

17-1-2014



IES
MONTERRAT
ROIG

LEVITACIÓ MAGNÈTICA



Karim Tahiri Anajjar

2^{on} BTX A

Tutor: Josep Sánchez

Índex

Introducció	4
• Motivació	4
• Hipòtesi	4
• Objectius	4
• Fases del treball	4
1. El magnetisme	6
1.1. Polarització dels imants	7
1.2. Camp magnètic	8
1.3. Inducció magnètica	9
1.4. Propietats magnètiques de les substàncies	10
2. Levitació magnètica	12
2.1. Introducció	12
2.2. Història	12
3. Levitació amb imants permanents	14
3.1. El <i>Levitron</i>	15
4. Superconductivitat	17
4.1. Què entenem per superconductivitat?	17
4.2. Variació de la resistència amb la temperatura	17
4.3. Superconductors	18
4.4. Valors crítics	19
4.5. Història	19
4.6. Efecte Meissner	20
5. Electromagnetisme	22
5.1. Història	22
5.2. Visualització de les línies de camp d'un conductor	24
5.3. Què és un electroimant?	25
5.4. Tipus d'electroimants i aplicacions	26

6. Aplicacions	28
6.1. Trens <i>Maglev</i>	28
6.2. El rodament magnètic	29
6.3. Futures aplicacions	30
7. Levitació d'un objecte amb electroimant	32
7.1. Construcció de l'electroimant	32
7.2. Materials i programari necessari	33
7.3. Passos seguits	39
7.4. Esquema del circuit amb Fritzing	45
7.5. Codi de programació per Arduino	46
7.6. Funcionament del sistema	49
Conclusions del treball	50
Bibliografia i recursos	52
Annexos	55

Introducció

• Motivació

La raó per la qual vaig decidir fer el treball sobre la levitació magnètica, és perquè en el moment en què havia de decidir el tema, vaig veure un documental on s'explicaven els seus principis i em va agradar bastant la idea, principalment em va motivar a fer-lo d'aquest tema per la curiositat que em despertava.

Tot i que vaig remenar altres temes, finalment em vaig fer la pregunta de si realment podria aconseguir una bona part pràctica, i en la primera entrevista amb el tutor vaig veure que la millor decisió era seguir amb el tema de la levitació magnètica, ja que a més d'aprendre aspectes que no havia vist abans, podia gaudir del treball.

• Hipòtesi

La hipòtesi és que cap sistema d'imants permanents produeix el que es coneix com una levitació magnètica estable. Per tant, em vaig centrar en la forma d'aconseguir aquesta amb el que tenia al meu abast, per tal de poder demostrar-ho a la part pràctica.

• Objectius

Després de contrastar informació, em vaig posar com a objectiu l'estudi de les diferents formes de fer levitar un objecte, i com a part experimental, construir un levitador magnètic amb el qual es pugui explicar el fenomen estudiat.

• Fases del treball

Per fer aquest treball primer he començat per la documentació, amb l'ajuda de vídeos, blogs i enciclopèdies online. A la part teòrica he explicat una mica d'història i els principis que fonamenten les tres maneres que he considerat per fer levitar un objecte magnèticament, però sense incidir-hi massa, ja que el meu objectiu era plasmar una o dues d'elles a la part pràctica. Aquestes tres maneres són: amb imants permanents, amb superconductors i amb electromagnetisme, l'última en la qual m'he centrat per fer la part experimental.

Com que per aconseguir la levitació necessitava una part de programació, vaig adquirir una placa Arduino a una botiga de robòtica i amb l'ajuda de vídeos, dels blogs i del meu tutor, vaig familiaritzar-me a poc a poc.

Seguidament vaig construir l'electroimant i vaig muntar el prototip amb tot el hardware necessari. Finalment, l'únic que em quedava era programar l'Arduino fins aconseguir el resultat desitjat.

1. El magnetisme

Aquest fenomen es va observar per primera vegada fa 2500 anys i des d'aleshores a l'home li segueix fascinant la idea d'una força invisible entre certs objectes. L'ésser humà i el seu afany d'explicar els fenòmens de la natura, van fer que el magnetisme no passés desapercebut.



Van observar que uns minerals interactuaven entre si d'alguna forma i van començar a preguntar-se el perquè, a aquests trossos, amb el temps se'ls hi va donar el nom d'imants permanents. Aquests imants exercien força entre ells i sobre altres objectes fets de ferro que no estaven magnetitzats.

Segons algunes fonts històriques, els primers intents d'utilitzar les propietats magnètiques, es remunten a l'any 121, quan els xinesos van començar a utilitzar el mineral anomenat *magnetita* amb finalitats tecnològiques. La magnetita quan es talla en forma de varetes, ferradures, cilindres, etc., dona lloc als anomenats imants naturals, que tenen la propietat d'atraure els objectes de ferro i altres materials.



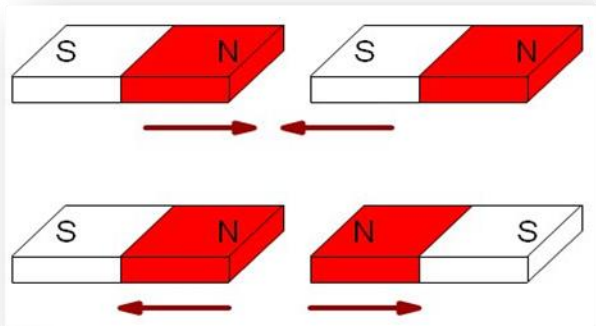
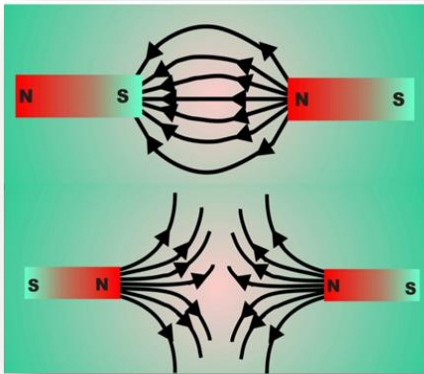
El magnetisme es un fenomen físic pel qual els objectes exerceixen forces d'atracció o repulsió sobre altres materials.



El primer tractat sobre magnetisme, **De Magnete** (Sobre l'imant), va ser escrit l'any 1600 per l'anglès William Gilbert (1544-1603). Va recollir totes les observacions fetes sobre els imants i va assenyalar que la Terra era un gran imant.

1.1. Polarització dels imants

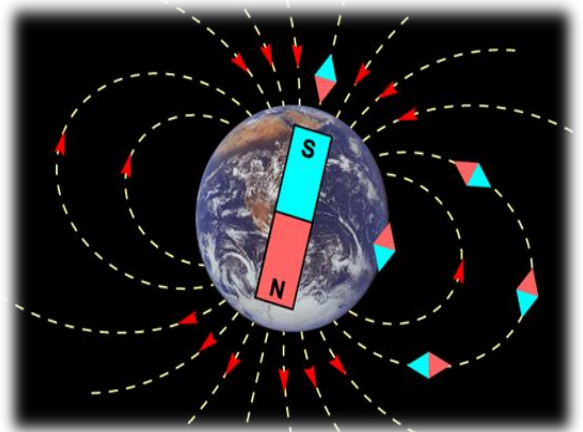
En un imant, la màxima força d'atracció es troba en els seus dos pols: el nord i el sud. Els pols diferents (pol N- pol S) s'atrauen i els pols iguals (pol N- pol N o pol S- pol S) es repel·leixen.



Una de les primeres aplicacions tecnològiques dels imants va ser la construcció de la brúixola, que serveix per orientar-nos a la Terra.

La Terra és com un imant gegant, encara que d'intensitat petita, és capaç de fer girar una agulla imantada. El pol nord magnètic terrestre, que no coincideix exactament amb el geogràfic, és determinat per un dels extrems de l'agulla magnètica de la brúixola i l'altre extrem, en sentit oposat, determina el pol sud magnètic.

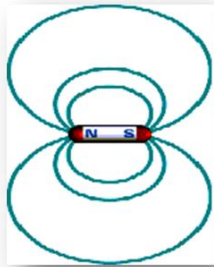
Respecte a la polaritat dels imants, si es parteix un imant en diferents trossos sempre seguirà tenint un pol nord i un pol sud, és a dir, no existeixen pols aïllats, es van fent imants nous, encara que la força d'atracció disminueix.



1.2. Camp magnètic

Quan tenim una càrrega elèctrica, al voltant d'aquesta es crea un camp elèctric. Si dins d'aquest camp elèctric existeix una altra carrega, aquesta segona carrega detectarà a l'altra gràcies al camp elèctric, per tant, el camp elèctric és una pertorbació que existeix al voltant d'una carrega elèctrica. Amb el camp magnètic tindrem un fenomen similar.

Un imant permanent produeix al voltant d'ell una pertorbació, anomenada camp magnètic, si un segon cos penetra en aquesta pertorbació, llavors aquest cos interactuarà amb l'imat a través del camp magnètic.



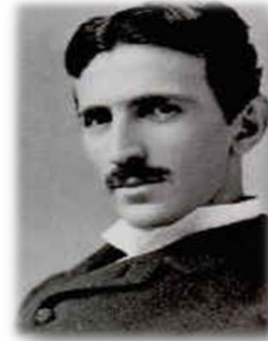
L'espai en el qual es posa de manifest l'acció d'un imant s'anomena camp magnètic. Aquest camp es representat mitjançant línies de força, que són unes línies imaginàries, que van del pol nord al pol sud, per fora de l'imat i en sentit contrari per dins d'aquest.

El camp magnètic el podem observar amb un experiment, que consisteix en escampar petites llimadures de ferro al voltant d'un imant sobre un full de paper, i aquestes llimadures aniran formant el que es coneix com a línies de camp.

Aquest experiment el va visualitzar Michael Faraday (1791-1867) i va introduir el concepte de forces per explicar la interacció magnètica. Al sistema internacional (SI) la unitat per expressar la intensitat del camp magnètic es el Tesla (T). Va ser definida l'any 1960, en honor a l'inventor, científic i enginyer Nikola Tesla.



Michael Faraday (1791-1867).



Nikola Tesla (1856-1943).

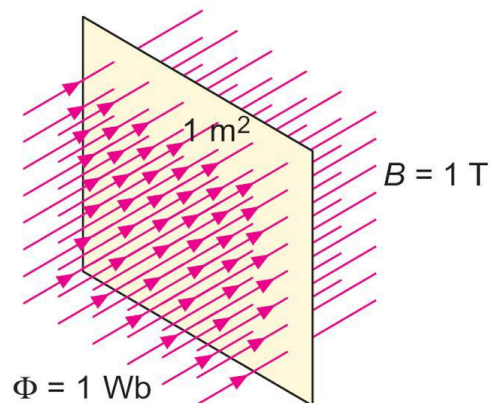
1.3. Inducció magnètica

Les línies que formen l'espectre magnètic, com he dit abans, són les línies de força, anomenades línies de força o d'inducció.

La inducció magnètica B és una magnitud vectorial que equival a la força puntual que el camp exerceix sobre la unitat de massa magnètica en aquell punt, i és proporcional al nombre de línies de força per unitat de superfície.

Encara que la unitat en el SI de la inducció magnètica sigui el Tesla, aquesta és un unitat molt gran a la pràctica. Per exemple, la inducció del camp magnètic terrestre és de l'ordre de 10^{-5} T, la dels imants permanents, de 10^{-2} T i amb electroimants molt potents es poden crear camps superiors als 30 T.

Diem que el camp magnètic és uniforme o homogeni quan tots els punts del camp magnètic tenen la mateixa inducció, la mateixa direcció, les línies són



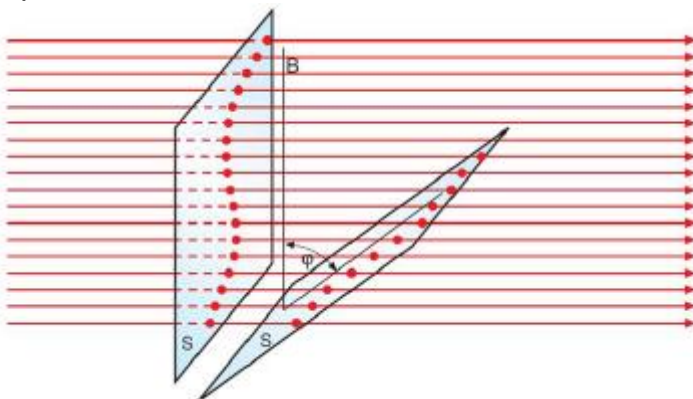
Línies de força o d'inducció, travessant una superfície.

paral·leles i es troben a la mateixa distància. Però s'ha de dir que això pràcticament només es produeix a l'interior de l'imant, perquè com s'ha vist anteriorment les línies de camp realment no són uniformes.

D'altra banda, el flux del camp magnètic Φ és el producte de la superfície S perpendicular a les línies de força i el de la inducció B . La unitat en el SI és el weber (Wb).

$$\Phi = B \cdot S$$

Si la superfície forma un angle φ amb la normal de les línies de força, el flux que travessa la superfície valdrà:



$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\varphi$$

El flux magnètic que travessa una superfície depèn de la inclinació de la superfície respecte de les línies.

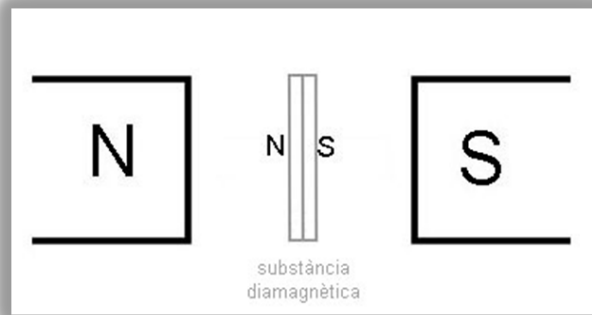
1.4. Propietats magnètiques de les substàncies

Els materials de ferro presenten propietats magnètiques. En canvi, la majoria dels altres materials no les presenten, almenys de forma apreciable.

