'inducció actua en el tren mitjançant un corrent trifàsic

generat per un variador de freqüència o inversor incorporat en el propi tren. Aquesta configuració ocasiona que la via no hagi de ser alimentada però té el desavantatge que tota l'energia s'ha de subministrar des del tren mitjançant catenàries.

El sistema LGI és el més inusual dins els EMS però el Maglev coreà UTM i el japonès HSST l'incorporen.

7.1.2 Suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia separada LGS

El sistema de levitació i guia separada LGS, que es mostra a la secció i detall la Figura 31, consta d'una via en forma de "T" i és més adequat per treballar a majors velocitats, ja que el control de la levitació i de la guia es fa per separat i no interfereixen entre sí però, per contra, el nombre de controladors augmenta.

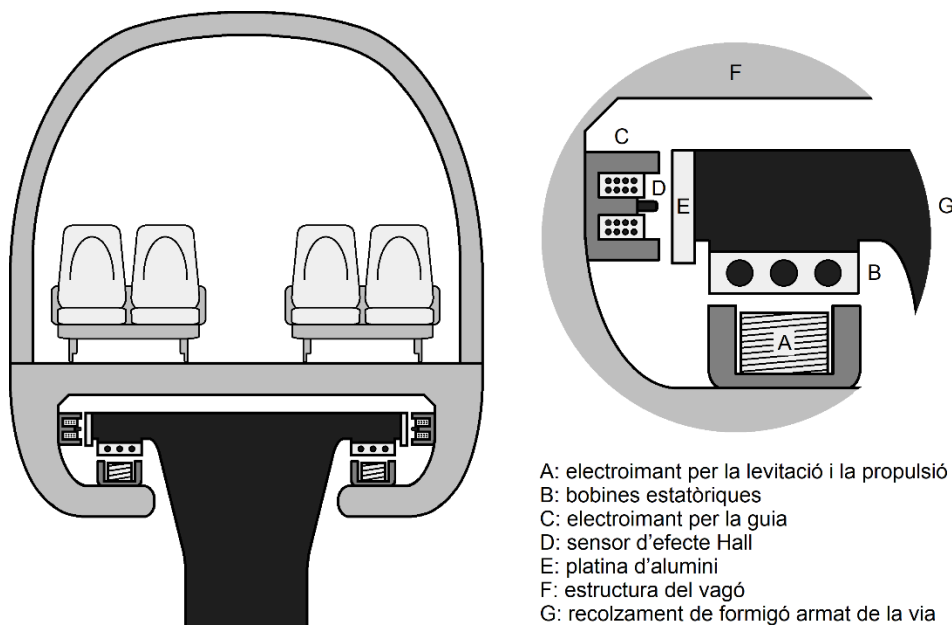


Figura 31. Suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia separada

La levitació també actua per atracció. En aquest cas, a diferència que el LGI anterior, es basa en un motor síncron, on l'inductor "B" és un electroimant alimentats en corrent continu que fa la funció del rotor d'un motor síncron, mentre la via, on es disposa el debanat "A" que treballa com l'estator d'un motor síncron, ha de ser alimentat per trams i a partir de subestacions a la via, amb un corrent trifàsic de freqüència variable.

D'aquesta manera el vagó, no només segueix la velocitat lineal dels pols magnètics de la via, sinó que el manté en levitació. Actualment es procura que els electroimants de levitació i centratge siguin de tipus superconductor i refrigerats, per tal de reduir-ne les dimensions.

Per tant en aquest cas, la levitació i la propulsió actuen simultàniament. Amb el principi dels motors síncrons en el qual simplement el vagó segueix la velocitat lineal de desplaçament magnètica de la via. Per aquesta raó, aquests tipus de trens han de tenir una estació radio-transmissora fins a la subestació de cada tram de via per tal de fer el procés d'acceleració i frenada segons les ordres de la locomotora.

El Transrapid d'origen alemany és un dels models Maglev més coneguts que incorporen el sistema LGS.

7.2 Suspensió electrodinàmica EDS

La tècnica de suspensió electrodinàmica, anomenada també EDS, utilitza la força de repulsió per levitar, a diferència del EMS que utilitza la força d'atracció.

El EDS és tant magnèticament estable que no és necessari el control de l'entreferro, que assoleix una distància molt més segura que el EMS. Com que pot sobrepassar els 100mm, les guies requereixen una construcció menys precisa i els possibles terratrèmols no l'afecten tant. Per aquest motiu, aquest sistema permet treballar a molt altes velocitats i també és molt adequat pel transport de mercaderies, ja que suporta càrregues molt variables i elevades.

No obstant, es necessita assolir una velocitat d'uns 100km/h per adquirir els corrents induïts requerits per la levitació i, per tant, el tren necessita incorporar rodes que faran contacte amb la guia a velocitats inferiors. Aquestes rodes, a diferència que en els trens convencionals, són construïdes amb pneumàtics de goma.

Un desavantatge és que la utilització d'imants amb flux elevat a les parets laterals del tren, provoca grans camps magnètics dins del tren. Per aquest motiu es requereix la utilització de complexos sistemes d'aïllament de la radiació magnètica per no perjudicar la salut dels passatgers, especialment aquells que portin marcapassos i també per evitar que es malmetin els aparells electrònics. En canvi, en el anterior sistema EMS, cal recordar que el camp magnètic dins l'habitacle del vagó és comparable amb el camp magnètic terrestre.

Aquest sistema EDS es basa amb un principi similar que el prototip de levitació per repulsió implementat al final d'aquest projecte i apartat XX, però s'ha de tenir en compte que, el que actua com a levitador en el prototip, és el que en aquests trens actua com a guia i el que actua com a placa en el prototip, és el que en aquests trens actua com a vagó.

Els EDS tenen una estructura més complexa ja que requereixen d'un sistema de refrigeració utilitzant com a calo-portador l'heli, per tal de refrigerar els debanats dels electroimants laterals del vagó. Per tant, necessita una màquina tèrmica refrigerant mitjançant un compressor que farà circular l'heli en circuit tancat en contínua evaporació i condensació. L'evaporació de l'heli líquid es produeix en contacte tèrmic amb l'electroimant, absorbint calor, mentre que la condensació es produeix en l'ambient i reixetes de ventilació en contacte amb l'aire exterior.

El sistema EDS es divideix en els dos tipus: electroimants superconductors SCM i amb imants permanents PM, conegut com a Inductrack.

7.2.1 Suspensió electrodinàmica EDS amb electroimants superconductors SCM

El sistema EDS, que incorpora electroimants superconductors SCM, es mostra a la secció i detall la Figura 32.

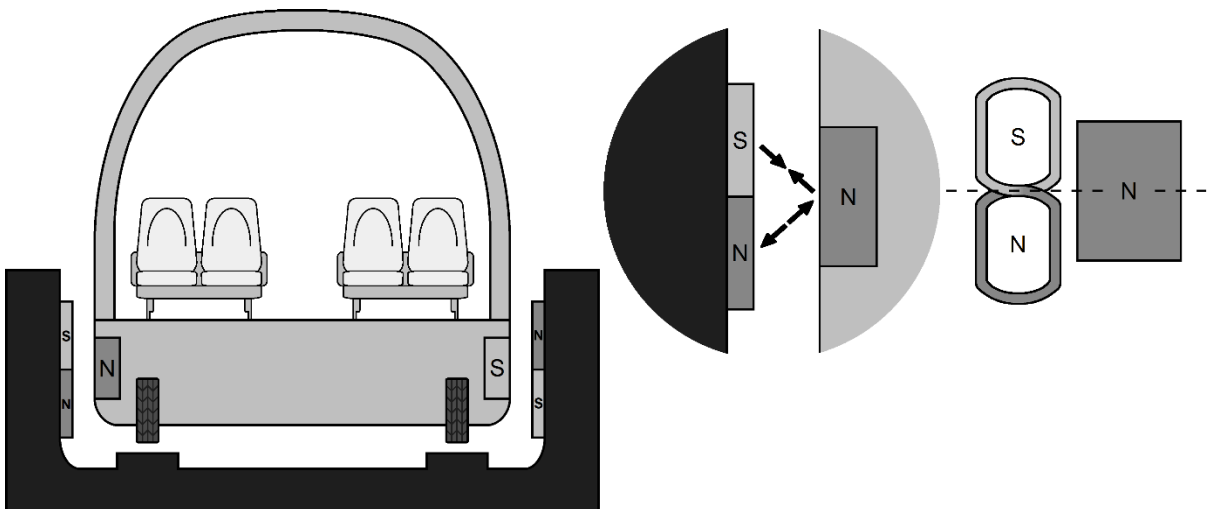


Figura 32. Suspensió electrodinàmica EDS amb electroimants superconductors SCM

En aquest sistema es fa la levitació, la propulsió i centratge de manera conjunta a través de les bobines laterals de la via. Aquestes bobines disposades en forma de "8", en circular un únic corrent, creen pols oposats en els seus dos centres i actuen de la següent manera: mentre la part inferior de la bobina repel·leix els electroimants laterals del tren mentre la part

superior de la bobina els atrau. Aquest fet prova la levitació i la propulsió del vagó, a mode d'estator d'un motor síncron. A més a més provoca el centratge.

El EDS SCM es troba únicament implementat en pista de proves pel japonès JR-Maglev MLX01, a Yamanashi, que té el rècord de velocitat en un tren tripulat amb 581 o 603 km/h al 2003 al Japó, tot i tenint una pista de llargada reduïda que només li permetia accelerar durant 11 segons. Es preveu que fins el 2027 no estigui operatiu.

7.2.2 Suspensió electrodinàmica EDS amb imants permanents PD o Inductrack

El sistema EDS d'imants permanents PD o més conegut com a Inductrack, es a la secció i detall la Figura 33.

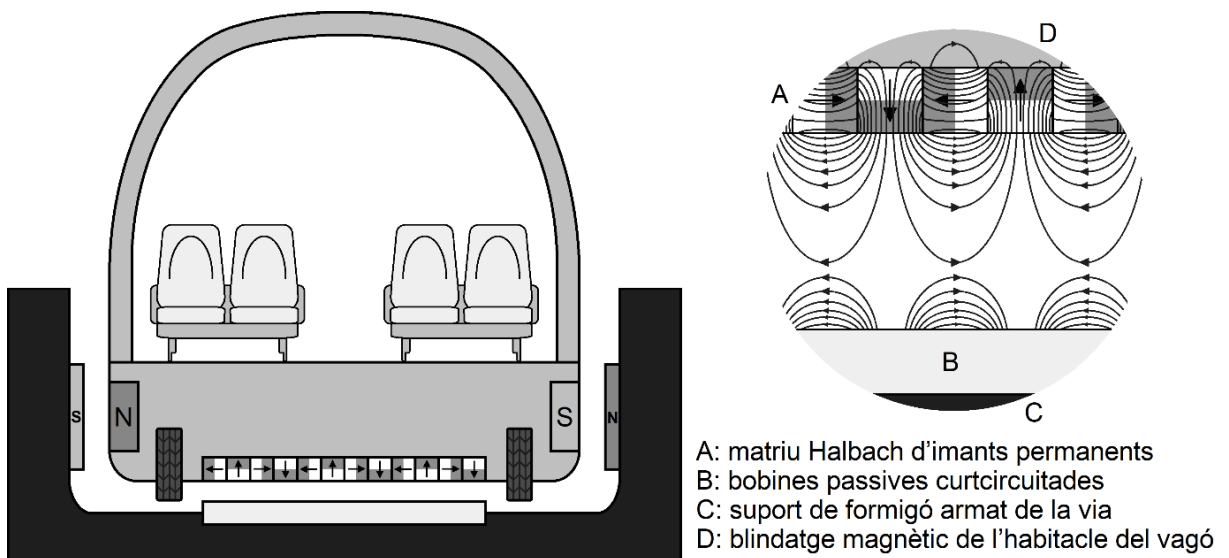


Figura 33. Suspensió electrodinàmica EDS amb imants permanents PM o Inductrack

Tenen una constitució més senzilla perquè la levitació és totalment passiva i no requereix energia elèctrica, fet que el fa un sistema molt eficient. Només cal subministrar energia elèctrica per la propulsió.

A la part inferior del tren s'estableixen imants permanents o electroimants superconductors "A", ambdós en disposició de matriu Halbach. Les matrius Halbach es descriuen a l'apartat XX del document i permeten concentrar tot el flux de l'imant a una sola cara fent levitar vagons amb una càrrega considerable. Quan el tren avança sobre les bobines induïbles passives en forma de llaç tancat o barres conductores curtcircuitades "B", que actuen com a gàbia d'esquirol, encastades al llarg de la via, aquestes tallen les línies de força del flux de cada

vagó. Aquest fet genera una força electromotriu com s'indica a l'Equació 31, on \mathcal{E} és la força electromotriu induïda a les bobines; B és densitat de línies de força o inducció; l és la llargada dels conductors perpendiculars a la velocitat; v és la velocitat i N és el número d'espises.

$$\mathcal{E} = B \cdot v \cdot l \cdot 2 \cdot N \quad (\text{Eq. 31})$$

Com que les bobines i les làmines estan curtcircuitades, aquesta força electromotriu provoca que per elles hi circuli una intensitat de curtcircuit, I_{CC} . Aquest corrent, a la vegada, provoca un flux magnètic que, per la llei de Faraday-Lenz, s'oposa al sentit del flux que l'ha creat, tal com es mostra a l'Equació 32.

$$\Phi = - \frac{N \cdot I_{CC}}{R_l} \quad (\text{Eq. 32})$$

La interacció entre aquests dos fluxos crea una força de repulsió entre la via i el tren, que provoca la levitació.

La propulsió del tren es fa mitjançant les bobines laterals de la via. Aquestes bobines estan alimentades amb elevats corrents trifàsics provinents de la subestació d'aquell tram, que a la seva vegada està controlada per radio des de la cabina. Aquestes bobines de la via actuen com l'estator d'un motor de corrent altern síncron, fent que el tren, que disposa d'electroimants superconductors als seus laterals alimentats amb corren continu, faci actuar el vagó com el rotor d'aquest motor síncron lineal.

Per tant, el control de l'acceleració i frenada s'ha de fer molt acurat a través d'aquests variadors de freqüència i en funció del comandament del tren.

A l'anterior Figura 33, s'observa la secció del vagó amb un sol parell de pols però al llarg del vagó n'hi ha varis.

Comparativament, el sistema Inductrack és energèticament molt més avantatjós, ja que no requereix gens d'energia per la levitació, per tant en principi el sistema Inductrack té molta més eficiència.

Un exemple d'aquest sistema EDS PD és el conegut Inductrack, d'Estats Units d'Amèrica.

7.3 Suspensió electromagnètica híbrida HEMS

En el sistema de suspensió electromagnètica híbrida HEMS és similar al EMS però incorpora l'ajuda d'imants permanents per tal de reduir l'energia consumida en la levitació. Aquest sistema s'observa a la secció i detall de la Figura 34.

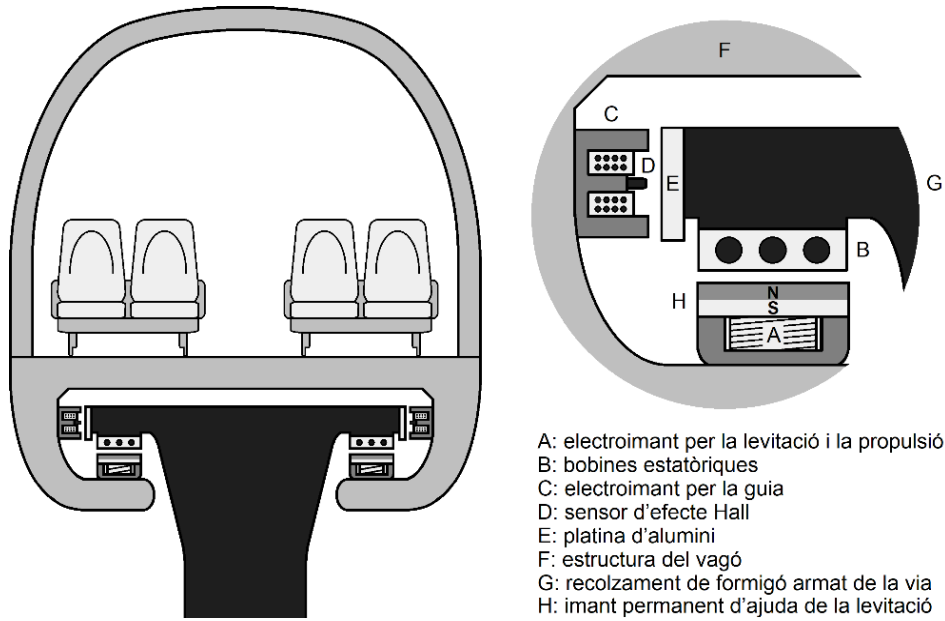


Figura 34. Suspensió electromagnètica híbrida HEMS

Quan l'entreferro assoleix la distància nominal de 10mm, el camp magnètic provinent de l'imant permanent gairebé pot suportar el tren per ell mateix i la potència elèctrica consumida pels electroimants que controlen l'entreferro pot arribar a ser pràcticament nul·la. El problema d'aquest sistema és que encara requereix la construcció d'una infraestructura més equilibrada perquè, si durant qualsevol pertorbació, tant sigui de la forma de la via com externa, per exemple causada per un moviment sísmic, encara que s'anul·lin els corrents de les bobines dels l'electroimants, l'atracció provocada pels imants permanents podrien enganxar el tren a la via. Un altre inconvenient és el fet que els imants permanents solen ser de material de baixa permeabilitat, similar a la de l'aire, per tant la seva intersecció en el circuit magnètic provoca un augment de la reluctància del mateix circuit. Aquest fet requereix augmentar la força magnetomotriu del electroimants per tal que hi hagi el mateix flux, tant sigui augmentant el número d'espores, com la intensitat que hi circula. Per tant, aquest sistema comporta una elevada variació de l'amplitud del corrent que circula per les bobines dels electroimants, ja que pot oscil·lar des d'un corrent pràcticament nul fins a un corrent encara més elevat que en el sistema EMS convencional, per tal de compensar l'augment de reluctància. Això representa un encariment del circuit de potència que controla els electroimants.

8 SISTEMES DE PROPULSIÓ

Com s'ha descrit, tots els sistemes de trens Maglev es propulsen mitjançant el principi dels motors de corrent altern. Poden ser motors síncrons o bé motors asíncrons d'inducció.

En el cas de motor d'inducció, es treballa tant en motors de gàbia d'esquirol com en motors de rotor bobinat. En tots casos es tracta d'un motor desplegat, també anomenat motor lineal. En conseqüència, la seva estructura és molt simple i robusta, ja que no necessita coixinets, ni mecanismes de transmissió de moviment, ni caixa de canvis. A més, el seu moviment rectilini comporta una reducció de vibracions i soroll molt significatius respecte el motor rotatiu. Així que representa un sempre un estalvi tant les pèrdues mecàniques, requerides per la conversió de treball rotatiu a treball lineal.

Encara que el principi de funcionament del motor lineal és el mateix que un motor rotatiu, el motor lineal té una longitud finita tant el tren com a la via, que actuen segons els sistemes Maglev d'estator o rotor indistintament. Aquest fet provoca unes pèrdues per flux de dispersió en els extrems, que s'estudien com a "efecte final". L'efecte final provoca un flux atenuat especialment quan es treballa a altes velocitats i això comporta una reacció en sentit oposat a la marxa en el tren, anomenat efecte frenada. A més, com que per motius de seguretat l'entreferro ha de ser major que el d'un motor rotatiu, augmenta molt la reluctància del circuit magnètic i això també provoca la pèrdua d'eficiència respecte el motor rotatiu.

Existeixen dos variants de sistemes de propulsió: els LSM, que utilitzen el principi dels motors síncrons i els LIM, que utilitzen el principi dels motors d'inducció o asíncrons i, concretament, són molt similars als de gàbia d'esquirol.

El sistema a escollir depèn de la velocitat nominal de treball del tren i de la inversió disponible en la realització de la infraestructura.

8.1 Motor lineal d'inducció o asíncron LIM

El principi de funcionament del motor lineal d'inducció és idèntic al del motor rotatiu d'inducció o asíncron, com el típic de gàbia d'esquirol. L'estator genera un camp magnètic en moviment lineal que, a través del circuit magnètic on la reluctància més gran a vèncer pel flux és la de l'entreferro, indueix una força electromotriu al rotor, el qual està format per làmines conductores. Aquesta f.e.m genera intensitats de curtcircuit en aquesta mena de gàbia

d'esquirol desplegada formada per làmines, que provoquen una força F que pren el valor de l'Equació 33, que és la força de tracció que empeny el tren cap endavant.

$$F = B \cdot I \cdot L \quad (\text{Eq. 33})$$

El factor de potència amb aquest tipus de motor és de tipus inductiu, fet que representa un inconvenient, ja que la majoria de les càrregues elèctriques que alimenten les centrals també són d'aquest tipus. Per tant cal compensar, a cada una de les subestacions d'alimentació, aquests factors de potència, ja sigui amb bateries de condensadors, o amb motors síncrons treballant en buit.

Hi ha dos tipus de LIM: el primari curt SP i el primari llarg LP.

8.1.1 Motor lineal d'inducció o asíncron LIM amb primari curt SP

Tal com mostra la Figura 35, les bobines de l'estator estan al tren, i s'alimenten amb un corrent trifàsic generat per un inversor en el tren, i les làmines conductores estan a la via, per tant la via fa de rotor d'un motor de gàbia d'esquirol.

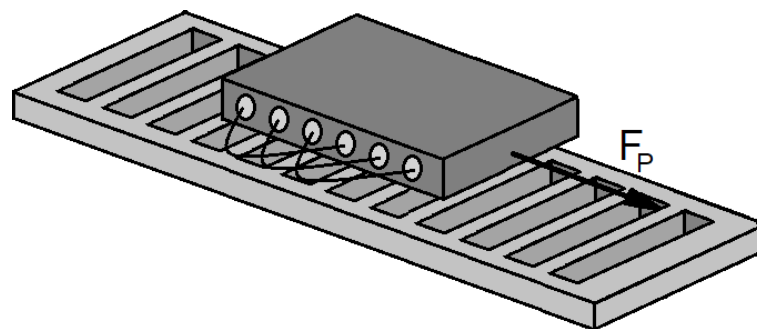


Figura 35. Motor lineal d'inducció o asíncron LIM amb primari curt SP

Els costos de construcció de la infraestructura són més baixos perquè només s'han de disposar làmines d'alumini al llarg del recorregut de la guia i a les catenàries per alimentar el tren. També requereix disposar d'un pantògraf i la catenària, ja que tota l'energia es consumeix a la màquina del tren i la via actua de forma passiva. El tren, que actua d'estator, ha de subministrar, mitjançant un variador freqüència o inversor, l'energia trifàsica als debanats del propi tren. Tal com s'explica en el concepte "efecte final", aquest sistema té més baixa eficiència energètica ja que en els extrems dels tren el flux no es pot tancar per la via i es tanca per l'aire, produint un flux de dispersió que com a resultat fa una força contrària al

desplaçament del tren. A causa d'aquesta limitació energètica i del poc entreferro que s'aconsegueix, el tren no pot superar el 300km/h i s'utilitza en trens de baixa o mitjana velocitat com el HSST japonès o el UTM coreà. Aquest sistema s'utilitza únicament i s'ha mencionat en el sistema LGI del EMS.

8.1.2 Motor lineal d'inducció o asíncron LIM amb primari llarg LP

Tal com s'observa a la Figura 36, les bobines de l'estator es troben a la guia repartides en varis trams i s'alimenten en corrent trifàsic només quan passa el tren per tal d'estalviar energia i les làmines conductores es troben en el tren.

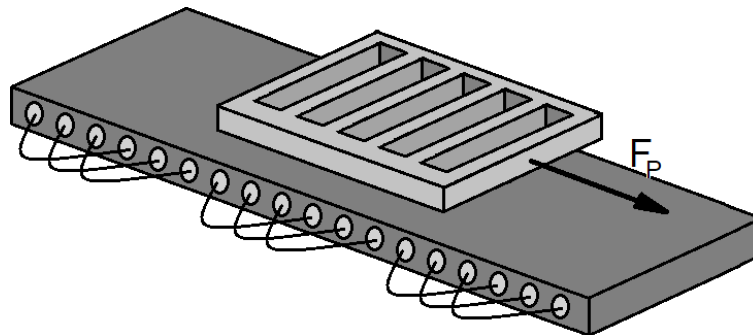


Figura 36. Motor lineal d'inducció o asíncron LIM amb primari llarg LP

La construcció és més cara que el SP ja que requereix bobinar tot el recorregut de la guia, però el tren no necessita bateries per funcionar ni catenària, ni el seu corresponent inversor. Per tant, aquest sistema fa el tren més lleuger.

S'utilitza per altes velocitats perquè permet treballar a més potència ja que l'energia l'aporta la via. Però requereix una comunicació via radio, efectiva, segura, i en temps real entre el tren i l'estació transformadora i de control, que s'ha de col·locar a cada tram de la via.

8.2 Motor lineal síncron LSM

Aquest sistema és el més utilitzat i el que té més rendiment en la conversió d'energia elèctrica a energia magnètica i a energia mecànica. S'utilitza combinat amb els sistemes de levitació anteriorment descrits: suspensió electromagnètica EMS tipus levitació i guia separada LGS; i a tots els tipus de suspensions electrodinàmica EDS, tant el que utilitza electroimants superconductors SCM com Inductrack amb imants permanents PM.

A la Figura 37 es mostra el principi de propulsió dels Maglev quan s'utilitza el motor lineal síncron LSM, que és a la majoria del casos.

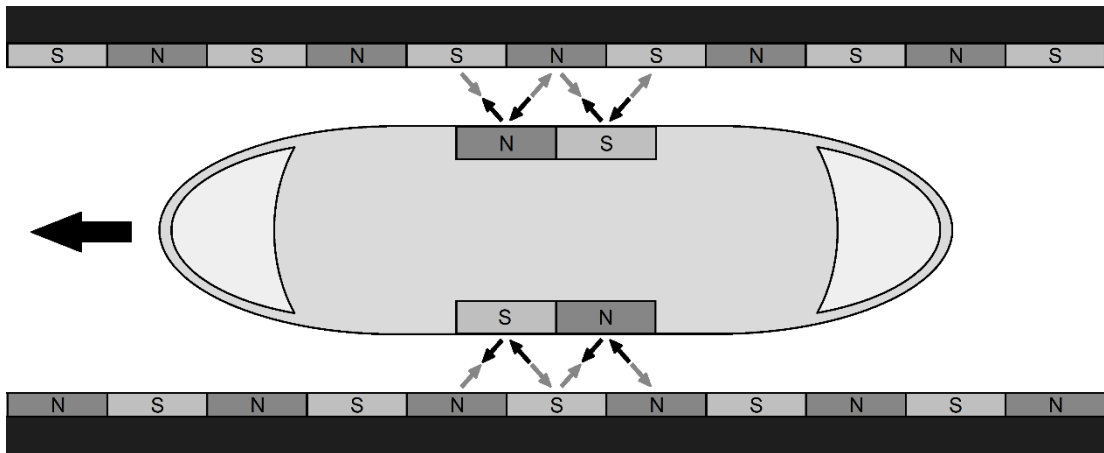


Figura 37. Propulsió amb el motor lineal síncron LSM

El motor lineal síncron requereix indispensablement d'una font magnètica pròpia al rotor, alimentada per corrent continu. El rotor, que sempre és el vagó i actua d'inductor, segueix el desplaçament del camp magnètic que provoca l'estator, que sempre és la via i actua d'induït. Així com el rotor d'un motor d'inducció segueix el camp magnètic rotatiu de l'estator a partir d'un moment M , el vagó segueix el desplaçament lineal del camp magnètic de la via, produint així la força d'empenta o propulsió. La velocitat és controlada mitjançant inversors trifàsics intercalats en diferents trams que regulen la freqüència d'alimentació de les bobines de la via.

Encara que teòricament, tal com succeeix amb el sistema del motor lineal d'inducció o asíncron LIM, hi podria haver els subsistemes de primari curt SP i primari llarg LP, a la pràctica, el sistema LSM només utilitza el subsistema LP representat a la següent Figura 38, on la guia actua d'estator i el tren actua de rotor, regulant el flux dels imants mitjançant una aportació de corrent continu pel mètode de modulació per ample de plusos PWM.

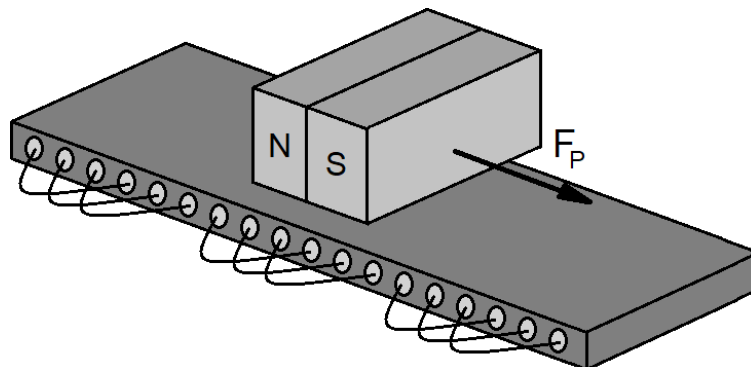


Figura 38. Motor lineal síncron LSM amb la única implementació de primari llarg LP

Per la característica de sortida dels motors síncrons, es requereix un control acurat de la freqüència en el procés d'acceleració i frenada, de tal manera que no "llisqui". S'entén per lliscar, el fet de que el rotor pugui perdre el seguiment del camp magnètic de l'estator.

Aquest sistema és preferible per treballar a altes velocitats ja que té major eficiència, igual que succeeix amb els motors síncrons. També, com els motors síncrons, el factor de potència és de tipus capacitatiu, amb un rang que va des de 0,75 fins a 0,91, depenent del model de tren.

El camp magnètic generat pel tren, es pot produir amb dos tipus d'electroimants: els electroimants convencionals EM amb nucli de ferro dolç, com el Transrapid alemany a Shanghai; i els electroimants superconductors SCM amb nucli d'aire, com el japonès MLX.

9 SISTEMA DE GUIA

Els trens de levitació magnètica requereixen una força de guia per evitar els desplaçaments laterals. Igual que la levitació, la guia es realitza electromagnèticament per forces magnètiques d'atracció o de repulsió.

9.1 Força magnètica de repulsió MRF

En el sistema de suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia separada LGS, com és el cas del Transrapid i mostrat a la Figura 39, els electroimants de guia laterals estan units al costat del tren i els rails de reacció es troben a les dos bandes de la guia o via. Els rails d'alumini E, al ser tallats pels electroimants de guia C, generen uns corrents de Foucault, i aquests reaccionen amb un flux que s'oposa al flux que l'ha creat.

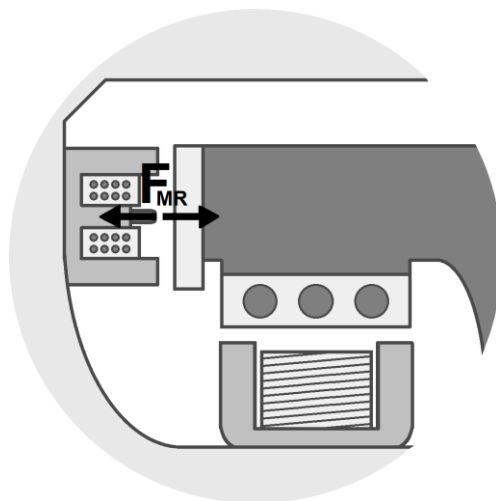


Figura 39. Centratge per repulsió en el cas EMS LGS

En el sistema de suspensió electrodinàmica EDS, tal com mostra la Figura 40, on la guia es representa a l'esquerra, i el vagó a la dreta, es pot observar que a les parets de la via es disposen les bobines en forma de buit de manera que la part superior fa la propulsió del tren com un motor síncron, mentre la part inferior amb menys espines fa la levitació per repulsió ja que el pol creat pel bucle superior és més potent que el creat pel bucle inferior. Durant tot el recorregut de la via, aquestes bobines en forma de "8" es troben interconnectades per parelles cada una amb la seva frontal. En aquest cas es crea un sud al bucle superior de la bobina, que és el que fa la tracció, mentre que en el bucle inferior es crea un nord que li provoca el centratge per repulsió i, a més a més, els dos bucles de la bobina provoquen la levitació. Per

tant, el sistema de propulsió comporta el propi centratge. Aquest sistema és un dels més implementats en els trens Maglev.

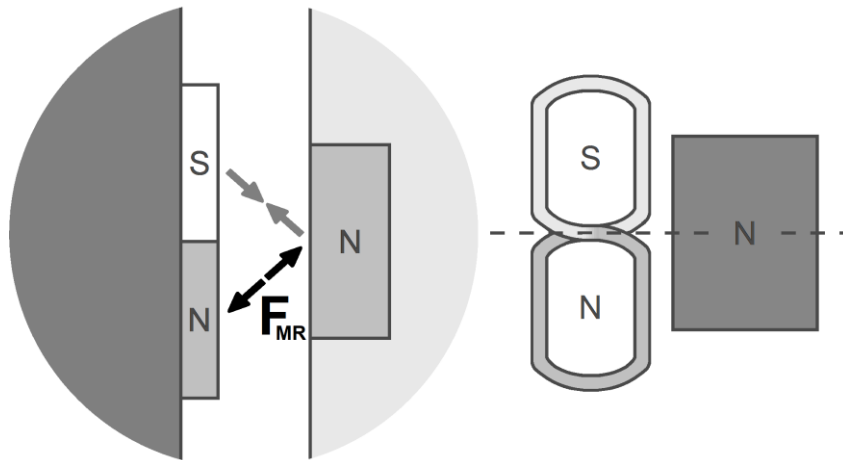


Figura 40. Centratge per repulsió en el cas EDS LSM

9.2 Força magnètica d'atracció MAF

Com mostra la Figura 41, aquest mètode associa el centratge amb la levitació. Si ve mitjançant sensors en el tren es detecta la distància de l'entreferro, per la mateixa distància, la reluctància total del circuit magnètic que formen les dues semis "U" pot variar. Per pròpia tendència física del magnetisme, les línies de força tendeixen a tancar-se i, per tant, tenen tendència a contraposar exactament les dues "U". Si no tinguessin forma de "U", tant l'electroimant del tren com el material ferro-magnètic de la guia, aquest fenomen seria molt més insignificant i el centratge casi no es produiria. Aquest mètode únicament s'utilitza en la suspensió electromagnètica EMS de levitació i guia integrada LGI. Cal puntualitzar que els debanats E i les barres d'alumini D s'utilitzen exclusivament per la propulsió.

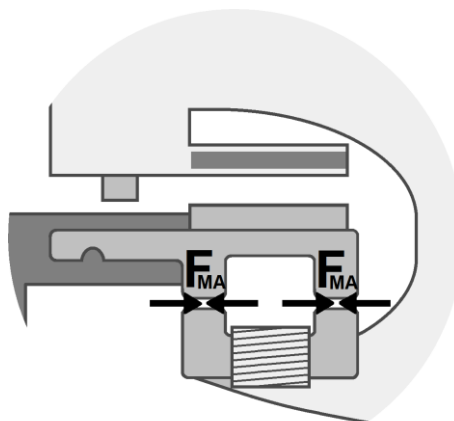


Figura 41. Sistema de guia de mitjançant la força magnètica d'atracció MAF

9.3 Càlcul de la força de guia

A continuació es desenvoluparan totes les forces que actuen quan el tren ha de seguir un moviment curvilini, calculant la força que han de fer els electroimants de guia i la inclinació mínima de la via a les corbes en funció de la massa de cada vagó i la seva velocitat màxima.

A la Figura 42 es mostra un Maglev com sòlid lliure, amb totes les forces que incideixen en una corba durant el trajecte.

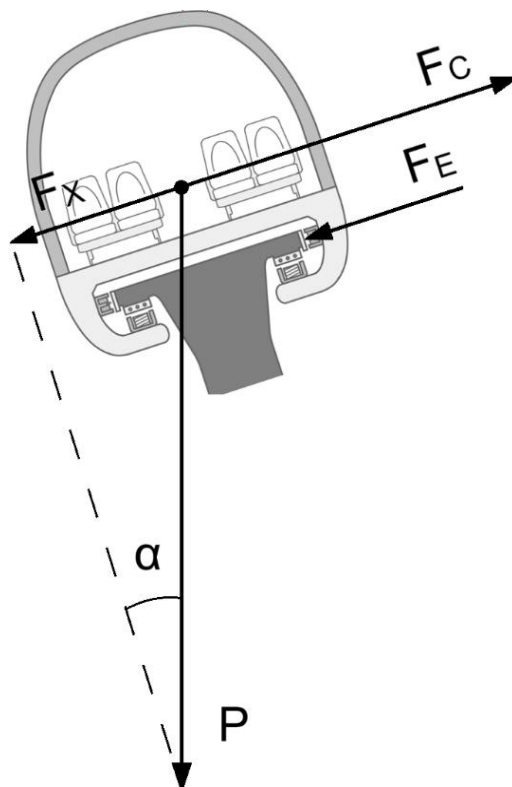


Figura 42. Forces que incideixen en un vagó com a sòlid lliure en una corba

La força centrífuga té el valor que s'indica a l'Equació 34.

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (\text{Eq. 34})$$

A l'Equació 35 es mostra la descomposició del pes a l'eix "x" en funció de la inclinació α .

$$F_x = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Eq. 35})$$

A l'Equació 36 es planteja que el sumatori de forces respecte l'eix "x" ha de ser igual a 0 per tal que el vagó no descarrili.

$$F_E = F_C - F_x \quad (\text{Eq. 36})$$

De les tres equacions anteriors, en resulta la següent Equació 37.

$$F_E = m \cdot \frac{v^2}{R} - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{v^2}{R \cdot g} - \frac{F_E}{m \cdot g}\right) \quad (\text{Eq. 37})$$

Es faran els càlculs pel model EMS Transrapid TR08S5, que té una massa total de 282.000kg, amb 5 vagons i per tant 56.400kg per vagó, i una velocitat màxima de 500km/h. Suposant que cada un dels 8 electroimants d'un lateral del vagó poden exercir una força màxima de repulsió de 20kN, per tant amb una força total de 160kN. I suposant un radi de curvatura R relativament petit de 2km, amb l'Equació 38 es determina el peralt α o la inclinació mínima que ha de tenir la via.

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{(500/3,6)^2}{2\text{k} \cdot 9,81} - \frac{160\text{k}}{56,4\text{k} \cdot 9,81}\right) = \arcsin(0,9831 - 0,2892) = 43,94^\circ \quad (\text{Eq. 38})$$

Per tant, un Maglev que circula a 500km/h, casi la meitat de la velocitat del so, caldrà que la via tingui un peralt mínim de 44° per poder fer una corba amb un radi de curvatura de 2km. Per aquesta raó, els trens que circulen a aquesta velocitat, solen tenir radis de curvatura molt més elevats.

10 SISTEMA DE TRANSFERÈNCIA D'ENERGIA AL TREN

Encara que tots els trens Maglev disposen de bateries, és necessari subministrar energia elèctrica des de fora per realitzar la levitació, la propulsió, l'alimentació de l'equip electrònic del tren i la recàrrega de bateries. La transferència d'energia al llarg de la via requereix l'ús d'un generador lineal o un contacte a mecànic, com el pantògraf, adequat al règim de velocitat del tren.

10.1 Pantògraf P

Per trens de suspensió electromagnètica EMS amb levitació i guia integrada LGI, descrits anteriorment, que treballen pel principi del motor d'inducció, el vagó és l'estator d'un motor d'inducció on es consumeix tota l'energia que cal subministrar el tren, i la via és l'induït format per una gàbia d'esquirol lineal que no requereix alimentació i, per tant, treballa de forma passiva. Per aquest motiu cal utilitzar un contacte mecànic al tren utilitzant un pantògraf, que actua com a escombretes, i una catenària. Aquest és un dels motius pel qual els trens amb propulsió de motor lineal d'inducció LIM tipus primari curt SP operen a mitges i baixes velocitats, inferiors a 110km/h. Uns exemples de trens Maglev amb catenària són el HSST japonès i el UTM coreà.

10.2 Generador lineal LG

La resta de sistemes de trens Maglev, que poden operar a velocitats superior als 110km/h, tenen la via alimentada amb sistemes trifàsics, formant l'estator d'un motor lineal síncron. L'única energia que aporta el tren és la necessària per alimentar els electroimants dels vagons que actuen com a inductors de flux, i per tant és una energia molt més reduïda. Aquest fet els permet obtenir l'energia necessària per la seva autonomia a partir de bateries de liti, que es recarreguen durant la circulació. Per exemple, el Transrapid amb propulsió de motor lineal síncron LSM, utilitza un generador lineal integrat al tren amb els electroimants de levitació. El generador lineal obté l'energia del camp magnètic en moviment quan el tren s'està desplaçant. L'avantatge del generador lineal per operacions d'alta velocitat és que no requereix contacte mecànic. No obstant, hi ha un petit problema causat per la fluctuació de la tensió induïda degut a la irregularitat de l'entreferro. En el Maglev MLX, a més del generador lineal, s'utilitza una turbina de gas com a font d'energia per carregar les bateries a baixa velocitat.

11 COMPARATIVA DE LES TÈCNiques DELS TRENS DE LEVITACIÓ MAGNÈTICA

Tal com s'ha especificat en els capítols anteriors, els trens Maglev es basen en diferents tipus de sistemes de propulsió, sistemes de levitació, sistemes de guia, sistemes de transferència d'energia al tren i tipus d'imants o electroimants que s'implementen. Això fa que la combinació de tots plegats generi una gran diversitat de variacions en els diferents models de trens Maglev, que actualment estan en funcionament, en pista de prova o en fase de disseny.

11.1 Tècniques dels trens de levitació magnètica

A la Figura 43 es mostra els diferents sistemes i subsistemes per la levitació, la propulsió, la guia i la transferència d'energia.

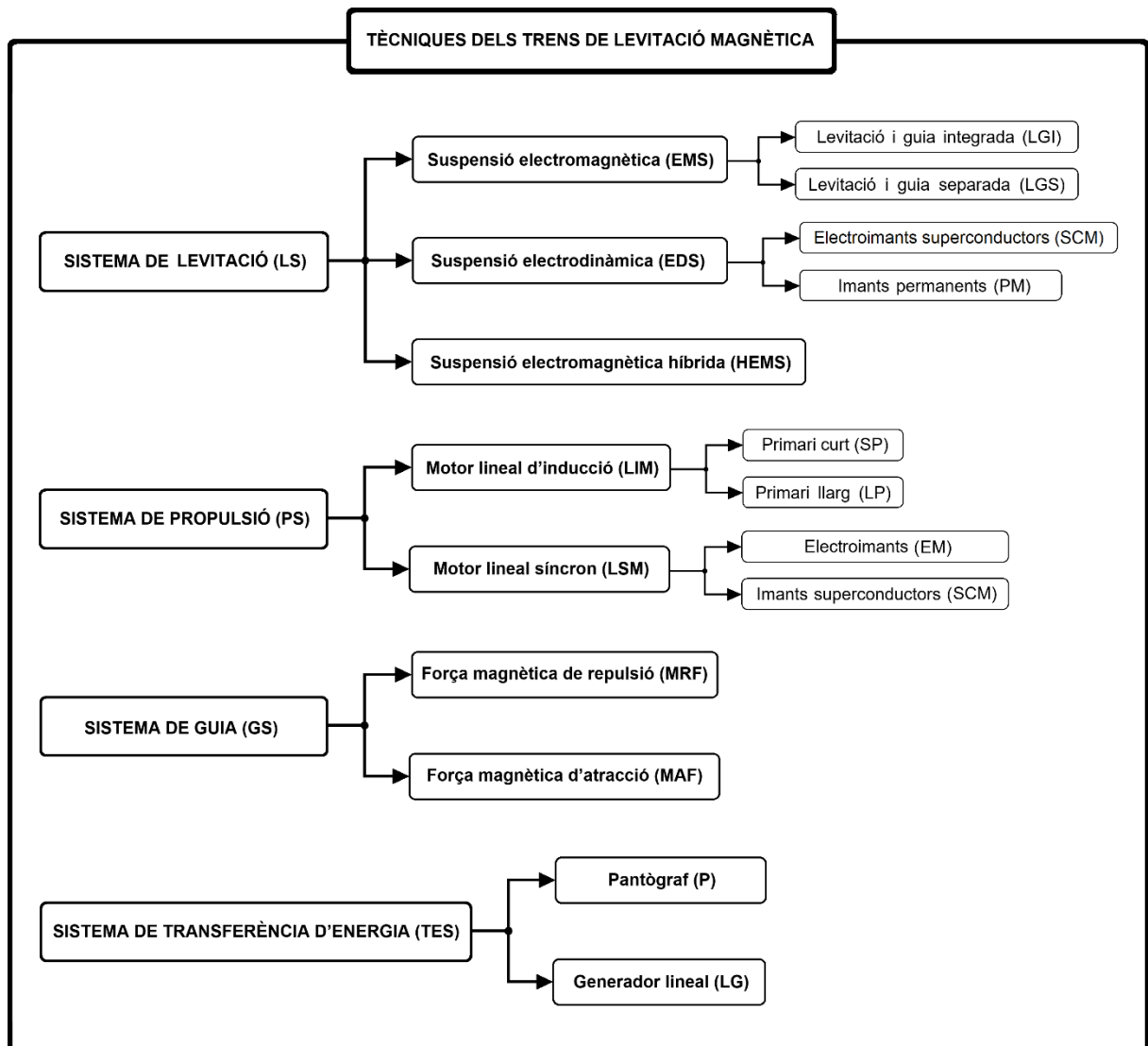


Figura 43. Classificació de les diverses tècniques

A la Figura 44 es mostren les seccions de les diferents combinacions dels trens Maglev.

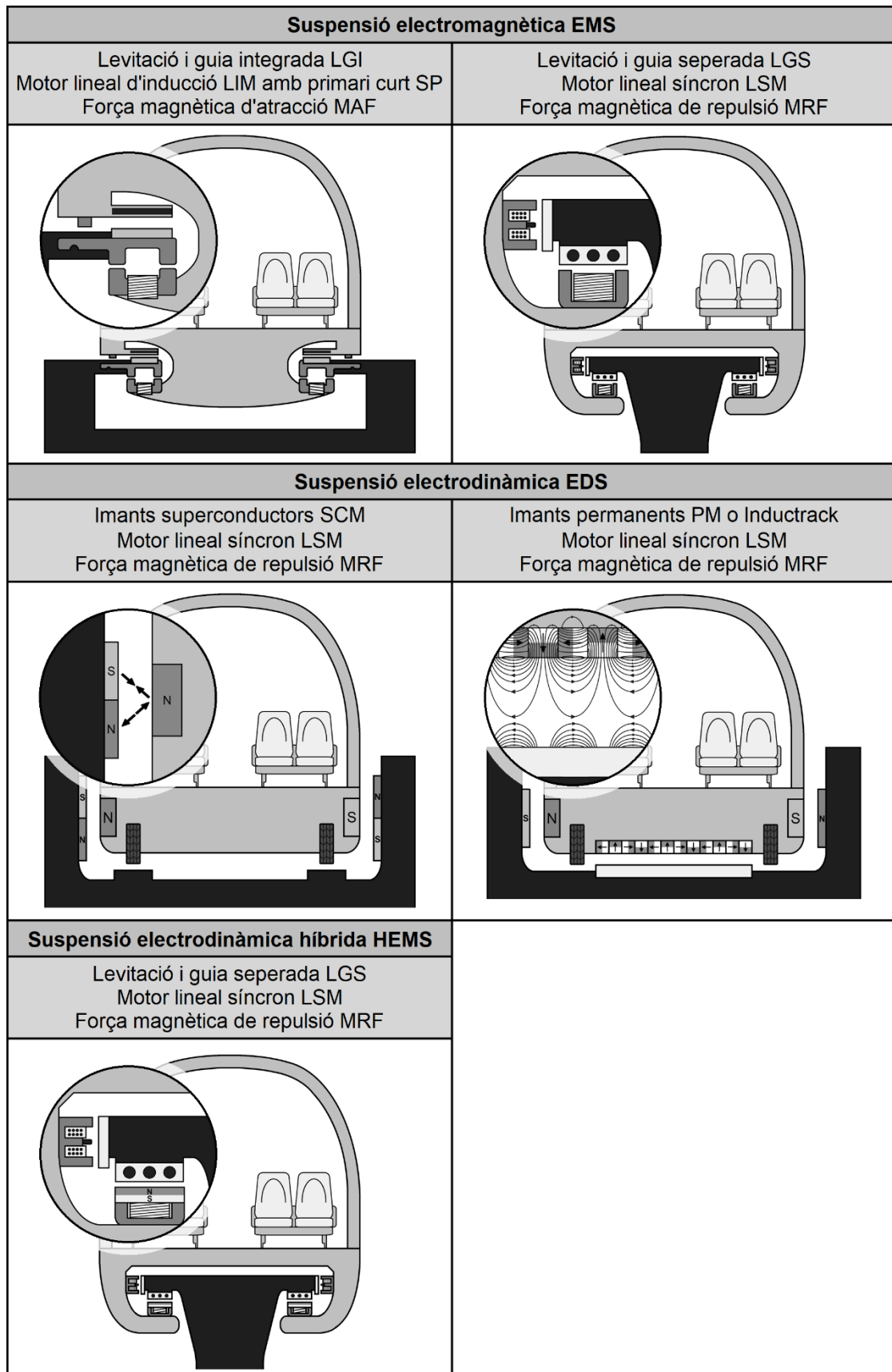


Figura 44. Perfils de les diferents tècniques

Els sistemes de control d'un tren Maglev requereixen tres trams a controlar: el de levitació, capaç de mantenir l'entreferro estable fins i tot en altes velocitats i en diferents càrregues; el de guia, capaç de mantenir el tren centrat entre els rails per tal que no descarrili en les corbes; i el de propulsió, que ha de regular un motor lineal desplegat, que pot ser síncron o asíncron, per tal de mantenir l'acceleració i frenada de manera òptima en funció de la velocitat instantània en cada moment.