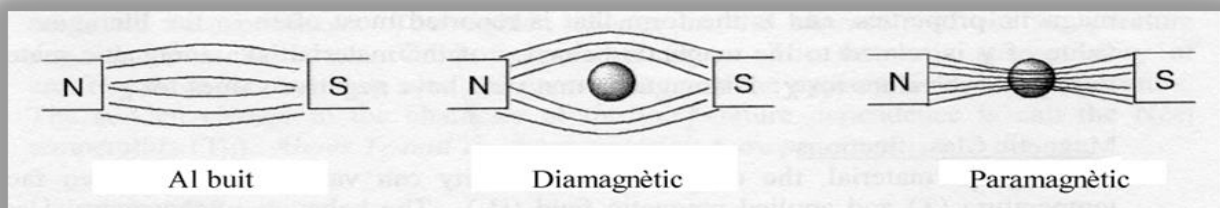
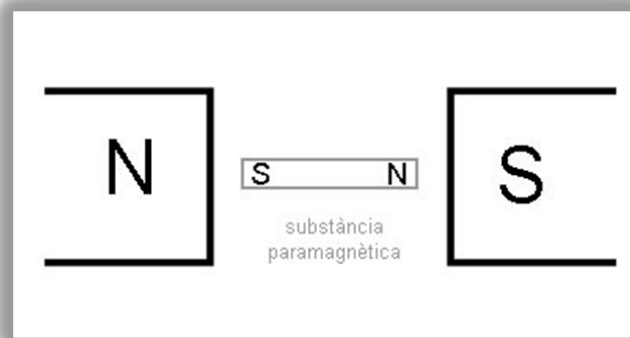
Les **substàncies** les podem classificar segons el comportament magnètic que presenten:

- Les **substàncies ferromagnètiques** com el ferro, el níquel o el cobalt, posseeixen la capacitat de que quan es magnetitzen per l'acció d'un camp magnètic, un cop deixa d'actuar aquest camp magnètic segueixen magnetitzades un cert temps.

- Les **substàncies diamagnètiques** repel·leixen els imants i es creen forces de repulsió. Alguns exemples són el bismut, el coure, l'hidrogen, el silici, etc.

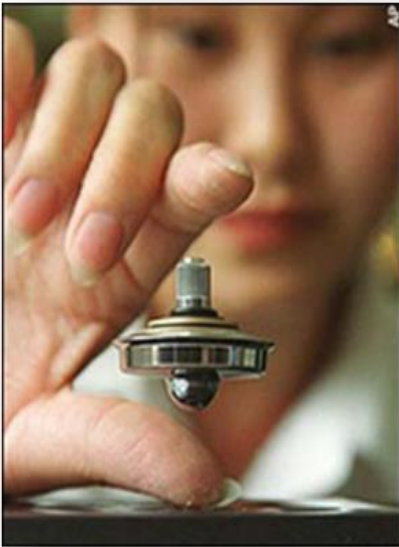


- Les **substàncies paramagnètiques** com el magnesi o el titani, es magnetitzen quan hi actua un camp magnètic i quan aquest deixa d'actuar aquestes substàncies tornen al seu estat normal. Una substància paramagnètica concentra les línies de camp.



2. Levitació magnètica

2.1. Introducció



Quan es parla de levitació el primer en el que es pensa és en un objecte flotant a l'aire, per tant, la levitació magnètica per definir-ho d'una forma més senzilla seria la suspensió d'un objecte en el aire gràcies a l'acció d'un camp magnètic. Qualsevol objecte pot ser levitat sempre que el camp magnètic sigui suficientment fort, l'acció d'aquest ha de contrarestar la força de la gravetat.

Les aplicacions d'aquest fenomen a la nostra vida quotidiana poden ser molt amplies. En un futur quan s'hagi desenvolupat del tot i s'hagi estudiat com reduir alguns dels inconvenients en la seva aplicació, crec que la levitació serà un dels fenòmens més útils i innovadors del moment.

Actualment ja en veiem algunes d'aquestes aplicacions. L'aplicació més directa seria la que s'utilitza en el transport, com ara els trens de levitació magnètica o *Maglev (Magnetic levitation)*, que es desplacen per damunt d'unes vies sense arribar-les a tocar.

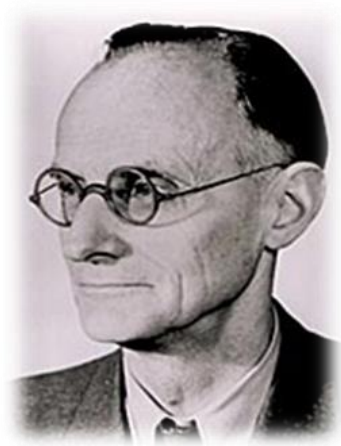
Pel que fa a la levitació magnètica en aquest treball estudiaré tres formes de fer levitar un objecte: amb imants permanents, utilitzant superconductors i amb l'electromagnetisme.

2.2. Història

La levitació magnètica en la seva investigació cada vegada creix més i més, es podria dir que en aquest moment es troba a la punta de l'iceberg del què algun dia podria ser una tecnologia més comuna del que ens pensem.

Des que es van descobrir els imants fins a la utilització de la levitació en un tren del Japó han passat segles. La màgia que envolta el magnetisme, és el que ha despertat la curiositat i les ganes d'estudiar aquest fenomen durant tots aquests anys.

L'any 1831 el científic britànic Michael Faraday (1791-1867) va descobrir que el moviment d'un imant en les proximitats d'un cable induïx en aquest un corrent elèctric: aquest efecte era invers al que va trobar Oersted. Els dos descobriments estan relacionats amb el motor elèctric i els generadors de corrent.



Deixant de banda una mica la història dels imants i el magnetisme, s'ha de dir que pel que fa a la levitació, l'any 1922 l'enginyer alemany Hermann Kemper va imaginar la idea d'un tren levitat magnèticament obtenint la patent 12 anys més tard, encara que la tecnologia de la seva època no li va permetre aconseguir el seu somni. Però amb el pas del temps va ser possible primer el 1962 a Japó i a l'any 1969 a Alemanya.

I actualment es segueix treballant en altres aplicacions a més de la levitació en els trens *Maglev*.

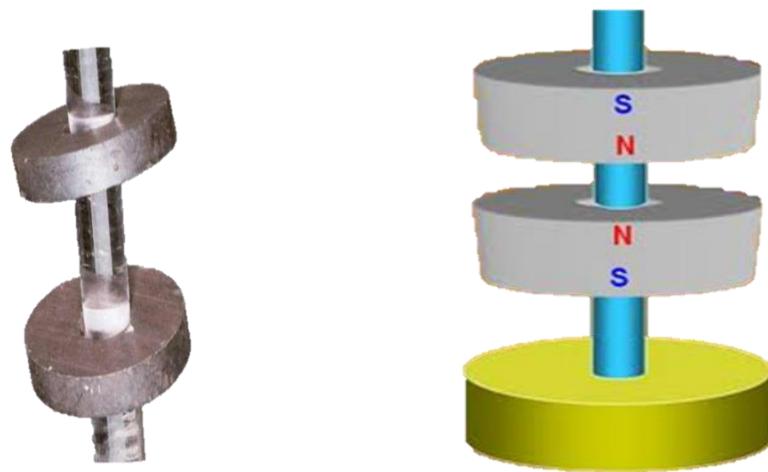


3. Levitació amb imants permanents

Si agafem dos imants i posem un a sobre de l'altre amb els pols de manera que aquests dos imants es repel·leixin, ens donarà la sensació de que l'imant de sobre pot suspendre's a l'aire per si sol, però una vegada que el deixem anar, veiem com la força passa a ser d'atracció i l'imant es mou.

Aquesta forma de levitació no és estable encara que els imants tinguin suficient força com per a que un d'ells leviti.

Si a la força, volem que l'imant leviti podem agafar dos imants circulars, posar en mig una guia per a que el sistema sigui més estable i així aconseguirem que cap imant es desviï cap els costats.



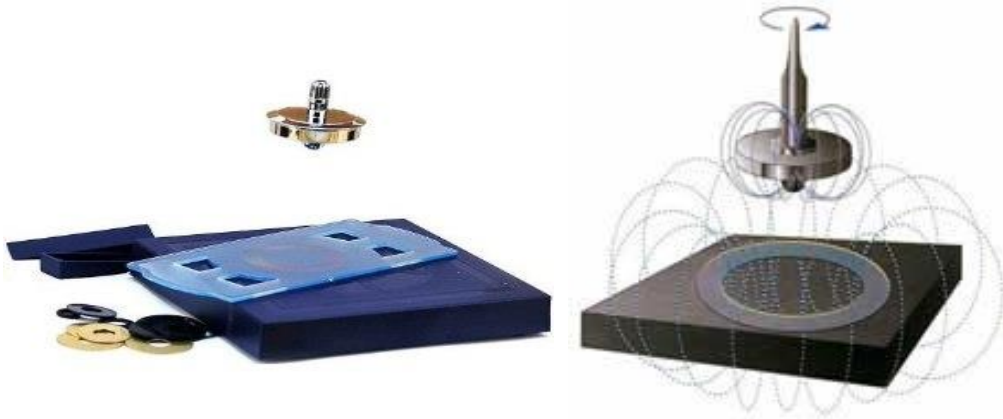
Està demostrat que cap sistema estàtic d'imants permanents, pot donar lloc a una levitació estable, tant si actuen forces d'atracció com de repulsió. És com intentar deixar un llapis en posició vertical sobre la seva punta.

Com es pot veure a la imatge, la vareta impedeix la rotació i el moviment lateral dels imants, la força de repulsió com he dit anteriorment es prou intensa per fer levitar un d'ells.

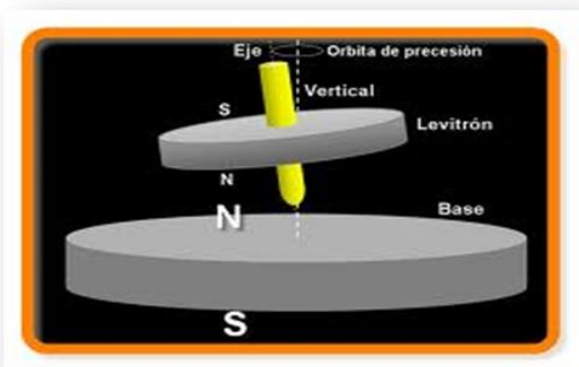
També es poden utilitzar altres sistemes per fer levitació amb imants permanents com el que explicaré a continuació.

3.1. El Levitron

Actualment podem trobar algunes joguines que leviten amb imants permanents. Una d'aquestes és el *levitron*, que demostra el fenomen de la levitació magnètica estabilitzada per rotació. Aquesta joguina consisteix bàsicament en una baldufa magnètica que gira levitant sobre una base també magnètica en forma d'anell o rectangular amb un forat central.



Per a que aquesta baldufa leviti el que hem de fer és agafar la base i a sobre hem de posar una placa com per exemple una capsa de plàstic que solen acompanyar als CD. A sobre d'aquesta capsa fem girar la baldufa i quan aixequem una mica aquesta placa ens donarà la sensació de que la baldufa vol levitar. Si la baldufa no s'aixeca vol dir que porta més pes del que hauria de portar, si en canvi surt volant, vol dir que pesa poc.



Com es pot veure a la imatge, la força que fa levitar la baldufa és de repulsió.

Una cosa que em vaig preguntar quan vaig veure aquesta joguina és perquè la baldufa es mantenia flotant i no donava la volta i queia.

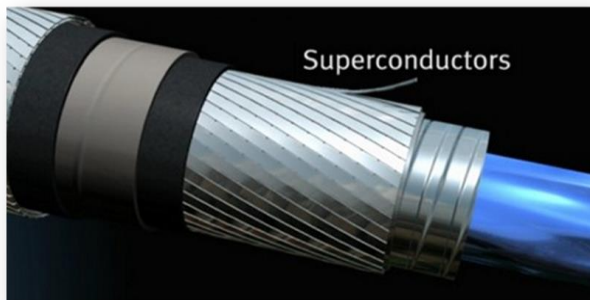
La resposta a aquesta pregunta està en el gir que fa la baldufa, per això quan perd velocitat la baldufa cau. L'eix és quasi vertical en un principi, però quan baixa la velocitat de gir, apareix una oscil·lació en aquest eix. Si gira amb la suficient velocitat, l'equilibri es manté.

El mateix passa amb el gir de la roda d'una bicicleta que fa que mantinguem l'equilibri i no caiguem, però si perdem velocitat o frenem és impossible mantenir l'equilibri.

També s'ha fabricat el *Superlevitron* que és més potent i levita més alt que el normal perquè utilitza imants de neodimi que són més potents.

4. Superconductivitat

4.1. Què entenem per superconductivitat?



La superconductivitat es un fenomen que mostra l'estat en el qual la resistència elèctrica de certs materials disminueix fins arribar a zero. La temperatura per sota de la qual la resistència s'aproxima a zero s'anomena temperatura crítica (T_C).

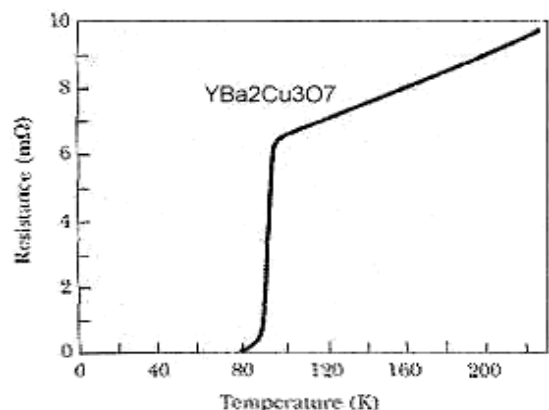
La resistència elèctrica representa l'oposició o dificultat que troben els electrons en el seu moviment dintre d'un material conductor, perquè aquests electrons xoquen entre ells i amb la xarxa d'ions metàl·lics.

Si per exemple agafem un fil conductor, la seva resistència depèn de diversos factors com la longitud del fil, la secció del fil i el tipus de material. Cada tipus de metall té una xarxa d'ions metàl·lics pròpia, i per caracteritzar-ne l'efecte dintre de la resistència es defineix un paràmetre anomenat resistivitat.

4.2. Variació de la resistència amb la temperatura

Experimentalment s'observa que la resistència varia amb la temperatura: la resistència augmenta quan ho fa la temperatura, i disminueix quan baixa la temperatura.

L'augment de la resistència amb la temperatura té inconvenients per a molts receptors elèctrics que funcionen a temperatures elevades.



La resistència elèctrica d'un conductor varia amb la temperatura.

Com que la intensitat de corrent que circula per un receptor és inversament proporcional a la seva resistència, si la resistència augmenta amb la temperatura, la intensitat disminueix, i l'aparell pot deixar de funcionar.