Discernir el funcionament de cada model de tren Maglev té la seva complexitat, ja que cada un és el resultat de la combinació de les diferents tècniques utilitzades en el sistema de levitació, de propulsió, de centratge a la guia i de transferència energètica.

La interacció utilitzada per la propulsió, centratge i levitació, ocasiona que un cop escollit un determinat sistema de levitació i centratge, calgui escollir un determinat sistema de tracció o al rebés. Per tant les combinacions d'aquests sistemes que a la pràctica són factibles, avui en dia, són les representades a la Figura 44.

11.2 Comparativa entre els diferents sistemes de levitació EMS i EDS

La Taula 1 mostra una comparativa general relativa entre els sistemes de levitació EMS i EDS.

Característica	EMS		EDS	
	LGI	LGS	SCM	PM
Capacitat de levitació estàtica	Sí	Sí	No	No
Pneumàtics de goma	No	No	Sí	Sí
Estabilitat a altes velocitats	Baixa	Mitja	Alta	Alta
Camp magnètic a l'interior del vagó	Nul	Nul	Elevat	Elevat
Cost d'inversió del tram de via	Baix	Elevat	Mig	Mig
Cost de manteniment del tram de via	Baix	Mig	Mig	Mig
Cost d'operació	Mig	Elevat	Mig	Baix
Seguretat en cas de fallida energètica	Baixa	Baixa	Alta	Alta
Tolerància en el disseny de la via	Crítica	Crítica	Mitja	Mitja
Distàncies per les que està adequat	Curtes	Llargues	Llargues	Llargues
Complexitat del sistema de control	Alta	Molt alta	Baixa	Molt baixa
Energia de refrigeració d'electroimants	Nul-la	Nul-la	Elevada	Elevada
Distància màxima d'entreferro	Petita	Mitja	Alta	Alta
Velocitat màxima	Mitja	Alta	Elevada	Alta

Taula 1. Comparativa general entre el sistema EMS i EDS

11.3 Classificació dels diferents models de trens Maglev

La Taula 2 mostra una recopilació de les tècniques de levitació LS, propulsió PS, guia GS i transferència d'energia TES dels models de trens Maglev que actualment estan operatius.

Any	Referència	LS	PS	GS	TES	v_{max} (km/h)	d_e (mm)	Classificació servei
2005	Linimo Autom HSST (Japó)	EMS (LGI)	LIM (SP)	MAF	P	100	8÷12	Baixa/mitjana velocitat Distàncies curtes
2006	Shanghai Transrapid (Xina)	EMS (LGS)	LSM (LP)	MRF	LG	500	8÷12	Altes velocitats Distàncies llargues
2014	MLU/MLX (Japó)	EDS (SCM)	LSM (LP)	MRF	LG	581	80÷150	Altes velocitats Distàncies llargues

Taula 2. Classificació dels trens Maglev operatius en funció de les tècniques utilitzades

La Taula 3 mostra una recopilació de les tècniques de levitació LS, propulsió PS, guia GS i transferència d'energia TES dels models de trens Maglev en fase de proves i desenvolupament.

Any	Referència	LS	PS	GS	TES	v_{max} (km/h)	d_e (mm)	Classificació servei
2007	Inductrack (USA)	EDS (PM)	LSM (LP)	MRF	LG	500	80÷150	Altes velocitats Distàncies llargues
2008	UTM-02 (Corea del Sud)	EMS (LGI)	LIM (SP)	MAF	P	110	8÷12	Baixa/mitjana velocitat Distàncies curtes
2009	Swissmetro (Suïssa)	EMS (buit)	LSM (LP/SP)	MAF	LG	500	18÷22	Altes velocitats Distàncies llargues
2012	Transrapid (Alemanya)	EMS (LGS)	LSM (LP)	MRF	LG	420	8÷12	Altes velocitats Distàncies llargues
2014	JR Maglev (Japó)	EDS (SCM)	LSM (SCM)	MRF	LG	603	80÷150	Altes velocitats Distàncies llargues

Taula 3. Classificació dels trens Maglev en fase de proves en funció de les tècniques utilitzades

12 ANÀLISIS COMPARATIU DELS TRANSPORTS TRADICIONALS I TRENS MAGLEV

El consum energètic és un criteri fonamental en el càlcul dels costos operatius alhora de comprar les diverses característiques dels sistemes de ferrocarrils d'alta velocitat. A més també és molt important a l'hora de plantejar-se criteris de sostenibilitat ambiental del planeta.

12.1 Bases de comparació

Per tal que els càlculs siguin objectius, cal tenir en compte les velocitats mitges dels diferents trens Maglev on la principal pèrdua en el transport és la fricció en l'aire, que depèn del quadrat d'aquestes velocitats. En el cas del tren, la constant de fricció aerodinàmica no ve només donada per la forma de la locomotora sinó que la fricció més important es produeix per la viscositat de l'aire al llarg del tren.

Es demostra que, tot i que hi ha lleugers avantatges energètics en transport amb trens Maglev, no es pot considerar un avantatge important en comparació amb els trens convencionals. Però sí que aconsegueix reduir el temps de viatge amb uns consums similars. Per tant, són una opció prometedora per nous projectes d'infraestructura de transport.

No obstant, la decisió d'implementar aquest sistema s'ha de basar també en un anàlisi complet del cost, del cicle de vida i del cost d'inversió inicial que representa. Per tenir una referència dels costos d'inversió inicial d'infraestructures, cal mencionar que s'està construint una línia Maglev d'alta velocitat entre Tokyo i Nagoya en el Japó, amb una inversió estimada de la infraestructura d'aproximadament 50.000 milions d'euros. La construcció del mateix sistema Maglev japonès per connectar Baltimore i Washington ja està en una fase avançada de la planificació.

En aquest apartat es compara el consum d'energia dels sistemes de ferrocarrils Maglev de més alta velocitat i amb alguns anys de funcionament que seran el Transrapid que és un EMS-LGS i Chuo Shinkansen que és EDS-SCM i que treballen com a motor d'estator llarg, amb els ferrocarrils convencionals de rodes i rails.

Els costos que es tenen en compte per l'estudi inclou l'energia necessària per la tracció i els sistemes auxiliars com el suport i guia de vagons, il·luminació i climatització. No es tindrà en compte els costos d'explotació com el manteniment, el personal operatiu, l'assegurança, l'operació i la comercialització; el temps de desplaçament entre estacions; la capacitat de

transport i la freqüència del tren i un anàlisi integral dels costos del cicle de vida, incloent els costos d'inversió de la infraestructura d'alimentació elèctrica.

S'ha escollit l'alemany ICE-3 per la disponibilitat de dades fiables. L'últim sistema ICE 4 de la companyia Deutsche Bahn S.A., encara que és més modern que el ICE 3, no s'ha inclòs a la comparació degut el límit màxim de velocitat de només 250km/h. Pel sistema japonès Maglev L0 Chuo Shinkansen, no hi ha cap fitxa tècnica completa ja que encara s'està construint la primera part del projecte, una línia de 290km entre Tokyo i Nagoya. Com que un estudi que no inclogui el Chuo Shinkansen, que és un projecte en curs i amb un gran impacte de mercat, tindria poc sentit, s'han recopilat dades dels models anteriors MLX de la mateixa tecnologia EDS-SCM.

Els motius pel qual els diferents valors de consum energètic són bastant diferents són: les diferents característiques de la línia, la topografia; les diferents configuracions del tren dels sistemes ferroviaris; requisits específics per l'operador (accessoris, nombre de seients o confort), l'amplada dels passadissos, l'espai per guardar les maletes i els serveis de restaurant i, per tant, la capacitat màxima total de seients; el disseny del sistema de tracció i l'alimentació elèctrica, especialment en els sistemes Maglev; les diferents longituds de vehicle, que afecten a la resistència de la conducció i el pes del vehicle; la velocitat de disseny operacional; el número d'estacions i distància entre aquestes.

Les dades dels sistemes ferroviaris (roda-rails), es mostren per 300km/h (N 700) i 330km/h (ICE 3 Velaro D). Per tant, l'energia es podria comparar directament entre els sistemes ferroviaris i els Maglev només per aquest rang de velocitat. Les velocitats més altes de fins a 550km/h en funcionament normal semblen factibles només amb els sistemes Maglev basats en el sistema d'accionament del estator llarg.

12.2 Consum en funció de la tipologia dels trens

S'han seleccionat els següents sistemes ferroviaris amb serveis d'alta velocitat per la comparació. Els sistemes de ferroviaris convencionals: el ICE 3 (Alemanya), el Shinkansen N 700 (Japó) i TGV Duplex Dasye (França). Mentre els sistemes Maglev seleccionats són: el Transrapid 08 (Alemanya i Xina) que és el descrit anteriorment com a EMS-LGS-MRF; el Chuo Shinkansen Maglev L0 (Japó) que utilitza els sistemes EDS-SCM-LSM-MRF, descrits anteriorment.

Si ve, els trens convencionals tenen determinada la potència dels seus motors, en els Maglev es pot aconseguir la potència a partir de la Figura 45 on es determina la potència per seient i per quilòmetre en funció de les velocitats dels diferents trens.

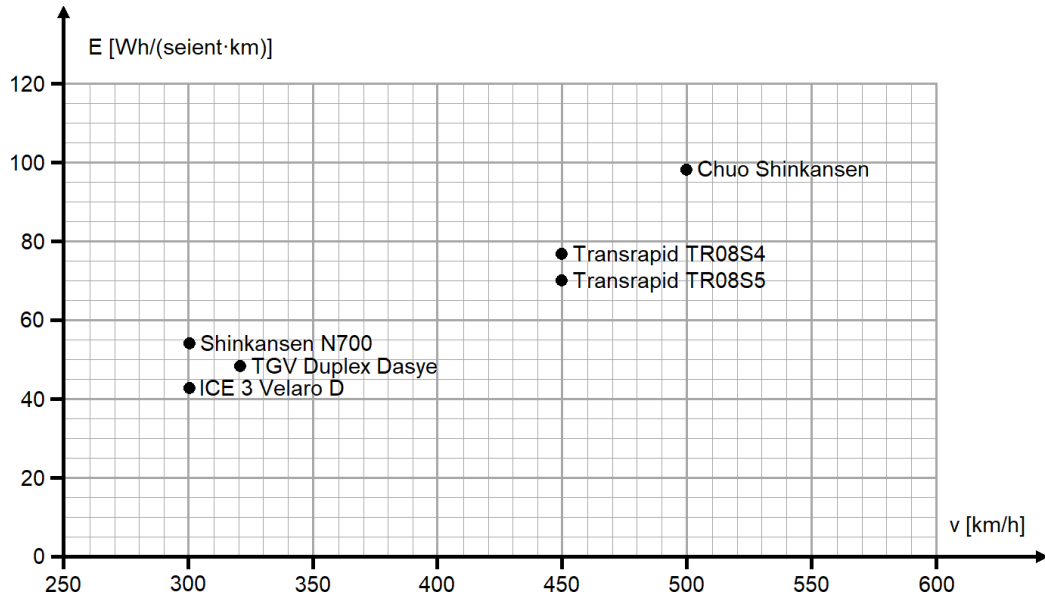


Figura 45. Energia consumida per seient i quilòmetres amb diferents models Maglev

En el següent estudi, el consum d'energia específic pels sistemes es compara en funció d'un paràmetra: l'energia, en MJ o en litres de gasolina per seient, per ocupació i per quilòmetre. A partir de la Figura 45, a l'Equació 39 es calcula la potència del Chuo Shinkansen de 12 seccions i 706 seients, que a 500km/h consumeix 98Wh/(seients·km).

$$P_C = \frac{E_C}{t} = \frac{98\text{Wh}}{\text{seients}\cdot\text{km}} \cdot \frac{500\text{km}}{\text{h}} \cdot 706 \text{ seients} = 34,59\text{MW} \quad (\text{Eq. 39})$$

La potència del Transrapid de 4 seccions de Berlín amb 360 seients, que a 450km/h consumeix 76Wh/(seients·km) es mostra a l'Equació 40.

$$P_C = \frac{E_C}{t} = \frac{76\text{Wh}}{\text{seients}\cdot\text{km}} \cdot \frac{450\text{km}}{\text{h}} \cdot 360 \text{ seients} = 12,31\text{MW} \quad (\text{Eq. 40})$$

La potència del Transrapid de 5 seccions de Leipzig amb 446 seients, que a 450km/h consumeix 72Wh/(seients·km) es mostra a l'Equació 41.

$$P_C = \frac{E_C}{t} = \frac{72\text{Wh}}{\text{seients}\cdot\text{km}} \cdot \frac{450\text{km}}{\text{h}} \cdot 446 \text{ seients} = 14,45\text{MW} \quad (\text{Eq. 41})$$

Amb l'Equació 42 es calcula l'energia consumida, amb la unitat de referència anterior de litres de gasolina i tenint en compte que el poder combustible de la gasolina és de 34,78MJ/l, a partir de la seva potència i la seva velocitat.

$$E_C \left(\frac{l}{100km} \right) = P \cdot \frac{x}{v} = P(kW) \cdot \frac{100km}{v(km/h)} \cdot \frac{3,6ks}{1h} \cdot \frac{1J}{1W \cdot 1s} \cdot \frac{1l}{34,78MJ} = \frac{P(kW) \cdot 360}{v(km/h) \cdot 34,78} \quad (\text{Eq. 42})$$

L'energia consumida cada 100km pel ICE 3 Velaro D és la calculada a l'Equació 43.

$$E_C \left(\frac{l}{100km} \right) = \frac{8.000 \cdot 360}{330 \cdot 34,78} = 251 \text{ l/100km} \quad (\text{Eq. 43})$$

L'energia consumida cada 100km pel Shinkansen N700 és la calculada a l'Equació 44.

$$E_C \left(\frac{l}{100km} \right) = \frac{9.760 \cdot 360}{300 \cdot 34,78} = 337 \text{ l/100km} \quad (\text{Eq. 44})$$

L'energia consumida cada 100km pel TGV Duplex Dasye és la calculada a l'Equació 45.

$$E_C \left(\frac{l}{100km} \right) = \frac{9.280 \cdot 360}{320 \cdot 34,78} = 300 \text{ l/100km} \quad (\text{Eq. 45})$$

L'energia consumida cada 100km pel Transrapid TR08S4 és la calculada a l'Equació 46.

$$E_C \left(\frac{l}{100km} \right) = \frac{12.310 \cdot 360}{500 \cdot 34,78} = 255 \text{ l/100km} \quad (\text{Eq. 46})$$

L'energia consumida cada 100km pel Transrapid TR08S5 és la calculada a l'Equació 47.

$$E_C \left(\frac{l}{100km} \right) = \frac{14.450 \cdot 360}{500 \cdot 34,78} = 299 \text{ l/100km} \quad (\text{Eq. 47})$$

L'energia consumida cada 100km pel Chuo Shinkansen és la calculada a l'Equació 48.

$$E_C \left(\frac{l}{100km} \right) = \frac{34.590 \cdot 360}{550 \cdot 34,78} = 651 \text{ l/100km} \quad (\text{Eq. 48})$$

La Taula 4 mostra tots els paràmetres comparatius utilitzats en aquest estudi, on n_v és el número de vagons, n_m és número de motors, que en el cas que valgui 1 significa que té un motor lineal, P és la potència consumida, m_b és la massa en buit o tara, n_s és número total de seients, l és la longitud total del tren, a és amplada del vagó, A_T és àrea total del tren i v_M és la velocitat màxima del tren.

Models de tren	n_v	m_b (T)	n_s	l (m)	a (m)	A_T (m ²)	n_m	P_m (kW)	P_T (MW)	v_M (km/h)	E_c (l/100km)
ICE 3 Velaro D	8	455	460	201	2,92	587	16	500	8,00	330	251
Shinkansen N700	8	356	546	205	3,36	689	32	305	9,76	300	337
TGV Duplex Dasye	10	380	510	200	2,90	580	8	1.160	9,28	320	300
Transrapid TR08S4	4	226	360	100	3,70	370	1	12.310	12,31	500	255
Transrapid TR08S5	5	282	446	125	3,70	463	1	14.450	14,45	500	299
Chuo Shinkansen	12	300	706	299	2,90	867	1	34.590	34,59	550	651

Taula 4. Resum del funcionament del circuit

A la Taula 5 es calcula l'energia consumida per persona amb una ocupació estàndard idèntica de tots els trens del 65%, encara que aquest factor depèn de les polítiques dels diferents estats referents al transport públic.

Models de tren	n_s	P_T (MW)	E_c (l/100km)	$E_{CP-100\%}$ (l/ n_s 100km)	$E_{CP-100\%}$ (MJ/ n_s 100km)	$E_{CP-65\%}$ (l/p100km)	$E_{CP-65\%}$ (MJ/p100km)
ICE 3 Velaro D	460	8,00	251	0,55	18,98	0,84	29,20
Shinkansen N700	546	9,76	337	0,62	21,47	0,95	33,03
TGV Duplex Dasye	510	9,28	300	0,59	20,46	0,90	31,48
Transrapid TR08S4	360	12,31	255	0,71	24,64	1,09	37,90
Transrapid TR08S5	446	14,45	299	0,67	23,32	1,03	35,87
Chuo Shinkansen	706	34,59	651	0,92	32,07	1,42	49,34

Taula 5. Resum del funcionament del circuit

12.3 Consum en funció de la tipologia de diversos mitjans de transport

La Taula 6, mostra una recopilació dels consums de la majoria de mitjans de transports més populars i alguns trens Maglev.

Les dades dels consums dels transports tradicionals s'ha obtingut a partir de les fons FES "Das System Transrapid" 2001 i IFEU 2006 referenciades a la biografia, indica el consum en litres de gasolina per cada 100km en diferents mitjans de transport.

La unitat energètica en litres per gasolina es fa pràctica per comparar-ho amb el mitjà de transport més convencional de tots, que és el cotxe.

El poder combustible de la gasolina és de 34,78MJ per litre, dels quals amb un motor de combustió modern se'n aprofiten menys de la meitat perquè la limitació de la conversió entre calor i treball, estipulada pel segon principi de la termodinàmica és a la pràctica en aquests motors inferior al 30%.

Mitjà de transport	V _M (km/h)	O _m (%)	E _{CS} (l/n _s 100km)	E _{CS} (MJ/n _s 100km)	E _{CP} (l/p100km)	E _{CP} (MJ/p100km)
Tramvia	20	21	0,40	13,91	1,70	59,13
Autobús	100	21	0,60	20,87	2,70	93,91
Tren rodalies	120	30	0,70	24,35	2,30	79,99
Automòbil	120	37	2,40	83,47	6,00	208,68
Tren regional	160	20	1,10	38,26	5,40	187,81
Shinkansen N700	300	65	0,62	21,47	0,95	33,03
TGV Duplex Dasye	320	65	0,59	20,46	0,90	31,48
ICE 3 Velaro D	330	65	0,55	18,98	0,84	29,20
Maglev Transrapid TR08S4	500	65	0,71	24,64	1,09	37,90
Maglev Transrapid TR08S5	500	65	0,67	23,32	1,03	35,87
Maglev Chuo Shinkansen	550	65	0,92	32,07	1,42	49,34
Avió	900	66	4,40	153,03	6,70	233,03

Taula 6. Comparativa de consums de diferents mitjans de transport

Aquesta Aquesta taula és resultat de varis estudis estadístics, en el qual s'hi inclou la mitjana d'ocupació de places de cada un dels sistemes de transport.

Especifica l'energia consumida, tant en MJ com en litres de gasolina per cada 100km i seient o passatger.

La utilització del litre de gasolina com a unitat de mesura d'energia té l'objectiu de donar una comparativa de domini públic, sobretot respecte l'automòbil.

12.4 Resultats de la comparativa

A partir de la Taula 6, es generen les gràfiques de la Figura 46 per tal de fer un anàlisi visual ràpid dels resultats.

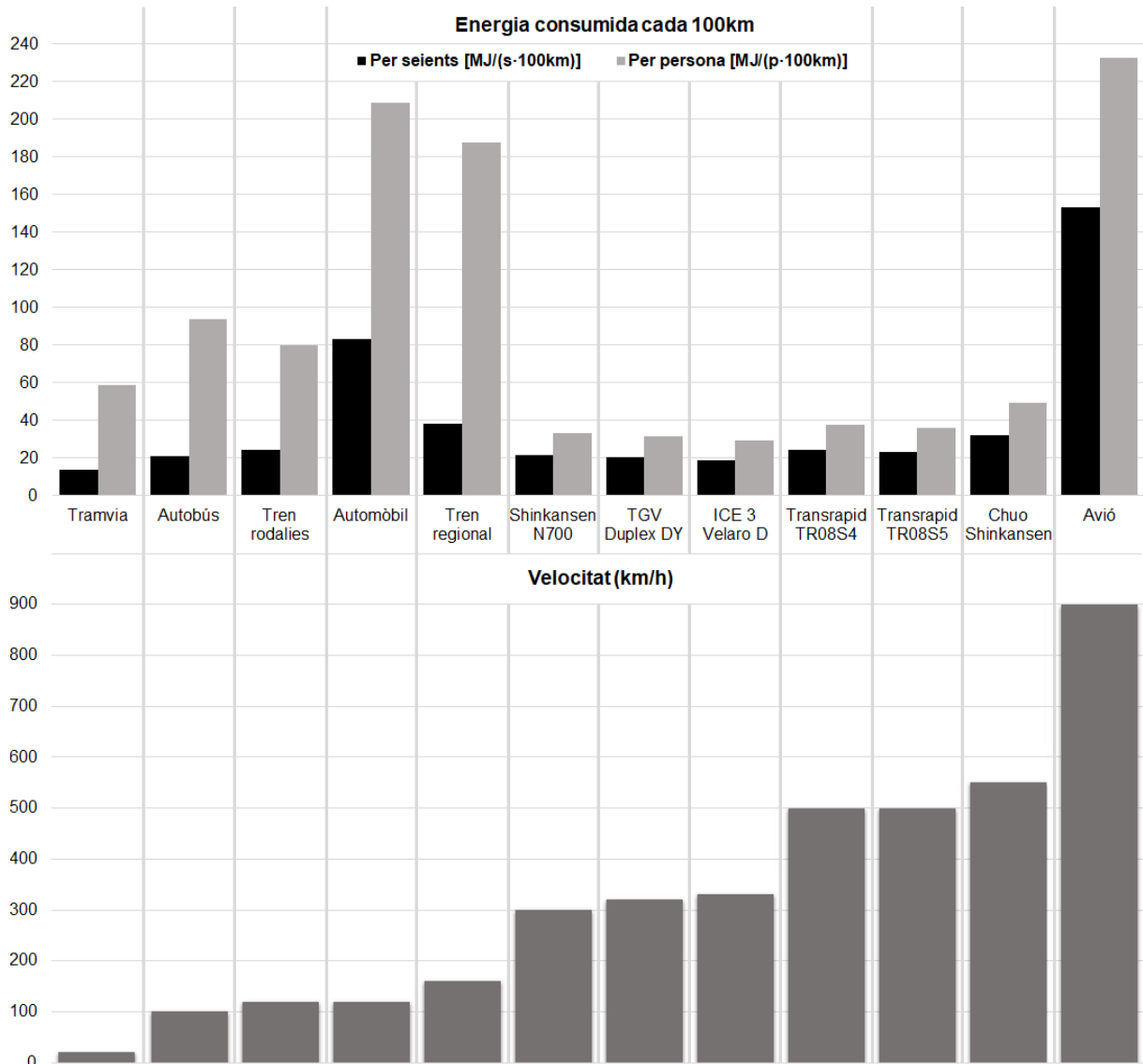


Figura 46. Anàlisi comparatiu de consums i velocitats de diferents mitjans de transport

S'observa que el mitjà de transport més eficient a la és el ICE 3 Velaro D, es tracta d'un sistema de trens convencionals d'alta velocitat dels ferrocarrils alemanys de Deutsche Bahn AG, que circula a llargues distàncies entre països veïns. Cal constatar que els 330km/h assolits per aquest tren s'apropa al límit teòric a que pot circular un tren convencional. El seu consum per seient no arriba a 19MJ cada 100km i considerant que la seva mitjana d'ocupació és força elevada, el consum real per viatger és poc més de 29MJ cada 100km, fet que representa, 0,85 litres de gasolina cada 100km. En comparació al automòbil, que de mitjana

consumeix 6 litres per persona cada 100km, ja que normalment té una ocupació molt baixa, representa un elevat estalvi energètic. Però si es té en compte també que el cotxe realment crema combustible i, en canvi, el tren ICE 3 Velaro D s'alimenta amb energia elèctrica, la reducció de partícules contaminants a l'atmosfera com el diòxid de carboni, el monòxid de carboni, el diòxid de sofre i el plom, encara és més elevada. En tot cas sempre dependrà del sistema de producció de l'energia de les centrals elèctriques d'Alemanya.

Tanmateix, s'observa el tramvia com el mitjà de transport que seria més eficient si tingués una elevada ocupació però malauradament, aquesta no sobrepassa de mitjana el 20%. A més a més, la velocitat màxima del tramvia de 20km/h, juntament amb el preu del bitllet, a vegades no representa una alternativa pel desplaçament, fet que es demostra simplement per la seva ocupació.

Si es té en compte que la mitjana de velocitat del cotxe és molt inferior a la d'un avió i pensant que el consum energètic és directament proporcional al quadrat de la velocitat en que circula, cal constatar que l'eficiència del transport en cotxe és, de lluny, la més baixa de totes. Tot i que, amb la mancança d'infraestructures ferroviàries que hi ha a molts municipis, malauradament es torna imprescindible perquè és el mitjà de transport més pràctic.

Tot i així, quan es considera també el factor de la velocitat, s'aprecia que els sistemes de trens Maglev són energèticament molt competents. Principalment el Transrapid, amb un consum per seient de 23,32MJ cada 100km i un consum real per passatger de 35,87MJ cada 100km, que equivaldria a 1,03 litres de gasolina, el fa molt competitiu. Sobretot si es té en compte que la velocitat que adquireix és de 500km/h. Fins i tot el Maglev Chuo Shinkansen, assolint els 550km/h, té un consum relativament baix si el comparem amb els avions i, en canvi, és una alternativa realment pràctica respecte aquestes aeronaus. Com que el sistema Maglev japonès entre Tòquio i Nogoya funciona gairebé completament al llarg d'una ruta de túnels, el consum d'energia del sistema Chuo-Shinkansen és considerablement superior a causa de l'alta resistència i les pertorbacions generades en el túnel en el rang d'alta velocitat en comparació amb els projectes anteriors al Transrapid, que eren principalment rutes elevades o a nivell de terra sense seccions llargues de túnels.

És evident que un dels mitjans de transport més contaminants, ja que consumeixen querosè i menys eficients en el transport són els avions. Amb un consum que assoleix els 6,7 litres de gasolina per persona cada 100km, que tenint en compte que el querosè té un poder calorífic pràcticament idèntic que la gasolina, representen també 6,7 litres de querosè cremats a

l'atmosfera mitjançant els turboreactors dels avions. Un avió estàndard de passatgers com el JET A, assoleix velocitats al voltant dels 900km/h, que només justifica la diferència de consums respecte els trens Maglev, pel fet de que els trens no poden travessar els oceans.

Si es comparen els diferents trens Maglev d'alta velocitat, s'observa que cap dels sistemes destaca molt per sobre d'un altre, però i si es comparen respecte els altres trens convencionals d'alta velocitat, es mostra una millora en l'eficiència dels sistemes Malev, això sí considerant dins el factor eficiència, tant el rendiment energètic com la velocitat mitjana de circulació.

Aquest estudi demostra que els sistemes Maglev d'alta velocitat es poden considerar objectivament sistemes de transport pràctics i eficients des de la perspectiva del consum d'energia, especialment pel transport de velocitats superiors a 330km/h. Maglev es una opció prometedora tant a l'hora de reduir el temps de viatge, com a l'hora trobar alternatives per reduir els consums energètics. Aquest relativament baix consum energètic també comporta la reducció de les tarifes del trajecte i suposa un sistema sostenible econòmicament i socialment orientada al futur i no discriminatori.

13 LEVITADOR PER ATRACCIÓ

La realització del disseny del levitador per atracció és trivial, simplement s'ha pensat en detectar la posició del levitador que, si està format per un imant permanent, la seva proximitat és fàcilment detectable amb un sensor d'efecte Hall.

Aquest sistema de levitació per atracció és l'utilitzat en el sistema de suspensió electromagnètica dels trens Maglev. Representa el sistema amb el control més simple, ja que solament requereix la regulació de l'eix vertical, per això el resultat és un circuit relativament senzill amb una referència de posició vertical determinada per un potenciòmetre i una lectura de la posició vertical determinada per un sensor lineal d'efecte Hall. En el circuit de la Figura 47 es pot observar una doble referència commutable per tal de fer una demostració de levitació de dues càrregues de masses diferents, les quals s'han de trobar a unes alçades també diferents. La dificultat d'ajustar cada una de les masses, amb les seves respectives distàncies, i per tant entreferros, fa oportú implementar els dos potenciòmetres amb una commutació de les referències mitjançant un simple pont.

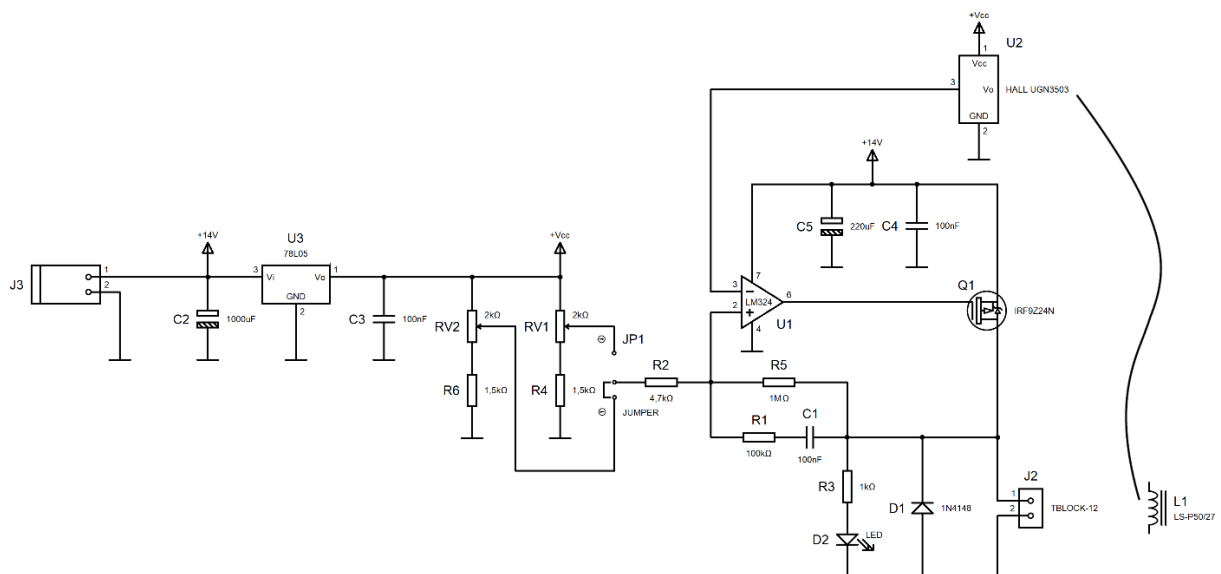


Figura 47. Esquema del circuit del levitador per atracció

S'ha realitzat una placa que té únicament finalitats educatives i, per qüestions econòmiques, s'ha desenvolupat a una sola cara. Com que la placa també implementa el propi electroimant, les seves dimensions són un xic més grans que les que cal per suportar la resta de components.

Com es pot observar a la Figura 48, les dimensions relatives de l'electroimant són força elevades, ja que aquest sistema requereix electroimants prou potents com perquè tota la força de sustentació, que és el producte de la massa per gravetat, la faci únicament aquest electroimant. Amb l'Equació 27 d'aquest document, es pot calcular el valor dels diferents entreferros necessaris per fer levitar les diferents masses.

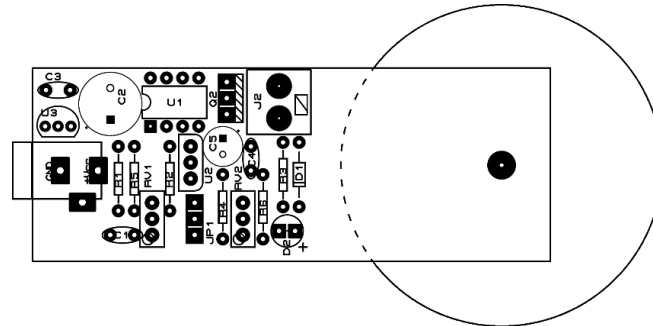


Figura 48. Cara de components de la placa de levitació per atracció

A la Figura 49 es mostra la cara de pistes, que es troba acotada en el plànol 2 del document de plànols del projecte.

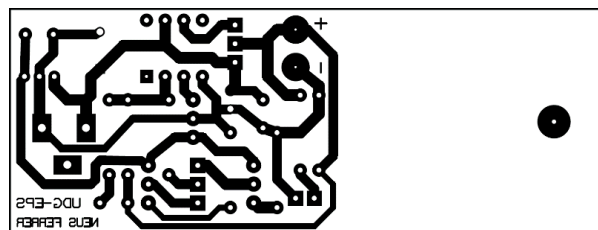


Figura 49. Cara de pistes de la placa de levitació per atracció

La Figura 50 mostra una visualització 3D del disseny de la PCB.

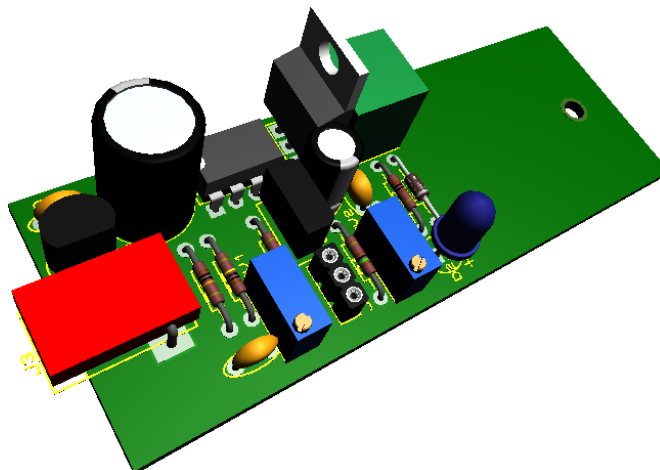


Figura 50. Visualització 3D del PCB del levitador per atracció

Per l'anàlisi del disseny del prototip de levitació per atracció, s'ha dividit el circuit en tres parts: circuit estabilitzador, circuit de control i circuit de potència. A la Figura 51 s'aprecien els esquemes parcials que conformen la totalitat del circuit.

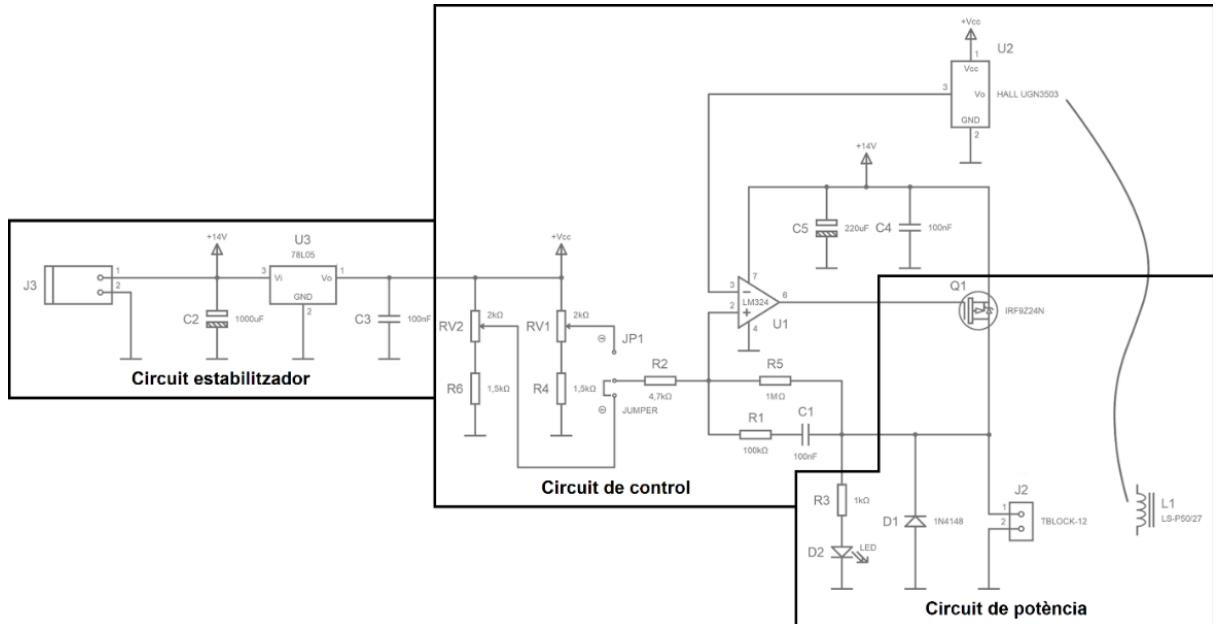


Figura 51. Esquemes parcials que conformen el circuit del levitador per atracció

13.1 Font d'alimentació externa i estabilitzador

Pel connector J3 entra una alimentació, a partir d'una font de 14V capaç de subministrar un mínim de 1A. Aquesta alimentació s'utilitza per dues finalitats: la primera és alimentar el circuit de potència, fet que generarà un arrissat considerable en aquesta tensió, i la segona és alimentar l'entrada de l'estabilitzador, la qual ha de garantir una tensió de sortida estable i precisa de 5V amb una mínima variació.

El condensador C2 de 1000µF, a l'entrada de l'estabilitzador s'encarrega de mantenir els 14V amb el menor arrissat possible, ja que l'activació de l'electroimant produeix un consum que provocaria un arrissat massa elevat a l'entrada de l'estabilitzador.

Per alimentar tant la referència com la lectura del Hall, cal una tensió ben estable, la qual no influeixi en l'arrissat que hi pugui haver en els 14V d'entrada. Per aquest motiu s'utilitza el conegut estabilitzador 78L05, que incorpora un circuit interior amb un bon rang d'estabilització i proporciona 5V a la sortida, sempre i quan l'entrada estigui compresa entre $7V \div 30V$.

L'estabilitzador 78L05 és una versió del 7805, que té un encapsulat TO-3, però amb l'encapsulat SO-8 que és molt més petit. En aquest circuit l'estabilitzador no requereix gaire intensitat de sortida i per tant no necessita poder dissipar gaire potència. Subministra l'alimentació de 5V només al Hall i a les referències, amb una intensitat determinada per l'Equació 49, on els 13mA són determinats per la intensitat màxima que pot consumir el Hall i els 3,5k Ω és el valor de les referències.

$$I_{o \max 78L05} = 2 \cdot \frac{5}{3,5k} + 13m = 15,86mA \quad (\text{Eq. 49})$$

Un cop calculada la intensitat màxima, a l'Equació 50 es calcula la potència dissipada que aquesta provoca.

$$P_{\max 78L05} = (14 - 5) \cdot 15,86m = 142,7mW \quad (\text{Eq. 50})$$

Aquesta potència és molt inferior a la màxima potència que pot dissipar aquest encapsulat, que ve a ser de l'ordre de 1,5W.

El condensador C3 de 100nF s'ha col·locat per eliminar els pics produïts per la commutació de l'electroimant.

13.2 Circuit de potència

La construcció pròpia d'un electroimant requereix la necessitat d'adquirir un nucli de ferro dolç amb baixa histèresis, per tant un aliatge de ferro i silici capaç de reduir al màxim les pèrdues per histèresis. L'adquisició d'aquest material magnètic a nivell particular, i per tant en baixes quantitats, no és factible. Tampoc es pot utilitzar un nucli magnètic d'un transformador qualsevol ja que és un material pensat per tenir poques pèrdues a 50Hz.

En definitiva, per la construcció d'aquest prototip, s'ha estimat convenient utilitzar l'electroimant comercial LS-P50/27 amb les següents característiques: 2.500 espines, un diàmetre exterior de 50mm, un diàmetre interior de 27mm, una alçada de 22mm, una resistència interna de 20 Ω i capaç d'atraure una massa de fins a 50kg quan s'alimenta a 14V, per tant té un consum de 0,7A, així que pràcticament no s'escalfa a aquesta tensió. Se'l farà treballar per levitació, per tant la massa que podrà suportar és molt inferior a 50kg però és

suficient per fer un prototip didàctic que demostrï el sistema de levitació. En el prototip, aquest electroimant treballa a 14V i es pot observar empíricament que no s'escalfa.

El MOSFET Q1 de canal P treballa a tall i saturació a partir de la sortida d'un comparador, que entrega 0V per activar-lo i pràcticament 14V per fer-lo treballar en tall. Pel propi funcionament del MOSFET, la intensitat requerida a la porta és pràcticament nul·la i, degut a la configuració de sortidor comú, la única caiguda de tensió entre drenador i sortidor del MOSFET és el producte de la intensitat de drenador o sortidor per la resistència interna del mateix.

Ja que la placa està pensada per poder activar diversos electroimants, s'ha utilitzat un MOSFET IRF9Z24N, que és un component molt utilitzat i molt comercial, per tant té un preu molt assequible. A més, és d'elevada potència, ja que és capaç de commutar una intensitat màxima de 75A, amb una resistència típica interna entre drenador i sortidor especialment baixa, segons el full de característiques tècniques aquesta és de 0,02Ω. Per tant, si s'utilitza aquest MOSFET per commutar la càrrega que representa l'electroimant, la màxima caiguda de tensió que hi haurà entre sortidor i drenador és aproximadament la que es calcula a la següent Equació 51.

$$V_{\text{IRF9Z24N}} = 0,02 \cdot \frac{14}{20} = 0,014\text{V} \quad (\text{Eq. 51})$$

L'Equació 52 representa la potència a dissipar pel MOSFET, tenint en compte la caiguda de tensió calculada anteriorment.

$$P_{\text{IRF9Z24N}} = 0,014 \cdot \frac{14}{20} = 9,8\text{mW} \quad (\text{Eq. 52})$$

L'encapsulat del MOSFET tipus TO-3, permet dissipar aquesta potència pràcticament a temperatura ambient, sense que s'escalfi el més mínim.

El díode LED D2, que es troba en sèrie amb R3, té la funció de poder visualitzar l'activació i desactivació de l'electroimant. El díode D1 és necessari per eliminar els pics d'inversa que apareixen durant la desconexió de l'electroimant. Aquests són determinats per la llei de Faraday-Lenz i, com aquesta indica, es genera una tensió molt elevada que s'oposa a la força que l'ha creat. Tot i així es podria prescindir d'aquest, ja que el MOSFET porta incorporat un díode intern.

13.3 Circuit de control

Com sempre, el circuit de control està format per tres parts: la magnitud de referència, la lectura i la realimentació.

Els divisors de tensió RV2 en sèrie amb R6 i RV1 en sèrie amb R4, col·locades a la sortida de l'estabilitzador, permeten ajustar l'entrada positiva del comparador entre $5V \div 2'14V$. El segon divisor de tensió serveix per permetre tenir dos ajustaments diferents per dues masses a levitar diferents.

S'ha utilitzat el OP TL071, configurat com a comparador, pel control del MOSFET. Aquest component també és molt comercial i la seva elevada producció dona com a resultat un baix cost.

El Hall U2, de referència UGN3503, és un sensor d'inducció magnètica molt sensible i molt lineal, tal com s'observa al corresponent full de característiques tècniques. S'alimenta a una tensió estabilitzada de 5V i la seva sortida es connecta a l'entrada negativa del comparador. Quan s'apropa l'imant, que és part del levitador, al Hall, aquest rep una intensitat de línies de força o inducció magnètica que és proporcional al quadrat de la distància que els separa i el Hall entrega una tensió de sortida totalment proporcional a la inducció.

En el full de característiques tècniques, es pot observar que la tensió de sortida del Hall és de 2,5V en absència d'inducció i oscil·la aproximadament entre $1V \div 4V$, en funció de la direcció de les línies de força respecte a la perpendicular del pla del sensor Hall.

Quan l'imant del levitador s'acosta al Hall, degut a l'orientació del mateix Hall respecte l'imant, aquest disminueix la tensió de sortida, fent que guanyi l'entrada positiva que és la referència i per tant el comparador entrega 14V a la sortida. Conseqüentment el MOSFET de canal P es posa en tall, OFF, eliminant la intensitat de l'electroimant i permetent que el levitador caigui.

Quan el levitador ha baixat suficient com perquè la tensió de sortida del Hall sigui més elevada que la referència, el comparador dona 0V a la sortida, activant així el MOSFET i aquest l'electroimant.

La distància entre ambdós punts serà l'interval d'oscil·lació del levitador, que es pretén que sigui relativament baix.

La Taula 7 resumeix el funcionament del levitador descrit anteriorment.

Levitador respecte el Hall	Sortida Hall (V)	Entrada amb més tensió comparador	Sortida comparador (V)	MOSFET	Electroimant
Lluny	4	Entrada -	0	Activat	Activat
Prop	1	Entrada +	14	Desactivat	Desactivat

Taula 7. Resum del funcionament del circuit

Per tant, el levitador ha d'estar basculant entre dos estats d'alçada. La distància entre el levitador i l'electroimant, en l'alçada màxima, ha de ser insuficientment elevada com perquè l'imant no s'enganxi directament a l'electroimant.

I la distància entre el levitador i l'electroimant, en l'alçada mínima, ha de ser suficientment reduïda com perquè l'imant encara el pugui atraure. Per aconseguir controlar aquest increment d'alçada, cal estipular una resistència de llindar, que permeti donar dos nivells a l'entrada de referència prou propers.

Si es fixa com a premissa que el temps de caiguda sigui de 10ms i es calcula l'increment d'alçada que comporta degut a l'acceleració de la gravetat, com que l'objecte parteix d'una velocitat nul·la i considerant que el lliscament de l'aire, a aquestes velocitats, és pràcticament negligible, en resulta un increment d'alçada en la levitació de menys de mig mil·límetre, tal com es demostra en l'Equació 53.

$$x = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot (0,01)^2 = 0,491 \text{mm} \quad (\text{Eq. 53})$$

13.3.1 Implementació del control de tipus proporcional

Sense considerar encara la branca RC, mitjançant la resistència de realimentació R5 de 1MΩ, s'aconsegueix modificar la referència amb aquest valor de llindar fent així un control de tipus proporcional o tipus P.

Per calcular el nivell alt del llinard, cal estudiar el circuit equivalent de la Figura 52 en cada un dels dos estats de l'electroimant.