Per evitar aquests problemes es fan servir aliatges de metalls, és a dir, mescles de metalls que no presenten tanta variació de la resistència amb la temperatura.

4.3. Superconductors



El fet que la resistència disminueixi amb la temperatura va portar a observar uns fenòmens extraordinaris que podien ser molt útils.

L'any 1891 el físic holandès Heike Kamerlingh Onnes va descobrir que quan es refredava mercuri per sota dels -269°C (que són 4 K, temperatura en que l'heli es torna líquid), aquest metall no presentava resistència elèctrica.

Els electrons que circulen per l'interior d'un conductor perden energia quan xoquen amb els ions metàl·lics. Per això els generadors els han de subministrar energia contínuament perquè continuïn circulant.

En canvi, en un metall en estat superconductor, els electrons no xoquen i, per tant, no perden energia. Està comprovat que un corrent establert en un superconductor no desapareix si prescindim del generador. S'ha observat que els corrents introduïts en bobines superconductores romanen constants uns quants anys.

Suposaria un estalvi important d'energia, si en un futur s'aconsegueix utilitzar superconductors per al transport d'energia, sense que hi hagin inconvenients. Una altra utilitat és la de fabricar potents imants que poden servir per construir trens de levitació magnètica. D'aquesta última aplicació en parlaré més endavant.

El problema principal per aconseguir la superconductivitat són les baixes temperatures a les quals s'ha de treballar; per això s'investiga contínuament per trobar materials que siguin superconductors a temperatures raonables.

4.4. Valors crítics



La superconductivitat només existeix per sota de una certa temperatura, anomenada temperatura crítica, per sota d'aquesta temperatura el material es converteix en superconductor. El que es fa per arribar a aquestes temperatures tan baixes, és utilitzar substàncies com l'heli o el nitrogen líquid, que és més barat, per poder refredar el material fins a unes temperatures extremes.

La pèrdua de resistència en d'alguns materials superconductors pot produir-se en un marge molt petit, en una milionèsima part d'un grau o, en el cas d'alguns superconductors, es pot produir en desenes de graus.

4.5. Història



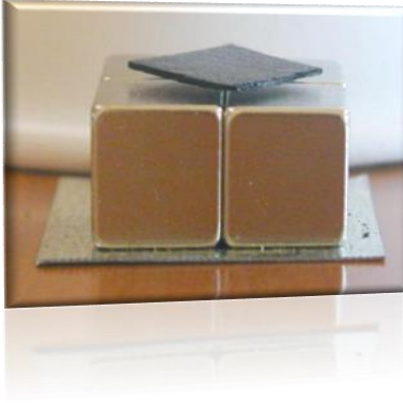
Heike Kamerlingh Onnes.

L'interès dels físics del segle XIX en liquidar tots els gasos que es coneixien en aquella època, va ser clau per descobrir la superconductivitat, ja que només es podien liquidar a temperatures molt per sota dels 0 °C.

Com he dit abans, el primer en descobrir el fenomen de la superconductivitat va ser Heike Kamerlingh Onnes, que no ho hauria descobert ni observat si no s'hagués dedicat a aconseguir heli líquid.

Onnes va observar que la resistivitat del mercuri per sota de -269 °C K era 10^{11} vegades més petita que el seu valor una mica més amunt.

L'any 1933, els alemanys Karl W. Meissner i R. Ochsenfeld van detectar un cert diamagnetisme en un superconductor, això vol dir que un superconductor repel·lia un camp magnètic.



El 1986 Alex Müller i Georg Bednorz van fabricar el primer superconductor ceràmic, amb una temperatura crítica (T_c) de $-243\text{ }^\circ\text{C}$, la més alta coneguda fins aquell moment. L'altre fet important d'aquest descobriment és que les ceràmiques normalment són aïllants. Aquest descobriment els va fer guanyar el Premi Nobel del següent any.

A partir del descobriment de Müller i Bednorz, els investigadors van començar la recerca de compostos ceràmics nous amb l'objectiu d'aconseguir la T_c més alta. El 1987 es va tornar a superar el rècord amb una temperatura crítica de $-181\text{ }^\circ\text{C}$, que per primera vegada era superior que el nitrogen líquid. Però encara hi ha més, l'actual rècord mundial de T_c és de $-135\text{ }^\circ\text{C}$, en una molècula de mercuri, tal·li, bari, calci, coure i oxigen, creada el 1995.

Recentment s'han fet descobriments que van en contra de les teories de la superconductivitat i això està portant als científics a revisar contínuament aquestes teories.

4.6. Efecte Meissner



Walter Meissner.

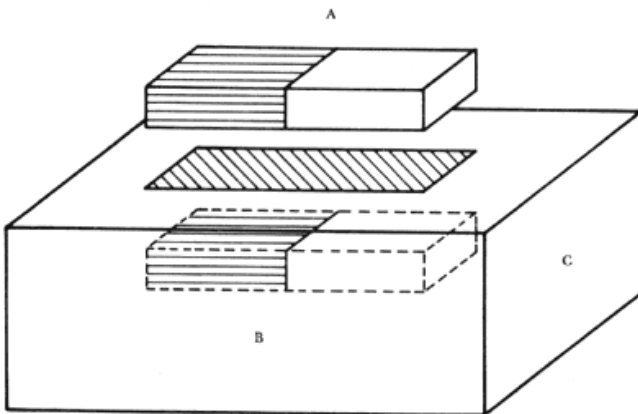
El 1933 Walter Meissner i R. Ochsenfeld van veure que un superconductor no permetia que existís un camp d'inducció magnètica al seu interior.

Una forma senzilla d'explicar l'efecte Meissner és que quan un superconductor és refredat, no permet cap camp magnètic al seu interior, sinó que un imant levita perquè es produeix com un reflex de l'imant, com si el superconductor fos un mirall. "L'imant és repel·lit per la seva pròpia imatge". Això seria l'efecte Meissner.

Com més potent sigui l'imant, més poderosa serà la seva imatge i consegüentment més intensa la força de repulsió.

En la levitació de l'imant, aquest pot estar quiet, movent-se sobre si mateix o també podem anar modificant la seva posició, ja que això no altera el fet de que sempre aparegui una imatge instantània d'ell en el superconductor que el repèl i el fa flotar.

I com s'ho fa el superconductor per generar la imatge de l'imant? Doncs el superconductor genera la imatge de l'imant movent els electrons, generant corrents superficials que, a la vegada, generen un camp magnètic que correspon a la imatge de l'imant, i produeix així la repulsió i levitació d'aquest.

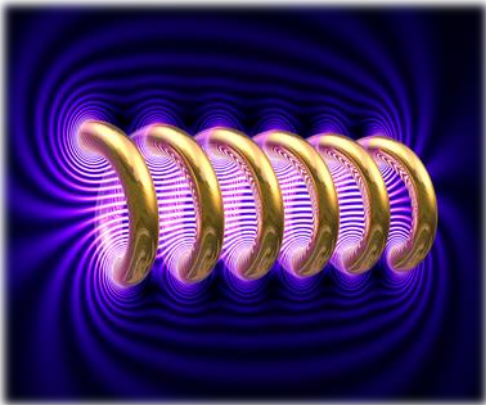


Esquema de l'efecte Meissner. Imant (A), superconductor (B) i imatge magnètica de l'imant (C).



A la imatge podem veure un imant levitant a sobre d'un superconductor per l'efecte Meissner.

5. Electromagnetisme



Des de fa molts anys que els humans coneixen els efectes magnètics, com per exemple el poder d'atracció de la magnetita sobre el ferro, però en aquest apartat parlaré d'un aspecte conegut més recentment, la relació entre l'electricitat i el magnetisme. La relació entre aquests dos fenòmens es coneix com a electromagnetisme.

El funcionament de generadors elèctrics, motors elèctrics i transformadors se sustenta amb el fenomen de la inducció electromagnètica, en que un camp magnètic canviant produeix un camp elèctric. També s'ha de dir que el camp elèctric produeix camp magnètic. Tot aquest conjunt de relacions és el que estudia l'electromagnetisme.

Es pot definir l'electromagnetisme com la branca de la física que estudia i unifica els fenòmens elèctrics i magnètics en una sola teoria.

5.1. Història

Abans del 1820, l'únic magnetisme conegut era el del ferro, això va canviar amb un professor poc conegut de la Universitat de Copenhaguen, Hans Christian Oersted. Fins a aquell moment l'electricitat i el magnetisme es van desenvolupar independentment l'una de l'altra.

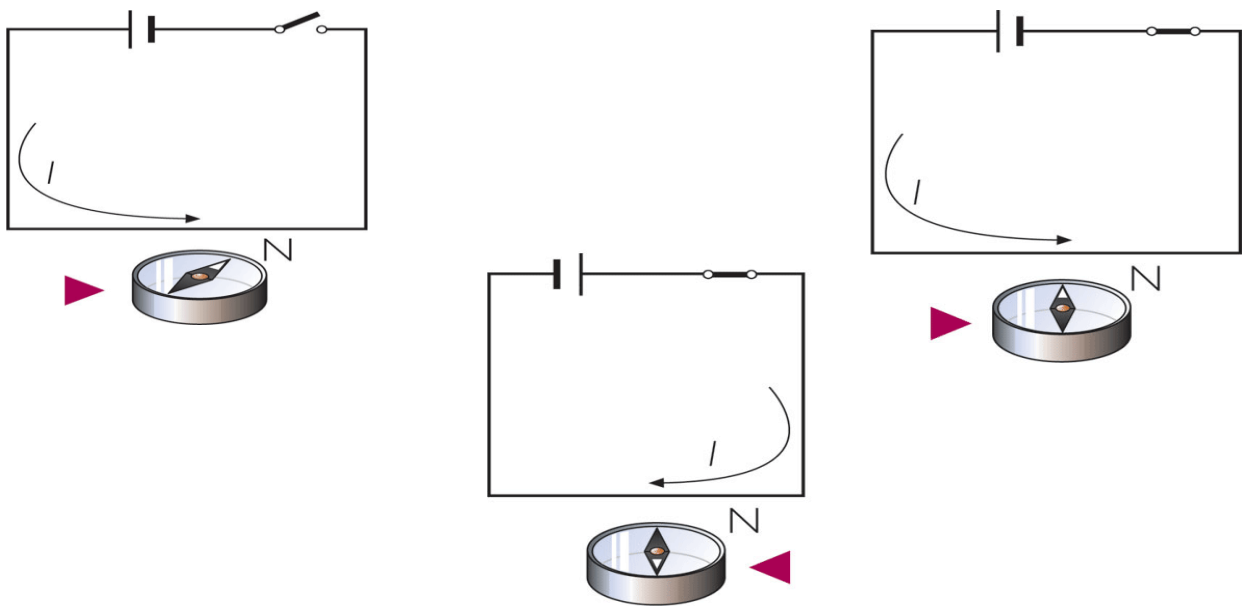
Oersted va preparar a casa seva una demostració científica als seus amics i estudiants. Va plantejar demostrar l'escalfament d'un fil per un corrent elèctric i també portar a terme demostracions sobre magnetisme, per la qual cosa va disposar d'una agulla de compàs muntada sobre una base de fusta.



Hans Christian Oersted.

Mentre portava a terme la seva demostració elèctrica, Oersted va notar que cada vegada que es connectava el corrent elèctric, es movia la agulla del compàs.

Experimentalment Oersted va veure que el corrent elèctric que passava per un filferro podia afectar a l'agulla magnètica d'una brúixola. Poc després es va comprovar que el fenomen magnètic observat era produït per corrents elèctrics i s'unificaren de manera definitiva el magnetisme i l'electricitat, originant la branca de la física coneguda com a electromagnetisme.



Amb aquests tres dibuixos es pot entendre millor el que va experimentar llavors Oersted. En el dibuix de l'esquerra es pot veure com el circuit està obert i no hi ha corrent, l'agulla de la brúixola no ha sofert cap variació i s'anala en direcció Nord. En canvi, en els altres dos dibuixos, si que hi circula corrent pel circuit i l'agulla de la brúixola es posa perpendicular a aquest corrent.

Francesc Joan Domènec Aragó (1786-1853), va presenciar l'experiment d'Oersted a Ginebra en què el corrent elèctric desvia una agulla imantada i el va repetir a París animant a Ampere a investigar sobre el fenomen. Va descobrir la imantació del ferro per un corrent elèctric i, de manera independent a Ampere, va construir el primer electroimant.



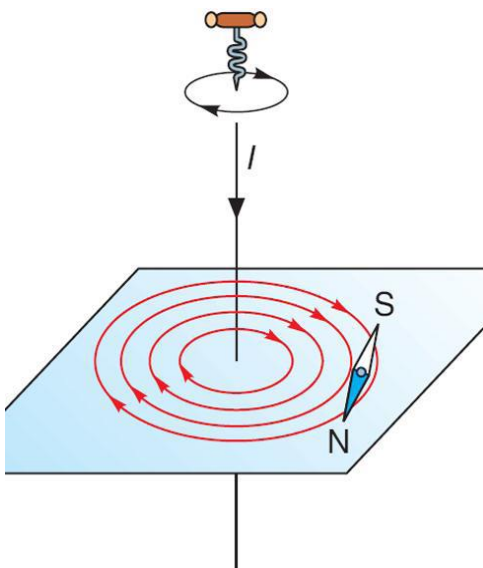
André-Marie Ampere.

André-Marie Ampère després de la presentació que Francesc Arago va fer de les descobertes d'Oersted va desenvolupar un gran interès sobre el tema i en poc temps, després de llegir una memòria sobre l'efecte del corrent elèctric d'una pila voltaica sobre una agulla magnètica, va presentar un fet nou: la interacció de dos corrents sense mediació d'un imant.

Ampère va continuar treballant sobre els corrents elèctrics durant els anys següents, i finalment el 1827 va publicar el que avui coneixem com a llei d'Ampère: dos conductors paral·lels a través dels quals passa un corrent en el mateix sentit s'atrauen i, si van en sentit oposat, es repel·leixen; l'efecte magnètic d'un conductor a través del qual passa un corrent elèctric és idèntic al d'un imant permanent.

Més tard (1864), James Clerk Maxwell va unificar els treballs anteriors en una sola teoria.