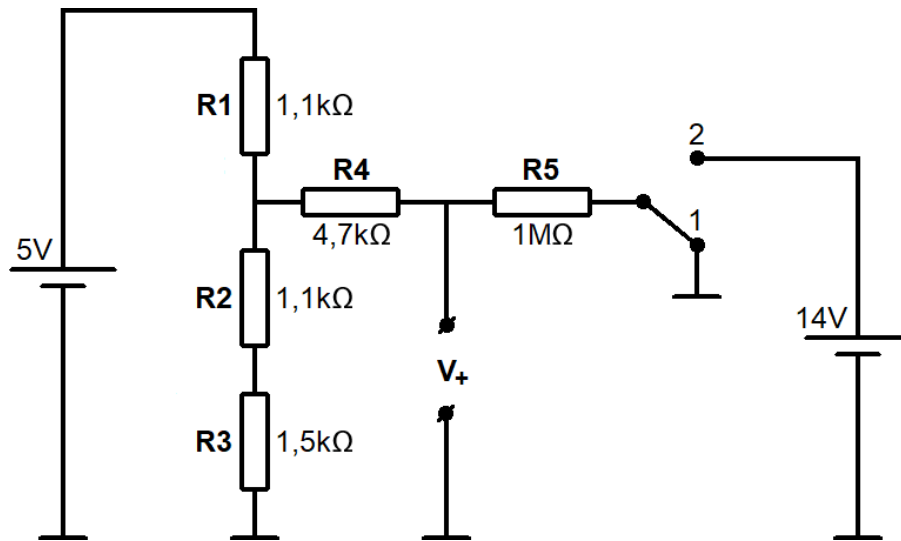


Figura 52. Circuit de l'entrada positiva amb 1MΩ a la realimentació

Per calcular la resistència de Thévenin a l'esquerra del circuit respecte els terminals de l'entrada positiva, es parteix del circuit de la Figura 53.

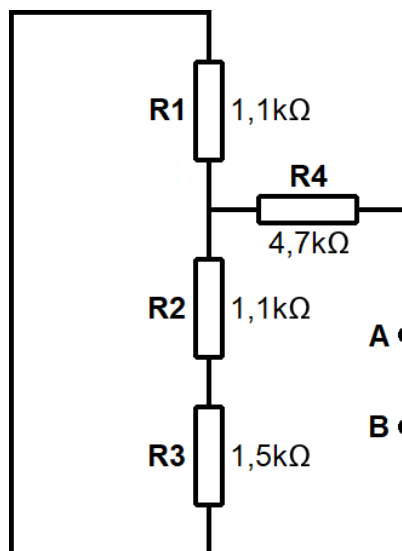


Figura 53. Circuit per calcular la resistència de Thévenin

A l'Equació 54 es calcula el valor de la resistència de Thévenin.

$$R_{TH} = R_{AB} = R4 + R1 // (R2 + R3) = 4,7k + \frac{1,1k \cdot 2,6k}{1,1k + 2,6k} = 5,473k\Omega \quad (\text{Eq. 54})$$

Per calcular la tensió de Thévenin s'ha de partir del següent circuit de la Figura 54.

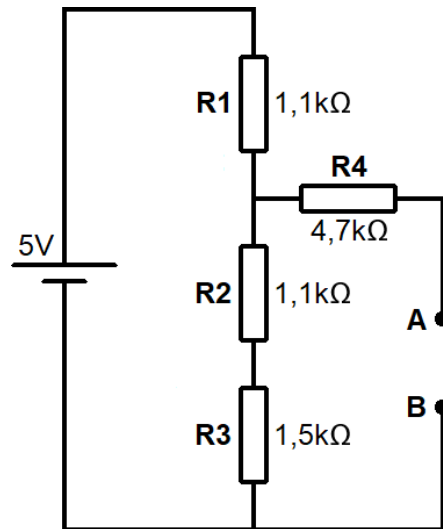


Figura 54. Circuit per calcular la tensió de Thévenin

A l'Equació 55 es calcula el valor de la tensió de Thévenin.

$$V_{TH} = V_{AB} = (R2 + R3) \cdot \frac{5}{R1 + R2 + R3} = (1,1k + 1,5k) \cdot \frac{5}{1,1k + 1,1k + 1,5k} = 3,514V \quad (\text{Eq. 55})$$

Un cop calculades la resistència i tensió de Thévenin, s'obté el circuit simplificat de la Figura 55.

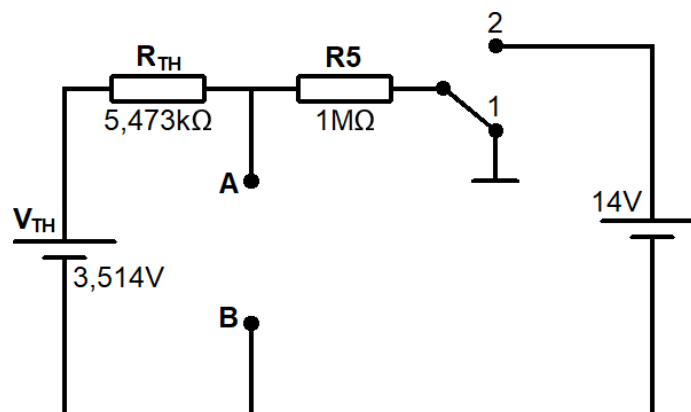


Figura 55. Circuit simplificat de l'entrada positiva amb 1MΩ a la realimentació

A l'Equació 56 s'observa el valor de V- quan l'electroimant està desactivat, per tant posició 1.

$$V_+ = R5 \cdot \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R5} = 1M \cdot \frac{3,514}{5,473k + 1M} = 3,495V \quad (\text{Eq. 56})$$

I a l'Equació 57 s'observa el valor de V_+ quan l'electroimant està actiu, per tant posició 2.

$$V_+ = 12 - R5 \cdot \frac{12 - V_{TH}}{R_{TH} + R5} = 12 - 1M \cdot \frac{12 - 3,514}{5,473k + 1M} = 3,560V \quad (\text{Eq. 57})$$

A la gràfica de la Figura 56 es representa la tensió a l'entrada positiva del comparador, que és el resultat de combinar la referència amb el llindar i determina un increment de tensió d'uns 100mV; la tensió de sortida del Hall; i l'alçada del levitador en funció del temps. Es pot observar les dues alçades de connexió i desconnexió en les quals el levitador es troba basculant.

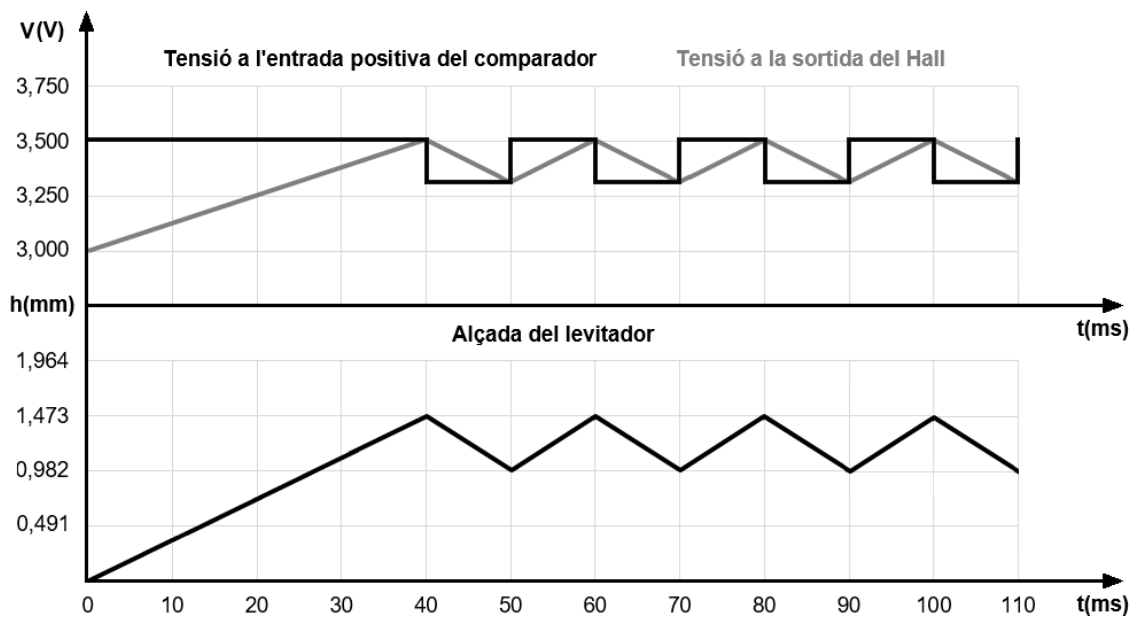


Figura 56. Tensió a l'entrada positiva del comparador, de la sortida del Hall i la distància d'entreferro

13.3.2 Implementació del control de tipus derivatiu

No obstant, la inèrcia que té el mateix levitador, tant de pujada com de baixada, provocaria que es sobrepassés els dos punts d'oscil·lació anteriors i per tant cal col·locar en paral·lel amb la R5 una branca que incorpori un component de tipus derivatiu o tipus D a la realimentació, de manera que actuï en funció de la velocitat que adquireix el sistema abans que arribi a un valor de distància concreta. A l'instant de commutació, C1 es comporta com un curtcircuit i per tant la branca R1C1 es comporta com una resistència de valor R1, que en paral·lel amb R5 de 1MΩ, provoca un pic molt més significatiu en aquest llindar. Aquesta acció es minimitza quan ha passat la constant de temps RC determinada a l'Equació 58.

$$RC = 100k \cdot 100n = 10ms \quad (\text{Eq. 58})$$

Passats 10ms, que s'ha fet coincidir amb el temps de caiguda lliure del levitador, el condensador ja està al 63% carregat i la intensitat que circula per aquesta branca és molt menor. Tota aquesta branca encara té molt més efecte que la resistència R5.

Per calcular el valor del pic, s'ha utilitzat el mateix circuit de Thévenin però considerant la resistència equivalent del paral·lel de $1\text{M}\Omega$ amb $100\text{k}\Omega$, de valor resultant $90,91\text{k}\Omega$, representat a la Figura 57.

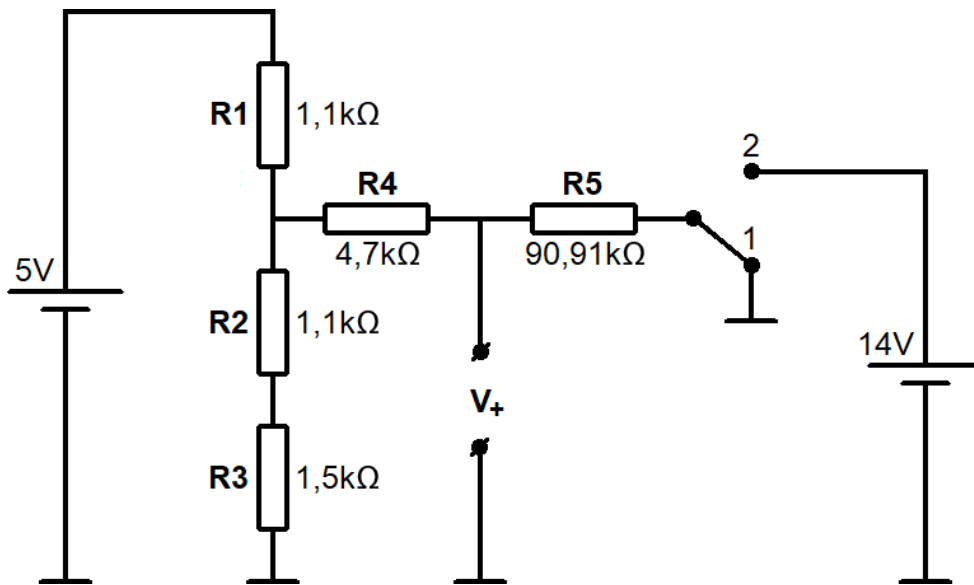


Figura 57. Circuit de l'entrada positiva amb la realimentació completa

Utilitzant els valors calculats anteriorment, el nou circuit de Thévenin és el mostrat a la Figura 58.

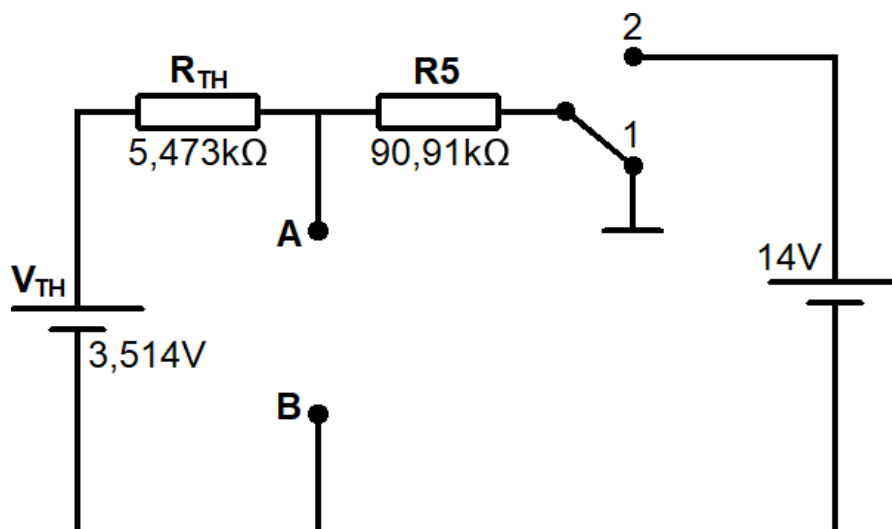


Figura 58. Circuit simplificat de l'entrada positiva amb la realimentació completa

A l'Equació 59 s'observa el nou valor de V- quan l'electroimant està desactivat, per tant quan l'interruptor es troba a la posició 1.

$$V_+ = R5 \cdot \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R5} = 90,91k \cdot \frac{3,514}{5,473k + 90,91k} = 3,314V \quad (\text{Eq. 59})$$

I a l'Equació 60 s'observa el nou valor de V- quan l'electroimant està actiu, per tant quan l'interruptor es troba en la posició 2.

$$V_+ = 12 - R5 \cdot \frac{12 - V_{TH}}{R_{TH} + R5} = 12 - 90,91k \cdot \frac{12 - 3,514}{5,473k + 90,91k} = 3,996V \quad (\text{Eq. 60})$$

La Taula 8 resumeix la interacció entre la realimentació P, provocada per la residència de 1MΩ i la realimentació D provocada per RC, durant la commutació de l'electroimant.

Seqüència	Electroimant	Posició interruptor	Resistències actuen	V+ (V)
1	ON	1	1MΩ//100kΩ	3,314
2	ON	1	1MΩ	3,495
3	OFF	2	1MΩ//100kΩ	3,996
4	OFF	2	1MΩ	3,560

Taula 8. Valors que pren l'entrada positiva durant la commutació de l'electroimant

Un cop determinats els pics, cal estudiar la seva recuperació respecte l'ona quadrada que es tenia a l'entrada positiva del comparador.

La càrrega del condensador es determina per l'Equació 61.

$$V_C = V_{C \max} \cdot (1 - e^{-t/RC}) \quad (\text{Eq. 61})$$

Amb aquesta fórmula, es pot comprovar que quan valor del temps val RC, el condensador es troba al 63% carregat, per tant la intensitat que circula per la resistència R1 de 100kΩ només el del 36% respecte a la inicial. Així en aquests moments, a efectes de la intensitat que hi circula, es pot considerar com si la branca RC fos només una resistència de 330kΩ en paral·lel amb la de 1MΩ, per tant d'aproximadament 248kΩ.

L'electroimant es fa treballar per modulació per ample de polsos, PWM, i a la pràctica, quan es fa levitar una massa de 30g, s'observa que la duració del temps d'activació, ON, és d'uns 11ms, mentre que el temps de tall és d'uns 13ms.

A partir dels càlculs anteriors, a les gràfiques de la Figura 59 s'han representat els senyals teòrics que es trobarien a l'entrada positiva del comparador. El senyal de color més fosc representa l'efecte del senyal degut només a la branca derivativa RC i el senyal més clar representa l'efecte total quan la branca derivativa RC es sobreposa amb la branca proporcional de $1M\Omega$, la qual generava l'ona quadrada representada a la gràfica de l'anterior Figura 59.

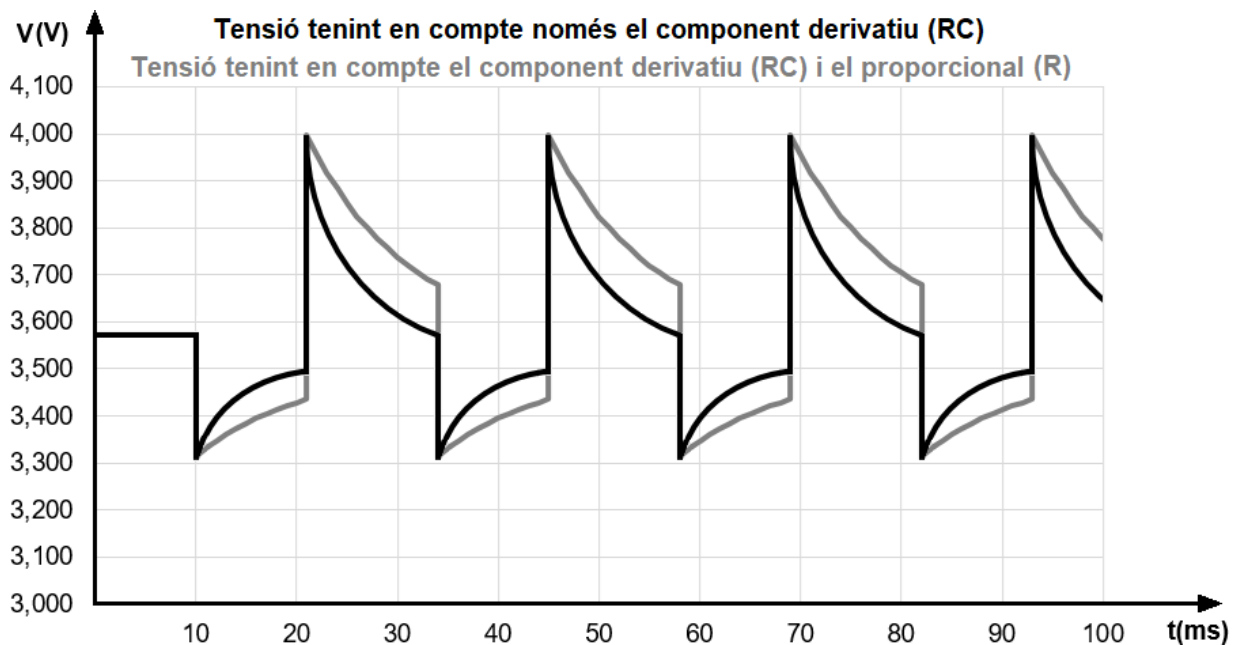


Figura 59. Formes d'ona teòriques a l'entrada positiva del comparador

Es pot observar que la resistència de la branca de control proporcional, d'un valor de $1M\Omega$, pràcticament no afecta al sistema en comparació amb la branca de control derivatiu RC, molt més predominant. Així que es pot concloure que la resistència de $1M\Omega$ podria ser prescindible en determinades càrregues de treball.

13.4 Posada en marxa, assajos i mesures

En aquest apartat s'hi indicaran els valors dels diferents assajos i mesures per poder arribar a les conclusions finals del prototip del levitador per atracció.

L'estructura del prototip de levitació per atracció, un cop muntat, s'indica a la Figura 60.

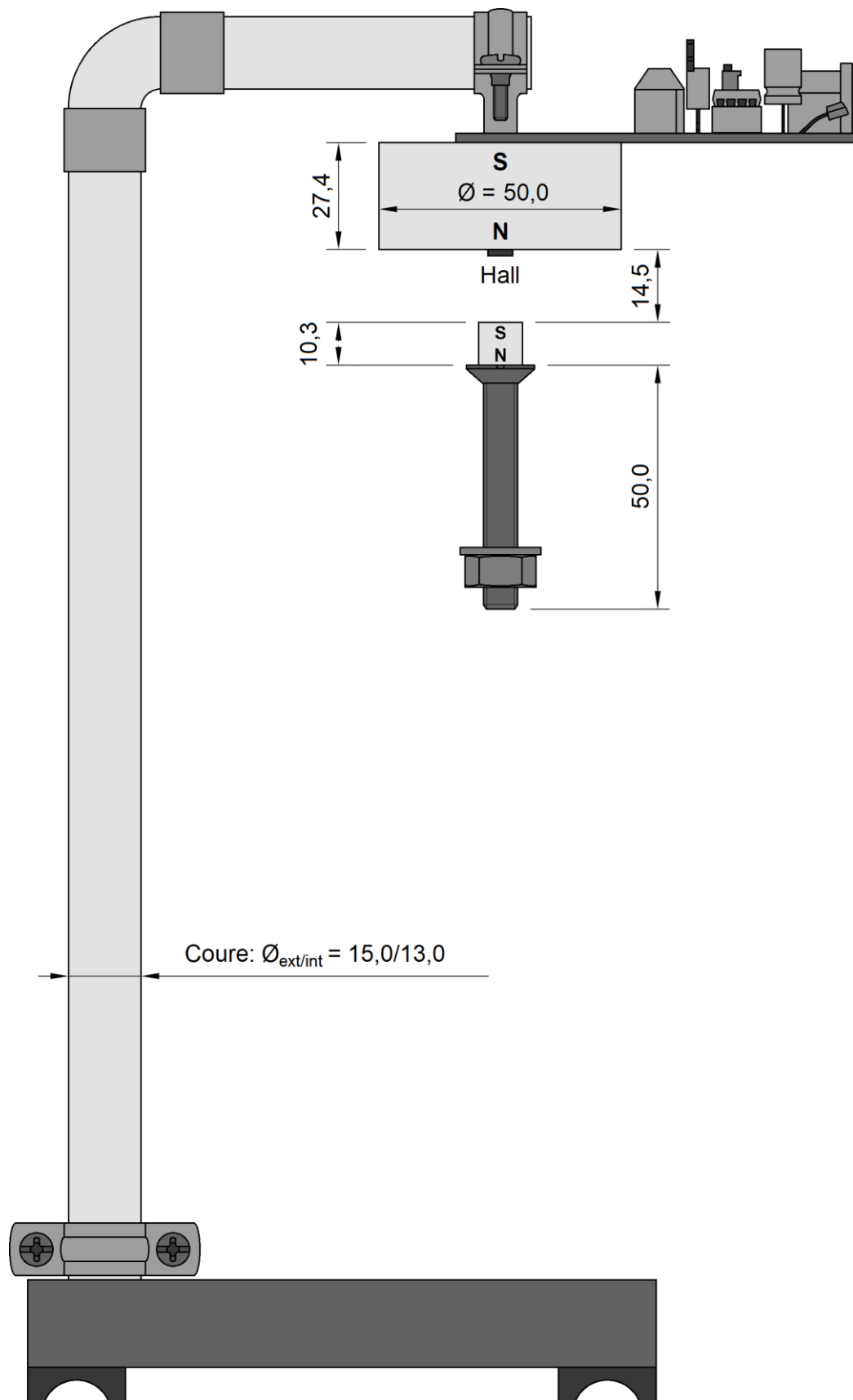


Figura 60. Estructura del proptip de levitació

La Figura 61 mostra la prototip de levitació per atracció ja finalitzat i fent levitar un conjunt format per un imant de neodimi N55, solidari amb una massa de ferro format per un vis i una femella, amb una massa total de 30g i una separació d'entreferro de 14,5mm.



Figura 61. Fotografia del levitador per atracció

Mitjançant un oscil·loscopi digital Hantek HT6022 connectable a l'ordinador, s'ha pres les mesures de les tres senyals més importants: l'electroimant, la referència, o entrada positiva del comparador, i la sortida del Hall. El resultat de les lectures fetes amb l'oscil·loscopi digital es pot apreciar a les gràfiques de la Figura 62. Al marge esquerra s'indica la posició de cada una de les referències de 0V de les gràfiques dels corresponents senyals. Mentre que a la

part dreta de la imatge s'observen les diferents amplituds, en Vols per divisió, de cada un dels senyals. Per últim, a la part inferior de la imatge s'hi indica la base de temps comuna pels tres senyals, que en aquest cas té un valor de 10ms per divisió. Aquesta base de temps determina un període de 26ms, que correspon a una freqüència de 38,46Hz. S'observa un període de ON de 6,5ms, que és el temps en el qual el levitador puja per acció de la força magnètica d'atracció, i un temps de OFF de 19,5ms, que és el temps en que el levitador baixa per acció de la gravetat. S'observa que el senyal de referència és el que teòricament s'havia predit a la Figura 59. Cal tenir en compte que la gràfica d'aquesta figura teòrica no comença a 0V i, per tant, es veu l'arriusat molt més pronunciat que el que apareix a la Figura 62.

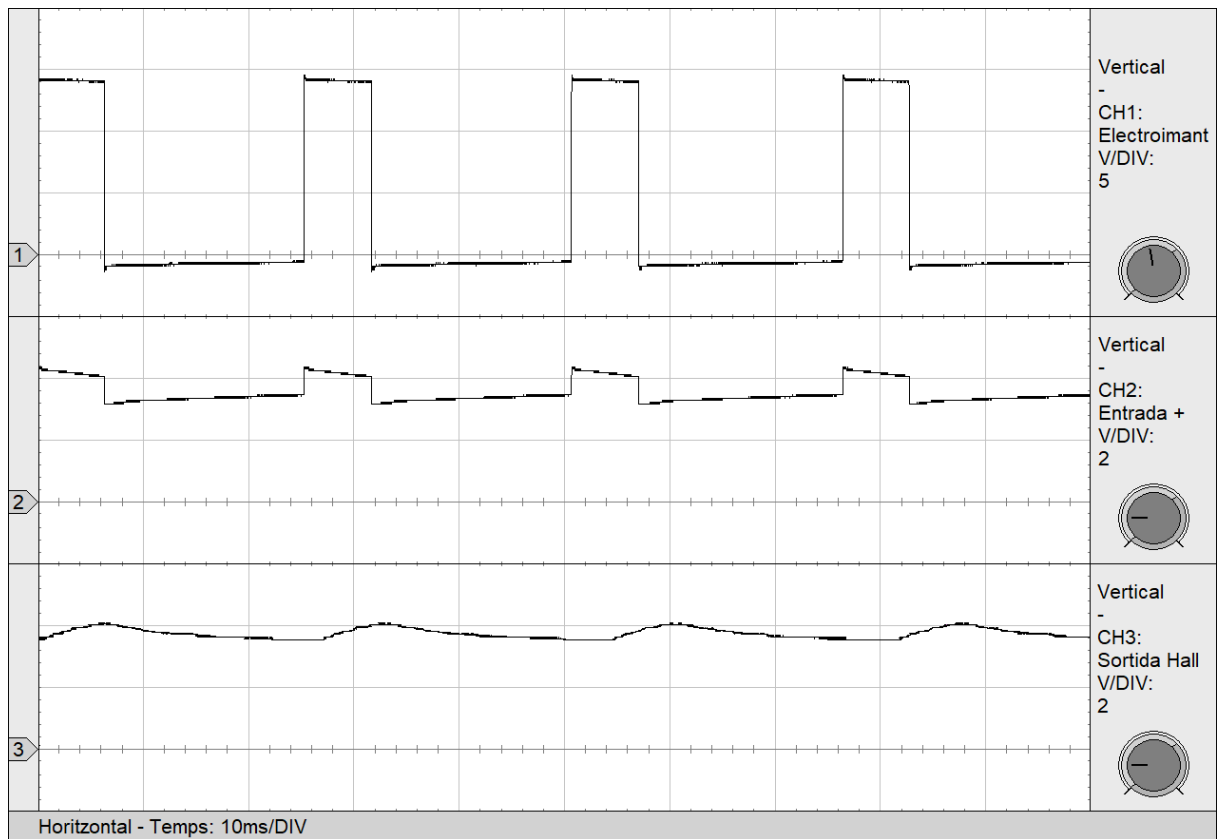


Figura 62. Lectures de l'electroimant, la referència i la sortida del Hall amb l'oscil·loscopi

Per últim, els resultats de l'assaig del consum requerit per la levitació, queden resumits a la Taula 9.

Estat	V _{CC} (V)	Massa (g)	Descripció massa	Entreferro (mm)	Consum (mA)	Potència (W)	Oscil·lació màxima (°)
Espera	14	-	-	-	623	8,722	-
Càrrega	14	30	Imant vis femella	14,5	56	0,781	+6 ÷ -6

Taula 9. Resultats dels assajos en el levitador per atracció

13.5 Resultats

En conclusió, alimentant el circuit amb una tensió de 14V s'aconsegueix fer levitar 30g amb un entreferro de 14,5mm. Per fer levitar masses superiors cal ajustar el potenciòmetre per tal que l'entreferro sigui menor. Així, amb un ajust diferent de la referència, s'ha aconseguit fer levitar una massa de 50g amb un entreferro de 9,1mm.

El sistema no permet pràcticament pertorbacions. Tot i així s'ha fet bascular el levitador i s'ha observat que la inclinació màxima de recuperació és d'aproximadament $+6^\circ \div -6^\circ$. Sobrepassant aquest desplaçament angular, el levitador o cau o s'enganxa a l'electroimant.

A la Taula 9 es pot observar que quan el prototip no té cap càrrega a levitar requereix un consum molt elevat. Aquest fet és degut a l'activació continuada de l'electroimant quan no hi ha cap càrrega. D'altra banda, el consum de treball, quan hi ha un levitador, és molt més reduït ja l'electroimant es pot desconectar quan el levitador se li acosta perillosament.

Amb tot, cal recordar que aquesta potència de 781mW continuen sent pèrdues degudes bàsicament per efecte Joule, per Histèresi i per corrents paràsites de Foucault, ja que físicament mantenir una massa a una determinada alçada no hauria de requerir cap energia. Dit d'una altra manera: l'energia útil que s'atorga al levitador és de 0J i, per tant, tota l'energia consumida es transforma en pèrdues.

Per tant, es comprova que la levitació és molt crítica en quant a la massa que pot suportar, amb una mateixa referència, i les pertorbacions a les que pot estar sotmès.

Per això, el control de la levitació en el sistema EMS dels trens Maglev requereix d'un control molt més complex i que disposi, a més de la lectura de la distància d'entreferro, de la lectura i control d'altres paràmetres com la massa, la velocitat i la inclinació del tren.

Evidentment la tracció d'un tren EMS no és respecte un imant, com en aquest prototip, sinó respecte la via de material ferromagnètic.

Per tant, el mètode de detecció és senzillament diferent i molt enginyós: col·locant els sensors Hall tal com mostra la Figura 63, es pot detectar, no més que s'acosta un imant com en el cas del prototip, sinó que s'acosta a un material ferromagnètic perquè fa canviar el circuit

magnètic, ja que en disminueix la reluctància total si el flux passa per la xapa magnètica de la via, simulada en aquesta figura com un cargol.

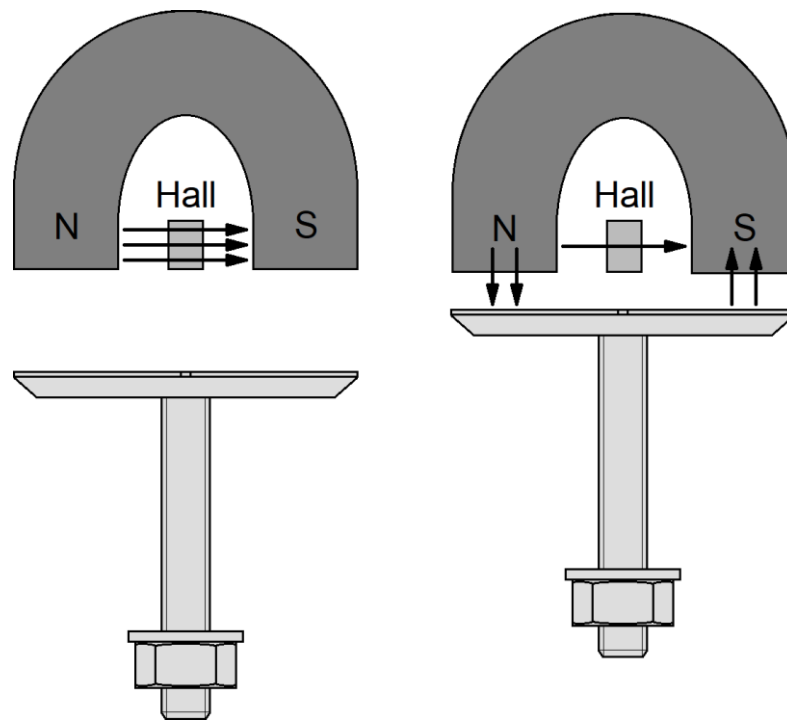


Figura 63. Mètode de detecció de la distància d'entreferro a la via

Tal com es pot comprovar al document de Pressupost, el preu dels materials que requereix el prototip puja a 22,18€; si a més es té en compte la mà d'obra necessària per fer el circuit imprès, el muntatge i la comprovació és de 142,18€ i si també es té en compte les hores invertides en el seu disseny pujaria a un total de 702,18€. Juntament amb el cost total del prototip de levitació per repulsió, s'obtenen els 2.362,57€ de la Base Imposable.

14 LEVITADOR PER REPULSIÓ

Aquest sistema s'ha basat amb l'anomenat Levitron, descrit al subapartat 6.3.4 d'aquest document. No obstant, s'ha provocat el mateix efecte amb un levitador estàtic, utilitzant la realimentació per tal de compensar qualsevol mínima inestabilitat del levitador tal com descriu el subapartat 6.3.5. En comptes d'utilitzar un imant toroïdal de secció quadrada, que es pot extreure dels altaveus, per fer-lo més econòmic s'ha substituït per quatre imants permanents de neodimi. S'ha partit també les publicacions tècniques sobre el procediment per analitzar la levitació magnètica (Caruso et al., 2016) i l'estudi analític del sistema magnètic Levitron (García-Agúndez, 2017). El levitador per repulsió representa un altre sistema de levitació, és utilitzat en els trens de levitació Maglev, concretament els EDS. Aquest mètode requereix molta menys energia de levitació però, en canvi, requereix un control molt més acurat de totes les magnituds que intervenen en el sistema. A la Figura 64 es mostra la distribució dels imants permanents i dels electroimants de control que permetran la levitació d'aquest prototip.

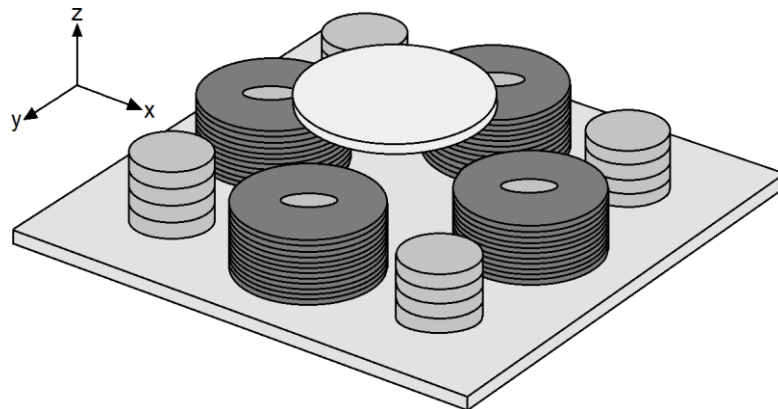


Figura 64. Estructura del levitador per repulsió

Com es mostra a la Figura 65, els imants permanents creen un camp magnètic amb una direcció de flux que manté suspès el levitador mitjançant la formació d'un llit magnètic.

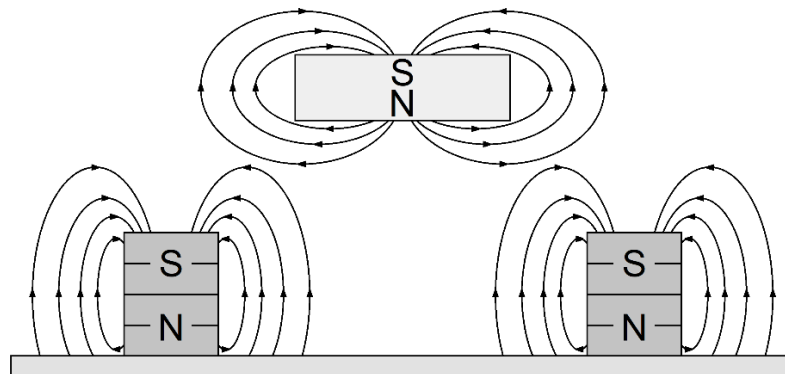


Figura 65. Llit magnètic de sustentació

No obstant, la inestabilitat d'aquest sistema demostrada pel teorema Earnshaw és molt elevada i cal un control dels 3 eixos de l'espai del levitador. El control de l'eix vertical, simplement fa activar el sistema quan el levitador s'acosta a la placa, per tant no és cap eix que requereixi un control crític. En canvi, els dos eixos del pla han de treballar de manera que corregeixin la inestabilitat que té el levitador o imant permanent en aquesta posició. Per aquest motiu, s'intercalen 2 electroimants a cada eix en sèrie i en contrafase, de manera que la intensitat que hi circula crea pols oposats als dos respectius electroimants. La missió dels electroimants és la correcció que es mostra a la Figura 66 per cada un d'aquests dos eixos de desplaçament del levitador.

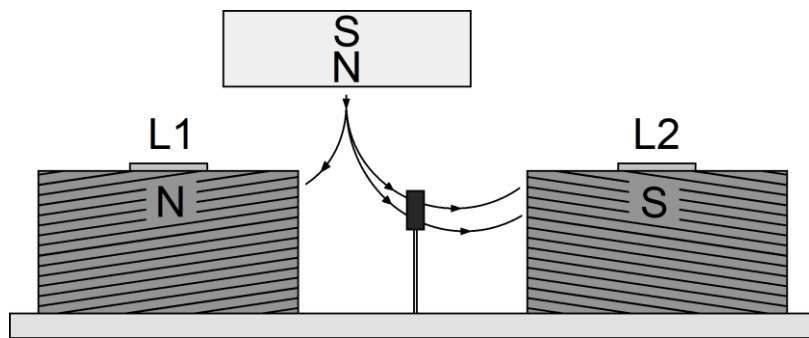


Figura 66. Detecció del desplaçament en un eix horitzontal

No obstant, aquest control dels electroimants sí que requereix una elevada rapidesa d'actuació i, per tant, cal una realimentació amb elements tipus proporcional i derivatiu, similar al que s'ha fet en el levitador per atracció. A la Figura 67, es mostra el circuit complet d'aquest levitador.

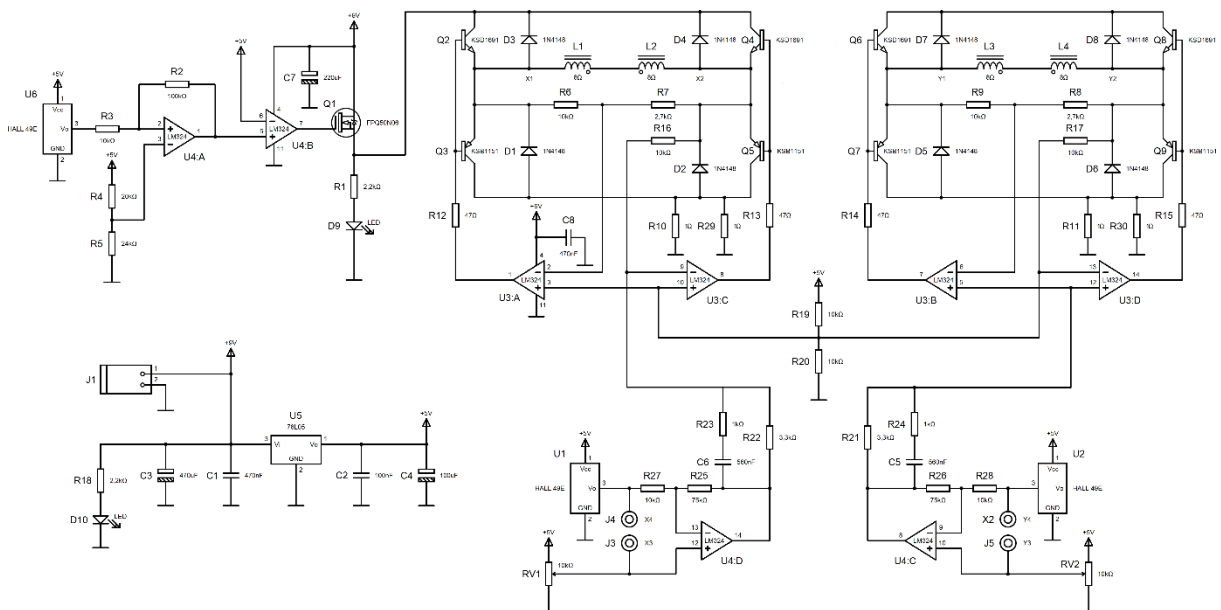


Figura 67. Circuit del levitador per repulsió

La distribució dels components a la placa es mostra a la Figura 68.

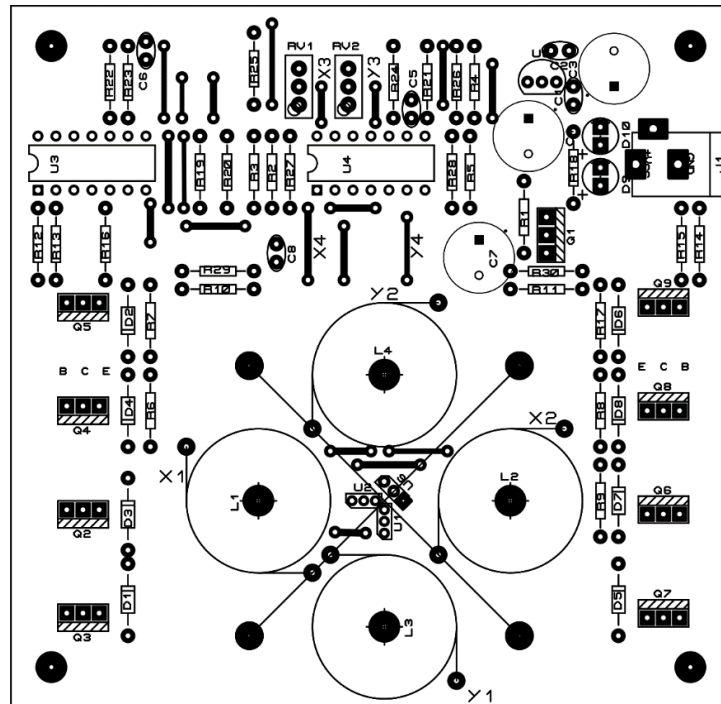


Figura 68. Cara de components del levitador per repulsió

Mentre la Figura 69 mostra la única cara de pistes, ja que aquest circuit s'ha fet a simple cara.

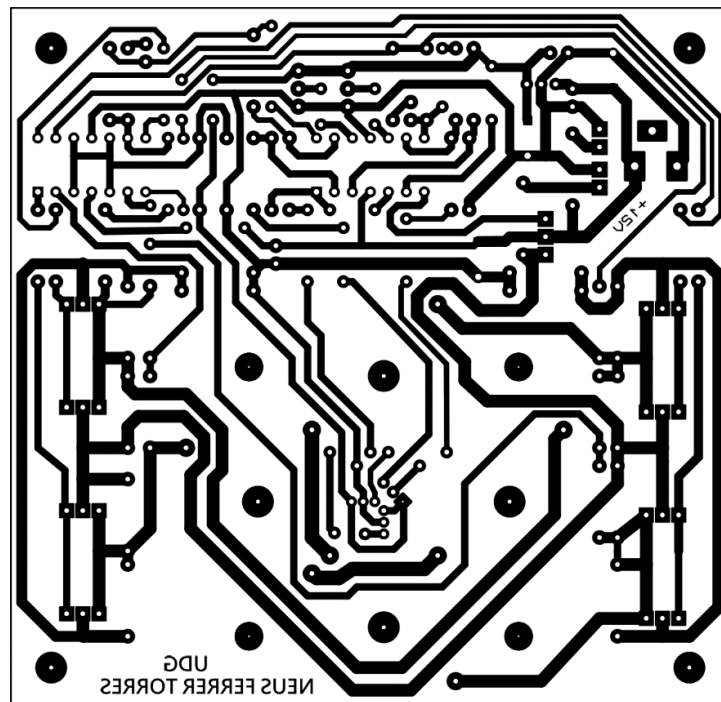


Figura 69. Cara de pistes del levitador per repulsió

A continuació, a la Figura 70, s'observa una vista virtual en tres dimensions de la placa. Es pot apreciar en color gris els quatre imants permanents i en color taronja les quatre bobines dels electroimants, dos per cada eix del pla horitzontal.

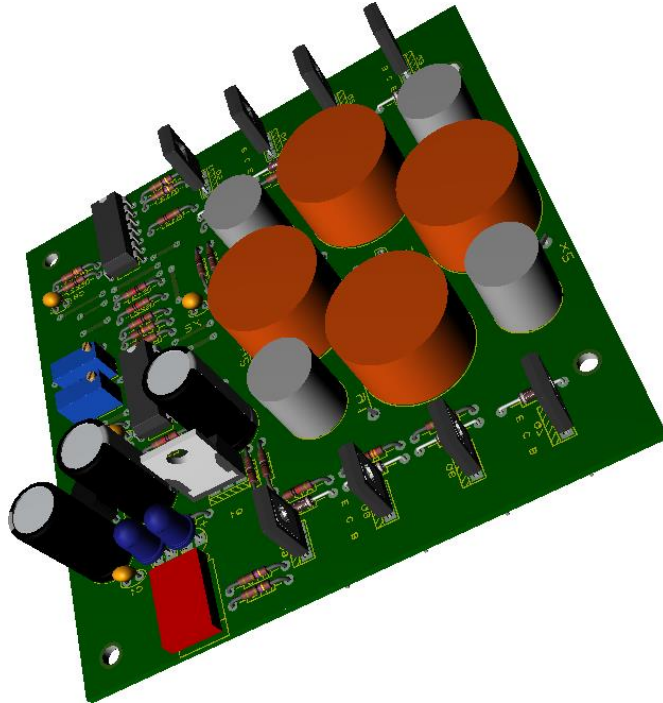


Figura 70. Vista virtual en 3D de la placa de repulsió

Com en el circuit anterior del levitador per atracció, per analitzar aquest circuit es separarà també en varies parts, tal com s'indica a la Figura 70.

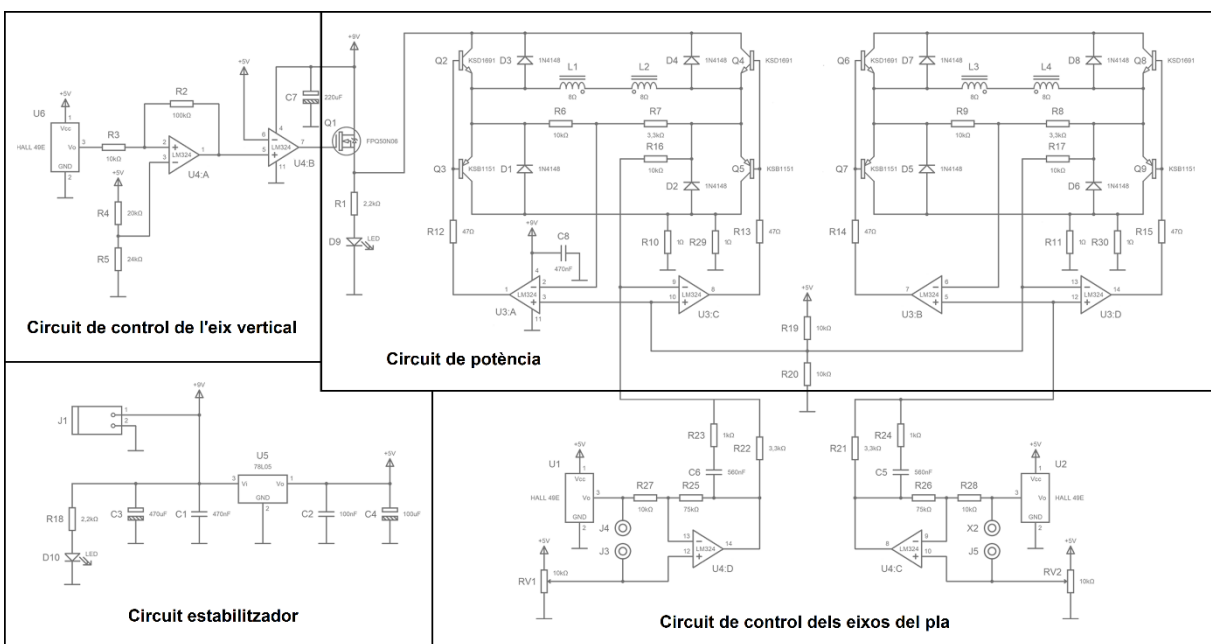


Figura 71. Parts del circuit del levitador per repulsió

14.1 Font d'alimentació externa i estabilitzador

Pel connector J1 entra una alimentació, a partir d'una font de 9V capaç de subministrar un mínim de 1A. Aquesta alimentació s'utilitza per tres finalitats: la primera és alimentar el circuit de potència a través del MOSFET, la segona és alimentar els dos operacionals LM324 i la tercera és alimentar l'entrada de l'estabilitzador, el qual ha de garantir una tensió de sortida estable i precisa de 5V amb una mínima variació a efectes d'alimentar els Halls i els divisors de tensió que propiciaran referències estables. Per alimentar tant les referències com els tres Halls, cal una tensió ben estable, la qual no influeixi en l'arissat que hi pugui haver en els 9V d'entrada. Per aquest motiu, en aquest levitador també s'utilitza el mateix estabilitzador 78L05, que incorpora un circuit interior amb un bon rang d'estabilització i proporciona 5V a la sortida, sempre i quan l'entrada estigui compresa entre $7V \div 30V$.