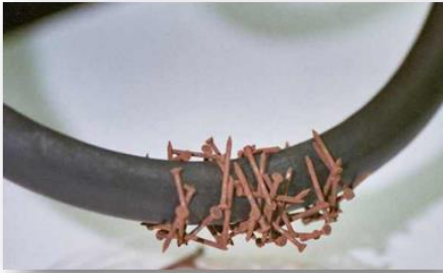
5.2. Visualització de les línies de camp d'un conductor



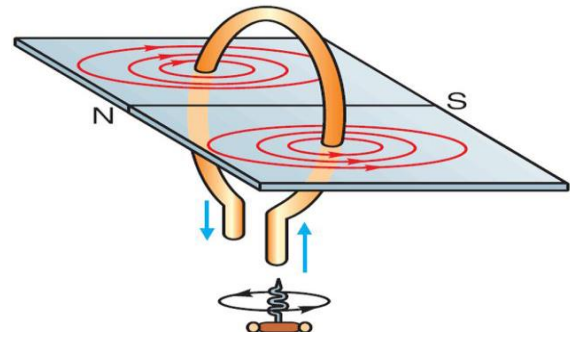
Línies de camp d'un conductor rectilini.

Com he dit abans, un conductor pel qual circula un corrent elèctric té associat un camp magnètic. Aquest camp magnètic es visualitza en forma de línies. Les línies del camp magnètic d'un conductor rectilini o d'una espira per on circula un corrent, consisteixen en circumferències concèntriques.

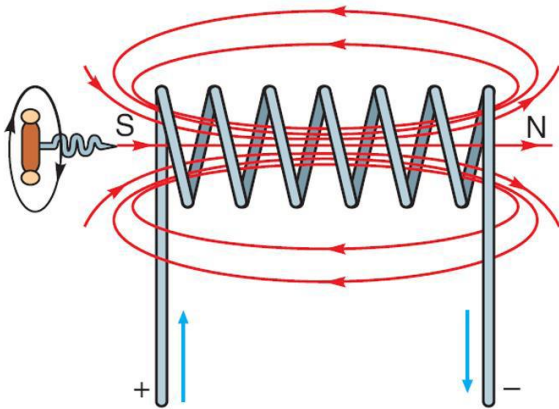
Quan per un conductor rectilini hi circula un corrent elèctric, crea un camp magnètic que desvia la brúixola, col·locant-la perpendicular al conductor. El camp magnètic creat està format per línies de força circulars situades en un pla perpendicular al conductor. El corrent avança en el mateix sentit que ho faria un tirabuixó.



El conductor actua com si fos un imant davant dels claus de ferro.



Línies de camp d'una espira.



Quan el camp creat és en un solenoide o bobina, el camp magnètic total és la suma dels camps magnètics creats per cada espira i és similar al d'un imant recte.

5.3. Què és un electroimant?



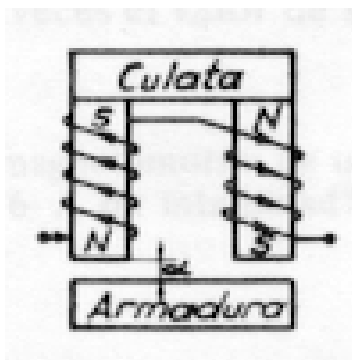
Un electroimant és un tipus d'imant en què el camp magnètic és produït per un corrent elèctric. Com he dit anteriorment el pas d'un corrent per un conductor crea al seu torn un camp magnètic, i això és el que passa amb l'electroimant. Com més corrent passi per l'electroimant, més potent serà la força d'atracció o repulsió magnètica d'aquest.

L' electroimant consta d'un nucli metàl·lic que concentra el camp magnètic i aquest nucli és envoltat per un bobinat o solenoide. Hi ha diferents peces que es poden utilitzar de nucli, és a dir, no cal que la secció del solenoide sigui circular, però és indispensable que les espiras estiguin molt juntes. Un solenoide o bobina s'utilitza per produir camps magnètics intensos i relativament uniformes en una petita regió de l'espai.

5.4. Tipus d'electroimants i aplicacions

Existeixen diversos tipus d'electroimants. Els més utilitzats són els **rectes**, els de **ferradura**, els **cuirassats** i els **electroimants de succió**.

- L'electroimant **recte** és aquell que té un nucli interior que està constituït per una barra de ferro.



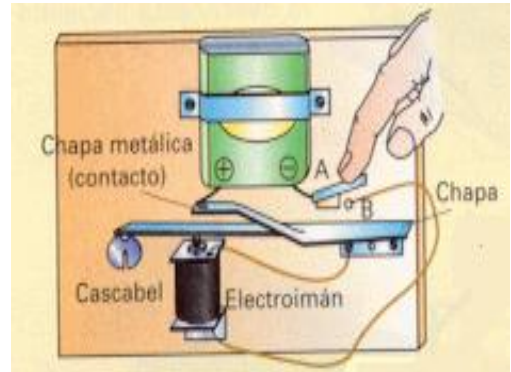
- Els electroimants de **ferradura** tenen formes com la indicada en la figura. Aquests electroimants estan formats per dos nuclis, cadascun dels quals és en realitat un electroimant recte.

- L'electroimant **cuirassat** està constituït per un sol nucli central, proveït d'una bobina. Aquests electroimants s'utilitzen en grues.



L'electroimant té diverses aplicacions, s'utilitza en portes automàtiques, en que obra el pany de la porta, en l'accionament d'electrovàlvules, timbres i bronzidors, relés, aparells de mesura, etc.

A la imatge de la dreta es pot veure com a partir d'un electroimant es construeix un timbre elèctric. El seu funcionament està basat en el fet de que quan passa corrent per l'electroimant aquest produeix una vibració que fa que el cascavell es mogui i produeixi el so.



Quan premem el polsador, es tanca el circuit i el corrent passa per la bobina, aquesta crea un camp magnètic en el seu nucli i la xapa vibra.

Es poden utilitzar altres electroimants fent que hi hagi una atracció entre l'electroimant i un objecte metàl·lic que colpeja la campana.

6. Aplicacions

A continuació descriuré algunes de les aplicacions actuals i futures de la levitació magnètica, ja que no totes estan del tot desenvolupades en els nostres dies.

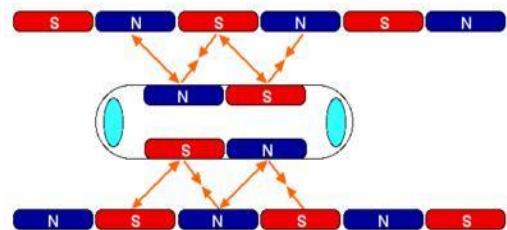
6.1. Trens *Maglev*

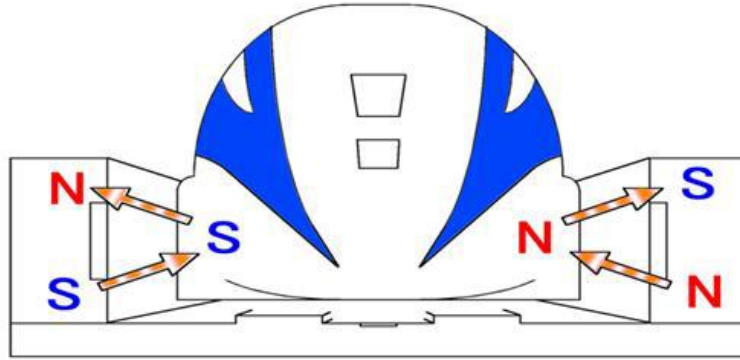


Una de les aplicacions més conegudes i desenvolupades de la levitació magnètica és la que s'utilitza en alguns trens, donant lloc al que es coneix avui en dia com a trens de levitació magnètica o trens *Maglev* (*Magnetic Levitation*). Es tracta d'un tren suspès en l'aire per damunt d'una via sent propulsat cap endavant mitjançant les forces repulsives i atractives del magnetisme amb l'ús d'una sèrie d'imants col·locats estratègicament.

L'estat de suspensió limita el fregament del comboi, permetent a aquest sistema ferroviari assolir velocitats quasi impossibles de aconseguir en un ferrocarril normal, trens que assoleixen velocitats de 500 km/h o més.

El funcionament d'un tren *Maglev* es fa a través de dos tipus de carrils: un carril situat a sota del tren i l'altre en les bandes laterals. En el carril de sota hi ha uns potents electroimants que repel·leixen els imants que porta el tren a la part inferior i el fan levitar. En el carril lateral hi ha uns imants que van canviant la polaritat alternativament i són els responsables del moviment del tren.



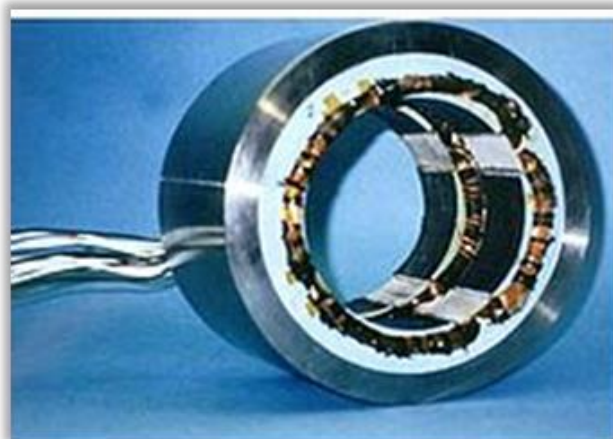


En les figures es pot apreciar com es genera el camp magnètic que impulsa el tren cap endavant.

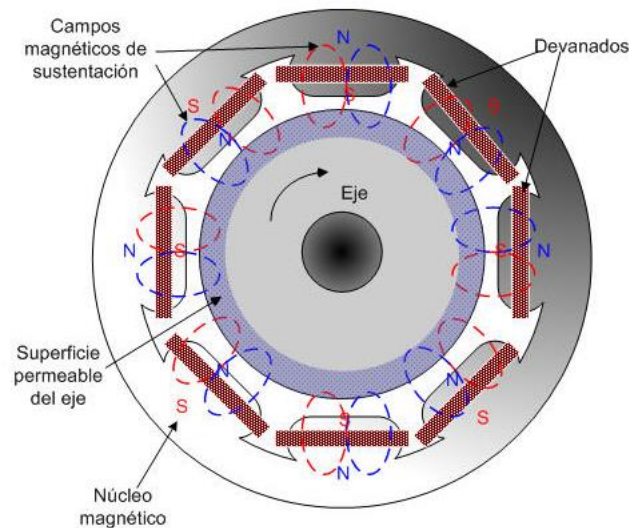
Aquests tipus de trens són més freqüents a Àsia. El record de velocitat el té el Japó i és de 581 km/h registrat a l'any 2003, però s'han aconseguit en prototips velocitats de fins a 600 km/h. Aquesta tecnologia porta molts anys en desenvolupament, però l'elevat cost de les infraestructures ha limitat la seva implementació.

6.2. El rodament magnètic

Una altra aplicació més comuna de la levitació magnètica és la que s'utilitza en el rodament magnètic. Els rodaments magnètics permeten sostenir parts mòbils sense haver d'estar en contacte físic amb elles. La força magnètica és suficientment forta per aixecar la peça de la màquina i permet que es mogui mentre està suspesa a l'aire. Per exemple, són capaços de levitar un eix que rota i permet moviments amb molt baixa fricció i sense desgast mecànic. Els rodaments magnètics són el tipus de rodaments que poden suportar les majors velocitats.



L'estructura interna del rodament de levitació inclou des de imants permanents fins a electroimants, els més utilitzats són els segons. El camp magnètic generat per les bobines actua sobre la superfície de l'eix en rotació. Els rodaments que utilitzen electroimants a diferència dels que utilitzen imants, requereixen un subministrament continu de potència elèctrica.



Esquema d'un rodament magnètic.

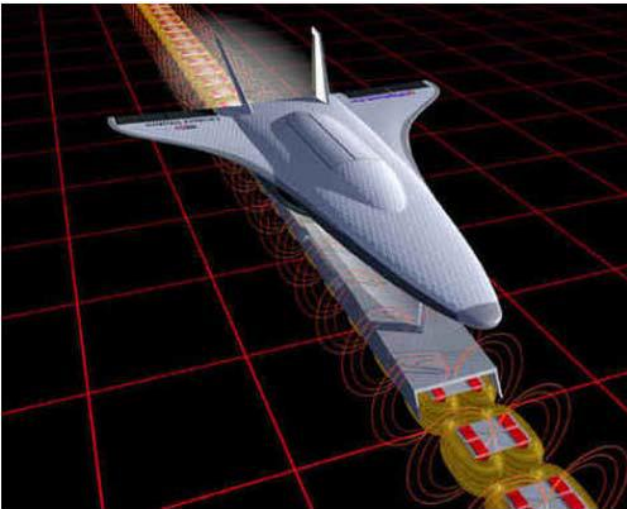
Els rodaments magnètics són utilitzats en diverses aplicacions industrials com en la generació de potència elèctrica, en la refinació de petroli, en centrifugadores per enriquir urani, en bombes turbo moleculars on no es pot utilitzar rodaments lubricats amb oli ja que serien una font de contaminació, etc.

6.3. Futures aplicacions

No totes les aplicacions de la levitació magnètica estan presents en els nostres dies, n'hi ha algunes que es creu que s'arribaran a aprofitar en un futur no molt llunyà.

Si arribem a controlar la fusió nuclear (es calcula que cap al 2050), una altra utilitat de la levitació magnètica podria ser la levitació del plasma. Aquesta seria la única manera possible ja que els milions de graus als que succeeix aquest fenomen fondrien qualsevol contenidor.

També es parla de que es podrà aplicar en els coets espacials, amb l'objectiu de reduir els costos del llançament basant-se en el fet que el major consum de carburant dels coets es produeix en els primers moments del viatge. Des de fa anys enginyers visionaris havien proposat utilitzar la tecnologia de la levitació magnètica per fer sobrepassar la velocitat del so de manera quasi horitzontal amb una espècie de nau espacial. Tot i això s'haurien de solucionar diferents problemes en relació amb el pes del coet i l'estabilitat.



Simulació d'un coet de levitació magnètica.



7. Levitació d'un objecte amb electroimant

En aquest apartat explicaré la part pràctica del meu treball, així com els passos que he anat seguint, el perquè d'algunes decisions, el material emprat i finalment el resultat.

L'experiment consisteix en aconseguir a partir d'un electroimant, altres materials que explicaré més endavant i un programa informàtic, que un objecte leviti.

7.1. Construcció de l'electroimant

Com s'ha explicat anteriorment un electroimant consta d'un nucli metàl·lic i un bobinat al voltant d'aquest nucli. Per construir el meu electroimant els passos que he seguit són els següents:

- Primer he agafat un cargol de ferro i amb fil de coure esmaltat he començat a fer espiras, deixant abans uns quants centímetres de fil sense bobinar. És important que les espiras estiguin ben juntes, una al costat de l'altra i sense muntar una a sobre de l'altra. Quan el fil arriba a un extrem del cargol, s'ha de tornar a envoltar aquest cap a l'altre extrem, i així successivament. He comptat que el meu electroimant té aproximadament unes 600 espiras.



- Una vegada que tinc el bobinat, amb una femella i una volandera estrenyo el solenoide. Encara que el fil faci contacte, no es produeix cap curtcircuit ja que aquest porta un vernís transparent que és aïllant i, per a connectar l'electroimant al circuit s'ha de treure l'esmalt rasant una mica.





- Després s'ha de posar un díode de protecció en paral·lel amb l'electroimant. La funció del díode es protegir el circuit en el qual després connectaré la bobina. Quan es tanca el circuit, l'electroimant es magnetitza i es carrega d'energia, i quan el circuit s'obre, es produeix una punta de corrent i la tensió és diverses vegades superior a la d'alimentació. Sinó es posés un díode aquesta tensió faria malbé el circuit, ja que aquest proveeix un camí de fuga per evitar que es rebi una tensió superior a la suportada. El díode s'inverteix i el càtode es connecta amb el pol positiu.

- Amb el fil que queda lliure als extrems he fet una mena de rinxols per a que no es trenqui fàcilment amb les vibracions de l'electroimant o a l'hora de manipular-lo. Amb això, l'electroimant està llest per a la seva utilització com a un dels components principals de l'experiment.



7.2. Materials i programari necessari

Pel que fa als elements físics a més de l'electroimant, altres components importants són:

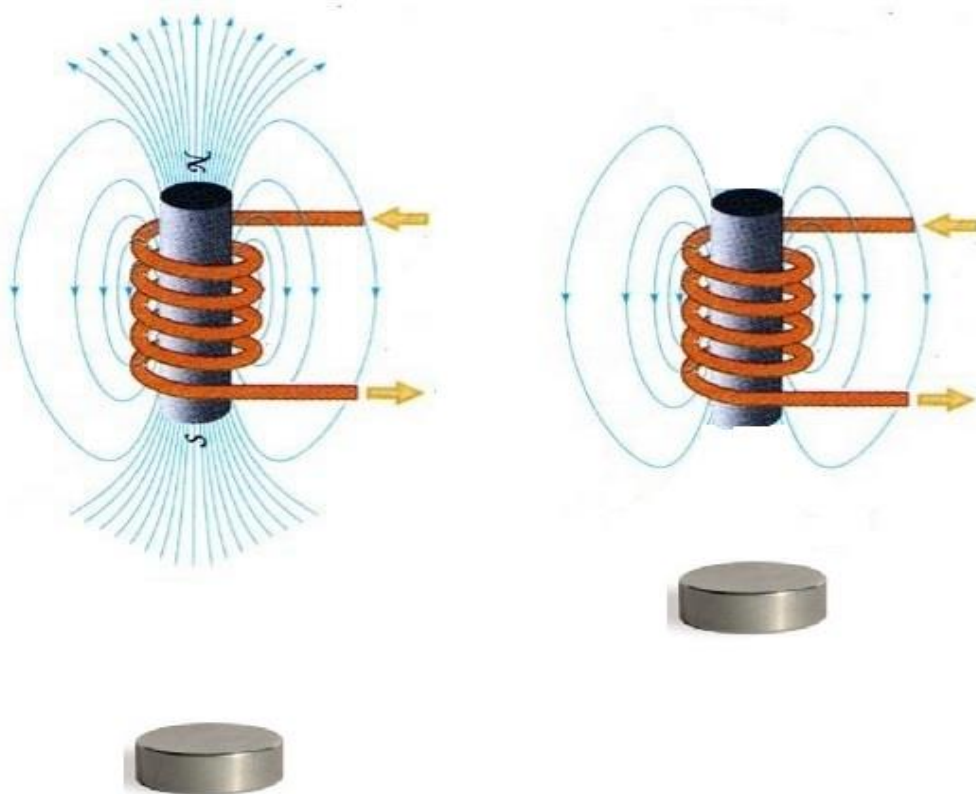
- **L'Arduino:** és el centre del prototip, s'encarrega de controlar que l'imat leviti. Sense aquest component seria molt més difícil aconseguir l'objectiu, ja que s'hauria d'utilitzar una electrònica més complexa, i això es simplifica gràcies al microcontrolador d'aquesta peça.



A més d'adquirir aquesta peça en una botiga de robòtica, també vaig haver de descarregar l'entorn de programació necessari per fer-la funcionar. Per al treball he utilitzat la versió 1, revisió 3.

- **Sensor d'efecte Hall:** un altre component molt important és el sensor de camp magnètic, que s'encarrega de detectar l'imant.

Com que l'electroimant és més o menys potent en funció del corrent que hi passa, el truc està en que segons la llunyania de l'imant, el corrent augmenti o disminueixi. Llavors quan l'imant es trobi més lluny del que nosaltres volem, el sensor ho detectarà i gràcies a les dades enviades a l'Arduino, la intensitat augmentarà fent que l'imant s'apropi. En canvi, quan l'imant es trobi massa a prop, l'electroimant disminuirà la potència per a que l'imant no s'atragui del tot amb aquest.



En el dibuix de l'esquerra l'imant és troba més lluny de la posició desitjada i l'electroimant augmenta la potència per a que l'imant s'apropi. En canvi, en el dibuix de la dreta, l'imant s'ha apropat massa i l'electroimant disminueix la força d'atracció. Amb això s'intenta trobar el punt mig on l'imant es queda levitant.

En realitat, com que l'electroimant apropa o allunya l'imant en funció del què detecti el sensor, quan aquest es troba levitant, s'estan produint molt petites oscil·lacions on l'imant puja i baixa contínuament.



El model que he utilitzat és el A1301EUAT que es pot trobar a botigues d'electrònica, encara que se'n poden utilitzar uns altres.

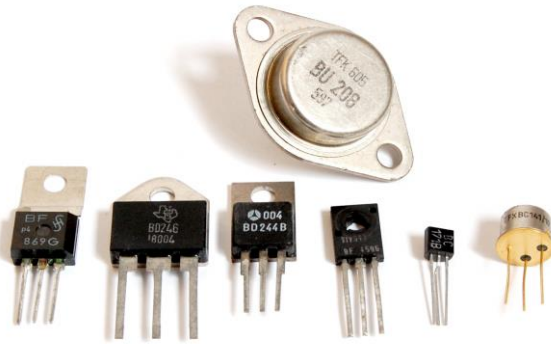
- **Imants de neodimi:** els imants que he utilitzat no són els de ferrita, que són els més comuns, sinó que he fet servir uns altres molt més potents i alhora més fràgils.

Tenint en compte que el camp magnètic de l'electroimant no serà molt fort, és important que els imants utilitzats siguin potents, perquè sinó la força serà molt petita i l'imant caurà fàcilment o també pot passar que no sigui detectat pel sensor.

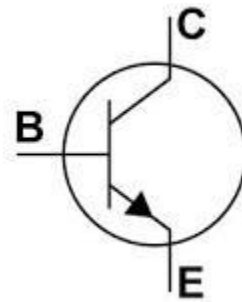
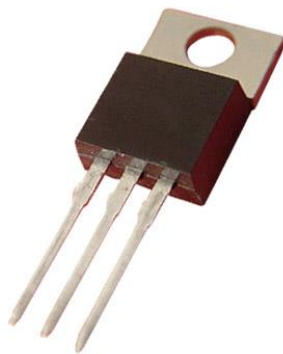


L'imant no ha de ser molt gran, amb un que tingui 15 mm de diàmetre ja va bé, perquè sinó pesa massa.

- **Transistor:** és un dispositiu electrònic semiconductor que pot fer la funció d'amplificador, commutador, rectificador (converteix corrent altern en continu) o d'oscil·lador (converteix corrent continu en altern). Aquest component es troba en molts aparells electrònics: ràdios, televisors, ordinadors, telèfons, etc.



El transistor, en funció d'una senyal d'entrada produeix una senyal de sortida i, en el cas del que he utilitzat, fa la funció d'interruptor del circuit. He escollit el model Darlington TIP120 (NPN) que també es pot trobar a botigues d'electrònica.

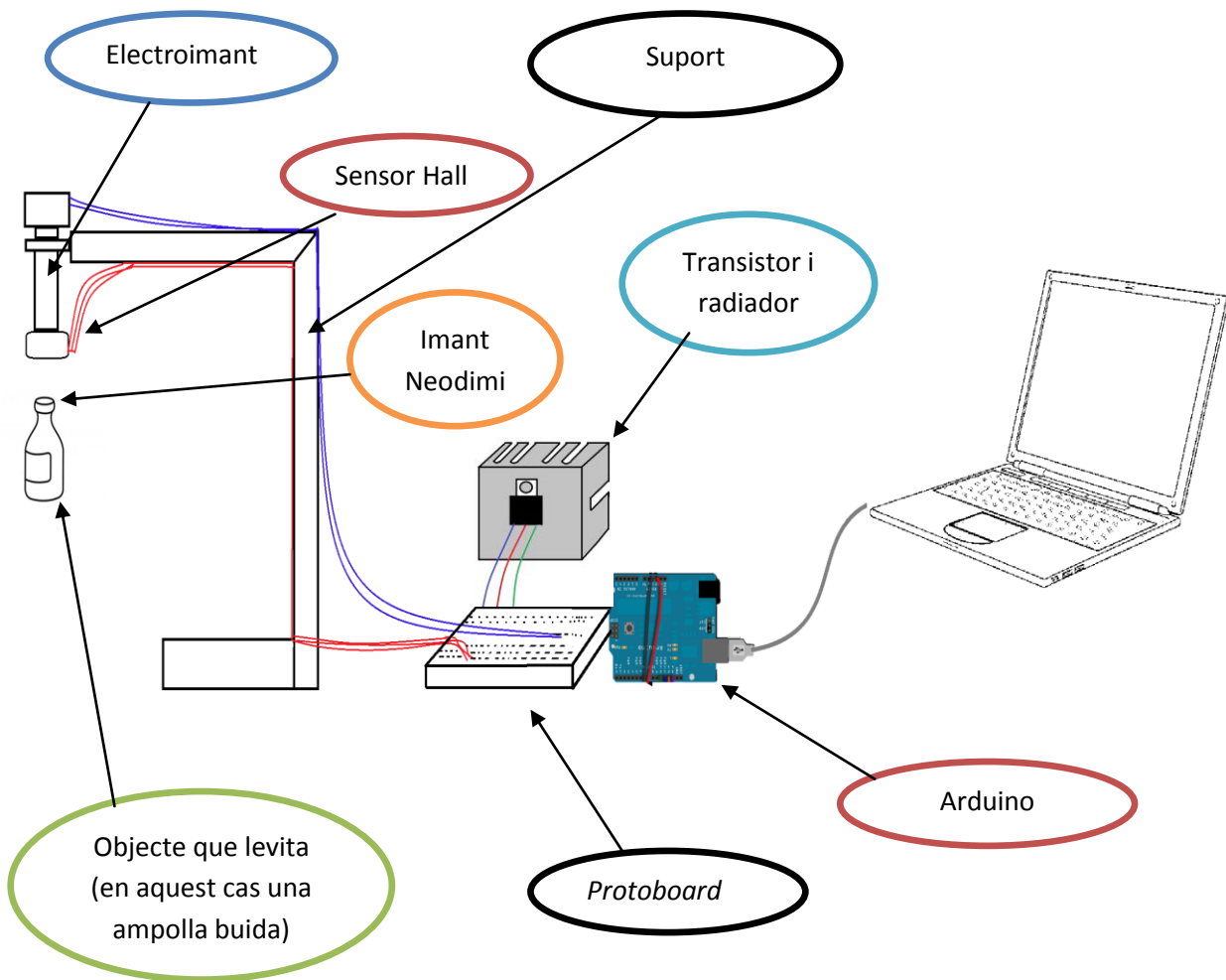


Símbol transistor NPN

Com que el transistor s'escalfa, li he posat el radiador de CPU d'un ordinador i en el cas de fer un levitador més potent també es pot posar un ventilador, però en principi no faria falta.



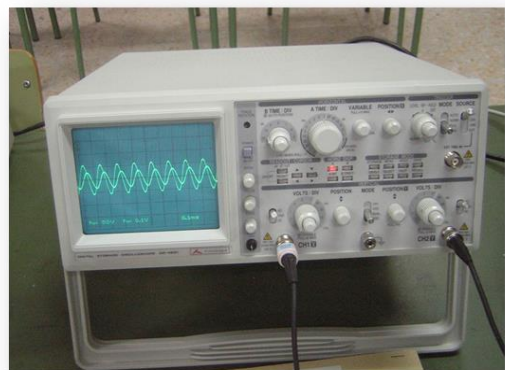
● Esquema del muntatge del levitador:



- També he fet servir altres elements com: un cable USB i cable per al circuit, un suport de fusta, una resistència d'1kΩ, una font d'alimentació, un polímetre, un oscil·loscopi, un soldador, cinta adhesiva i una mica d'estany.