En aquest circuit l'estabilitzador no es requereix gaire intensitat de sortida i per tant el 78L05 no necessita poder dissipar gaire potència. Només ha de subministrar l'alimentació de 5V als tres Hall i a les referències obtingudes de tres divisors de tensió. La intensitat total de sortida està determinada per l'Equació 62, on els 13mA és la intensitat màxima que pot consumir cada Hall, i els 10k Ω , 20k Ω i 44k Ω , són la suma dels valors de les resistències utilitzades en cada divisor de tensió.

$$I_{o \max 78L05} = 3 \cdot 13\text{mA} + \frac{5}{44\text{k}} + 2 \cdot \frac{5}{10\text{k}} + \frac{5}{20\text{k}} = 40,36\text{mA} \quad (\text{Eq. 62})$$

Aquest intensitat màxima subministrada, determina la potència que ha de dissipar l'estabilitzador lineal segons l'Equació 63.

$$P_{\max 78L05} = (9 - 5) \cdot 40,36\text{mA} = 161,44\text{mW} \quad (\text{Eq. 63})$$

Aquesta potència és molt inferior a la màxima que pot dissipar aquest encapsulat, que segons el full de característiques tècniques es de l'ordre de 1,5W.

El condensador C3 de 470uF, a l'entrada de l'estabilitzador s'encarrega de mantenir els 9V amb el menor arissat possible. Sense ell, l'activació dels electroimants produiria un consum que provocaria un arissat molt significatiu a l'entrada de l'estabilitzador. El condensador C1 de 470nF redueix els pics externs de la font d'alimentació. El condensador C2 de 100nF s'ha

col·locat per eliminar els pics interns produïts per la commutació de l'electroimant. I el C4 és per acabar d'assegurar l'estabilització de la tensió de 5V.

14.2 Circuit de potència

Un transistor MOSFET de canal N, s'encarrega d'activar tot el circuit de potència quan l'imant s'acosta al Hall de referència U6. Aquest Hall està encarat amb la superfície paral·lela del levitador, de manera que al acostar-s'hi, rep una major inducció perpendicular a la seva cara i, per la orientació del Hall, fa disminuir la tensió de sortida que va a l'entrada positiva de l'amplificador diferencial U4:A. La sortida de U4:A va a parar al operacional U4:B que actua com a comparador i quan sobrepassa els 5V dona gairebé 9V a la porta del MOSFET Q1 de canal N i el posa en conducció.

El MOSFET, en conduir, alimenta la resta del circuit de potència, format per dos ponts de transistors bipolars independents que controlen els electroimants dels eixos del pla "x" i "y". Observant l'esquema del control de la base d'aquests transistors, es pot veure que condueixen en creu, de manera que o bé fa passar la intensitat en un sentit en els dos electroimants o bé la fa passar en l'altre.

14.3 Circuit de control de l'eix vertical

Tal com s'ha mencionat, amb el Hall U6 posicionat de manera oportuna, un divisor de tensió i dos operacionals, es detecta l'apropament de l'imant levitador. El Hall està orientat de tal manera, que el flux que rep de forma perpendicular quan el levitador s'acosta, fa que la seva tensió sortida disminueixi.

L'etapa formada per l'operacional U4:A és un amplificador diferencial que dona una sortida proporcional a la tensió del Hall menys la tensió del divisor, multiplicat per un guany de 100. El càlcul dels diferents valors de tensió que pren la sortida de l'amplificador diferencial, es realitzen a partir de l'esquema de la Figura 67.

El valor de tensió a l'entrada de l'operacional, l'entrada negativa i per tant també la positiva, es calcula a partir del valor resultant del divisor de tensió calculat a l'Equació 64.

$$V_x = \frac{V_{cc}}{R4 + R5} \cdot R5 = \frac{5}{20k + 24k} \cdot 24k = 2,727V \quad (\text{Eq. 64})$$

L'Equació 65 determina la intensitat de sortida del Hall.

$$I = \frac{V_{\text{Hall}} - V_x}{R_i} \quad (\text{Eq. 65})$$

Per tant, el valor de la tensió de sortida del amplificador diferencial en funció de la tensió de sortida del Hall, s'obté a partir de l'Equació 66.

$$V_{\text{out}} = V_x - \frac{V_{\text{Hall}} - V_x}{R_i} \cdot R_o = \frac{1}{R_i} \cdot [(R_i + R_o) \cdot V_x - R_o \cdot V_{\text{Hall}}] \quad (\text{Eq. 66})$$

Substituint amb els valors del circuit s'obté l'Equació 67 simplificada.

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{10} \cdot (110 \cdot 2,727 - 100 \cdot V_{\text{Hall}}) = 30 - 10 \cdot V_{\text{Hall}} \quad (\text{Eq. 67})$$

Si el Hall no rebés cap inducció, segons el seu full de característiques tècniques, la seva sortida seria d'aproximadament 2,5V. Però el Hall integrat a la placa, encara que no tingui el levitador proper, està alterat al flux dels propis quatre imants permanents que hi ha al seu voltant i, a la pràctica, la seva sortida és de 2,8V, de manera que la sortida de l'amplificador diferencial entrega gairebé 2V, tal com es mostra a l'Equació 68.

$$V_{\text{out}} = 30 - 10 \cdot 2,8 = 2V \quad (\text{Eq. 68})$$

Quan el levitador s'acosta prou com perquè el circuit s'activi, la sortida del Hall és d'aproximadament 1,5V i per tant la tensió a la sortida de l'operacional es determina per l'Equació 69.

$$V_{\text{out}} = 30 - 10 \cdot 1,5 = 15V \quad (\text{Eq. 69})$$

Però com que l'alimentació de l'operacional és de 9V, es satura i dona a la sortida del U4:A una tensió de gairebé 9V, i com que sobrepassa la magnitud de referència de 5V del següent comparador, U4:B activa el MOSFET de potència. En definitiva, quan s'apropa el levitador al centre dels quatre imants permanents de la placa, el MOSFET passa a conducció; s'activen els dos ponts de transistors i; com a referència per l'usuari, s'encén el LED D9 que mostra que el levitador està actiu.

14.4 Circuit de control dels eixos del pla

Els controls dels eixos del pla horitzontal, eix “x” i eix “y”, s’encarreguen de mantenir el levitador centrat. L’eix “x” es regula mitjançant els electroimants L1 i L2, mentre que l’eix “y” ho fa mitjançant L3 i L4.

El Hall U1 és l’encarregat de la detecció del desplaçament horitzontal “x”, rebent el flux amb una direcció o una altre depenen de la posició del levitador, segons es pot apreciar a la Figura 66. Aquest fet provoca que la tensió del Hall disminueixi o sobrepassi els 2,5V. S’amplifica de la mateixa manera que es fa amb el Hall U6, però amb un altre guany. La referència del potenciòmetre RV1 s’ajusta de manera que, sense levitador o amb el levitador centrat, hi hagi la mateixa tensió que la sortida que el Hall, per tant la tensió al punt X3 ha de ser igual a la de X4.

Partint de l’Equació 69, quan s’ha produït l’ajustament anterior, fent que la tensió de la referència sigui igual a la tensió de la sortida del Hall i en el supòsit estadísticament més probable que aquestes tensions estiguin ajustades a 2,5V, la sortida de l’operacional U4:D té el valor calculat a la següent Equació 70, on R_i és R27 i R_o és R25.

$$V_{out} = \frac{1}{R_i} \cdot [(R_i + R_o) \cdot V_x - R_o \cdot V_{Hall}] = \frac{1}{10} \cdot [85 \cdot V - 75 \cdot V] = V = 2,5V \quad (\text{Eq. 70})$$

14.4.1 Sense control de tipus proporcional ni derivatiu

Per tant, quan el levitador es troba centrat, la sortida dels amplificadors diferencials U4:D i U4:C és igual a la tensió de referència de les sortida dels potenciòmetres. Si es considera de moment la malla R23, C6, R22 com un curtcircuit i la resistència de realimentació R16 com un circuit obert, aquesta tensió és la que entra al comparador U3:C, mentre a l’altre entrada té una referència fixe de 2,5V determinada per R19 i R20. Aquest comparador és l’encarregat d’activar els transistors de la drete de cada un dels ponts i donar a la seva sortida pràcticament 0V si l’imant està desplaçat cap un dels dos costats i pràcticament 9V si ho està cap a l’altre.

Per exemple, en el cas de la Figura 66, on el levitador està descentrat, la sortida de U3:C està saturada a massa, dóna aproximadament 0,3V, s’activa Q5 i deixa en tall Q4. En activar-se Q5, arriba aproximadament 1V a X2 i, a través de R7, a l’entrada negativa de U3:A, ja que la tensió base a emissor d’aquest transistor PNP és aproximadament de 0,7V. Això provoca que

guanyi l'entrada positiva de 2,5V i, per tant a la sortida del U3:A està saturada a uns 8,7V, els quals posen en conducció el transistor Q2, portant 8V a X1 i fent circular la intensitat d'esquerra de dreta pels dos electroimants de l'eix "x". No obstant, també circula intensitat pel divisor de tensió creat per R6 i R7, amb un valor d'uns 0,55mA. Aquesta intensitat provoca una caiguda de tensió a R7 de 1,48V, que sumats a 1V que hi ha des de l'emissor del Q5 a massa, donen 2,48V a l'entrada negativa del comparador de U3:A. Això provoca que en el comparador continuï guanyant l'entrada positiva i, per tant, es mantingui en el mateix estat però d'una forma crítica. Aquest estat es representa a la Figura 72.

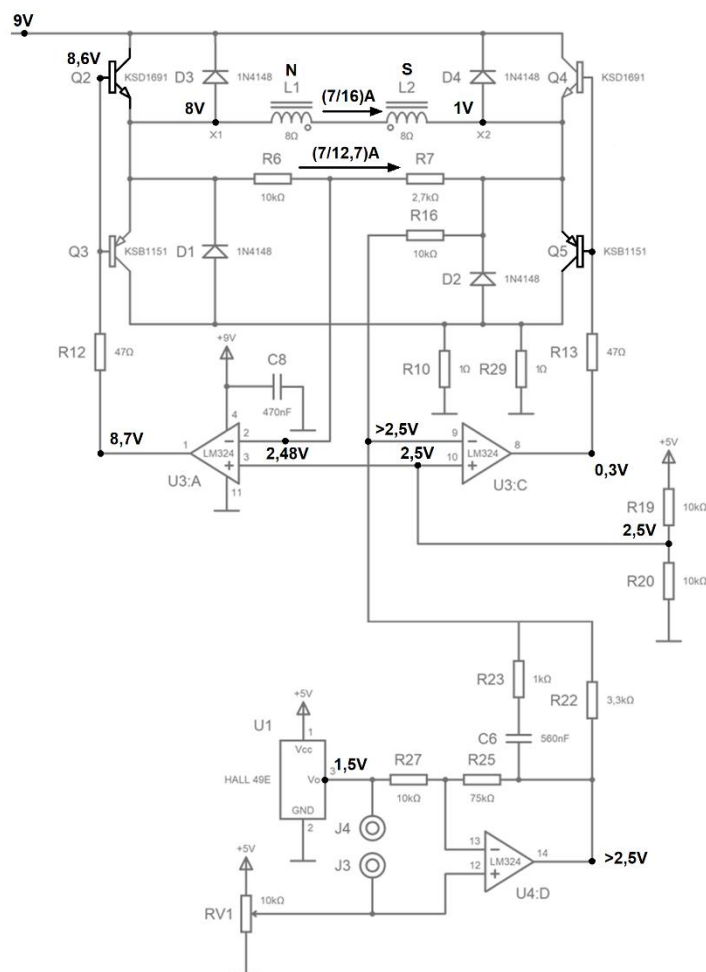


Figura 72. Distribució de tensions en el pont quan el levitador està descentrat

Simètricament succeeix el mateix quan l'imant sobrepassa el Hall en l'altre direcció. Els quatre díodes que conformen el pont serveixen per descarregar el pic d'inversa que fa la bobina de l'electroimant quan de cop hi deixa de circular corrent. Evidentment, en aquest moment hi ha una variació d'intensitat molt elevada, ja que passa de conduir, a ser 0A. I en conseqüència, una variació de flux molt elevada ja que també passa a ser nul i per la llei de Faraday-Lenz

crea un pic de força contra-electromotriu tant elevat que sobrepassaria els límits absoluts de tensions inverses entre emissor i col·lector dels transistors.

La Taula 10 mostra l'estat dels transistors i el valor de les tensions a diferents punts del circuit segons si el levitador està més desplaçat cap un costat o cap a l'altre del eix "x", on l'estat de la primera fila correspon al cas de la Figura 65 i la Figura 72.

U3:C:9 (V)	U3:C:8 (V)	Q4 (NPN)	Q5 (PNP)	X2=U3:A:2 (V)	U3:A:1 (V)	Q2 (NPN)	Q3 (PNP)	X1 (V)	U3:A:2' (V)	L1	L2
>2,5	0,3	OFF	ON	1	8,7	ON	OFF	8	2,48	N	S
<2,5	8,7	ON	OFF	8	0,3	OFF	ON	1	6,52	S	N

Taula 10. Estat dels transistors i valor de tensions segons el desplaçament en l'eix "x"

L'eix "y" treballa absolutament de la mateixa manera.

14.4.2 Implementació del control de tipus proporcional i derivatiu

Anteriorment s'ha descrit el funcionament del circuit si no es considera la realimentació de R16 i si la malla formada per la branca R23, C6 en paral·lel amb R22, actua com un curtcircuit.

No obstant, com que el levitador requereix uns paràmetres de control molt ràpids, s'implementa aquesta malla, que actua com un divisor de tensió amb R16, de manera que la influència de R16, que representa una realimentació negativa, pretén anul·lar l'efecte de l'imant ràpidament. Aquest divisor de tensió s'ha d'estudiar en els dos estats que a continuació es descriuen.

Primer, immediatament quan s'ha produït el desplaçament es pot considerar el condensador com un pont i, per tant, la malla actua com una resistència de 390Ω en paral·lel amb $4,7k\Omega$, resultant aproximadament 360Ω . Per tant, la realimentació de $10k\Omega$ en aquests instants no té gaire incidència. Segon, quan ha passat un temps RC de $390\mu s$, ja que R23 val 390Ω i C6 val $1\mu F$, la resistència de 390Ω pràcticament no actua i, per tant, la resistència de realimentació negativa de $10k\Omega$, ja comença a tenir més incidència respecte a la R22 de $4,7k\Omega$. Es pot aproximar l'element derivatiu de la realimentació com la relació entre $10k\Omega/390\Omega$, per tant aproximadament 25, i l'element proporcional de la realimentació, amb una relació de $10k\Omega/4,7k\Omega$, per tant aproximadament 2.

Aquests valors s'han obtingut de manera empírica amb el temps d'assaig i posada en marxa, ja que els paràmetres que comportaria un estudi complet són múltiples, entre altres: flux dels imants permanents fixos, flux del levitador, resposta a la inducció del Hall, flux que generen els electroimants, massa del levitador, moment d'inèrcia del levitador en girar amb l'eix paral·lel a la superfície, partint el levitador en dos semi circumferències.

14.5 Posada en marxa, assajos i mesures

En aquest apartat s'hi indicaran els valors dels diferents assajos i mesures per poder arribar a les conclusions finals del prototip del levitador per repulsió.

La fotografia de la Figura 73 mostra el prototip de levitació per repulsió fent levitar un conjunt format per un imant de neodimi N55, solidari amb una massa de ferro format per un tornavís, amb una massa total de 30g i una separació d'entreferro de 14,5mm.

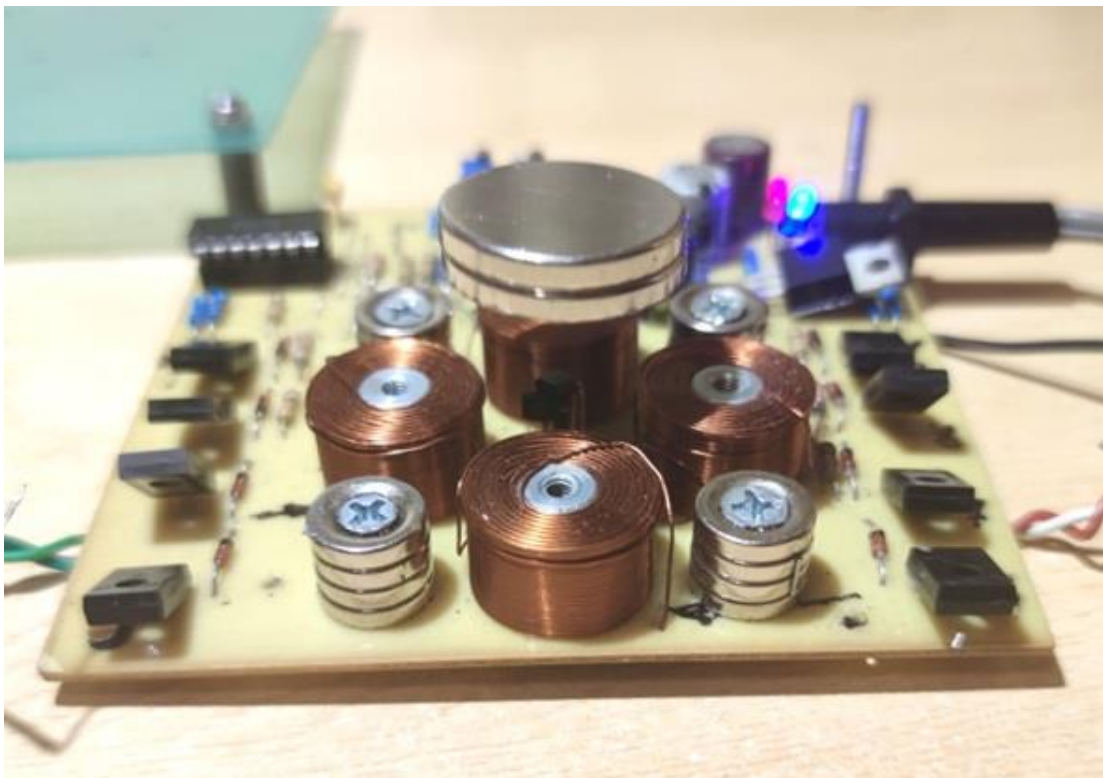


Figura 73. Fotografia del levitador per repulsió

Mitjançant un oscil·loscopi digital Hantek HT6022 connectable a l'ordinador, s'ha pres les mesures de les senyals més significatives. A efectes d'aportar resultats més interpretables, l'ordre en que es mostren els diferents senyals de les captures amb l'oscil·loscopi, serà des de la pròpia sortida dels electroimants fins a l'entrada que els genera.

La Figura 74 mostra una captura de l'oscil·loscopi amb la tensió en extrems del electroimants de control de l'eix "x", des del punt X1 al punt X2, amb 5V per divisió d'amplitud i 10ms per divisió a la base de temps. Es comprova que en tot moment els electroimants estan actius, ja sigui circulant el corren en un sentit o en un altre. En el tercer cicle s'aprecia que el levitador ha sofert una petita pertorbació, que s'ha compensat amb un període positiu més elevat. També s'aprecia un pic negatiu d'uns 10V, que representen els 9V d'alimentació més la caiguda de tensió en directe dels dos díodes. Finalment cal fer notar que la tensió d'alimentació dels electroimants només arriba a 5V, aquest fet és degut al sistema de polarització, tant del MOSFET de canal N en sortidor comú, com dels transistors amb configuració d'emissor comú. El fet de configurar el MOSFET en sortidor comú i, com que segons el seu full de característiques tècniques, requereix una tensió mínima d'activa V_{GS} major de 3V, provoca una caiguda de tensió entre drenador i sortidor, V_{DS} , que és també d'aquesta magnitud. Això, a més a més, provoca que el MOSFET hagi de treballar amb una potència dissipada igual que la tensió de drenador a sortidor multiplicada per la suma de les intensitats que circulen pels quatre electroimants. Per tant, aquests resultats indiquen que, en aquest cas, hagués sigut molt millor utilitzar una configuració de drenador comú, invertint els senyals del comparador U4:B que l'activa.

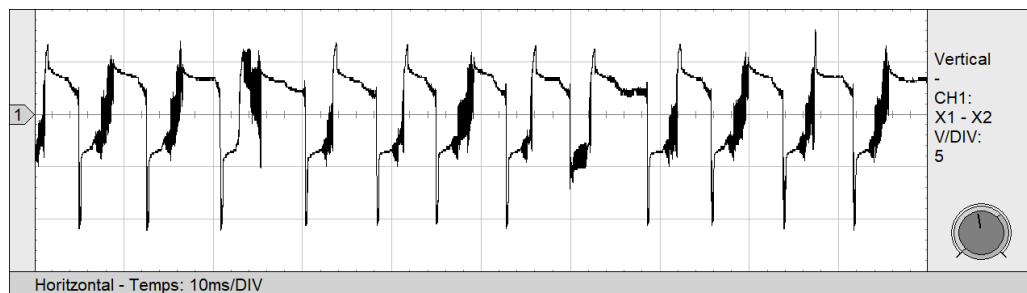


Figura 74. Tensió en extrems dels electroimants de control del eix "x"

La Figura 75 mostra una captura de l'oscil·loscopi amb la tensió en extrems del electroimants de control de l'eix "y", des del punt Y1 al punt Y2, amb 5V per divisió d'amplitud i 10ms per divisió a la base de temps. Les observacions són exactament les mateixes que les de la figura anterior.

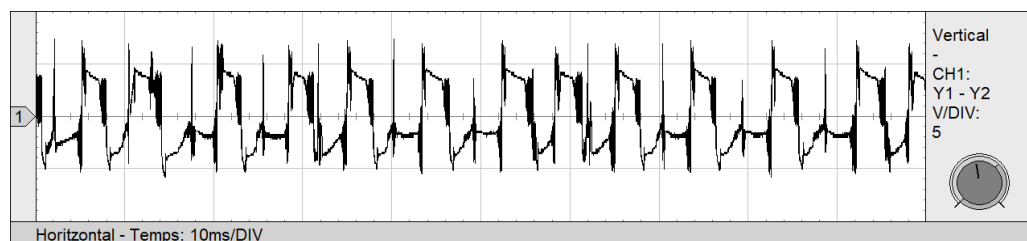


Figura 75. Tensió en extrems dels electroimants de control del eix "y"

La Figura 76 mostra una captura respecte massa de l'oscil·loscopi, on al canal 1 i al canal 2 hi ha respectivament les tensions de X1 i X2, amb 5V per divisió d'amplitud i 5ms de base de temps. Es veu que en estat de tall la tensió no arriba a 0V, excepte pels pics d'inversa limitats pels díodes. Això es deu a que, des de la massa virtual que creen els dos ponts de transistors fins a la massa real de la placa, s'intercalen dues resistències de protecció d' 1Ω . S'aprecia també una ona quadrada, sovint simètrica, que s'interpreta com l'actuació de tipus proporcional en el desplaçament del levitador i simultàniament uns pics més elevats que responen a la variació de velocitat del levitador, que són provocats per la realimentació de tipus derivativa.

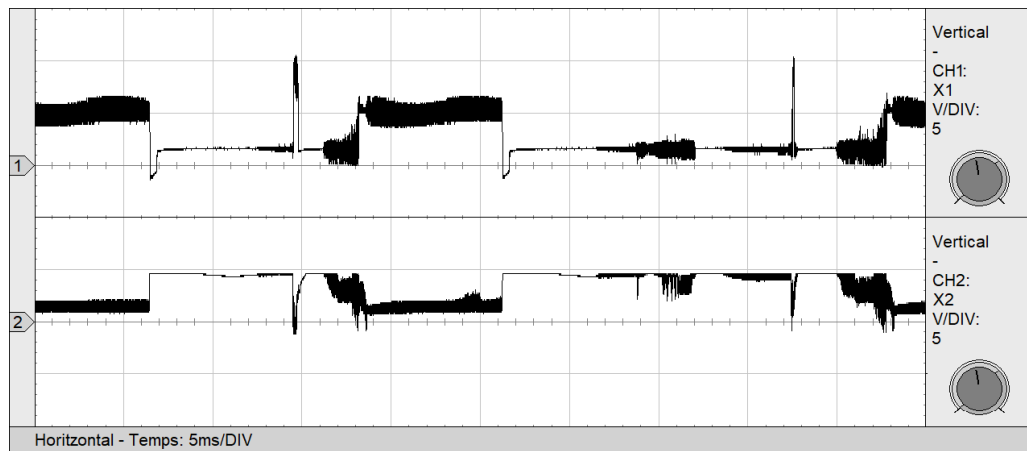


Figura 76. Tensió de X1 i X2

La Figura 77 mostra una captura respecte massa de l'oscil·loscopi on al canal 1 hi ha la tensió de X1 i en el canal 2 la tensió de sortida del comparador U3:A, amb 5V per divisió d'amplitud i 5ms per divisió al temps. S'observa l'efecte derivatiu en cada un dels polsos de cada commutació.