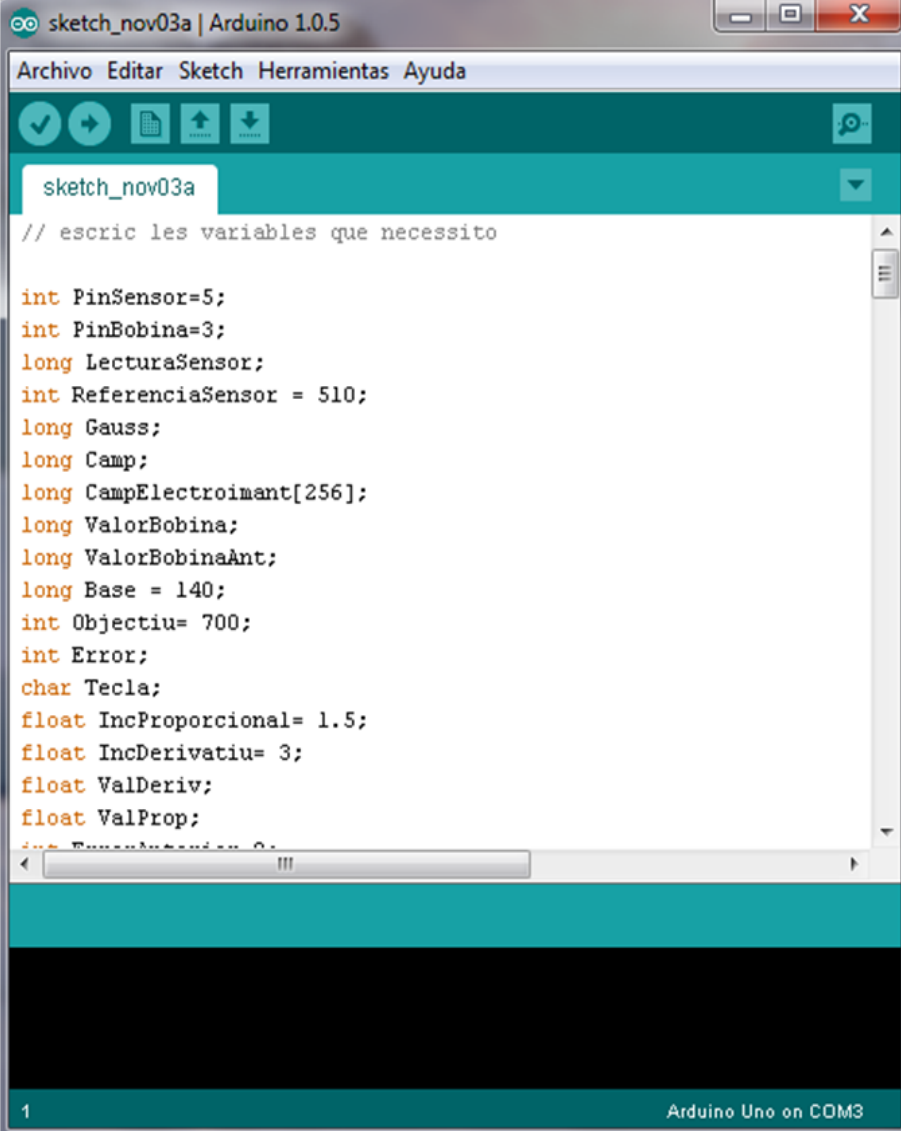


Font d'alimentació



Oscil·loscopi

Per realitzar l'experiència a més de descarregar el programa de l'Arduino, ha estat necessari l'**Hyperterminal**, que serveix per veure les dades que van sortint pel port sèrie i que ens poden semblar interessants observar per la pantalla de l'ordinador.



```
sketch_nov03a | Arduino 1.0.5
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
sketch_nov03a
// escribo las variables que necesito

int PinSensor=5;
int PinBobina=3;
long LecturaSensor;
int ReferenciaSensor = 510;
long Gauss;
long Camp;
long CampElectroimant[256];
long ValorBobina;
long ValorBobinaAnt;
long Base = 140;
int Objectiu= 700;
int Error;
char Tecla;
float IncProporcional= 1.5;
float IncDerivatiu= 3;
float ValDeriv;
float ValProp;
int ErrorAnterior= 0;
```

Programa de l'Arduino

```

n - HyperTerminal (Unlicensed)
File Edit View Call Transfer Help
ValorBobina:255 Camp:19
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:2100.00 IncError:700 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:0.00 IncError:0 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:0.00 IncError:0 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:-6.00 IncError:-2 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:0.00 IncError:0 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:0.00 IncError:0 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:0.00 IncError:0 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:0 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:700 V
alProp:1050.00 ValDeriv:0.00 IncError:0 ValorBobina:0
Base:140 Objectiu:700 Gauss:-2 IncProporcional:1.50 IncDerivatiu:3.00 Error:702
ValProp:1053.00 ValDeriv:6.00 IncError:2 ValorBobina:0
-
Connected 0:00:14 Auto detect 115200 8-N-1 SCROLL CAPS NUM Capture Print echo

```

Finestreta de l'Hyperterminal

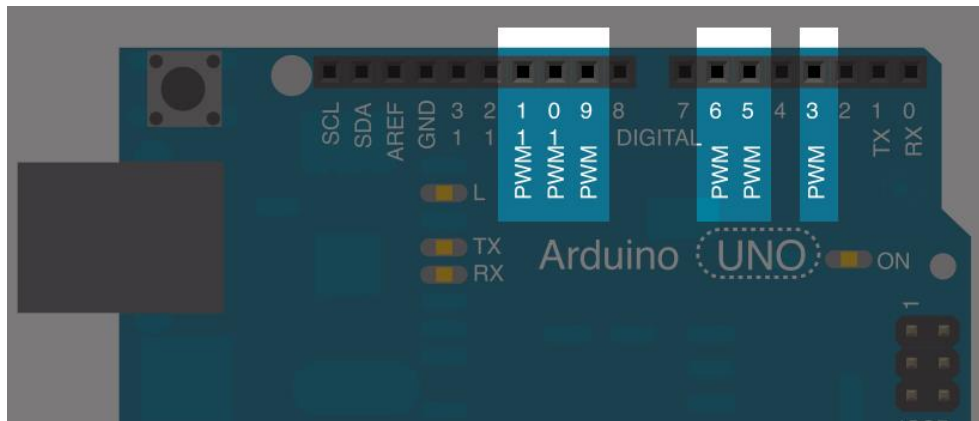
7.3. Passos seguits

El que es vol aconseguir és escriure un programa per a la placa Arduino, de forma que es mantingui un imant suspès en l'aire. La placa controlarà la bobina de l'electroimant amb l'ajuda del sensor, com s'ha explicat anteriorment, la funció del sensor és detectar l'imant i enviar dades per executar certes ordres a fi de que la força de la gravetat cap avall i la força d'atracció de l'electroimant cap amunt, s'igualin el màxim possible per a que estiguin equilibrades i l'imant es quedi flotant.

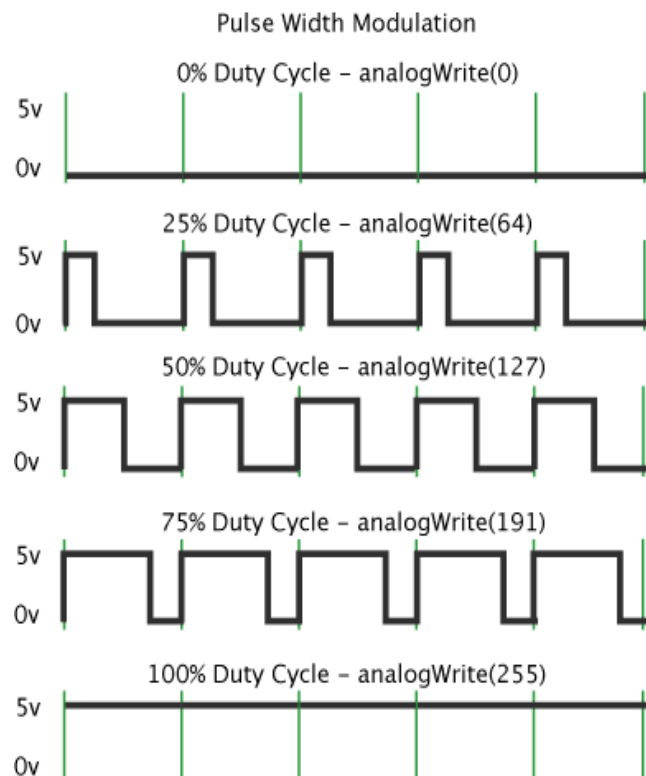
► Els primers passos que vaig seguir, van ser més aviat per familiaritzar-me amb l'Arduino i per observar diversos aspectes:

- La senyal de comunicació utilitzada s'anomena PWM, aquesta funció integrada a l'Arduino, s'encarrega de controlar la potència de l'electroimant. Llavors per entendre una mica el PWM, vaig començar mirant exemples que demostren l'ús d'una sortida

analogica PWM per disminuir o augmentar la lluminositat d'un LED. El PWM commuta constantment entre encès i apagat, pot simular voltatges entre 0 (sempre apagat) i 5 Volts (sempre encès) variant la proporció del temps entre el moment que està encès i el moment que està apagat.



- Amb la funció que té l'Arduino anomenada *analogWrite()*, podem establir la proporció que nosaltres vulguem, introduint valors entre 0 i 255. El 255 representa el 100 % del cicle i vol dir que està tota l'estona a 5 V (sempre encès) i si introduïm el valor 0 serà el 0% i vol dir que està sempre apagat. Amb l'oscil·loscopi es pot observar el següent:



► El següent pas es aprendre a llegir el camp magnètic amb el sensor i veure com varia el voltatge amb un polímetre.

Per llegir amb el sensor l'Arduino utilitza una funció anomenada *analogRead ()* que fa una lectura del valor de la tensió al PIN analògic especificat. Això significa que convertirà tensions entre 0 i 5 Volts a un número enter entre 0 i 1023. Partint d'això i de la següent relació:

$$1 \text{ Gauss} = 2,5 \text{ mV} = 0,0025 \text{ V}$$

Vaig observar:

- $\frac{5 \text{ V}}{1024 \text{ unitat}} = 0,00488 \frac{\text{V}}{\text{unitat}}$
- $2,49 \text{ V} \rightarrow$ Volts del sensor sense imants (510 unitats).
- $4,87 \text{ V} \rightarrow$ apropant l'imant al màxim (20 unitats).

$$4,87 - 2,49 = 2,38 \text{ V}$$

$$2,38 \text{ V} \times \frac{1 \text{ Gauss}}{0,0025 \text{ V}} = 952 \text{ Gauss} \rightarrow \text{quan l'imant està apropat al màxim.}$$

$$510 - 20 = 490 \text{ unitats}$$

$$\frac{952 \text{ Gauss}}{490 \text{ unitat}} \approx \boxed{1,94 \frac{\text{Gauss}}{\text{unitat}}}$$

O també d'una altra manera més senzilla:

$$0,00488 \frac{\text{V}}{\text{unitat}} \times \frac{1 \text{ Gauss}}{0,0025 \text{ V}} \approx \boxed{1,95 \frac{\text{Gauss}}{\text{unitat}}}$$

Amb el factor de conversió queden comprovades les mesures fetes amb el polímetre, encara que hi hagi un petit error. I amb aquesta relació entre Gauss i unitats, ja podem dir-li al programa que quan llegeixi l'ímant amb el sensor, en comptes de donar-nos les dades en unitats que estan entre 0 i 1024, que ens les doni en Gauss, ja que estem parlant de camp magnètic.

► El següent pas és muntar el circuit amb les connexions corresponents. Del suport en surten cinc. Tres d'elles corresponen al sensor: alimentació (5 V), terra (GND) i sortida del sensor que s'utilitza com a entrada analògica, en el nostre cas l'entrada A5 de l'Arduino.

Les altres dues connexions corresponen a la bobina. Com que no podem controlar la bobina directament des de l'Arduino, connectem també un transistor. Una de les connexions de l'electroímant va directament al pol positiu de l'alimentació i l'altra connectant amb el transistor, va a la sortida PWM, en aquest cas al PIN 3.

► Tot i haver fet la conversió d'unitats a Gauss i poder llegir el camp magnètic amb el sensor, hi ha un problema amb la lectura: quan es situa el sensor entre l'electroímant i l'ímant, el camp que tenim no és realment el de l'ímant, sinó que hi ha un error ocasionat pel camp magnètic de la bobina. És llavors quan s'ha de diferenciar els Gauss de l'ímant i el camp magnètic total, ja que el que ens interessa són només els de l'ímant.

► Com que amb la lectura del sensor ja tenim informació dels Gauss de l'ímant, el següent que s'ha de fer és indicar-li al programa que l'electroímant actuï en conseqüència i augmenti o disminueixi de potència en funció del camp que nosaltres volem.

El camp que nosaltres volem serà aquell punt on els Gauss indicats per la lectura siguin els adequats, l'ímant trobarà el punt mort on ni caurà ni s'atraurà amb l'electroímant, en el aquest cas és el punt on hi ha 700 Gauss.

Si l'ímant cau, el sensor detectarà que l'ha de pujar i l'Arduino posarà l'electroímant al màxim estat d'atracció, però si l'ímant es troba una mica lluny del punt mort, la bobina no tindrà la força suficient i encara que l'intenti recuperar, no el podrà retornar a la posició de més estabilitat. I el mateix passarà si l'ímant s'apropa molt al nucli de l'electroímant, que

encara que el vulgui allunyar, no podrà perquè es trobarà molt a prop i aquest s'enganxarà ràpidament sense res a fer-hi.

► Entre els Gauss que nosaltres volem per a que l'imant sigui estable i els Gauss que llegeix el sensor segons la posició de l'imant, hi ha un error o marge, que es pot calcular fent la diferència de Gauss. Per exemple, si com he dit abans el camp magnètic que nosaltres volem és de 700 Gauss, però el sensor n'està llegint 680, vol dir que hi ha un error de 20 Gauss i que l'imant es troba més lluny del punt mort. En canvi, si en llegim 740, tenim un error de 40 Gauss, amb signe negatiu, vol dir que l'imant està més a prop del punt desitjat i que l'electroimant haurà d'afluixar la potència.

Segons quin sigui aquest error, amb el programa farem que el valor o potència de la bobina sigui un o altre. El valor de la bobina pot anar de 0 a 255 unitats (PWM) i depèn dels Gauss que detecti el sensor, aquest valor varia: disminueix si l'imant està a prop i augmenta si el que vol fer es recuperar l'imant perquè està lluny.

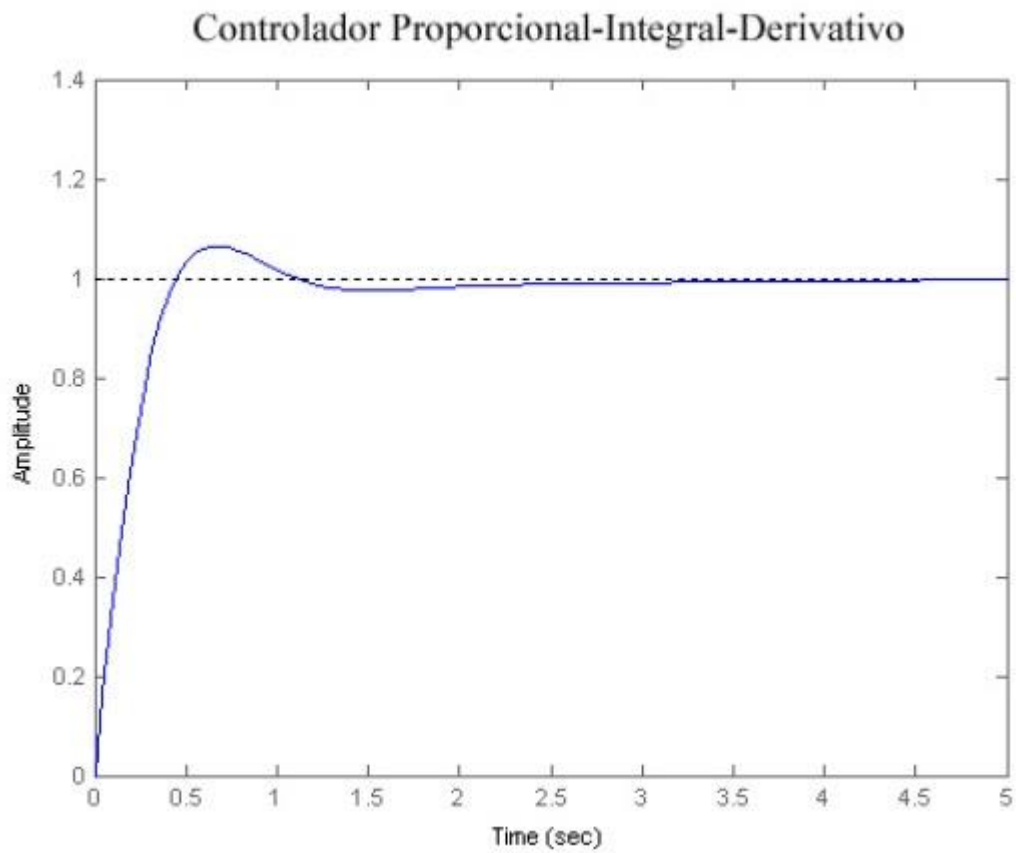
► Com que l'error i el valor de la bobina no tenen una relació proporcional, es recorre al control proporcional-integral-derivatiu (PID). Amb aquest control s'aconsegueix restablir o mantenir les condicions de regulació desitjades, pròximes al valor de consigna.

$$\text{Valor Bobina} = \text{Base} + K_p \cdot \text{Error} + K_d \cdot \frac{d\text{Error}}{dt}$$

- Amb el control proporcional, introduint una constant proporcional que multipliqui l'error, no és suficient, perquè encara hi haurà una desviació de l'error i això a la pràctica farà que l'imant oscil·li molt i caigui.

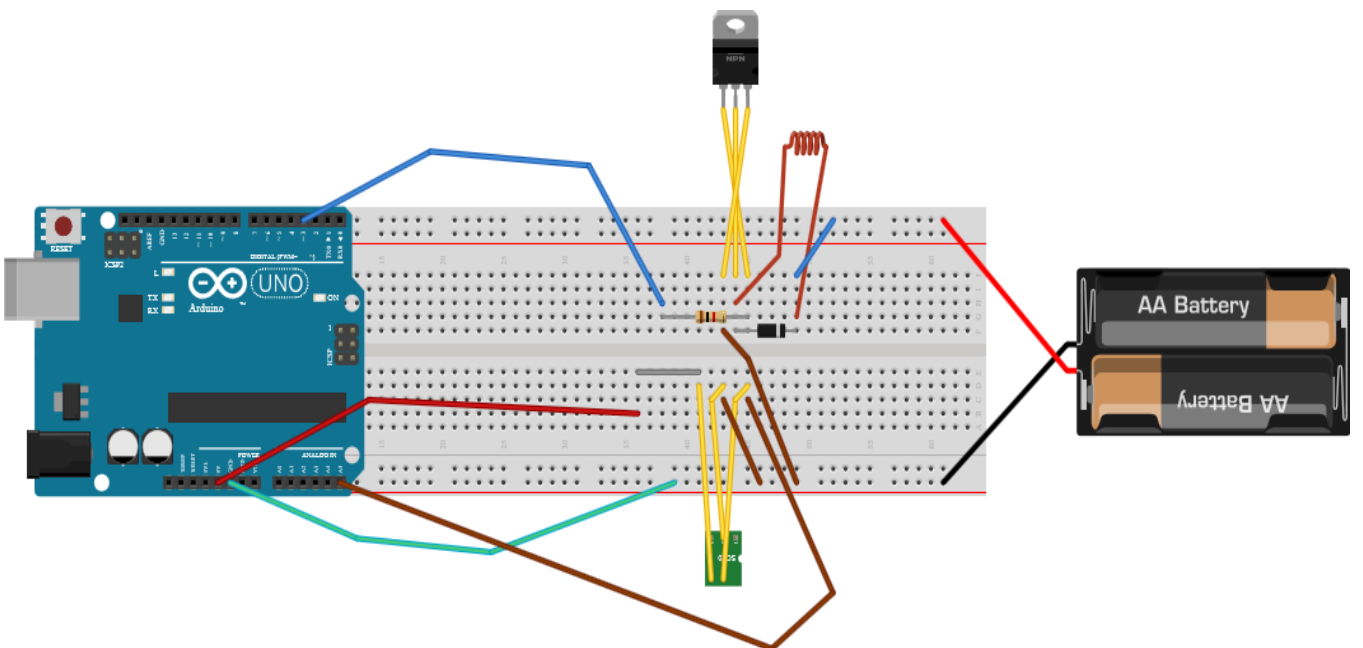
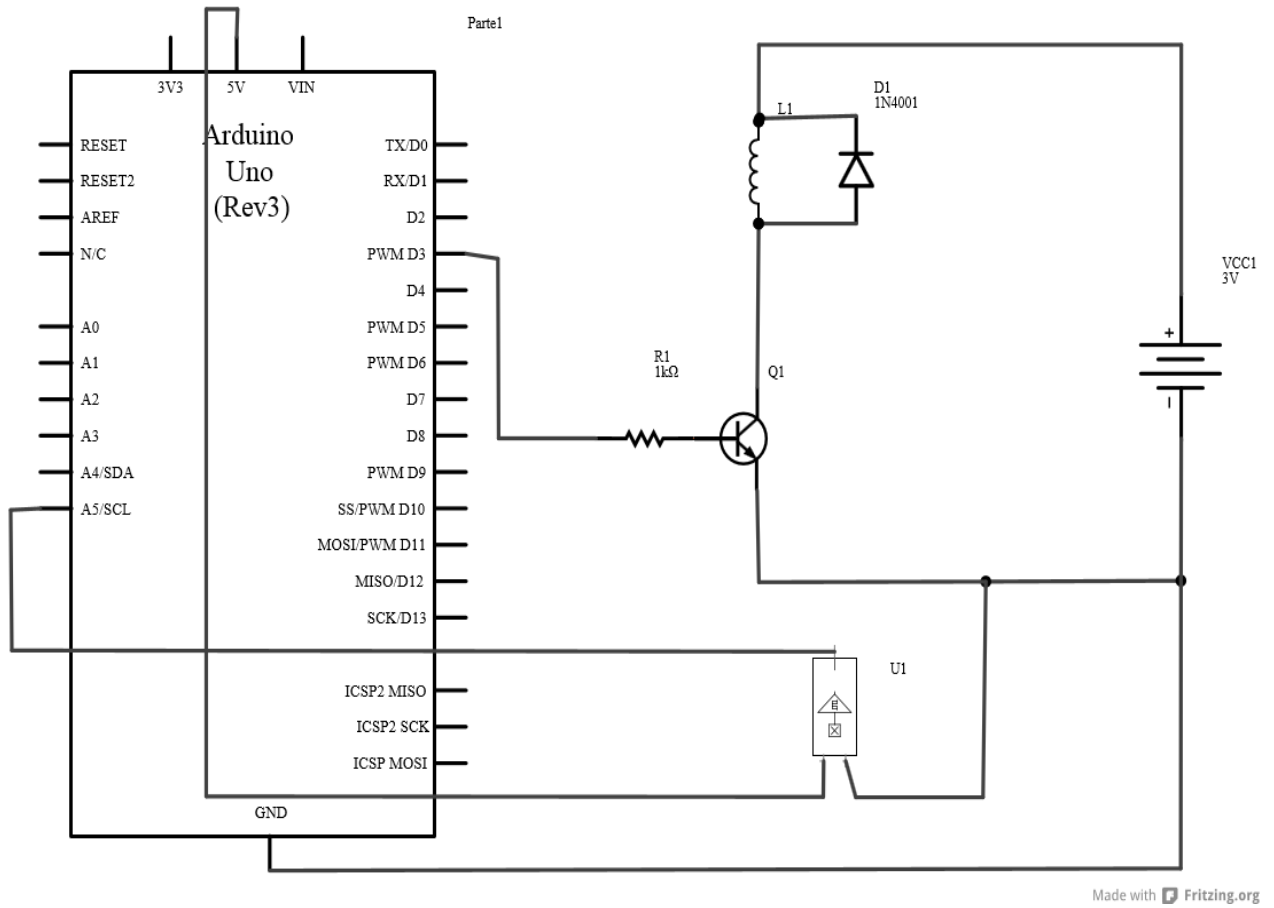
- El control derivatiu utilitzat consisteix en multiplicar una constant derivativa per l'increment d'error. És afegint aquest control derivatiu quan l'imant deixa d'oscil·lar i aconseguim l'objectiu. La constant proporcional i derivativa, és un número que podem anar variant nosaltres mateixos amb el programa, amb la finalitat d'aconseguir la màxima estabilitat possible.

- En principi, com que amb el valor proporcional i derivatiu, l'imant ja és estable, no faria falta el control integral.



Gràfica de control PID

7.4. Esquema del circuit amb Fritzing



Made with Fritzing.org

7.5. Codi de programació per Arduino

En aquest apartat s'especifica el programa utilitzat per a la programació de l'Arduino (les paraules en cursiva i escrites després de //, són comentaris que he anat afegint al programa) i l'ordre és el següent: negre-vermell-blau-verd.

```
// escriu les variables que necessito
```

```
int PinSensor=5;
int PinBobina=3;
long LecturaSensor;
int ReferenciaSensor = 510;
long Gauss;
long Camp;
long CampElectroimant[256];
long ValorBobina;
long ValorBobinaAnt;
long Base = 140;
int Objectiu= 700;
int Error;
char Tecla;
float IncProporcional= 1.5;
float IncDerivatiu= 3;
float ValDeriv;
float ValProp;
int ErrorAnterior=0;
int IncError;
unsigned long NouMilis;
unsigned long OldMilis;
```

```
// inicialitzar el programa
```

```
void setup()
{
    analogReference(DEFAULT);

    // velocitat de comunicació amb la placa en bps
    Serial.begin(115200);

    pinMode (PinBobina, OUTPUT);

    NouMilis = millis();
    OldMilis = NouMilis;

    // obtenir valors bobina
    for (int Bucle=0; Bucle < 256; Bucle= Bucle + 1)
    {
        ValorBobina= Bucle;
        analogWrite(PinBobina, ValorBobina);
        delay(10);
        LecturaSensor= analogRead(PinSensor);
        Camp= (LecturaSensor-ReferenciaSensor)*1.953;
        CampElectroimant[Bucle]= Camp;

        Serial.print ( " ValorBobina:");
        Serial.print(ValorBobina);

        Serial.print ( " Camp:");
        Serial.println(Camp);
    }

    // test electroimant
    analogWrite(PinBobina, 0);
    delay(1000);
    analogWrite(PinBobina, 255);
}
```

```

void loop()
{
  // comprovar el port sèrie amb serial available
  if (Serial.available() > 0)
  {
    // llegir tecla
    Tecla= Serial.read ();

    // jugar amb tecles per increment/decrement de la base, IncProporcional, IncDerivatiu i el objectiu de Gauss

    // tecla B/b per base
    if (Tecla == 'B')
      Base= Base + 1;

    if (Tecla == 'b')
      Base= Base - 1;

    // tecla G/g per objectiu Gauss
    if (Tecla == 'G')
      Objectiu= Objectiu + 1;

    if (Tecla == 'g')
      Objectiu= Objectiu - 1;

    // tecla P/p per IncProporcional
    if (Tecla == 'P')
      IncProporcional= IncProporcional + 0.1;

    if (Tecla == 'p')
      IncProporcional= IncProporcional - 0.1;

    // tecla D/d per IncDerivatiu
    if (Tecla == 'D')
      IncDerivatiu= IncDerivatiu + 0.1;

    if (Tecla == 'd')
      IncDerivatiu= IncDerivatiu - 0.1;

    PrintValors();
  }

  // lectura del sensor
  LecturaSensor= analogRead (PinSensor); //lectura analògica
  Camp= (LecturaSensor-ReferenciaSensor)*1.953; // conversió a Gauss

  // diferenciar Gauss imant i camp magnètic total
  Gauss= Camp - (0.7 * CampElectroimant[ValorBobina] + 0.3 * CampElectroimant[ValorBobinaAnt]) ;

```

```

// calculo l'error
Error= Objectiu - Gauss;

IncError= Error - ErrorAnterior;
ErrorAnterior= Error;
ValProp= IncProporcional* Error;
ValDeriv= IncDerivatiu * IncError;

//calculo el valor de la bobina

ValorBobinaAnt= ValorBobina;
ValorBobina= Base + ValProp + ValDeriv;

// filtre per a que ValorBobina no es passi de 0..255
if (ValorBobina > 255)
    ValorBobina= 255;

if (ValorBobina < 0)
    ValorBobina = 0;

// per desconnectar electroimant si no hi ha imant
if (Gauss < 100)
    ValorBobina = 0;

//control bobina
analogWrite (PinBobina, ValorBobina);
delay(5);

// cada x temps treu informació per pantalla
NouMilis = millis();
if((NouMilis-OldMilis) >1000)
{
    OldMilis = millis();
    PrintValors();
}
}