Figura 77. Tensió de X1 i tensió U3:A(1)

La Figura 78 mostra una captura respecte massa de l'oscil·loscopi, on al canal 1 hi ha la tensió de la sortida del comparador U3:C amb 2V per divisió, i en el canal 2 es mostra la tensió de la sortida del comparador U3:A(1) amb 5V per divisió, ambdós amb 5ms per divisió al temps. El canal 2 és la conseqüència inversa del canal 1, ja que U3:A actua complementant el U3:C.

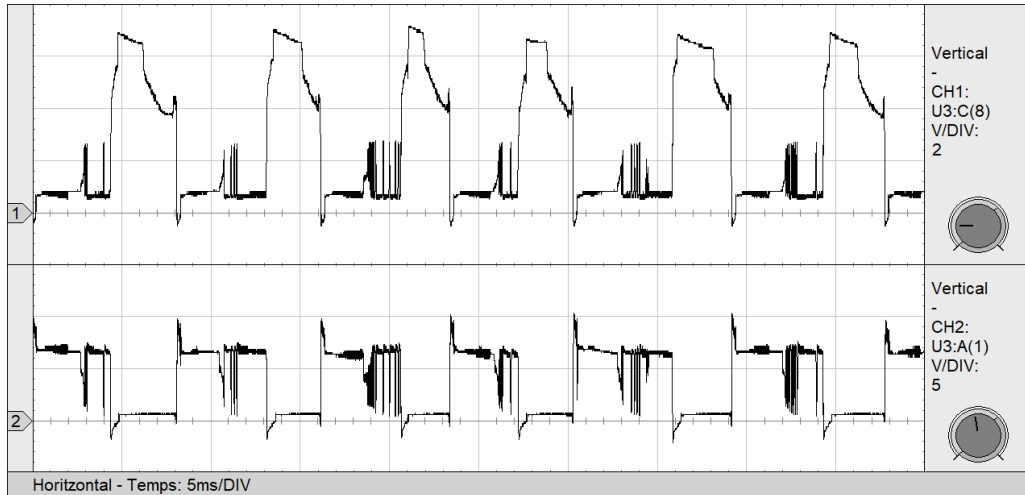


Figura 78. Tensió de U3:C(8) i tensió de U3:A(1)

La Figura 79 mostra una captura on al canal 1 hi ha la tensió de la sortida del U3:C, amb 2V per divisió, i en el canal 2 hi ha la tensió de l'entrada negativa del U3:C, amb 1V per divisió, ambdós amb 5ms per divisió. El senyal del canal 2 és complex ja que el resultat de la interacció entre la realimentació de R16 i el senyal de desviació entre la lectura i la referència de U4:D. El senyal del canal 2 és simètric respecte la referència fixa de 2,5V de l'entrada positiva del mateix comparador. Aquests senyals mostren el dinamisme de la regulació.

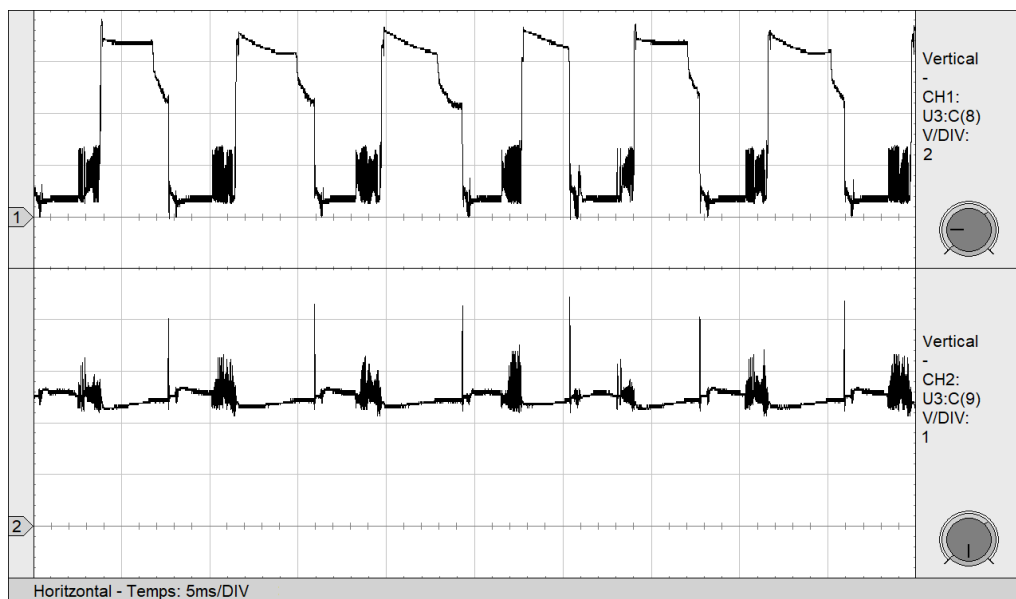
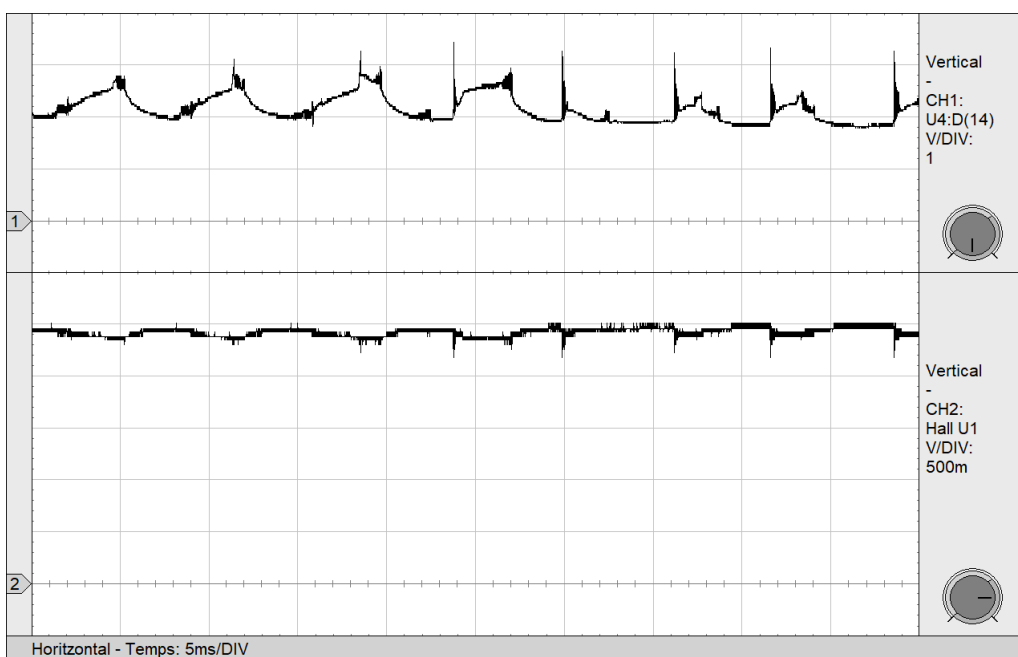


Figura 79. Tensió de U3:C(8) i tensió de U3:C(9)

Al canal 1 de la Figura 80 hi ha la tensió de l'entrada negativa del U3:C i en el canal 2 hi ha la tensió de la sortida del U4:D, ambdós amb 1V i 5ms per divisió. El canal 1 és el resultat de l'amplificació derivativa i proporcional de la sortida de la desviació que es té en el canal 2.



Al canal 1 i 2 de la Figura 80 apareix la tensió de la sortida del U4:D i de sortida del Hall U1 amb 1V i 500mV per divisió respectivament, ambdós amb 5ms per divisió. L'Equació 70 determina la relació matemàtica entre el canal 1 i 2. També s'aprecia una sèrie de oscil·lacions posteriors a cada commutació, provocades pel Hall i que finalment seran les oscil·lacions que es visualitzen com a taques negres més gruixudes a la Figura 76 i a la Figura 77.



Seguidament s'han realitzat assajos de consum i separació per diferents masses de levitadors. La Taula 11 indica els diferents valors d'aquestes masses; la distància d'entreferro o separació del levitador respecte el pla que forma la part superior del imants permanents; el consum en cada un dels estats i la potència consumida pel levitador.

Estat	V _{cc} (V)	Massa (g)	Descripció massa	Entreferro (mm)	Consum (mA)	Potència (W)	Oscil·lació màxima (°)
Espera	9	0	-	-	95	0,855	-
Mínima	9	25	2 imants	13,8	550	4,950	+10 ÷ -10
Òptima	9	38	2 imant i 1 femella	11,6	550	4,950	+10 ÷ -10
Màxima	9	51	2 imant i 4 femella	9,3	550	4,950	+10 ÷ -10

Taula 11. Resultats dels assajos en el levitador per atracció

14.6 Resultats

Aquest sistema de levitació és molt més espectacular que el levitador per atracció però el seu control també és molt més complex i la quantitat de components necessaris és molt superior. De fet, i tal com es pot comprovar al document de Pressupost, el preu dels materials que requereix el prototip puja a 45,39€; si a més es té en compte la mà d'obra necessària per fer el circuit imprès, el muntatge i la comprovació és de 295,39€ i si també es té en compte les hores invertides en el seu disseny pujaria a un total de 1.660,39€. Juntament amb el cost total del prototip de levitació per atracció, s'obtenen els 2.362,57€ de la Base Imposable. Si es compara només el preu dels costos dels materials, i tenint en compte que el disseny i la mà d'obra és percentualment similar, es pot veure que els 45,39€ d'aquest prototip, representen més del doble que el mateix cost de la placa de levitació per atracció.

La Taula 11 indica que la despesa energètica d'aquest levitador és molt més elevada que la necessària en el levitador per atracció, fet que no és gens acceptable ja que, tal com s'ha esmentat anteriorment, el levitador per repulsió es sustenta per sí sol i l'única energia consumida pels electroimants, és la necessària per mantenir l'estabilitat. Amb l'assaig de funcionament a posteriori, s'ha observat que molta de la potència consumida és perduda tant en MOSFET, com en els transistors. Aquest fet podria millorar-se amb una altre polarització del MOSFET que no ocasionés la caiguda de tensió elevada, d'aproximadament 2V que hi ha entre la porta i el sortidor, utilitzant per exemple la configuració establerta amb un MOSFET de canal P representada en el circuit del levitador per atracció. La configuració dels ponts de transistors bipolars també és molt millorable si es configuren en col·lector comú, modificant l'esquema dels comparadors de manera que s'inverteixin les seves entrades. Aquest fet

requeriria una evolució d'aquest sistema de levitació en un altre projecte i seria suficient una tensió d'alimentació de 6V.

La filosofia de funcionament d'aquest sistema ha sigut basat en diferents models de levitadors comercialitzats. L'esquema ha estat dissenyat per poder fer una sustentació a partir dels components disponibles al mercat, sense referència concreta, i per tant amb característiques magnètiques ambigües: electroimants, imants permanents i levitador. A partir d'aquests components s'ha dissenyat l'esquema més simple possible que permetés una levitació relativament estable.

L'estabilitat del levitador en aquest circuit, si bé no s'ha pogut mesurar de forma quantitativa, si que s'observa que és molt superior a l'estabilitat aconseguida amb el levitador per atracció. A més, es pot apreciar un gran marge de toleràncies entre el rang de masses que pot fer levitar, que va de 25g a 51g. Això dóna una amplitud percentual molt superior a la que s'ha pogut aconseguir amb el levitador per atracció. No obstant, encara queda molt curt en quan estabilitat aconseguida i requeriria un control amb molt més complert de diferents paràmetres simultanis per ésser un sistema capaç de controlar la levitació d'un tren EDS.

15 RESUM DEL PRESSUPOST

En el quart document d'aquest projecte, que fa referència a l'Estat d'Amidaments, trobem la quantitat de material necessari i les hores de feina que es necessiten invertir per la realització del projecte. Juntament amb el cinquè document, que és el Pressupost, on apareixen els preus de cada material i les hores de feina, trobem la confirmació total del pressupost. Durant la realització d'aquest projecte s'ha tingut en compte que els components fossin fàcils d'obtenir i assequibles. Els preus s'han ajustat de manera que el projecte sigui viable i econòmic.

Un cop aplicades totes les unitats requerides, tant de treball com de material, l'import del projecte en qüestió és de dos mil tres-cents seixanta-dos euros amb cinquanta-set cèntims, sense IVA.

16 CONCLUSIONS

Condensar en un sol document tota la informació de les diferents tècniques del trens de levitació magnètica, pel que fa el sistema de levitació, el de propulsió, el de guia i el de transferència energètica, i poder comparar de forma clara totes les seves combinacions, ha estat una tasca complexa degut sobretot a dos aspectes: primerament cal tenir en compte que molts d'aquests models encara estan en fase de disseny i, en segon terme, cal remarcar l'elevat nivell de confidencialitat pel que fa a les tecnologies que estan en fase de desenvolupament per les diferents empreses responsables dels dissenys.

A partir de la informació obtinguda a través de múltiples publicacions d'estudis tècnics parcials en revistes tècniques, aquest projecte aconsegueix condensar totes les diverses tecnologies dels models Maglev que actualment estan en funcionament o bé que estan en fase de disseny i prova. S'ha estudiat tècnicament i amb relativa profunditat cada una d'aquestes tècniques concretes i finalment s'ha aconseguit una comparativa amb els avantatges i inconvenients de cada una d'elles. Totes les figures d'aquest document han estat creades específicament per aquest projecte, a partir de la informació de múltiples figures esquemàtiques parcials subministrades pels articles anteriorment descrits.

L'eficiència energètica de l'electromagnetisme en quan a la conversió d'energia elèctrica a energia magnètica i d'energia magnètica a mecànica és molt elevada, superior al 95%. Com totes les màquines d'elevat rendiment, aquesta conversió és, a més a més, reversible amb el mateix rendiment. Les úniques pèrdues que intervenen en aquestes conversions són les d'efecte Joule dels bobinats, l'energia perduda per Histèresis, pels corrents paràsites de Foucault i la perduda pel flux de dispersió que hi pugui haver a la via i, sobretot, en el tren. Així, a diferència dels motors elèctrics, on també hi intervé l'energia mecànica perduda en els coixinets i sobretot en els elements de transmissió d'energia rotativa a energia lineal, aquestes pèrdues desapareixen. D'aquesta manera es pot concloure que el balanç de pèrdues energètiques en un tren Maglev és similar al balanç de pèrdues energètiques en un transformador, aconseguint una màquina dinàmica a partir de les pèrdues d'una màquina estàtica com és el transformador.

També cal tenir en compte que l'energia consumida per la levitació i el centratge és negligible respecte a l'energia requerida per la propulsió. Fins i tot, en alguns casos com el Inductrack, l'energia de levitació és pràcticament nul·la sinó fos perquè quan les línies de força dels imants permanents inferiors, tallen les vies, també frenen lleugerament el tren.

Com a resultat de l'estudi energètic comparatiu de tots els mitjans de transport, s'observa que els Maglev d'alta velocitat tenen un rendiment lleugerament inferior als trens convencionals. No obstant, poden circular a velocitats comparables a les dels avions, amb un consum per viatger inferior a una cinquena part del consum d'un avió. Això demostra que els trens Maglev són una alternativa molt més recomanable a l'avió en trajectes de llargues distàncies.

Si es compara amb un automòbil, el consum d'un Maglev representa menys d'una quarta part. En tot, les seves prestacions són totalment diferents, ja que els trens Maglev estan pensats per llargues distàncies intercontinentals.

El fet que a la Taula 6 de resultats comparatius, s'hi introdueixin les columnes de consum per seient i consum per passatger, implica treure a la llum la següent reflexió: són les polítiques dels diferents estats els que han de promocionar els diferents transports públics en general per tal de fer un món més sostenible. Cal entendre per sostenibilitat tres aspectes: l'econòmic, ja que tal com es demostra al projecte, els mitjans de transport públic requereixen un consum energètic més baix per seient; el social, ja que la capacitat de desplaçar-se ha d'estar a l'abast de qualsevol persona, sense tenir la necessitat d'adquirir i mantenir vehicles propis; i per suposat, el mediambiental, doncs és evident que un dels mitjans de transport més contaminants, ja que consumeixen querosè, i menys eficients en el transport, són els avions. Amb un consum que assoleix els 6,7 litres de gasolina per persona cada 100km i tenint en compte que el querosè té un poder calorífic pràcticament idèntic al de la gasolina, representen també 6,7 litres de querosè cremats a l'atmosfera mitjançant els turboreactors dels avions. Un avió estàndard de passatgers, com el JET A, assoleix velocitats al voltant dels 900km/h, que només justifica la diferència de consums respecte els trens Maglev, pel fet de que els trens no poden travessar els oceans.

El fet que l'energia consumida, tant en els trens Maglev com en els trens convencionals, sigui elèctrica, pot suposar un altre gran avantatge, ja que l'energia elèctrica és una energia de per sí neta, tant pel que fa el transport com pel que fa a la seva conversió a mecànica. No obstant, cal tenir en compte també el sistema de producció d'aquesta energia en les centrals elèctriques, doncs si es produeix a partir de centrals tèrmiques, igualment han de cremar combustibles sòlids per produir-la. Tot i que les centrals tèrmiques actuals de cicle combinat tinguin rendiments molt elevats, tot combinat varies turbines de gas amb turbines de vapor, aquests rendiments, pel segon principi de la termodinàmica, a la pràctica no superen el 60%.

Per tant, els governs tenen dues tasques: una, l'anteriorment mencionada de promocionar el transport públic, fent-lo més econòmic i complert en els diferents trams i diferents franges horàries, i dos, intentar convertir les centrals tèrmiques, incloent les nuclears, en centrals provinents d'energies renovables.

En la realització i anàlisi dels dos sistemes de levitació s'ha observat que, tot i que el resultat pugui ser sorprenent donat que l'entreferro aconseguit en els dos sistemes és més elevat que l'entreferro nominal dels trens que utilitzen el sistema de suspensió electromagnètica, també s'ha comprovat que l'estabilitat en els prototips deixa molt a desitjar. Per tant, en els sistemes Maglev, els paràmetres dels trams a controlar i l'efecte de les seves respectives cadenes de realimentació ha de ser molt més complex i acurat.

Dels dos sistemes de levitació incorporants en el projecte, el més espectacular és el que és capaç de sostenir el levitador a l'aire, actuant per repulsió des d'una base inferior. S'ha comprovat que la inestabilitat que suposa, requereix controlar els tres eixos a l'espai. Aquest fet ha comportat un disseny de circuit molt més complex. No obstant, els resultats en quan a magnituds de massa que pot suportar, han estat molt més satisfactoris que en el levitador per atracció, perquè si bé el sistema no té gaire tolerància en front a les pertorbacions, sí que en té pel que fa a la possibilitat de suportar un bon rang de masses.

Neus Ferrer Torres
Graduada en Enginyeria Elèctrica

Girona, 10 de juny de 2020

17 RELACIÓ DOCUMENTS

El projecte en qüestió està format pel conjunts de cinc documents: Memòria, Plànols, Plec de condicions, Estat d'amidaments i Pressupost.

18 BIBLIOGRAFIA

CARUSO, W., CINTORINO, K., MCPHERON, M. A Procedure for Analyzing A Magnetic Levitation Toy. Escola Superior d'Enginyeria Informàtica i Gestió de la Construcció. Universitat Roger Williams. 2016.

CASSAT, A., BOURQUIN, V. Maglev Worldwide Status and Technical Review. Alain CASSAT, Vincent Bourquin. Suïssa. 2015.

CHAVARETTE, F.R. Dynamics and control design via LQR and SDRE methods for a Maglev System. Global Journal of Pure and Applied Mathematics. Vol. 101. No. 2. p.289-300. 2015.

DONGHOON, K., WONSEOK, C. Integrated monitoring scheme for a maglev guideway using multiplexed FBG sensor arrays. NDT&E International. Vol. 1. No. 42. p.260-266. 2009.

GARCÍA-AGÚNDEZ, B. Analytical study of a hovering magnetic System (Levitron). Projecte Fi de Grau. Enginyeria de Tecnologia Industrial. Escola Superior d'Enginyeria. Universitat de Sevilla. Juny 2017.

GINZBURG, V. ANDRYUSHIN, E. Superconductivity. Institut de Física de Lebedev. Rússia. Singapore. 2004.

GONZÁLEZ, A. ¿Qué es el magnetismo? Ediciones Universidad de Salamanca. Salamanca. 2001.

HYUNG-WOO, L., SUNG GU, L., CHANBAE, P., JU, L., HYUN-JUNE, P. Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train According to Various Secondary Schemes. IJR International Journal of Railway. Vol. 1. No. 1. p.6-11. 2008.

J.C. Mallinson, "Els fluxos d'una sola cara - Una curiositat magnètica?", IEEE Transactions on Magnetism, 9, 678-682, 1973.

JUFER, M., CASSAT, A. Collaboration with the Korean Railroad Research Institute (KRRI) Status Synthesis of the Swissmetro Project Swissmetro Maglev and KRRI Tube Train

Developments. Projecte Fi de Màster. Escola Politècnica Federal. Universitat de Lausana. Desembre 2010.

KIM, K., LEE, J. Review of Maglev train technologies. Vol. 1. No. 10. p.109-119. 2006.

KIM, M., JAE-HOON, J., JAEWON, L., CHANG-HYUN, K., MOONCHEOL, W. Design and Control of Levitation and Guidance Systems for a Semi-High-Speed Maglev Train. Institut Coreà d'Enginyers Elèctrics. Corea. 2016.

MAGNOVATE. Technology Overview. Canada. (<http://www.magnovate.com/technology-overview>, 30 de maig del 2020)

Nørgaard, J., Bentsen, F. Zero-Power Control of Hybrid Magnetic Levitation System. Projecte de Fi de Màster. Enginyeria de Control Mecatrònic. Departament de Tecnologia Energètica. Universitat de Aalborg. Juny 2015.

NORTHEAST MAGLEV. Technology in Maglev Trains. Maryland (<https://northeastmaglev.com/project/technology/>, 30 de maig del 2020)

RAILWAY TECHNICAL RESEARCH INSTITUT. Principles of superconducting levitation. Tokyo. (<https://www.fzu.cz/~jirsa/htm/principles.htm>, 30 de maig del 2020)

SAU-YING, M., SHIU-SING, T. Maglev Frontiers of physics. CUJK. (http://www.hk-phy.org/articles/maglev/maglev_e.html, 30 de maig del 2020)

SHANGHAI MAGLEV TRANSPORTATION DEVELOPMENT CO., LTD. Maglev Technology. Pudong Shanghai, China. (<http://www.smtdc.com/en/gycf3.html>, 30 de maig del 2020)

SONG, X., NING, H., ZHIQIANG, L. Electromagnetic Field Analysis and Modeling of a Relative Position Detection Sensor for High Speed Maglev Trains. MDPI Journal Sensors. Vol. 1. No. 12. p.24-32. 2012.

ZHIGANG, L., ZHIQIANG, L., XIAOLONG, L. Maglev Trains Key Underlying Technologies. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Dordrecht. 2015.

19 GLOSSARI

3D: Tres dimensions.

AC: Corrent altern.

CC: Corrent continu.

EDS: Suspensió electrodinàmica.

EMS: Suspensió electromagnètica.

GS: Sistema de guia.

HEMS: Suspensió electromagnètica híbrida.

LED: Díode emissor de llum.

LG: Generador lineal.

LIM: Motor lineal d'inducció.

LS: Sistemes de levitació.

LSM: Motor lineal síncron.

MAF: Força magnètica d'atracció.

MRF: Força magnètica de repulsió.

OP: Amplificador operacional.

PCB: Placa de circuit imprès.

PS: Sistema de propulsió.

PWM: Modulació per ample de polsos.

TES: Sistema de transferència d'energia al tren.