```

```

// treure la informació que vull veure per
pantalla

void PrintValors()
{
    Serial.print ( "Base:");
    Serial.print (Base);

    Serial.print ( " Objectiu:");
    Serial.print (Objectiu);

    Serial.print ( " Gauss:");
    Serial.print(Gauss);

    Serial.print ( " IncProporcional:");
    Serial.print(IncProporcional);

    Serial.print ( " IncDerivatiu:");
    Serial.print(IncDerivatiu);

    Serial.print ( " Error:");
    Serial.print(Error);

    Serial.print ( " ValProp:");
    Serial.print(ValProp);

    Serial.print ( " ValDeriv:");
    Serial.print(ValDeriv);

    Serial.print ( " IncError:");
    Serial.print(IncError);

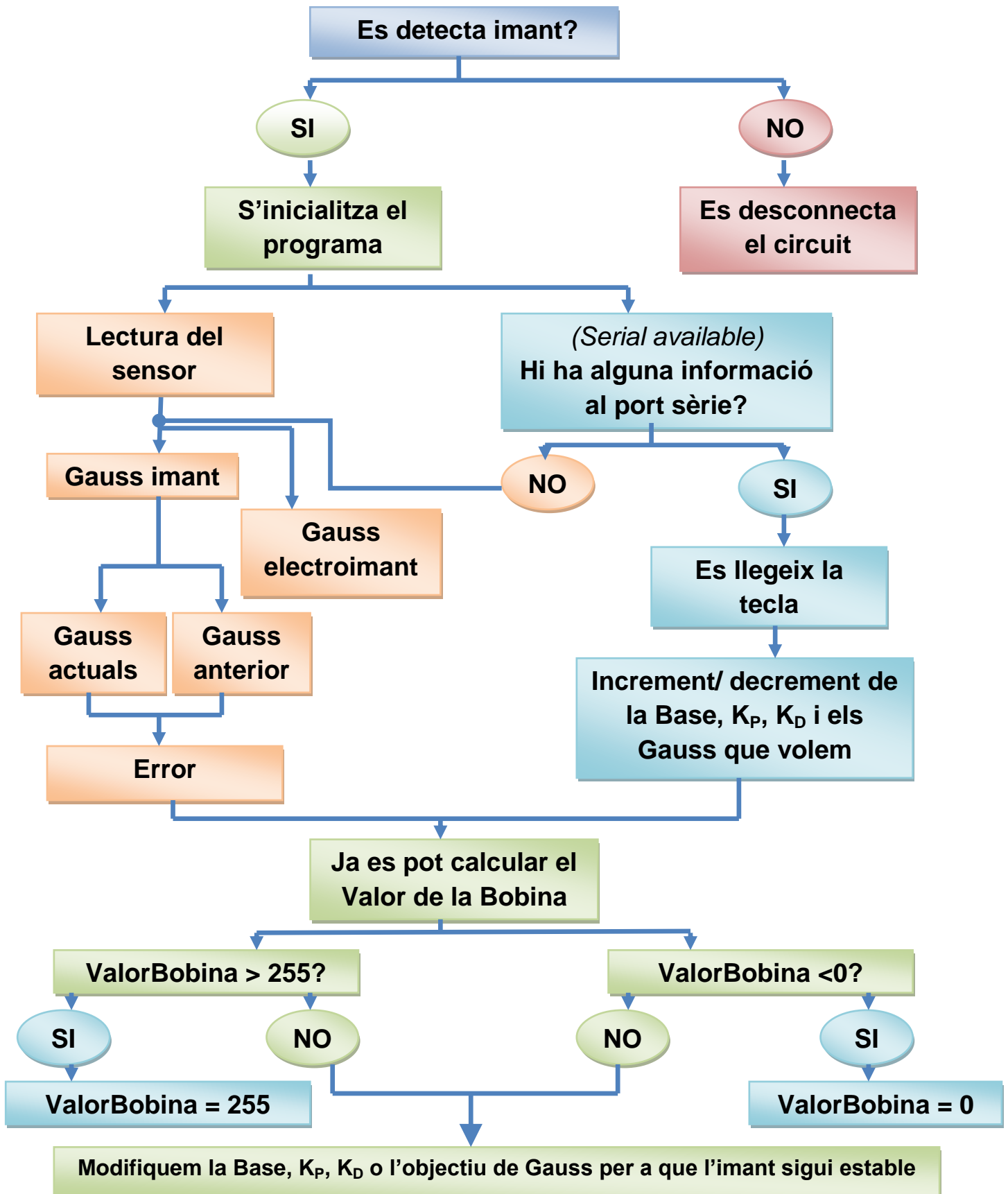
    // Serial.println per al canvi de línia

    Serial.print ( " ValorBobina:");
    Serial.print(ValorBobina);

    Serial.println ("");
}

```


7.6. Funcionament del sistema



Conclusions del treball

Durant el treball he arribat a diverses conclusions. Algunes d'aquestes van sorgir al començament, perquè em feia preguntes i ara que ja he acabat el treball i m'he informat més, algunes d'aquestes preguntes em semblen una mica absurdes. Altres en canvi, van aparèixer segons anava avançant feina.

- Després d'escollir el tema, vaig pensar que amb dos imants normals i amb molta paciència podia aconseguir el fenomen que volia estudiar i així poder-ho plasmar a la part pràctica, tot i que després d'intentar-ho vaig veure que no era tan fàcil com pensava i amb diferents vídeos vaig arribar ràpidament a la conclusió de que no era possible, ja que no era estable i un dels imants no s'aguantava perquè queia o s'atreia fàcilment i no es quedava a l'aire levitant tal com m'hauria agradat. Es llavors quan desenvolupant el treball apareixen algunes de les respostes que m'havia plantejat en un primer moment.
- Per a que un imant pugui estar en equilibri, la suma de les forces que hi actuen ha de ser nul·la, així la força del seu pes ha d'igualar-se a la força magnètica d'atracció o repulsió. Per a que això succeeixi les forces han de tenir sentits contraris i el mateix valor o mòdul.
- Quan un superconductor presenta el que es coneix com a efecte Meissner i fa levitar un imant, no és que el superconductor es converteixi en un altre imant, ja que els superconductors no permeten un camp magnètic interior, sinó que es produeix com un reflex de l'imant levitat.
- Cap sistema de levitació amb imants permanents, encara que sigui mitjançant el gir d'una baldufa levitant (*levitron*), és del tot estable. I amb aquest aspecte es reafirma la hipòtesi inicial. Per tant, la resposta a com aconseguir l'estabilitat en una levitació magnètica, està en el fet d'utilitzar un "imant ajustable". Aquest imant ajustable és l'electroimant que he utilitzat al prototip, que fa possible gràcies a un sensor de camp magnètic i un programa informàtic que l'imant amb l'objecte levitat es mantingui a l'aire tot sol i de forma estable.

- Com més corrent passi per l'electroimant, més potent serà i més força d'atracció o repulsió tindrà, ja que aquest per les raons que s'han explicat en el nucli de l'informe, es converteix en un imant.
- Tot i que s'ha avançat molt en els últims anys, la levitació magnètica encara s'està desenvolupant, algunes aplicacions que podrien ser útils en un futur tenen per davant molta investigació encara, ja que per a la seva aplicació existeixen molts factors en contra que fan que no sigui viable l'opció d'aplicar-les. Per exemple, les baixes temperatures que es necessiten per a que un material esdevingui superconductor o els alts costos en la construcció d'infraestructures per a trens *Maglev*, són alguns dels inconvenients de la levitació magnètica.

• Valoració i opinió personal

Haig de dir que vaig començar fent el treball per curiositat i l'he acabat fent per gust. Penso que el fet d'haver escollit un tema el qual no se m'hagi fet pesat, ha estat molt important. Trobar resposta a les preguntes que m'anaven sorgint en un primer moment i sobretot assolir l'objectiu principal és el que més m'ha satisfet del treball.

Pel que fa a la construcció del levitador, m'ha agradat molt perquè he après coses que en un primer moment no sabia i també pel fet d'anar veient que el treball avançava i d'observar que cada part tenia la seva importància per poder aconseguir l'objectiu final.

Al principi quan el meu tutor em va parlar de la placa Arduino vaig pensar que potser no ho aconseguiria, llavors em va dir que no em preocupés, ja que en molts instituts s'utilitzava a quart d'ESO. Poc a poc vaig anar escrivint el programa i vaig anar observant que cada part tenia un perquè i que s'havia de posar per un motiu o un altre.

L'experiència ha estat interessant, el temps dedicat ha valgut la pena i del treball resultant haig de dir que n'estic orgullós.

Bibliografia i recursos

● Llibres:

Llibre de Física, 2 BATXILLERAT, J. Mercadé; S. Serra i M. Armengol. *Ed McGraw Hill*. (ELECTROMAGNETISME I i II).

Llibre de Tecnologia Industrial, 2 BATXILLERAT, J. Joseph; J. Garravé; F. Garófano i F. Vila. *Ed McGraw Hill*. (ELECTROMAGNETISME, CONTROLADORS, p.221-226).

● Adreces d'Internet:

<http://www.levimagne.blogspot.com.es/>

Fonaments i història de la levitació magnètica.

http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyg3/tema9/index9.htm

Introducció al magnetisme.

<http://www.xtec.cat/iesemperadorcarles/webfq/elisa/magnetisme/magnetisme.htm>

Magnetisme, electromagnetisme i experiències interessants.

<http://www.elemental.awardspace.com/electronica/levitacion.htm>

Levitador magnètic.

<http://www.textoscientificos.com/fisica/superconductividad/tipos-y-diferencias>

Superconductivitat.

<http://www.superconductivitat.blogspot.com.es/2007/05/treball-de-recerca-superconductivitat.html>

Treball de recerca sobre la superconductivitat i les seves aplicacions.

[http://www.prezi.com/jsipd1ilxta-/electromagnetisme-i-levitacio-magnetica/#_ =](http://www.prezi.com/jsipd1ilxta-/electromagnetisme-i-levitacio-magnetica/#_=)

Electromagnetisme i levitació magnètica.

<http://www.arduino.cc/es/Tutorial/HomePage>

Exemples Arduino.

<http://www.arduino.cc/en/Main/Software>

Descàrrega del Software de l'Arduino.

<http://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>

Llenguatge utilitzat per Arduino.

<http://www.forum.arduino.cc/index.php?topic=89241.0>

Suport Arduino.

http://www.coilgun.info/lev_popelex1966/home.htm

Història i funcionament de levitadors magnètics.

<http://www.blogthinkbig.com/maglev-trenes-levitacion-magnetica/>

Article sobre els trens Maglev.

<http://www.cortoc.com/p/arduino.html?m=1>

Exemples Arduino.

<http://www.youtube.com/watch?v=9Rjd7SeAzG8>

Vídeo explicatiu de la construcció d'un electroimant.

<http://www.youtube.com/watch?v=8MFTwpxCBlc>

Vídeo sobre magnetisme.

http://www.youtube.com/watch?v=JOZeCTF_Ilk

Vídeo d'un levitron.

● Programaris utilitzats:

Durant el treball he fet servir els següents programes, necessaris per a:

- Programació: Arduino i Hyperterminal.
- Esquema final del circuit: Fritzing.
- Redacció del treball: Microsoft Word 2010.
- Retocar les imatges: Microsoft PowerPoint 2010.

● Botigues per comprar material:

Arduino

Ro-Botica.

Carrer d'Hercegovina, 22.

08006, Barcelona.

Tel: 934 143 581.

<http://www.ro-botica.com>

Sensor i transistor

Ondaradio S.A.

Gran Via de les Corts Catalanes, 581.

08011, Barcelona.

Tel: 934 525 100. Fax: 934 525 109.

<http://www.ondaradio.es>

Imants

Cifec.

C/ Josep Anselm Clavé, 30.

08760, Martorell.

Tel: 937 750 225.

Annexos

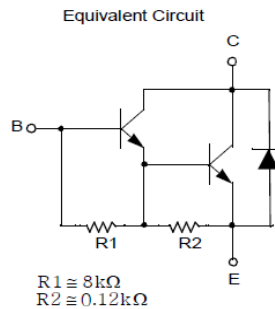
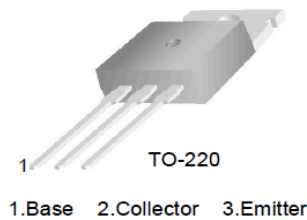
Annex A

Datasheet Transistor Darlington TIP120



TIP120/TIP121/TIP122 NPN Epitaxial Darlington Transistor

- Medium Power Linear Switching Applications
- Complementary to TIP125/126/127



Absolute Maximum Ratings* $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Ratings	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : TIP120	60	V
	: TIP121	80	V
	: TIP122	100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : TIP120	60	V
	: TIP121	80	V
	: TIP122	100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	5	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	8	A
I_B	Base Current (DC)	120	mA
P_C	Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$)	2	W
	Collector Dissipation ($T_c=25^\circ\text{C}$)	65	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 ~ 150	$^\circ\text{C}$

* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

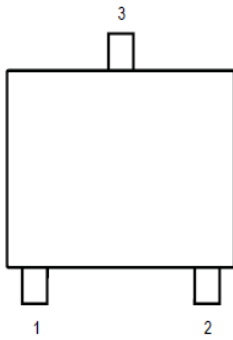
Font: <http://www.adafruit.com>

Annex B

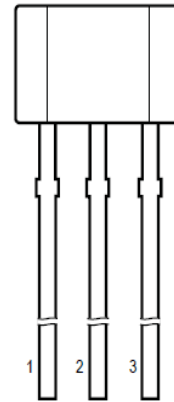
Datasheet Sensor HALL A1301EUAT

Pin-out Drawings

Package LH



Package UA



Terminal List

Symbol	Number		Description
	Package LH	Package UA	
VCC	1	1	Connects power supply to chip
VOUT	2	3	Output from circuit
GND	3	2	Ground

Font: <http://www.allegromicro.com>

Annex C

Construint l'electroimant:



Fent el forat per al transistor:



Soldant el transistor i el sensor:



Obtenció del camp de l'electroimant corresponent a cada intensitat de la bobina:

```
j - HyperTerminal (Unlicensed)
File Edit View Call Transfer Help
ValorBobina:223 Camp:44
ValorBobina:224 Camp:46
ValorBobina:225 Camp:44
ValorBobina:226 Camp:46
ValorBobina:227 Camp:48
ValorBobina:228 Camp:46
ValorBobina:229 Camp:46
ValorBobina:230 Camp:46
ValorBobina:231 Camp:46
ValorBobina:232 Camp:48
ValorBobina:233 Camp:46
ValorBobina:234 Camp:48
ValorBobina:235 Camp:48
ValorBobina:236 Camp:48
ValorBobina:237 Camp:48
ValorBobina:238 Camp:48
ValorBobina:239 Camp:48
ValorBobina:240 Camp:48
ValorBobina:241 Camp:48
ValorBobina:242 Camp:48
ValorBobina:243 Camp:48
ValorBobina:244 Camp:50
ValorBobina:245 Camp:48
ValorBobina:246 Camp:48
Connected 0:03:50 Auto detect 115200 8-N-1 SCROLL CAPS NUM Capture Print echo
```

Imatges del prototip:



