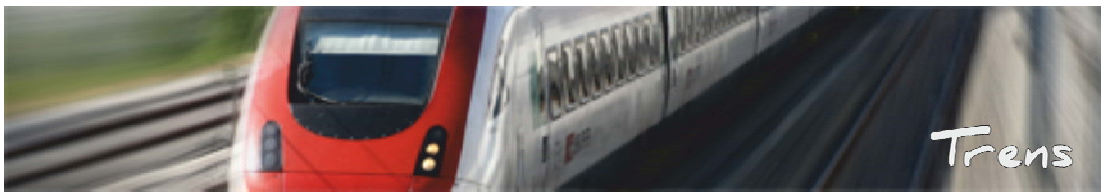


Física en context

Batxillerat 2n curs



Equip d'elaboració d'aquesta unitat

Octavi Casellas

Montserrat Enrech

José Javier González

Luisa Herreras

Josep Olivella

Octavi Plana

Jaume Pont

Centre de Documentació i Experimentació en Ciències

Departament d'Ensenyament

Barcelona 2011

UNITAT 9. TRENS

Índex

Per què una unitat anomenada “Trens”?	1
1 La levitació magnètica	3
1.1 Els imants.....	3
1.2 Electroimants.....	6
2 La força magnètica	11
2.1 La mesura de la força magnètica	11
2.2 Dirigint partícules carregades.....	14
2.3 L'espectròmetre de masses i el sincrotró	17
3 Trens d'alta velocitat	21
3.1 El tren es mou	21
3.2 El tren arriba a l'estació	22
3.3 Fabricant corrent altern	29
3.4 Cap al voltatge correcte	33
4 Una última volta	37
4.1 Objectius	37
4.2 Activitats i Qüestions finals	38

Per què una unitat anomenada “Trens”?

El tren més ràpid del món constitueix una alternativa cada vegada més interessant a l'avió. Menor consum de CO₂ i velocitats semblants a les d'un Fòrmula-1 augmenten les prestacions de l'AVE. El futur s'acosta al present. L'alta velocitat ha obert una nova dimensió en un món que vol moure's cada vegada més ràpid.

El tren desafiarà als avions no tant en velocitat com en competitivitat. Els experts opinen que un tren a 1000 km/h és encara ciència ficció, només realitzable si es desenvolupa de manera eficaç i rentable un concepte encara molt llunyà com la levitació magnètica i situen el repte al voltant del 600 km/h, el límit en què es destrueix físicament la catenària, el cablatge aeri que transfereix l'energia elèctrica al tren. En un exercici de realisme, l'objectiu per a la propera dècada està en poder recórrer mil quilòmetres en menys de tres hores, fet que garanteix la competència amb l'avió.

Laurent Baron, enginyer aeroespacial que treballa per l'empresa Alstom opina que *“pensar en trens circulant a 600 km/h és poc realista, ja que totes les despeses es multipliquen de manera exponencial. Considerem per exemple un tren que va a 500 km/h: caldria peraltar la via, les corbes haurien de tenir un radi de 12 km, caldria fer túnels dues o tres vegades més amplis que els actuals i no parlem del seu consum energètic i d'altres aspectes claus com el manteniment de la via, molt més costós, o l'aïllament de la via”*.

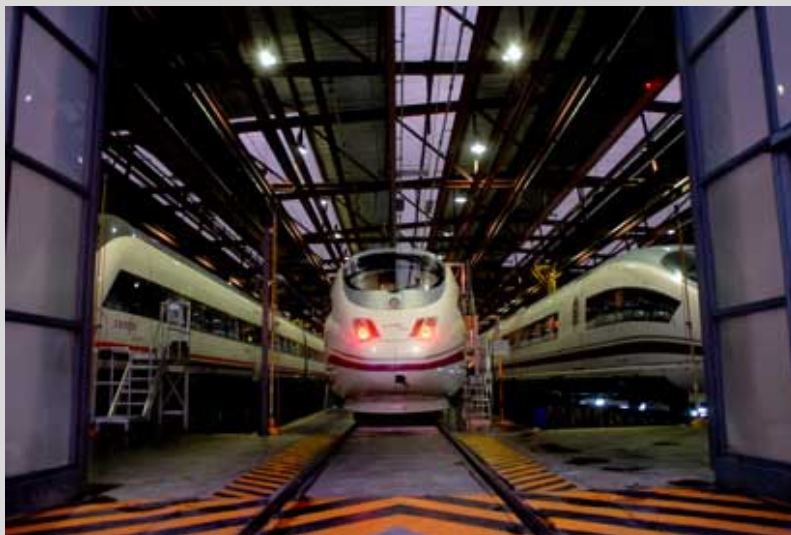


Figura 1. AVE de Siemens de la línia Madrid – Barcelona en el taller de Cerro Negro. Font La Vanguardia

La molt alta velocitat és molt cara. Superada la que els tècnics denominen la **barrera del so** dels trens, els 250 km/h, les despeses es disparen. A més velocitat, més esforços per a pressuritzar els combois en els túnels, més exigència per evitar que el balast (les pedres que hi ha a les vies) voli amb el pas del tren. També cal més inversió en fer que la comoditat dels passatgers no es vegi afectada quan es creuin dos trens.

“A Espanya estem vivint el futur ara en el present”, valora de manera contundent Juan Carlos Lozano, director general de mobilitat de Siemens. I ho justifica: “l’AVE és el tren comercial més ràpid del món. El tren Velaro de Siemens utilitzat en la línia Madrid-Barcelona circula a 300 km/h, però està homologat per a fer-ho a 350 km/h. El canvi de velocitat està en mans d’Adif, responsable de l’exploració de les vies, que ha de completar els sistemes de senyalització adequats”.

Siemens ha participat en el projecte de tren de levitació magnètica, un tren propulsat per imants electromagnètics que circula elevat per sobre un monorail. *“A la levitació magnètica encara no se li ha trobat l’aplicació concreta, però per parlar de velocitats com les dels avions, és l’única manera”,* apunta Juan Carlos Lorenzo. Els experiments amb la levitació magnètica estan, però, estancats, llastrats per la complexitat tecnològica i el cost desorbitat de la via i la infraestructura necessària. No obstant, el consum energètic de la propulsió amb imants electromagnètics és un 30 % inferior al d’un tren d’alta velocitat i el manteniment de la línia pot costar un 20% menys, fet que el faria més sostenible ecològicament en un futur proper.

Adaptació i traducció de “*Más rápido que un F-1*”, Magazine La Vanguardia, 12-09-2010.

Introducció dels principis i dels procediments físics

Malgrat la complexitat del modern sistema ferroviari, trobareu que els seus principis es fonamenten en els continguts que es treballen en la matèria de física.

En aquesta unitat contextualitzada en els trens d’alta velocitat i en altres trens convencionals, recordareu continguts de corrent elèctric, i desenvolupareu nous continguts de magnetisme. Estudiareu la relació entre el corrent elèctric i el magnetisme (electromagnetisme), una de les àrees més importants i amb més aplicacions de la física. Veureu com funciona un motor i s’introduirà el fenomen de la inducció magnètica i la generació de corrents induïts. Finalment, veureu l’aplicació d’aquests fenòmens en la generació de corrent altern i la construcció dels transformadors de corrent.

1 La levitació magnètica

La levitació magnètica

Levitar vol dir que algun objecte “surí” a l'aire. En la unitat anterior, el programa “Quèquicom” us mostrava la levitació sònica. Hi ha però, altres maneres d'aconseguir la levitació, entre elles la magnètica.

<http://www.youtube.com/user/ThePhysicscat#p/a/u/1/SDtt0tYlgYg>

Una de les aplicacions que es pot donar al fenomen de la levitació és el disseny i construcció de trens de levitació magnètica (*Maglev*), trens que permetrien anar més ràpid i amb un menor consum energètic.

L'Enciclopèdia Catalana diu sobre un tren magnetolevitant:

“Vehicle d'alta velocitat que levita sobre un carril guia impulsat per camps magnètics

Pel que fa a la velocitat, cal destacar els 435 km/h assolits a Alemanya i els 517 km/h, al Japó. La levitació magnètica es pot aconseguir, d'una banda, mitjançant la denominada suspensió electromagnètica, que utilitza electroimants convencionals situats als extrems d'un parell d'estructures sota el tren -aquestes estructures envolten cada banda del carril guia i els imants són atrets cap als rails de ferro i eleven el tren-. I de l'altra, mitjançant la suspensió electrodinàmica, que se serveix de la força d'oposició que es produeix entre els imants del vehicle i les bandes o bobines elèctriques del carril guia per a elevar el tren. Aquest disseny, a diferència de l'anterior, no necessita un control i ajustament continuat, però els imants superconductors que utilitza són més cars que els normals”.



Figura 2. Maglev de Shangai. Font Wikipedia (Autor JakeLM by [CC-BY-2.5])

ACTIVITAT 1 El Maglev

La següent pàgina web us explica com funciona un Maglev i quines són les tecnologies que s'utilitzen en el seu disseny i construcció. Feu un resum amb tota aquesta informació.

http://www.consumer.es/web/es/viajes/ideas_y_consejos/2008/01/27/174066.php

1.1 Els imants

L'Activitat 2 us mostra diferents tecnologies amb què es pot aconseguir que un tren leviti. La tecnologia de la suspensió electromagnètica es basa en l'ús del que s'anomenen electroimants, mentre que la tecnologia de suspensió electrodinàmica utilitza imants superconductors.

En totes dues tecnologies, la levitació s'obté gràcies a les propietats dels imants, propietats que estudiareu en aquesta secció de la unitat.

1.1.1 Propietats dels imants

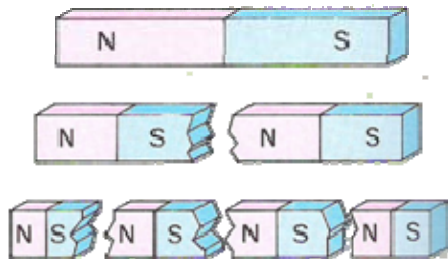


Figura 3. Divisió d'imants: cada cop que es parteix un imant "per la meitat" es formen dos imants nous amb el pol N i el pol S.



Figura 4. Clips d'acer atrets per un imant

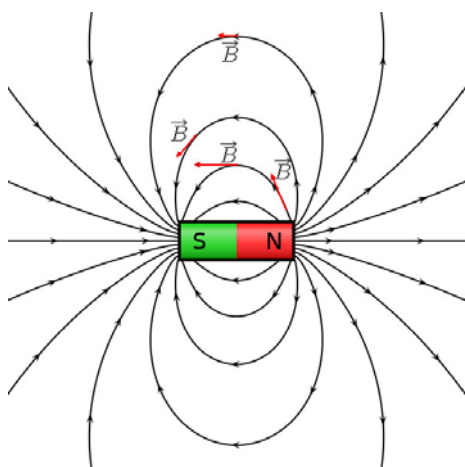


Figura 5. Camp magnètic i línies de camp creades per un imant en forma de barra rectangular (Imatge adaptada de Geek3 [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

ACTIVITAT 2 Imants



En aquesta activitat fareu una sèrie d'experiències curtes per a introduir-vos en les propietats dels imants i el comportament de la matèria en camps magnètics.

Hi ha materials, com la magnetita, que presenten de manera natural la propietat magnètica, però per a obtenir camps magnètics més intensos que puguin fer levitar un tren o fer funcionar motors i transformadors, dispositius que estudiareu més endavant en aquesta unitat, calen imants artificials.

Experimentalment s'observa que quan s'atansen dos imants apareix una força entre ells que pot ser d'atracció o repulsió. Aquest fet permet definir els pols magnètics nord (N) i sud (S). Així, s'observa que pols magnètics iguals es repel·leixen i pols magnètics diferents s'atrauen (a l'igual que passa entre càrregues elèctriques).

En aquest cas, però, hi ha una diferència important entre la interacció magnètica i l'elèctrica. Mentre que és possible separar càrregues elèctriques, positives i negatives, és impossible aïllar un únic pol magnètic. Si es divideix un imant per la meitat s'obtenen dos imants, cadascun amb el seu pol nord i el seu pol sud. Si es torna a dividir un d'aquests nous imants s'obtenen dos imants més petits amb els seus pols nord i sud, i així successivament (Figura 3).

ACTIVITAT 3 El magnetisme de la Terra

La Terra sencera és un enorme imant natural, amb pols magnètics prop dels pols nord i sud geogràfics. Com que el pol nord de l'agulla d'una brúixola apunta cap al nord geogràfic, a prop del pol nord (geogràfic) hi ha el pol sud magnètic.

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/magnet-and-compass>
(busqueu la versió en català)

1.1.2 El camp magnètic

Anteriorment en aquest curs heu estudiat el camp gravitatori que crea la Terra, camp que es detecta fàcilment quan un objecte que, per exemple, es troba prop de la superfície experimenta una força que el fa caure quan es deixa anar.

Un imant es capaç d'atreure objectes d'acer que estan situats a una certa distància. Per analogia es pot dir que l'imant crea un **camp magnètic**. Així, a cada punt de l'espai se li fa correspondre un vector, anomenat **inducció magnètica**, que se simbolitza per B , la direcció del qual és la

que té l'agulla de la brúixola en aquell punt i el sentit és el que va del pol sud al pol nord de la brúixola o del pol nord al sud de l'imant (Figura 5).

La unitat d'inducció magnètica en el Sistema Internacional és el **tesla (T)** en honor al científic Nikola Tesla (1856-1943). Un camp magnètic d'un Tesla és molt gran, per això s'acostuma a utilitzar també una altra unitat, el **gauss (G)**. Un tesla equival a 10000 G. Per exemple el camp magnètic de la Terra a la seva superfície és aproximadament de 0,5 G. Per mesurar la intensitat del camp magnètic es fa servir un aparell anomenat **teslàmetre**.

Igual com per al camp gravitatori, es poden representar les **línies de camp magnètic** que, en el cas dels imants es pot fer visible amb l'ajuda de llimadures de ferro (Figura 6).

ACTIVITAT 4 Visualitzar les línies de camp magnètic

Situeu un imant potent sobre un full de paper. Amb una brúixola (o millor, si en teniu, amb moltes brúixoles) exploreu el camp magnètic al seu voltant. Indiqueu sobre el paper la direcció i sentit del camp que heu determinat en diferents punts i intenteu dibuixar les línies de camp magnètic que compleixin la condició de tenir la direcció del camp en cada punt.

Les línies del camp magnètic són tancades (Figura 6). Es considera que per fora de l'imant van del pol nord al pol sud de l'imant i es tanquen a l'interior de l'imant, ja que allí van del pol sud al pol nord. Dintre de l'imant el camp magnètic és aproximadament uniforme i les línies són paral·leles.

1.1.3 Comportament de la matèria en camps magnètics

El magnetisme de la matèria és una propietat que només es pot analitzar d'una manera exacta amb la mecànica quàntica. Aquesta teoria veu a cada electró com un petit imant que, a l'interactuar amb els camps magnètics externs, s'orienta.

Només uns pocs materials dels que hom pot trobar a la natura exhibeixen una forta resposta a un camp magnètic alineant-se amb ell. La magnetita és un exemple d'aquest tipus de materials. Aquests tipus de materials s'anomenen **ferromagnètics** i són materials que es poden imantar fàcilment.

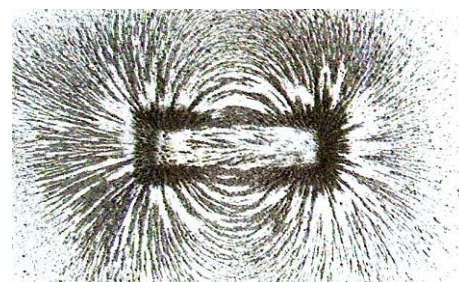


Figura 6. Visualització del camp magnètic que crea un imant amb llimadures de ferro

Els dominis magnètics

Els materials ferromagnètics presenten unes zones amb una magnetització ben definida. En acostar-hi un imant, el seu camp magnètic orienta al llarg del camp els diferents dominis, de manera que el material s'imanta i esdevé un imant.

<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/java/domains/index.html>

No obstant, tots els materials presenten algun tipus de reacció als camps magnètics, reacció que sovint passa desapercebuda. Així hom pot parlar de materials **paramagnètics** com l'alumini que són dèbilment atrets per un imant i només mantenen el seu magnetisme en presència d'un camp magnètic extern. També existeixen els materials **diamagnètics** com el coure o l'aigua, que són dèbilment repel·lits pels dos pols d'un imant.

ACTIVITAT 5 El diamagnetisme

El diamagnetisme és una forma molt dèbil de magnetisme que només es dona en presència d'un camp magnètic extern. Els materials diamagnètics proporcionen eines per a una levitació estable.

Un article del núm. 6 de la *Revista de Recursos de Física* us permetrà aprofundir en el diamagnetisme.



Figura 7. Imant levitant sobre un imant superconductor que es troba a uns -200°C (Peter nussbaumer [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

Levitació diamagnètica

<http://www.youtube.com/watch?v=hyQztViPW1g>

Un cas particular molt interessant el constitueixen els **superconductors**, materials que a temperatures prou baixes, tenen un comportament diamagnètic perfecte. Aquests materials “expulsen” les línies de camp magnètic del seu interior i d'aquesta manera leviten sobre els imants externs. Aquesta és la base d'una de les tecnologies de disseny d'un Maglev.

El Maglev

<http://www.youtube.com/watch?v=2--43eAS1iY>

<http://www.youtube.com/watch?v=u8LKbh8BNeY&feature=related>

1.2 Electroimants

Maglev train capable of 3.500 km/h

<http://www.youtube.com/watch?v=aIwbrZ4knpg>

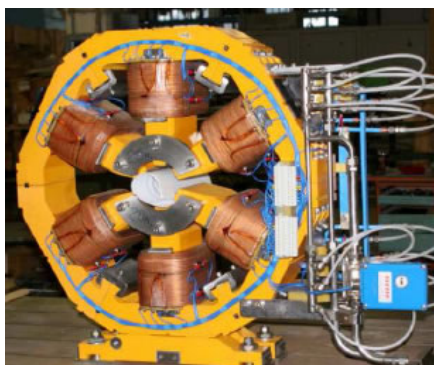


Figura 8. Electroimant sextupolar del Sincrotró ALBA (Font CELLS)

elèctric. Aquests dispositius s'anomenen **electroimants**, que s'utilitzen també en altres àmbits com és la construcció d'acceleradors de partícules com el sincrotró ALBA (Figura 8).

ACTIVITAT 6 Corrent elèctric i brúixoles



Hans Christian Oersted (1777-1851) va dur a terme un experiment que intentava mostrar la relació entre l'electricitat i el magnetisme. En aquesta activitat us proposem repetir la seva experiència.

En l'Activitat 6 heu vist com, a les proximitats d'un corrent elèctric, les agulles de les brúixoles es desvien. Aquest fet és l'indicador de l'existència d'un camp magnètic, de manera que ens mostra que, a més dels imants, els corrents elèctrics també generen camps magnètics al seu voltant. En unitats anteriors heu vist que el corrent elèctric són càrregues elèctriques en moviment. Així doncs, per a què es produeixi la interacció magnètica cal que hi hagi càrregues elèctriques movent-se.

Fins a l'experiència d'Oersted els fenòmens elèctrics i magnètics s'estudiaven separatament. Aquesta experiència va posar de manifest que electricitat i magnetisme estaven estretament relacionats i, per tant, es pot parlar d'**electromagnetisme**.

El descobriment d'Oersted, crucial per al desenvolupament de l'electromagnetisme, va causar un gran impacte en molts àmbits científics. Físics de tota Europa es van posar a repetir i ampliar els experiments, de manera que els avenços en el camp de l'electromagnetisme van ser espectacularment ràpids.

1.2.1 Camp magnètic creat per un conductor rectilini

ACTIVITAT 7 Camp magnètic al voltant de diferents distribucions de corrent



En aquesta activitat visualitzareu el camp magnètic que crea un conductor rectilini i d'altres distribucions de corrent per les quals circula un corrent intens. A continuació interpretareu les línies de camp en cada cas.

Amb experiments com els de l'Activitat 7, es va descobrir que el camp magnètic generat per un corrent rectilini era molt diferent del camp generat per un imant. En el cas del camp creat pel conductor rectilini, la intensitat del camp disminueix amb la distància al conductor elèctric, però no hi ha cap zona que pugui identificar-se amb el pol nord o el pol sud, les línies de camp simplement volten el conductor en circumferències concèntriques. En la Figura 9 es mostra el camp magnètic que es crea visualitzat amb llimadures de ferro.



Figura 9. Visualització amb llimadures de ferro del camp magnètic creat per un fil conductor (Font Tipler)

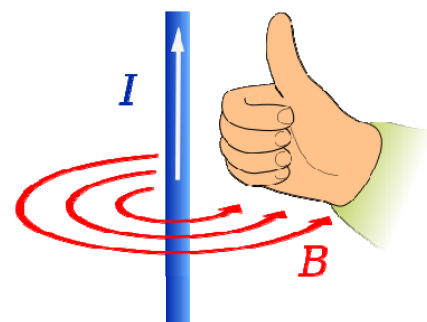


Figura 10. Regla de la mà dreta (Font Jmelero [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

Per a trobar la direcció i el sentit de la inducció magnètica, $\vec{B}$, al voltant del fil elèctric, es poden fer servir diverses regles. Una de les més utilitzades és la **regla de la mà dreta**. La mà dreta (Figura 10) agafa el conductor de manera que el dit polze apunta en el sentit del corrent elèctric i la resta dels dits, que formen un pla perpendicular al fil, assenyalen la direcció i sentit de la inducció. També podeu usar la **regla del cargol**. Si feu girar un cargol amb un tornavís de manera que avanci com ho fa el corrent, el seu sentit de gir coincideix amb el de les línies de camp.

Quan representem situacions en què apareixen camps magnètics és freqüent que sigui impossible representar tots els elements en un pla. El conveni que s'utilitza per a representar camps magnètics (o altres vectors) perpendiculars al pla del dibuix és el següent: si el sentit del vector $\vec{B}$ és cap a nosaltres es representa mitjançant un punt (*), es veu la punta de la fletxa, i si el sentit del vector $\vec{B}$ és en sentit contrari a nosaltres es representa mitjançant una (X), es veu la cua del vector.

Qüestions

- 1 Les catenàries són cables situats sobre les vies per a subministrar corrent elèctric als trens. Sobre un tram recte d'una via hi ha una catenària per la qual circula un corrent de 115 A. Des del punt de vista d'un observador situat al costat de la via el corrent circula cap a la dreta.
 - (a) Dibuixeu les línies del camp magnètic al voltant de la catenària.
 - (b) Dibuixeu i indiqueu la direcció i el sentit del camp magnètic.
 - a) A les vies.
 - b) Just a sobre de la catenària.
 - c) Al punt en què està situat l'observador.
- 2 Expliqueu com es pot fer servir una brúixola per a detectar, sense tocar-lo, si un cable elèctric està conduint corrent elèctric, i -si és el cas- en quin sentit circula el corrent.
- 3 Representeu la direcció i el sentit del camp magnètic, mitjançant les línies de camp, si el corrent circula en dos conductors paral·lels en la mateixa direcció i el mateix sentit.
- 4 Què passarà quan els corrents siguin de sentit oposat? Representeu la direcció i sentit del camp magnètic.
- 5 Pels cables d'alta tensió circulen corrents alterns (que canvien de sentit 100 vegades cada segon). Considereu una línia d'alta tensió que segueix la direcció nord-sud. Com serà el camp magnètic en un punt situat just a sota d'un cable? (Negligiu els efectes dels altres cables de la línia).

1.2.2 Camp magnètic creat per un solenoide

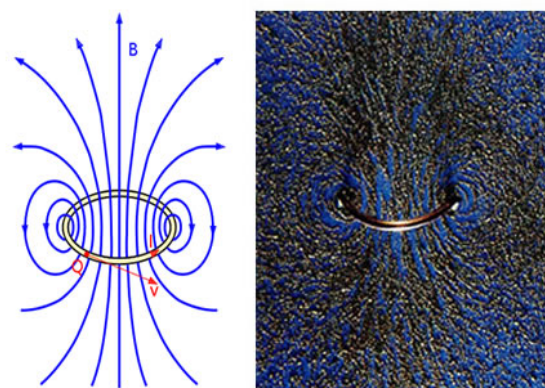
Tanmateix per aconseguir un camp magnètic semblant al que produeix un imant, la bobina és l'element més adequat.

Per entendre-ho considereu primer el cas més senzill: una sola **espira**. A la Figura 11 es veu una espira per la qual circula el corrent en el sentit de les agulles del rellotge.

D'acord amb la regla de la mà dreta, a dins de l'espira el camp magnètic està dirigit cap amunt. D'acord amb el sentit del vector $\vec{B}$ la cara superior de l'espira és un pol nord (d'allà surten les línies de camp magnètic). La cara inferior és un pol sud (les línies del camp magnètic entren).

Si en comptes d'una espira n'hi ha moltes, com en un **solenoid**, l'efecte simplement es multiplica. A dins del solenoide, el valor del camp magnètic és pràcticament uniforme i el seu valor és proporcional a la intensitat del corrent, al nombre d'espires per unitat de longitud i a la permeabilitat magnètica, una propietat del medi.

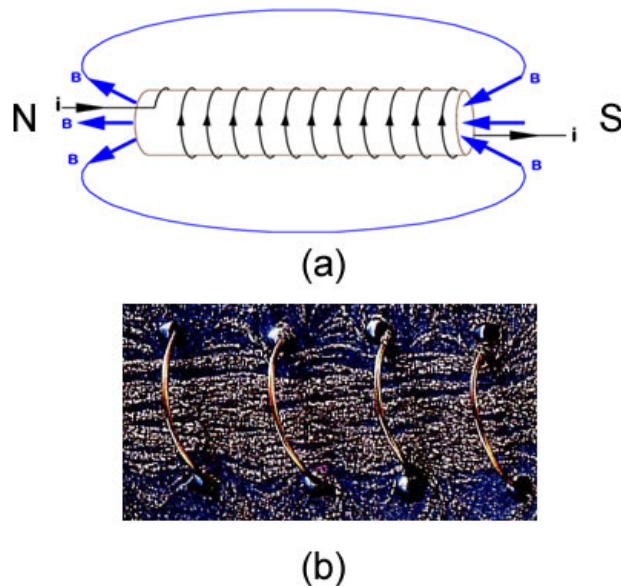
L'esquema de les línies del camp magnètic creat per un solenoide que mostra la Figura 12 és semblant a l'esquema de les línies de camp creat per un imant de barra com el de la Figura 5.



(a)

(b)

Figura 11. (a) Direcció de les línies de camp magnètic creat per una espira. (Adaptació de MovGPO [CC-BY-SA-2.0], via Wikimedia Commons) (b) Visualització de les línies del camp creat per una espira (Font Tipler)



(a)

(b)

Figura 12. (a) Línies de camp magnètic en un solenoide. (Adaptació de P.wormer [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons) (b) Visualització del camp magnètic creat per un solenoide amb llimadures de ferro (Font Tipler)

Nota d'estudi

Pot comprovar-se experimentalment que si a l'interior d'un solenoide hi ha un material, la inducció magnètica, $\vec{B}$, produïda és diferent que la inducció magnètica produïda quan no hi ha cap material. Els materials que produeixen una major inducció magnètica en l'interior del solenoide, es diu que tenen una permeabilitat magnètica més gran.

La permeabilitat magnètica es representa per μ . La permeabilitat magnètica del buit és $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$. Alguns valors de la permeabilitat magnètica són:

Acer	$875 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
Ferrita (Ni-Zn)	$20-800 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
Alumini	$1,2566650 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
Coure	$1,2566290 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
Buit	$1,2566371 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
Aigua	$1,2566270 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
Superconductors	$0 \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$

ACTIVITAT 8 Aprofundir en el solenoide i en l'electroimant



En aquesta activitat explorareu el funcionament i el comportament d'un solenoide i d'un electroimant.

Qüestions

- 6 Podria existir una espira d'una sola cara? Relacioneu-ho amb el fet que no existeixen monopols magnètics.
- 7 El camp magnètic dins d'un solenoide és aproximadament constant i el seu valor es pot calcular amb l'expressió $B = \mu_0 I N / L$, on I és la intensitat de corrent que hi circula, N el nombre de voltes i L la longitud del solenoide. Amb aquestes dades, penseu de quina manera canviarà el camp magnètic produït per un solenoide:
 - (a) si es duplica la intensitat del corrent.
 - (b) si s'inverteix el sentit de circulació el corrent.
 - (c) si s'introdueix un nucli de ferro dins el solenoide (la permeabilitat magnètica del ferro és unes 100 vegades més gran que la de l'aire).
 - (d) si es duplica el radi del solenoide (sense canviar el nombre de voltes).
 - (e) si es duplica la longitud del solenoide (el doble de voltes).
 - (f) si es duplica el nombre de voltes sense canviar la longitud.

En un **electroimant**, a més de la bobina connectada al corrent, hi ha un nucli de ferro dolç (pel qual no passa el corrent!). La imantació del ferro és temporal i, per tant, és molt adequat per a construir l'electroimant. Un electroimant és, doncs, un imant artificial que produeix un camp magnètic quan circula el corrent elèctric per la bobina i només mentre dura el pas del corrent.

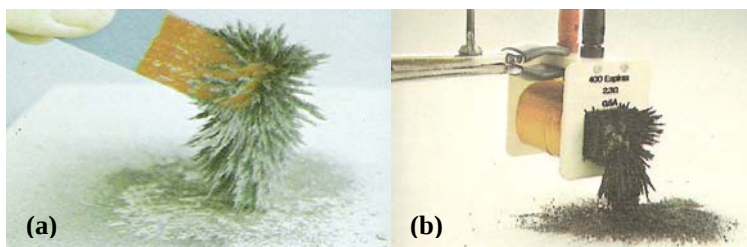


Figura 13. (a) imant permanent i (b) electroimant

La Figura 13 mostra un imant permanent en forma de barra que atreu llimadures de ferro i un electroimant que també atreu llimadures de ferro. En el cas de l'electroimant, en desconnectar el corrent, les llimadures deixen de ser atretes i cauen.

La levitació magnètica per electroimants es basa en el mateix funcionament que mostra la Figura 13. Relacionant el què heu vist a l'Activitat 8 amb el tren, es pot entendre molt

fàcilment que, quan circula corrent per l'electroimant, el tren s'eleva i resta en suspensió sobre la via i quan el corrent s'anul·la, el tren torna a entrar en contacte amb la via, tal com mostra el vídeo que introdueix la Secció 1.2.

2 La força magnètica

Una vegada el Maglev levita sobre les vies, cal impulsar-lo. Aquest tipus de tren no porta motor ja que l'impuls neix de les forces magnètiques que s'estableixen entre els electroimants que porta el tren i els de la via tal com heu vist a l'Activitat 2. El corrent elèctric que circula pels electroimants genera un camp magnètic que es pot utilitzar per a impulsar el tren.

En aquest apartat, veureu com els corrents elèctrics són també sensibles als camps magnètics i estudiareu les forces relacionades amb aquesta interacció. Les aplicacions que s'obtenen són molt interessants quan els camps magnètics produeixen forces que actuen sobre corrents elèctrics o sobre càrregues lliures en moviment. La utilització de les forces electromagnètiques permet construir motors elèctrics o dirigir feixos de partícules carregades.

ACTIVITAT 9 La força magnètica



Munteu un experiment per a observar la força que actua sobre un conductor elèctric en un camp magnètic. Useu una balança electrònica per a mesurar la força entre un corrent elèctric que passa per un fil de coure i un camp magnètic. Varieu el valor de la longitud del conductor, de la força del camp i de la intensitat del corrent per a mostrar com el valor de la força depèn d'aquestes magnituds.

2.1 La mesura de la força magnètica

A l'Activitat 14 heu experimentat la força magnètica que actua sobre un conductor rectilini pel què circula un corrent elèctric situat en un camp magnètic en la direcció i sentits adients. A continuació es resumeixen els resultats observats.

2.1.1 Direcció i sentit de la força magnètica

S'observa que:

- La força magnètica no apareix quan el corrent elèctric i el camp magnètic estan en la mateixa direcció.
- Quan el corrent elèctric i el camp magnètic estan en direccions diferents, sí que apareix una força magnètica i la seva direcció és perpendicular tant al corrent com al camp magnètic.
- Per predir el sentit de la força podem utilitzar la regla de la mà dreta o la regla del cargol:

Regla de la mà dreta: El palmell de la mà dreta mig tancat fent un cercle ens indica el sentit del gir que s'hauria de fer per anar de la direcció del vector corrent elèctric cap al vector camp magnètic (pel camí més curt) i el dit polze ens indica el sentit de la força (Figura 14).

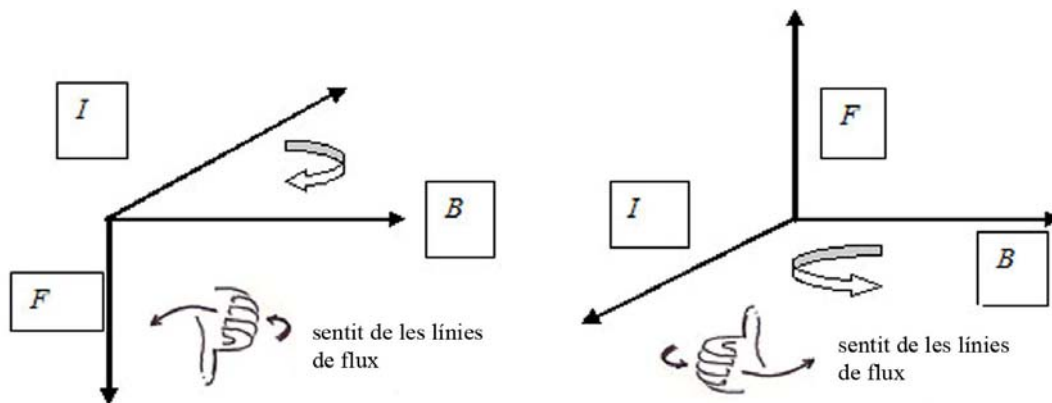


Figura 14. Sentits del camp magnètic, $\vec{B}$, del corrent elèctric, I , i de la força magnètica, $\vec{F}$, amb la regla de la mà dreta

Regla de la rosca del cargol: El sentit de gir de la rosca va del vector corrent elèctric al vector camp magnètic (pel camí més curt) i el sentit de desplaçament de la rosca és el de la força.

2.1.2 Mòdul de la força

El valor de la força magnètica ve determinat per diversos factors: la intensitat de la inducció magnètica, el valor de la intensitat del corrent i la longitud del filament. Com heu vist en la segona part de l'Activitat 14, el valor de la força magnètica, F , en el filament, és proporcional

- a la intensitat del corrent elèctric, I , que circula pel filament,
- a la longitud del conductor, L , que es troba en el camp magnètic i
- a la intensitat de la inducció magnètica, B .

Experimentalment també es troba que la força és màxima quan el corrent és perpendicular al camp magnètic, i zero quan el corrent és paral·lel al camp magnètic. Quan el camp magnètic i el corrent són perpendiculars, la relació entre aquestes magnituds es pot escriure com

$$F = BIL \quad (1)$$

Com influeix l'angle que formen el corrent i el camp magnètic en el mòdul de la força magnètica?

Per a veure com varia el mòdul de la força magnètica amb l'angle que formen el camp magnètic i el corrent elèctric, cal tenir present que el camp magnètic i el corrent són dos vectors –que tenen direcció, sentit i mòdul.

Imagineu un camp magnètic que actua verticalment cap avall travessant la pàgina. Ara imagineu un conductor rectilini sobre la pàgina amb un corrent que va d'esquerra a dreta (Figura 15a). Sobre el conductor actuarà una força magnètica dirigida cap a la part superior de la pàgina (tal com resulta de la regla de la rosca del cargol).

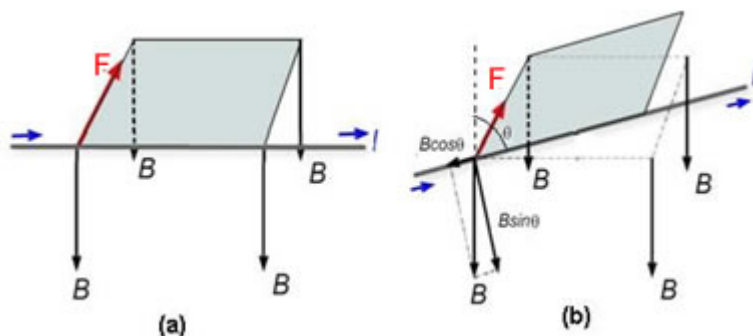


Figura 15. (a) Segons la regla de la rosca del cargol la força magnètica actua perpendicularment al corrent i al camp magnètic. (b) Si el camp magnètic forma un angle θ respecte la vertical, només el component $B \sin\theta$ produeix força

Ara suposeu que aixequem la part dreta de la pàgina cap amunt fins que el conductor imaginari formi un angle θ amb la vertical (Figura 15b). Només el component del camp magnètic perpendicular al conductor, $B \sin\theta$, produeix força. El component $B \cos\theta$ és paral·lel al cable i no produeix força. Alternativament, podríeu pensar que el corrent que circula pel conductor es descompon en dos components $I \sin\theta$ i $I \cos\theta$, un perpendicular i l'altre paral·lel al camp. S'obté, així, l'expressió completa de la força magnètica que actua sobre el conductor

$$F = ILB \sin\theta \quad (2)$$

El mòdul de la força magnètica, quan el corrent i el camp magnètic formen un angle, és menor que quan són perpendiculars. En el cas de corrent i camp magnètic perpendiculars s'obté el valor màxim de la força magnètica ($\sin 90^\circ = 1$). Fixeu-vos en l'Equació 2, per a qualsevol altre angle entre el corrent i el camp magnètic, el valor de la força es veu reduït en un factor "sin θ ".

2.1.3 Expressió vectorial de la força magnètica

El valor del mòdul, la direcció i sentit de la força es poden agrupar en una única fórmula en la qual hem d'utilitzar el producte vectorial de dos vectors

$$\vec{F} = I(\vec{L} \times \vec{B}) \quad (3)$$

on $\vec{F}$, la força magnètica, és un vector que té per mòdul $F = ILB \sin\theta$, la direcció és perpendicular al pla format pels vectors $\vec{L}$ i $\vec{B}$ i el sentit, el que indica la regla del cargol quan va de $\vec{L}$ a $\vec{B}$ pel camí més curt.

Nota d'estudi

Multiplicar vectors

Així com només hi ha una manera de multiplicar dos escalars, hi ha dues operacions diferents que permeten multiplicar vectors: el producte escalar i el producte vectorial.

El **producte escalar** de dos vectors $\vec{A}$ i $\vec{B}$ dona com a resultat un escalar. S'indica per un punt ($\vec{A} \cdot \vec{B}$).

Si $\vec{A} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\vec{B} = (b_x, b_y, b_z)$, el producte escalar $\vec{A} \cdot \vec{B}$ val

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos\theta$$

on θ és l'angle que formen els dos vectors.

Un exemple de producte escalar és la definició de treball $W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{x}$

El **producte vectorial** de dos vectors és un altre vector. És pot denotar amb el símbol $\times$ o amb el símbol $\wedge$.

$\vec{A} \times \vec{B}$ és un vector que té per mòdul $|\vec{A}| |\vec{B}| \sin\theta$, on θ és l'angle que formen els dos vectors, direcció perpendicular a $\vec{A}$ i a $\vec{B}$, i el sentit en el que avança un cargol que gira de $\vec{A}$ a $\vec{B}$ pel camí més curt.

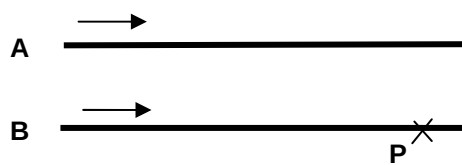


Figura 16. Esquema per a la Qüestió 10

Qüestions

- 8 La inducció magnètica entre els pols d'un electroimant molt potent és 2 T. Quina és la força exercida sobre un conductor rectilini de 10 mm, pel qual circula un corrent de 4 A, quan el conductor:

- (a) és perpendicular al camp magnètic.
- (b) és paral·lel al camp.
- (c) forma un angle de 30° amb el camp.

Feu un esquema indicant la direcció i el sentit del camp magnètic, del corrent i de la força magnètica en cada cas.

Solució: 0,08 N

Solució: 0 N

Solució: 0,04 N

- 9 Un filament conductor horitzontal de longitud 100 mm es troba situat perpendicular al camp creat entre els pols d'un imant. Quan un corrent de 5,0 A circula pel filament, aquest és impulsat pel camp verticalment cap amunt. Si pengeu una massa de 15 g del filament, aquest retorna a la seva posició inicial. Feu un esquema de la situació i calculeu el valor de la inducció magnètica entre els pols de l'imat. (Preneu $g = 9,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Solució: 0,294 T

- 10 L' **ampere** (símbol **A**) és la unitat de intensitat de corrent elèctric en el sistema internacional d'unitats. Es defineix com la intensitat de corrent tal que, en circular per dos conductors paral·lels, rectilinis, de longitud infinita i en el buit, de secció circular menyspreable i separats entre ells una distància d'un metre, produeix una força entre els conductors de $2\cdot 10^{-7} \text{ N}$ per cada metre de conductor.

Considereu dos conductors paral·lels com els que cita la definició, pels que circula un corrent elèctric dirigit cap a la dreta (Figura 38).

- (a) Quina direcció té el camp magnètic produït pel conductor A en el punt P del conductor B?
- (b) Quina direcció té la força magnètica que actua sobre cada un dels conductors?
- (c) Calculeu la intensitat del camp magnètic a un metre de distància d'un conductor pel que circula un ampere.

Solució: $2\cdot 10^{-7} \text{ T}$

- 11 Considereu ara dos conductors paral·lels pels que circulen corrents iguals, però en sentit contrari.

- (a) Dibuixeu, utilitzant dos colors diferents, les línies del camp magnètic generat per cada un dels dos conductors, i el vector inducció magnètica que cada conductor crea sobre l'altre.
- (b) Quina direcció i sentit tindrà la força magnètica que actua sobre cada un dels dos conductors?

2.2 Dirigint partícules carregades

En les seccions anteriors heu treballat amb càrregues elèctriques que circulen sempre per cables conductors. Però la força magnètica actua igualment sobre càrregues elèctriques lliures, com per exemple, els electrons que viatgen pel tub de buit d'una pantalla CRT (Cathodic Ray Tube, en anglès) o les partícules carregades que es mouen en un accelerador de partícules.

Aquesta secció està dedicada a les forces magnètiques que actuen sobre les càrregues lliures que es mouen dins d'un camp magnètic. Veureu com aquestes càrregues elèctriques es poden confinar en una zona de l'espai, seguint òrbites circulars i les aplicacions que d'aquest fet es deriven.

D'acord amb l'Equació 3, sobre un conductor rectilini de longitud L pel qual circula una intensitat I , en un camp magnètic B , actua una la força magnètica que ve determinada per

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$$

Recordeu que la intensitat de corrent es defineix com el quocient entre la càrrega elèctrica que travessa la secció d'un conductor i el temps que tarda en travessar-la

$$I = \frac{q}{\Delta t}$$

on q és la càrrega elèctrica i Δt el temps. La longitud L recorreguda per la càrrega elèctrica en un interval de temps Δt val

$$\vec{L} = \vec{v}\Delta t$$

on $\vec{v}$ és la velocitat de la càrrega. Substituint les expressions de la intensitat I i de la longitud L a l'Equació 3 s'obté

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (4)$$

expressió vectorial que permet obtenir la força magnètica que actua sobre una partícula de càrrega q que es mou amb una velocitat $\vec{v}$ a l'interior d'un camp magnètic $\vec{B}$. La mateixa expressió indica que la força magnètica sempre actua perpendicularment a les altres dues magnituds vectorials: el camp magnètic i la direcció del moviment de la partícula,

El mòdul de la força pot calcular-se com

$$|\vec{F}| = q|\vec{v}||\vec{B}|\sin\theta \text{ o bé, } F = qvB\sin\theta$$

on θ és l'angle que forma la direcció de la velocitat de la partícula i la direcció del camp magnètic. La direcció i el sentit poden trobar-se aplicant la regla del cargol. Tot això suposant una càrrega positiva. Però – atenció! – cal recordar que els electrons són càrregues negatives: per a partícules negatives en moviment, heu de canviar el sentit de la força obtinguda amb la regla de la rosca o de la mà dreta.

La Figura 17 mostra què passa quan una càrrega positiva $+q$, que es mou a una velocitat $\vec{v}$, de mòdul constant, entra en una regió de l'espai on hi ha un camp magnètic $\vec{B}$. Les creus indiquen que el camp magnètic és dirigit cap a l'interior de la pàgina. El sentit del moviment de la càrrega és d'esquerra a dreta. El camp magnètic exerceix sobre la càrrega una força magnètica que, d'acord amb la regla del cargol, està dirigida cap a la part superior de la pàgina, formant angles rectes amb la direcció del camp i amb la direcció de la velocitat. Aquesta força alterarà la direcció de la trajectòria de la càrrega (però no modificarà el valor del mòdul de la velocitat perquè l'acceleració és perpendicular a la direcció de la velocitat i no suposa un augment ni una disminució de la seva rapidesa). Aquesta

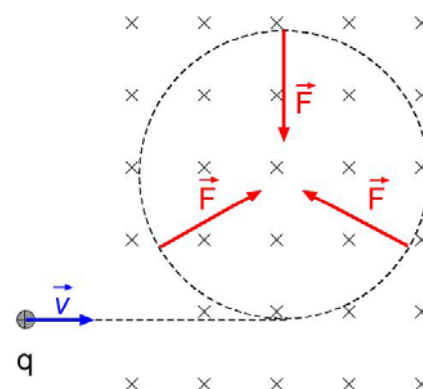


Figura 17. Moviment d'una càrrega elèctrica lliure dins d'un camp magnètic

força és, de fet, una força centrípeta i origina la trajectòria circular de la càrrega, sense variar el mòdul de la velocitat, és a dir, un moviment circular uniforme.

Així doncs, quan el camp magnètic s'aplica perpendicularment a la direcció del moviment de les partícules, la força magnètica proporciona la força centrípeta necessària per a què les partícules es moguin en moviment circular. Aplicant la segona llei de Newton

$$\vec{F}_c = m\vec{a}_c$$

on $\vec{a}_c$ és l'acceleració centrípeta i m és la massa de la partícula carregada. La força magnètica té la mateixa direcció i sentit que l'acceleració centrípeta, per tant, es prescindirà de la notació vectorial. Donat que l'angle que formen la velocitat de la càrrega i el camp és 90° , la força magnètica que actua sobre la càrrega és la màxima i igual a

$$F = qvB$$

Substituint la força magnètica en la equació de Newton es pot escriure

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

on r és el radi de la trajectòria que descriu la partícula de càrrega q i la inducció magnètica, B , representa el camp magnètic. Aïllant r , es dedueix l'expressió que determina el **radi de l'òrbita** circular de la partícula

$$r = \frac{mv}{Bq} \quad (5)$$

El producte del numerador de l'Equació 5 és el mòdul de la quantitat de moviment de la partícula, p . Substituint, doncs, el producte mv per p es pot escriure la següent expressió

$$r = \frac{p}{Bq} \quad (6)$$

Com més gran és la quantitat de moviment de la partícula, més gran és el radi de la seva òrbita –suposant que el camp magnètic es manté sempre igual.

El període, T , del moviment de la partícula és el temps que aquesta tarda en fer una volta i, com ja vau veure en la unitat 3, *Satèl·lits en l'espai*, es pot calcular a partir de

$$T = \frac{2\pi}{v}$$

Substituint r pel seu valor segons l'Equació 5, s'obté

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \quad (7)$$

La freqüència, f , del moviment és la inversa del període i per tant

$$f = \frac{qB}{2\pi m} \quad (8)$$

Cal remarcar que ni el període ni la freqüència del moviment depenen del radi de l'òrbita ni de la velocitat de la partícula.

ACTIVITAT 10 Una càrrega elèctrica en un camp magnètic



En aquesta activitat simuleu el moviment de dues càrregues elèctriques de diferent signe quan entren, amb moviment rectilini i uniforme, en un camp magnètic perpendicular al sentit de moviment. Podeu observar la variació del radi del moviment circular que es produeix si es varia la massa, la càrrega o la rapidesa de les partícules.

2.3 L'espectròmetre de masses i el sincrotró

El moviment circular de partícules carregades en un camp magnètic té moltes aplicacions en el món de la tecnologia: espectròmetres de masses, confinament de partícules carregades, selectors de velocitats, ciclotrons, sincrotrons i d'altres acceleradors de partícules.

L'**espectròmetre de masses** és un instrument molt important per a les anàlisis químiques tal com podeu veure a la unitat *Art i Medicines* del curs de *Química en Context de 2n de Batxillerat*. Aquest dispositiu permet determinar la massa de les molècules que hi ha en una mostra i els seus possibles fragments. En l'espectròmetre de masses, les substàncies són ionitzades i els ions resultants s'acceleren fins a una velocitat alta. Després aquests ions -tots a la mateixa velocitat- s'envien a una zona on hi ha un camp magnètic perpendicular a la direcció de la velocitat d'aquestes partícules, de manera que descriuen una trajectòria circular, el radi de la qual depèn només de la massa de les partícules (Equació 5) la qual cosa permet separar les partícules a la sortida del camp magnètic segons el valor de la seva massa (Figura 18). Quan les partícules que entren a l'aparell tenen diferent càrrega elèctrica, la massa és la que determina el radi de gir.

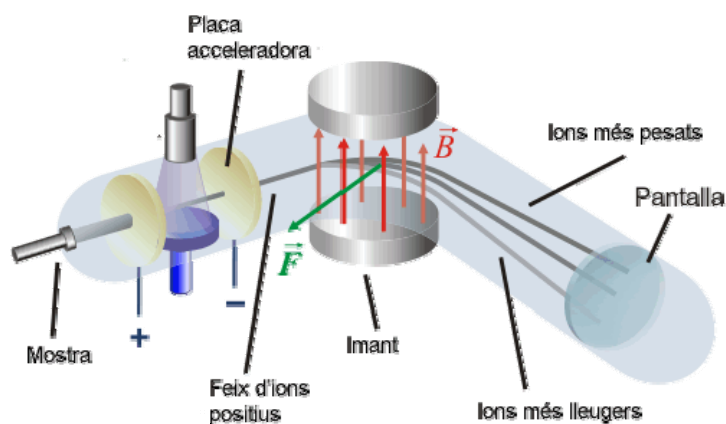


Figura 18. Esquema d'un espectròmetre de masses. Els ions de diferent m/q experimenten diferents curvatures dins del camp magnètic (Font UPM)



Figura 19. Font de llum sincrotró ALBA
(Font CELLS)

Una altra aplicació són els **anells de confinament de partícules**, com el del colisionador LHC, a Ginebra, que fa girar protons per a estudiar el que passa quan xoquen a grans velocitats o com en la Font de Llum de sincrotró ALBA a Cerdanyola del Vallès (Figura 19), que fa girar electrons a gran velocitat per a obtenir una font de llum de gran intensitat i gran puresa cromàtica.

En els anells d'emmagatzematge les partícules carregades estan confinades i en moviment circular. Les partícules són desviades per camps magnètics perpendiculars al pla de l'anell, de manera que recorren l'anell un gran nombre de vegades sense xocar amb les parets. En aquest cas el radi de la trajectòria està fixat per la construcció de l'anell i el camp magnètic s'ha d'ajustar en funció de la massa, la velocitat i la càrrega de les partícules confinades.

En la Unitat 10 *Acceleradors de partícules* estudiareu més amb detall els diferents tipus d'acceleradors i en concret el sincrotró Alba.

El Sincrotró Alba

Catalunya disposarà d'un dels sincrotrons més avançats del moment que permetran dur a terme un ventall molt ampli d'experiments.

<http://www10.gencat.net/gencat/binaris/multimedia/sincrotró.htm>

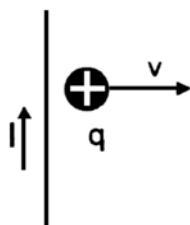


Figura 20. Esquema per a la Qüestió 14

Qüestions

- 12 El LHC (Large Hadron Collider) és un accelerador de protons que està allotjat en un túnel de 27 km de circumferència entre les fronteres de França i Suïssa. En el mateix túnel abans havia estat LEP (Large Electron-Positron Collider), un accelerador d'electrons i positrons. La velocitat amb què es movien les partícules al LEP i la velocitat amb què es mouen els protons al LHC són semblants. Recordeu que $m_e < m_p$, $q_e = -q_p$.
 - (a) Raoneu en quin dels dos casos calen imants més potents.
 - (b) Si les partícules giren en el sentit de les agulles del rellotge (mirant l'anell des de sobre), indiqueu en cada cas quina direcció i sentit ha de tenir el camp magnètic.
- 13 Una càrrega està en repòs en les proximitats d'un fil recte pel qual passa un corrent elèctric d'intensitat constant. Existirà camp magnètic en el punt on es troba la càrrega? Actuarà una força sobre la càrrega? Raoneu les respostes.
- 14 Quina direcció i sentit té la força que actua sobre una partícula positiva que es mou cap a la dreta perpendicularment a un corrent elèctric en el mateix sentit? I si la partícula és negativa? (Figura 20)

Qüestions

15 Quines d'aquestes afirmacions són certes i quines són falses?

- (a) Una càrrega elèctrica en repòs crea
 - 1) només un camp elèctric,
 - 2) només un camp magnètic,
 - 3) un camp elèctric i un camp magnètic.
- (b) Una càrrega elèctrica en moviment crea
 - 4) només un camp elèctric,
 - 5) només un camp magnètic,
 - 6) un camp elèctric i un camp magnètic.

16 Una partícula arriba a un detector on deixa una traça que mostra que ha descrit un arc de 3 cm de radi en el sentit de les agulles del rellotge (Figura 21). A la regió del detector hi ha un potent camp magnètic de 2 T dirigit cap a "dins del paper". Tenim motius per creure que la càrrega de la partícula ha de ser de $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ o bé $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$. Indiqueu si la partícula és positiva o negativa i calculeu la seva quantitat de moviment.

Solució: $9,6 \cdot 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

17 Una partícula carregada penetra en una regió de l'espai on hi ha un camp magnètic de manera que no hi experimenta cap força. Expliqueu com pot ser això.

18 El camp magnètic de la Terra ens protegeix de les partícules carregades que ens arriben amb els raigs còsmics. Imagineu un protó que arriba, procedent del Sol, amb una velocitat de $3 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ a les proximitats de la Terra, per sobre de la zona equatorial, on el camp magnètic està dirigit cap al Nord i té una intensitat de $30 \mu\text{T}$.

- (a) Calculeu la força que actua sobre el protó, indicant la seva direcció i sentit.
- (b) Com serà la trajectòria d'aquest protó? Feu un esquema.

Solució: $1,44 \cdot 10^{-21} \text{ N}$

19 S'està construint un prototip de reactor de fusió nuclear anomenat ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). L'ITER tindrà una forma toroïdal amb un diàmetre intern de 6,5 m i un diàmetre extern de 19,4 m. Dintre es mouran nuclis de deuteri i de triti a temperatures de 10^8 K girant sense xocar amb les parets gràcies a un camp magnètic de fins a 11,8 T.

- (a) Feu una predicció amb aquestes dades de la quantitat de moviment i de la velocitat dels nuclis de deuteri que girin en aquest dispositiu en un moviment circular de 5 metres de radi.
- (b) És compatible la velocitat obtinguda a l'apartat anterior amb els principis de la relativitat especial? Quins altres factors haurien de tenir-se en compte per a un estudi complet d'aquest problema?
- (c) Dada: massa nucli deuteri = $3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Solució: $9,45 \cdot 10^{-18} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v = 2,83 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

20 En els tubs de raigs catòdics (Figura 22) un canó dispara electrons cap a la pantalla. Les imatges es formen allà on els electrons impacten amb la pantalla. Quin efecte té acostar el pol nord d'un imant a la part superior d'un tub de raigs catòdics?



Figura 21. Esquema per a la Qüestió 16

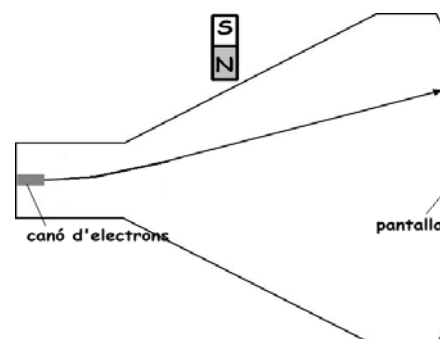


Figura 22. Esquema d'un tub de raigs catòdics per a la Qüestió 20

3 Trens d'alta velocitat

La Unió Internacional de Ferrocarrils (UIC) denomina tren d'alta velocitat a aquell que pot circular a més de 250 km/h sobre vies específicament dissenyades. Espanya compta amb una xarxa d'alta velocitat en expansió, que arribava a finals de l'any 2010 a més de 2200 km. Per aquesta xarxa circulen multitud de models diferents, entre ells l'AVE S-103 (Figura 23).

L'AVE S-103.

L'AVE S-103 és un dels trens més avançats del món que fa la línia Madrid – Barcelona i que podrà assolir una velocitat de 350 km/h. La wikipèdia en català us dona més informació sobre aquest tren.

A diferència dels Maglev, tots aquests trens necessiten motors que els impulsin. Així, l'AVE S-103 porta 16 motors d'inducció que donen una potència d'uns 8800 kW per tal d'accelerar i moure les més de 425 tones del tren. També cal que disposi d'un sistema de frenada prou potent per a poder garantir unes distàncies de frenada adequades dins dels intervals de seguretat que hi ha a la línia.

Els motors i els sistemes de frenada d'aquests trens d'alta velocitat aprofiten l'electricitat i el magnetisme per a generar forces electromagnètiques que fan funcionar els motors i per recuperar part de l'energia "perduda" durant la frenada.

3.1 El tren es mou

En la secció anterior heu estudiat que un conductor situat a l'interior d'un camp magnètic experimenta una força perpendicular al camp i al conductor quan per aquest hi circula un cert corrent. La Figura 24 mostra una espira situada dins d'un camp magnètic. L'aplicació de la regla de la mà dreta mostra com apareixen dues forces paral·leles i de sentit oposat que donen lloc a un parell de forces que fa girar l'espira.

Aquesta idea pot ser utilitzada per a fabricar un motor que pugui impulsar un AVE S-103. Ara bé, és evident que amb un sol filament conductor no n'hi ha prou. En aquesta mateixa unitat heu vist que incrementant el nombre de conductors els efectes resultants es multipliquen. D'aquesta manera per a dissenyar els motors que fan falta s'utilitzen bobines situades a l'interior d'un camp magnètic que giren a causa de les forces electromagnètiques que apareixen.

Aquesta és la primera etapa del moviment continu d'un motor elèctric. Malauradament el gir s'atura quan els pols de l'imant i de la bobina estan en oposició. Aquest problema es pot resoldre si aleshores el corrent canvia de sentit: els pols de la bobina canvien de polaritat i originen una força de repulsió amb el camp de l'imant, fent que la bobina continuï girant.



Figura 23. AVE S-103 reduint la velocitat a l'acostar-se al túnel del Prat (Font Bonaventura Leris [CC-BY-SA-2.0], via Wikimedia Commons)

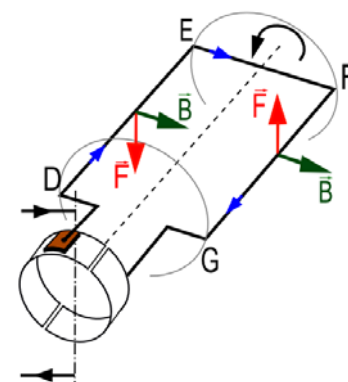


Figura 24. Espira situada dins d'un camp magnètic (Font EBattleP [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)



Figura 25. Imatge que mostra l'estructura interior d'un motor elèctric

Simulació d'un motor de corrent continu

Observeu, en la simulació, el canvi de polaritat en el corrent que circula per l'espira i com aquest efecte fa que giri permanentment.

http://www.walter-fendt.de/ph14s/electricmotor_s.htm

ACTIVITAT 11 Dos motors elèctrics



Construïu un motor elèctric senzill. Si treballeu amb altres grups d'estudiants, competeix a veure qui construeix el motor que pot girar més de 30 segons.

Els motors tenen el seu vocabulari propi: armadures, bobina, commutador, delgues, etc. Identifiqueu les diferents parts d'un motor.

Qüestió

- 21** L'AVE S-103 necessita que els motors proporcionin, en arrencar, una força de tracció molt gran, d'uns 283 kN. Imagineu que els enginyers han dissenyat un motor modificat, similar al de l'Activitat 11. Emprant la fórmula de la força magnètica (Equació 2) penseu quines magnituds intervenen en el càlcul de la força, i quins podrien ser els seus valors, per tal de tenir una aproximació al valor real de la força de tracció. (Nota: Hi ha una quantitat extra que cal incloure-hi en l'Equació 2—penseu en la construcció de les bobines)

3.2 El tren arriba a l'estació

Frenada magnètica

L'AVE S-103 és un tren de tracció distribuïda. Això vol dir que els 16 motors de què disposa es troben distribuïts al llarg de diversos eixos del tren. Tots els eixos però, participen en el procés de frenada. En aquest procés actuen diferents tipus de frens. Per una banda els frens pneumàtics que utilitzen discs de fre (com en els cotxes) i els frens elèctrics que basen el seu funcionament en l'electromagnetisme.

<http://demonstrations.wolfram.com/MagneticBraking/>

En un circuit amb un fil conductor dins d'un camp magnètic, la trajectòria dels electrons està dirigida, clarament, al llarg del conductor que forma el circuit. Però, si el material conductor és una làmina d'un cert gruix situada en un camp magnètic variable, la trajectòria que seguiran els electrons no està tan clara. Els corrents que es creen en la

làmina són els anomenats **corrents de Foucault**, que tenen trajectòries en forma de remolí i canvien d'un moment a l'altre, d'una manera semblant als remolins d'aigua en els ràpids d'un riu. Cadascun dels girs arremolinats que es formen origina el seu propi camp magnètic i, per tant, dóna lloc a unes forces d'atracció i de repulsió entre ells i l'imant extern. Aquestes forces són les responsables que el tren pugui reduir la seva velocitat.

ACTIVITAT 12 Caiguda d'un imant dins d'un tub metàl·lic



En aquesta activitat experimentareu amb els corrents de Foucault que es generen quan un imant cau per l'interior d'un tub metàl·lic.

3.2.1 Inducció electromagnètica

Però com apareixen els remolins dels corrents de Foucault? Com ja sabeu del curs passat, per tal de produir un corrent es necessita una força electromotriu (**fem**). Una manera de proporcionar una fem és l'ús d'una bateria o d'una placa fotovoltaica, però com es veurà en l'Activitat 13 es pot produir una força electromotriu emprant el magnetisme, procés que rep el nom d'**inducció electromagnètica**, i la fem i el corrent que s'originen s'anomenen **força electromotriu induïda** i **corrent induït**.

ACTIVITAT 13 Inducció electromagnètica



Mostreu sota quines condicions un corrent pot ser induït en un conductor rectilini o en una bobina. Investigueu els factors que influeixen en el valor de la fem i del corrent induïts.

L'Activitat 13 us permet que el valor de la fem induïda, ε , és proporcional a:

- La velocitat amb la qual es mou el conductor elèctric o la bobina, o bé, la velocitat amb la qual es mou l'imant.
- La intensitat del camp magnètic.
- El nombre d'espores de la bobina.

També s'observa que la fem canvia de sentit si s'inverteix la polaritat de l'imant, o si s'inverteix el sentit del moviment.

L'Activitat 13 us mostra una manera diferent d'induir una força electromotriu. La fem també pot ser induïda en un solenoide quan el corrent que circula per un altre solenoide, que es troba al seu costat, canvia. Així, la clau de volta és que la fem és induïda en el primer solenoide perquè el camp magnètic del segon canvia; ara el canvi es fa només per variació del corrent elèctric del segon solenoide i no pel moviment de l'imant o la bobina.

3.2.2 Flux magnètic

El fenomen de la inducció electromagnètica es pot explicar utilitzant la descripció que va fer Faraday durant el segle XIX, descripció que utilitza la idea de línies de camp magnètic.

Penseu primer en el cas d'una espira en la qual s'indueix una fem pel moviment relatiu d'un imant pròxim (Figura 26). Quan l'imant es troba a una certa distància de l'espira, només unes poques línies de camp travessen la superfície de l'espira, però quan l'imant s'acosta a l'espira, el camp a l'interior de la superfície de l'espira es fa més fort –ara hi ha més línies de camp que travessen la superfície de l'espira, tal com mostra una de les simulacions de l'Activitat 13.

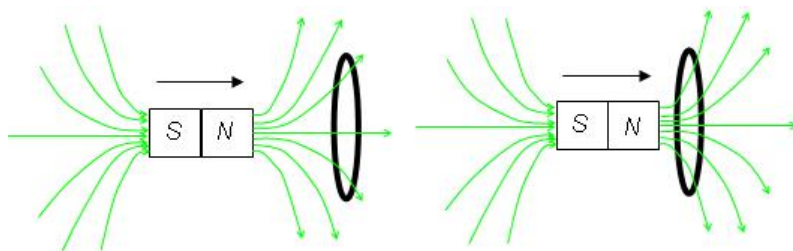


Figura 26. Un imant s'apropa a una espira pel seu extrem nord: el nombre de línies de camp que travessa l'espira augmenta

Per donar compte de la quantitat de línies de camp que travessen l'espira, es defineix el **flux magnètic**, Φ , com el producte escalar del vector inducció magnètica, $\vec{B}$, pel vector àrea de l'espira, $\vec{S}$. El vector $\vec{S}$ és un vector perpendicular al pla de l'espira i mòdul igual a l'àrea que tanca el circuit de l'espira

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \theta \quad (9)$$

La unitat de flux en el sistema internacional és el weber (Wb) on

$$1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot 1\text{m}^2 = 1\text{N} \cdot 1\text{A}^{-1}$$

A partir de la definició del flux magnètic, la inducció magnètica es pot expressar també en $\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ en comptes de Tesla, ja que les dues unitats són equivalents.

Els treballs de Faraday van mostrar que la fem induïda, ε , en una espira era proporcional a la variació temporal del flux a través de l'espira. Aquesta relació es coneix com la **lleï d'inducció magnètica de Faraday** i matemàticament s'expressa de la següent manera

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (10)$$

Si la bobina conté N espiras de conductor, aleshores s'origina una fem en cadascuna de les espiras. Com que les espiras estan connectades en sèrie, la fem neta del conjunt de la bobina és la d'una espira multiplicada per N , i l'equació és la següent

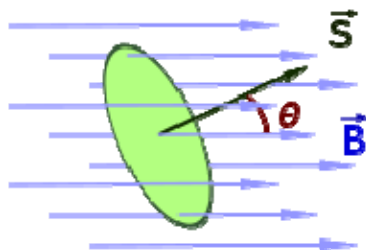


Figura 27. Una espira en un camp magnètic formant un cert angle, θ , amb el camp magnètic (Font Jfmeleiro [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

$$\varepsilon = \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t} \quad (11)$$

El valor de la fem és directament proporcional a la velocitat de canvi del flux magnètic. No obstant, hi ha un punt important que encara no ha estat considerat, i es tracta del sentit de la fem induïda (i per tant del sentit de circulació del corrent induït). Aquí es fa imprescindible una anàlisi de l'energia.

3.2.3 El sentit del corrent induït

A primera vista les experiències de la inducció electromagnètica de l'Activitat 13 semblen una oferta de riquesa sense límits. Per exemple, en la dinamo d'una bicicleta el moviment d'una bobina en l'interior d'un imant produeix una fem que fa circular un corrent per la bobina. Aquest corrent induït podria fer girar la bobina en l'interior de l'imat. Quan la bobina gira ràpid genera una gran fem, que a la vegada crea un corrent elèctric de gran intensitat, que sembla que la podria fer girar més de pressa encara i així successivament. Sembla que un petit moviment inicial pugui provocar un moviment accelerat, i generar energia cinètica, aparentment del no res.

Aquest procés que s'acaba de descriure indica que l'energia disponible és a cada pas més gran, aspecte totalment en contradicció amb el fet que l'energia es va degradant, tal com indica el principi de conservació de l'energia.

La **lleï de Lenz** resumeix aquest fenomen. La fem induïda i el corrent induït tenen un sentit tal que s'oposen al canvi que els produeix. Per exemple, el sentit del corrent induït en una espira quan se li acosta un imant com en la Figura 26, és tal que aquest corrent induït genera un flux magnètic contrari a l'augment de flux a través de l'espira produït per l'imat en acostar-se. Matemàticament la lleï de Lenz s'expressa afegint un signe negatiu a l'Equació 11

$$\varepsilon = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t} \quad (12)$$

Així s'obté una expressió que agrupa la **lleï de Faraday** i la **lleï de Lenz**. L'Equació 12 és vàlida quan el flux és constant o varia linealment amb el temps. En situacions més complexes, cal considerar una generalització d'aquesta equació en termes de la derivada del flux respecte del temps

$$\varepsilon = -\frac{d(N\Phi)}{dt} \quad (13)$$

Qüestió

- 22 Els esquemes de la Figura 28 mostren diferents situacions en què hi ha un moviment relatiu entre un imant en forma de barra i una espira. Dibuixeu en cada cas el sentit del corrent induït en l'espira.

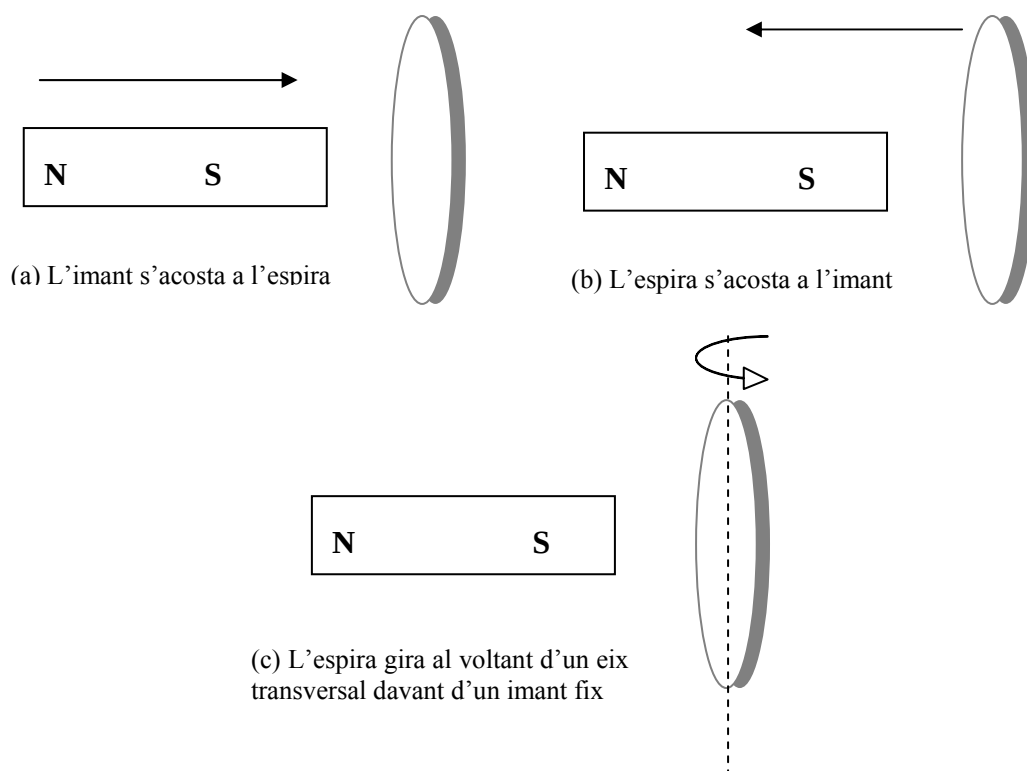


Figura 28. Diagrames per a la Qüestió 22

Qüestions

23 Demostreu que en el SI d'unitats el membre esquerre de la llei de Faraday té les mateixes unitats que el membre dret.

24 El flux magnètic que travessa una bobina de 50 espires és 10 Wb. El flux disminueix fins a zero en 2,0 s. Calculeu el valor de fem induïda a la bobina. Feu un esquema possible de la situació que es descriu i indiqueu el sentit del corrent induït en la bobina.

Solució: 250 V

25 Una bobina de 10 espires té una secció transversal de $0,03 \text{ m}^2$. Està situada de manera que la secció de la bobina és perpendicular a la inducció magnètica de 2 T. Llavors gira 90° en 0,2 s de forma que se situa paral·lela al camp. Quina és la fem induïda en la bobina?

Solució: 3 V

26 Si es produeixen grans corrents d'obertura i de tancament prop d'un aparell de ràdio, es pot sentir un crack o un click. Suggeriu una explicació d'aquest fenomen.

ACTIVITAT 14 Feu prediccions amb la llei de Lenz

Deduïu i expliqueu el sentit del moviment de l'agulla del galvanòmetre connectat a un solenoide, en les següents situacions:

(Prèviament cal saber a quin sentit del corrent en el solenoide correspon el desviament de la agulla del galvanòmetre).

1. S'apropa un imant per la cara nord o sud al solenoide. S'apropa el solenoide a l'imat. Es mouen imant i solenoide apropant-se.
2. S'allunya un imant per la cara nord o sud al solenoide. S'allunya el solenoide de l'imat. Es mouen imant i solenoide allunyant-se.
3. L'imat està fix i el solenoide es fa girar en relació a un eix transversal, o el solenoide està fix i l'imat es fa girar en relació a un eix transversal.
4. Un electroimant està unit a una font d'alimentació amb un interruptor (cal determinar primer els pols de l'electroimant). L'electroimant es troba enfrontat al solenoide unit al galvanòmetre. Es tanca l'interruptor. S'obre l'interruptor.

Qüestions

27 Considereu un fil conductor de longitud L que es mou cap a la dreta amb una velocitat constant v a l'interior d'un camp magnètic perpendicular B entrant en el pla.

- (a) Els electrons que hi ha dins del fil conductor experimenten una força magnètica. Demostreu que aquesta força magnètica va en la direcció i sentit que mostra la figura 29.
- (b) Degut a aquesta força, a l'interior del fil conductor apareix una separació de càrregues, ja que les càrregues negatives s'acumulen a la part inferior, fet que provoca un excés de càrrega positiva en la part superior. Aquesta separació origina una força elèctrica d'atracció entre les càrregues de diferent signe que pot ser calculada per l'equació $F=qE$ on E es coneix amb el nom de camp elèctric. Determineu el valor d'aquest camp elèctric en el moment en què no hi ha més desplaçament de càrrega.
- (c) Per a separar les càrregues cal una certa força electromotriu que es relaciona amb el valor del camp elèctric segons la formula $\mathcal{E}=EL$. Determineu el valor d'aquesta fem.
- (d) Justifiqueu perquè en avançar el fil conductor apareix una força electromotriu. Determineu l'equació que la descriu i compareu-la amb la que heu obtingut a l'apartat (c).

28 En un cert lloc, el camp magnètic terrestre té un component vertical de $4 \cdot 10^{-5}$ T. La carrosseria metàl·lica d'un tren té 4 m d'ample i 5 m d'alt, com es mostra en la Figura 30, i el tren es mou a $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- (a) Determineu la direcció i el sentit de la fem induïda i del corrent resultant del moviment i del component vertical del camp magnètic de la Terra.
- (b) Calculeu el valor de la fem induïda que es produeix.

Solució: 9,6 mV

Camp magnètic uniforme B dirigit cap a l'interior de la pàgina

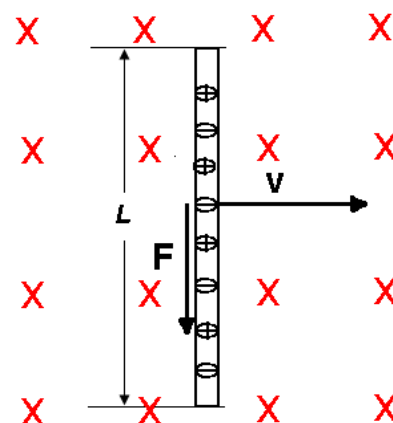


Figura 29. Moviment d'un conductor aïllat de longitud L amb velocitat $\vec{v}$ cap a la dreta i perpendicular al camp magnètic $\vec{B}$

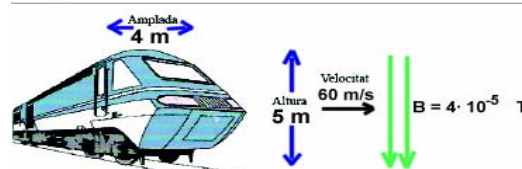


Figura 30. Diagrama per a la Qüestió 28

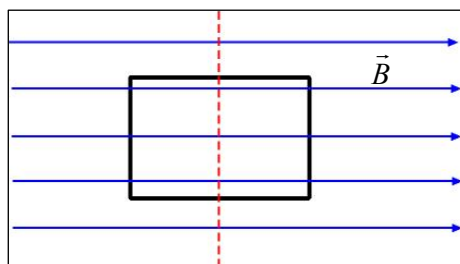


Figura 31. Diagrama per a la Qüestió 30

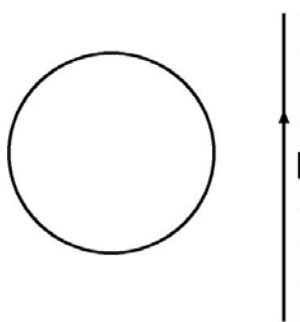


Figura 32. Diagrama per a la Qüestió 31

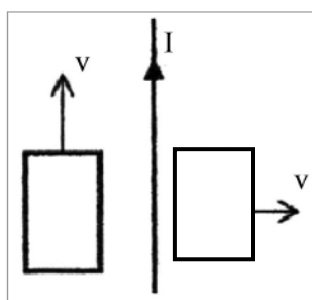


Figura 33. Diagrama per a la Qüestió 33

Qüestions

- 29** Raoneu si circularà o no un corrent elèctric induït per un circuit en repòs travessat per:
- (a) Un camp elèctric i un camp magnètic constants.
 - (b) Un flux magnètic constant i diferent de zero.
 - (c) Un camp magnètic variable.
 - (d) Un camp magnètic i un camp elèctric variables.
- 30** Una espira rectangular es troba en una regió de l'espai on hi ha un camp magnètic uniforme, $\vec{B}$, tal com es veu a la Figura 31. Raoneu si es generarà corrent a l'espira en els casos següents:
- (a) Si es mou l'espira cap a la dreta.
 - (b) Si es fa girar l'espira sobre ella mateixa per la línia de punts.
- 31** Per un conductor rectilini circula un corrent continu d'intensitat I . Al costat hi ha una espira circular situada de manera que el fil rectilini i l'espira estan en un mateix pla (Figura 32).
- (a) Quins seran la direcció i el sentit del camp magnètic creat pel corrent I a la regió de l'espai on és l'espira?
 - (b) Si disminueix el valor d' I , apareixerà un corrent elèctric induït a l'espira? Per què?
- 32** Es disposa d'una bobina, d'un cable elèctric, un imant potent i un amperímetre capaç de mesurar el pas de corrents elèctrics de molt baixa intensitat. Com es pot aconseguir que l'agulla de l'amperímetre assenyali pas de corrent? Feu un diagrama que mostri el circuit. En quina llei es basa l'experiment?
- 33** Per un fil vertical indefinit circula un corrent elèctric d'intensitat I . Si dues espires es mouen amb les velocitats indicades a la Figura 33, s'induirà corrent elèctric en alguna d'elles? En quina? Raoneu la resposta.

3.2.4 Tornem als frens

Ara estem en disposició d'explicar la frenada per corrents de Foucault. Tal i com s'ha vist a l'inici de la Secció 3.2, quan un disc metàl·lic gira en un camp magnètic s'indueix en aquest forces electromotrius en el disc que varien d'acord amb la densitat de flux local i la velocitat del moviment. L'efecte net és la formació d'uns corrents de Foucault en el disc metàl·lic. Aquests corrents, juntament amb el camp magnètic extern, originen forces electromagnètiques que, d'acord amb la llei de Lenz, han d'oposar-se al moviment: per exemple, frenen el disc.

Una de les aplicacions d'aquest fenomen és el sistema de frens electromagnètics. Un disc no ferromagnètic es connecta a una bobina rotatòria. Un camp magnètic, entre el disc (rotor) i la bobina, crea una resistència que s'empra per a generar electricitat o calor. Si s'utilitza un electroimant per a produir el camp magnètic, l'acció resistent es pot controlar variant la intensitat del camp. La força de frenada apareix quan circula corrent elèctric per l'electroimant. El moviment del disc de metall en el camp magnètic de l'electroimant genera corrents de Foucault en el disc. Els corrents de Foucault generen un camp magnètic contrari al que crea l'electroimant, ofereixen resistència a la rotació del disc i generen una força de frenada. Els trens japonesos d'alta velocitat Shinkansen

utilitzaren aquest sistema de frenada durant molt de temps (Figura 34), fins que finalment van ser substituïts per un sistema més modern de frens regeneratius.

Qüestions

- 34 Un fre de bicicleta funciona mitjançant un bloc de goma que pressiona contra la llanta de la roda. És un fre de contacte. Un fre magnètic de corrents de Foucault és un fre de contacte? El fre de mà d'un cotxe és un fre que actua per corrents de Foucault? Justifiqueu les respostes.
- 35 En el disseny d'un fre per corrents de Foucault, com es podria dissenyar el disc per tal d'assegurar que els corrents de Foucault siguin grans?
- 36 Per a una determinada velocitat, un bon sistema de frenada ha de permetre una frenada forta o suau. Suggerix un mètode per fer aquesta classe de control en un fre per corrents de Foucault.



Figura 34. Fre electromagnètic d'un tren Shinkansen (Imatge de TTake-y [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

ACTIVITAT 15 Frenada elèctrica



Un camp magnètic pot frenar un imant en moviment.

3.3 Fabricant corrent altern

L'AVE S-103 que fa la línia Madrid – Barcelona opera sota una electrificació 25 kV, 50 Hz (AC). Què indiquen aquestes dades? Aquest tren funciona amb un corrent altern (AC) de 50 Hz de freqüència i a una tensió de 25.000 V. Com es pot obtenir un corrent altern i altes tensions? Aquesta secció us permetrà estudiar aquests aspectes.

En l'apartat anterior heu vist com es pot generar una fem induïda en una bobina. Aquesta fem és més gran com més de pressa varia el flux magnètic que la travessa. Una aplicació important d'aquest fenomen és l'**alternador** o **generador de corrent altern**.

ACTIVITAT 16 Muntatge d'un generador de corrent altern



En aquesta activitat construïreu un generador de corrent altern senzill fent girar una bobina dins d'un camp magnètic.

La llei de Faraday–Lenz mostra que una variació de flux magnètic origina un corrent elèctric induït. Aquesta variació es pot originar modificant la intensitat del camp magnètic, la superfície del circuit o modificant l'angle que forma el circuit amb les línies de camp.

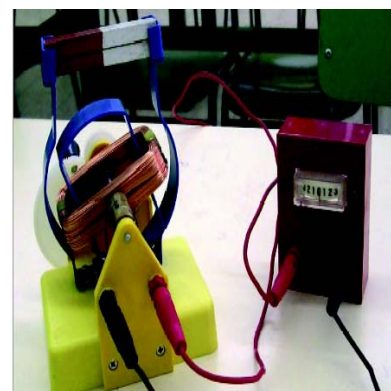


Figura 35. Alternador

Suposeu que teniu una bobina alineada amb el camp magnètic $\vec{B}$ constant, tal com mostra la Figura 35. Si feu girar la bobina amb moviment circular uniforme al voltant de l'eix de la figura (línia de punts vermella) obtindreu un flux magnètic que va canviant en funció del temps. Si la bobina comença a girar quan una de les cares de la bobina és perpendicular a la direcció del camp magnètic i la velocitat angular uniforme de la bobina és ω , resulta que el flux magnètic, d'acord amb l'Equació 10 per a una bobina de N espires, és

$$N\Phi = NBA\cos\theta = NBA\cos(\omega t)$$

on θ és l'angle que formen el camp magnètic $\vec{B}$ i el vector $\vec{A}$, i per tant, l'angle girat per la bobina en un temps t , és $\theta = \omega t$. Fixeu-vos que el flux magnètic a través de la bobina varia temporalment i per tant, d'acord amb la llei de Faraday, s'indueix una fem. Per a calcular-la s'aplica l'Equació 14 i s'obté

$$\varepsilon = \frac{d(N\Phi)}{dt} = -\frac{d(NBA\cos(\omega t))}{dt} = NBA\omega\sin(\omega t) \quad (14)$$

Fixeu-vos, que la fem induïda té una variació sinusoidal en el temps. Els valors màxims de la fem, en positiu i en negatiu, s'assoleixen quan el $\sin(\omega t)$ pren el valor +1 o -1, essent la fem màxima el producte NBA . La força electromotriu màxima es representa per ε_m

$$\varepsilon_m = NBA\omega$$

i l'Equació 14 es pot reescriure

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t) \quad (15a)$$

Generador de corrent altern

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccio/generador/generador.htm#Actividades>

L'energia mecànica necessària per a moure la bobina prové, habitualment, d'un salt d'aigua, un molí de vent o una turbina, i encara que els generadors de corrent elèctric de les centrals de producció d'energia elèctrica són més complexos, funcionen a partir de la mateixa idea: obtenir una fem sinusoidal produïda per una bobina que gira en un camp magnètic.

El canvi de signe de la força electromotriu ens indica el canvi de sentit del corrent elèctric induït en la bobina i d'aquí el nom de **corrent altern**.

La tensió, V , aplicada a un circuit extern al generador, o a un element d'aquest circuit, es pot considerar com una part d'aquesta fem, i té una expressió anàloga

$$V = V_m \sin(\omega t)$$

D'acord amb la **llei d'Ohm**, la intensitat de corrent s'expressa com el quocient entre la fem i la resistència elèctrica del circuit R (inclosa la

bobina que gira en el camp magnètic). Donada la variació temporal de la fem, Equació (15a), la intensitat de corrent induït que circula pel circuit, I , s'expressa com

$$I = I_m \sin(\omega t) \quad (15b)$$

on I_m és el valor màxim de la intensitat i és igual a

$$I_m = \frac{NBA\omega}{R}$$

ACTIVITAT 17 El motor com a dinamo i com a alternador

Aquest senzill muntatge us permetrà veure la reversibilitat dels efectes d'un motor i d'una dinamo.

3.3.1 Potència mitjana del corrent altern

Recordeu que en un circuit de corrent continu la potència dissipada en un circuit de resistència elèctrica R és

$$P = I^2 R$$

En un circuit de corrent altern el valor de la potència ve donat per la mateixa expressió, però en aquest cas la tensió i la intensitat depenen del temps (Equacions 15a i 15b) i, per tant, la potència també. La potència calculada segons aquestes expressions és la **potència instantània**.

Normalment, més que el valor instantani de la potència dissipada en el circuit, interessa conèixer la potència mitjana dissipada en un o més cicles. La **potència mitjana** en un cicle serà igual a la suma de les energies que corresponen a les potències instantànies al llarg del cicle, dividida per la durada del cicle, el període T . Gràficament això es pot calcular a través de l'àrea del gràfic potència-temps en un període, la qual representa l'energia dissipada en un període. Si posteriorment es divideix aquesta energia entre el temps corresponent a un període, s'obté el valor de la potència mitjana, $\bar{P}$.

El gràfic de la Figura 36 mostra el gràfic P - t . En el gràfic es pot veure que l'àrea ratllada del gràfic, és igual a l'àrea del rectangle que té per base el període T i per altura $\frac{P_{\max}}{2}$, de manera que el valor de la potència mitjana és

$$\bar{P} = \frac{P_{\max}}{2} = \frac{RI_{\max}^2}{2} \quad (16)$$

3.3.2 Valor eficaç

El **valor eficaç** de la tensió o de la intensitat d'un corrent altern aplicat a un circuit purament resistiu és el valor que tindria la tensió o la intensitat

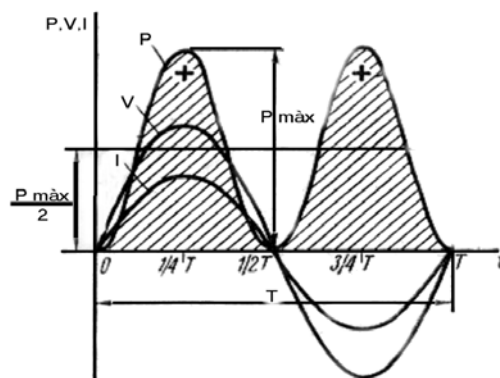


Figura 36. Gràfic de la potència, P , de la intensitat, I , i del voltatge, V , instantanis en funció del temps d'un circuit de corrent altern

d'un corrent continu que dissipés la mateixa energia que el corrent altern, en aquest mateix circuit i en el mateix interval temps.

Es poden aplicar les equacions que ja coneixeu del corrent continu al corrent altern, utilitzant els valors eficaços de la tensió i de la intensitat. Així la potència mitjana dissipada en un circuit de corrent altern purament resistiu és

$$\bar{P} = RI_e^2$$

on I_e és el valor eficaç de la intensitat de corrent. Igualant l'expressió anterior amb la que dona l'Equació 16 s'obté el **valor eficaç de la intensitat de corrent**

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Per un procediment semblant es pot determinar l'expressió per a calcular la **tensió eficaç**, V_e , que és

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

El valor eficaç d'una magnitud que variï sinusoidalment és igual al seu valor màxim dividit per $\sqrt{2}$. Els voltímetres i els amperímetres que habitualment s'utilitzen estan dissenyats per a mesurar valors eficaços de la tensió i de la intensitat més que no pas els valors màxims.

La potència mitjana subministrada pel generador de corrent altern es calcula com

$$\bar{P} = \mathcal{E}_e I_e$$

Qüestions

37 Un corrent altern de tensió eficaç 25 V proporciona a una resistència elèctrica una potència de 100 W.

- (a) Quina intensitat eficaç circula per la resistència?
- (b) Quanta energia s'ha subministrat a la resistència en 30 minuts? (Expresseu el resultat en J i en kW·h.)

Solució: 4 A
Solució: 180.000 J

38 Un tren d'alta velocitat porta dos motors de 1400 kW de potència cada un, en paral·lel. Si el corrent de treball del tren és de 1500 V de tensió eficaç, calculeu la intensitat eficaç que passa per cada motor. (Aquests càlculs donaran un valor aproximat al valor real, ja que els motors elèctrics no són circuits purament resistius.)

Solució: 933 A

39 Una estufa té una potència de 1200 W. Si la tensió eficaç de la xarxa és de 230 V, calculeu la intensitat de corrent eficaç que hi circula.

Solució: 5,2 A

Qüestions

- 40 Calculeu la potència mitjana d'un aparell elèctric que funciona a 125 V de tensió eficaç i pel qual hi circulen 10 A d'intensitat eficaç.

Solució: 1250 W

- 41 Calculeu la tensió i la intensitat màximes d'un circuit de corrent altern que té una potència màxima de 2200 W si la resistència del conductor del circuit és de 22 Ω . Quina quantitat de calor dissiparà aquest circuit en una hora de treball? Expressau el resultat en joules i en calories. (Dada: 1 cal = 4,18 J).

Solució: 14,1 A; 311 V; $1,89 \cdot 10^6$ cal

- 42 La potència del corrent altern subministrada a les llars per la companyia elèctrica en l'Estat espanyol té una freqüència de 50 Hz i un voltatge de 220 V. La tensió en els endolls és de 220 V, independentment del corrent que hi circuli, i tots els aparells estan connectats en paral·lel. Trobeu:

- (a) El corrent que consumeix un escalfador de 1600 W connectat a un dels endolls?
- (b) Si ara s'hi connecta una batedora de 500 W en un altre endoll, quin corrent consumirà?
- (c) La majoria de les instal·lacions elèctriques de les llars estan calculades per a resistir un corrent màxim de entre 15 A i 20 A.
- (d) Què pot passar si se supera el corrent màxim de la instal·lació? Se us acut alguna manera o algun mecanisme perquè això no passi? Penseu en la instal·lació de casa vostra, quins mecanismes de seguretat té?
- (e) Quin és el valor màxim de la potència mitjana que pot suportar un interruptor general de 20 A?
- (f) Quin serà el corrent consumit si teniu connectar al mateix temps l'escalfador de 1600W, la batedora de 500 W, la cuina de 1200 W, un radiador de 800 W i 5 làmpades de 60 W cadascuna?
- (g) Què passarà si a més hi connecteu una planxa de 1800 W?

Solució: 7,3 A

Solució: 9,6 A

Solució: 4400 W

Solució: 20 A

3.4 Cap al voltatge correcte

El camí de l'electricitat

L'AVE S-103 necessita una tensió de 25 kV per a fer funcionar els 16 motors de corrent altern. Aquesta electricitat, generada per una central elèctrica arriba al tren a través d'unes línies de conducció.

http://ciencia.elortegui.org/datos/2BACHFIS/shock/Camino_electricidad.swf

Els canvis de tensió en el corrent altern s'obtenen amb l'ús de transformadors que són uns aparells formats per dues bobines aïllades,

amb diferent nombre d'espises; ambdues estan enrotllades a un nucli de ferro comú a les dues bobines, generalment rectangular, format per un premsat de làmines de ferro (per a evitar pèrdues de potència per corrents de Foucault). El transformador a més de modificar el voltatge, modifica també la intensitat d'un corrent altern amb les mínimes pèrdues de potència.

En l'Activitat 16 heu vist com un camp magnètic variable en un solenoide origina un corrent induït en un altre solenoide situat a prop del primer. En aquell cas es tractava d'un pols de corrent produït pel canvi sobtat del camp magnètic. Però si el camp magnètic és produït per un corrent altern que circula per un solenoide, el camp magnètic canviarà contínuament i això generarà un corrent altern en el segon solenoide. Per obtenir el màxim efecte possible, les bobines dels solenoides s'han d'enrotllar una a continuació de l'altra. Això vol dir que tot el camp del primer solenoide passa a través del segon, augmentant així el flux d'unió entre els dos solenoides. A més, el flux magnètic a través de les dues bobines s'incrementa introduint un nucli de ferro dolç en l'interior de les bobines.

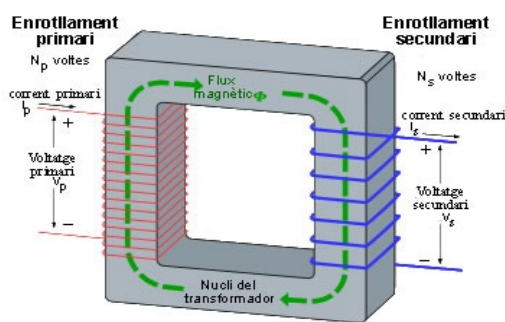


Figura 37. Diagrama d'un transformador amb N_P espises el circuit primari i N_S en el secundari. (Adaptació de la imatge de BillC [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

El primer solenoide, anomenat **primari**, té N_P espises i està connectat a un voltatge d'entrada V_P (Figura 37). En la segona bobina, el **secundari**, el nombre d'espises és N_S , i s'obté un voltatge de sortida V_S . L'Activitat 18 il·lustra sobre la relació de voltatges en el primari i en el secundari, corrents en les bobines i potència, amb la proporció del nombre d'espises N_P/N_S .

ACTIVITAT 18 Transformadors



Construiu circuits amb nuclis en forma de ferradura, o tancats amb un quadre de ferro com a nucli, i bobines per a treballar els transformadors. Investigueu les relacions entre els voltatges d'entrada i sortida, les intensitats que circulen pel primari i pel secundari i les potències d'entrada i de sortida amb un simulador de circuits.

A l'Activitat 18 haureu observat que la proporció entre el voltatge d'entrada i el de sortida és igual que la proporció entre el nombre d'espises del primari i el del secundari

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad (19)$$

Si N_S és més gran que N_P , això dona un voltatge de sortida més gran que el d'entrada (**transformador elevador**): el transformador “eleva” (“apuja”) el voltatge; en canvi el “disminueix” (“abaixa”) quan N_S és menor que N_P (**transformador reductor**).

El transformador

Variant el nombre d'espises del primari o del secundari es pot variar la tensió de sortida.

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transformer/>

Un transformador ideal transfereix l'energia del primari al secundari amb un rendiment del 100 %. Això significa que, en un transformador ideal, la potència d'entrada és igual que la de sortida

$$V_P I_P = V_S I_S \quad (20)$$

Si es comparen les dues Equacions 19 i 20 s'arriba a la conclusió que el nombre d'espores i la intensitat de corrent són inversament proporcionals

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \quad (21)$$

Un transformador elevador augmenta la tensió però abaixa la intensitat. D'altra banda, un transformador real té una potència de sortida menor que la d'entrada i, per tant, la proporció de les intensitats és inferior a la teòrica. Una possible causa d'això és el disseny del nucli. Per a obtenir un rendiment del 100 % tot el flux magnètic del primari hauria de passar pel secundari. Però en realitat això no passa mai. A més, no tota la potència d'entrada es “transforma” en potència elèctrica a la sortida. Part de l'energia es perd en escalfar les bobines i en els moviments d'atracció i repulsió magnètica originats en diverses parts del transformador i això produeix un brunzit de baixa freqüència, el qual ja s'haurà detectat a l'Activitat 18. La Qüestió 45 identifica una altra via de pèrdues d'energia per part del transformador.

Qüestions

- 43** A França l'electricitat se subministra a 25 kV i a Bèlgica a 3.000V, però els motors necessiten 1.500 V. Si el primari té 1.000 espores, quantes espores ha de tenir el secundari a cada país?

Solució: 60 i 500

- 44** El corrent del tercer rail de 750 V és convertit en un corrent altern i després la tensió s'apuja fins als 1.500V de tensió de treball dels motors. La potència del motor és de 1.200 kW.

- (a) Quina és la relació d'espores?
(b) Quin és el corrent del primari?

Solució: 0,5
Solució: 1600 A

- 45** Quan s'estudia el camp magnètic d'una bobina per la qual circula un corrent altern, un estudiant observa que el nucli de ferro al voltant del qual la bobina està enrotllada s'escalfa molt.

- (a) Expliqueu l'origen d'aquest escalfament. (Pista: repasseu el treball fet en la secció dels frens.)
(b) Els nuclis de ferro emprats en els solenoides i els transformadors són normalment laminats, és a dir, construïts amb làmines fines enganxades, en lloc d'un bloc de ferro compacte. Feu ús de la resposta de l'apartat anterior per a suggerir una explicació d'aquest disseny.

4 Una última volta

Heu estudiat una de les àrees importants de la física: l'electromagnetisme. Els fonaments del magnetisme, els materials magnètics, els imants i les fonts de camp magnètic es van estudiar en l'apartat 1 de la unitat. La força magnètica i algunes aplicacions, com són els motors, s'han treballat en l'apartat 2. En el tercer apartat s'ha vist com poden actuar forces electromagnètiques sobre un conductor pel qual circula un corrent elèctric quan està dins d'un camp magnètic, i com els canvis en el flux magnètic produeixen inducció electromagnètica de corrent. Finalment heu treballat l'aplicació del fenomen de la inducció en la construcció de transformadors.

ACTIVITAT 19 Més ràpid, més segur, més ecològic



Els entusiastes del ferrocarril afirmen que en els propers anys es veurà el naixement d'una nova època per al transport ferroviari. Els problemes ambientals i la congestió de les carreteres situen de nou els trens en el centre d'atenció per a resoldre aquests problemes. L'extraordinària tecnologia aplicada en els trens d'alta velocitat que circulen per gran part d'Europa, competint amb el transport aeri, reforça la idea del naixement d'aquesta nova era.

4.1 Objectius

En acabar aquesta unitat heu de ser capaços de:

- Saber que els camps magnètics són creats per càrregues en moviment.
- Saber deduir la direcció i el sentit del camp creat per un corrent elèctric.
- Conèixer algunes fonts de camp magnètic, saber dibuixar les línies de camp i conèixer les principals magnituds que el caracteritzen.
- Descriure qualitativament i quantitativa les forces magnètiques que actuen sobre càrregues en moviment en el si d'un camp magnètic i entre corrents elèctrics paral·lels.
- Relacionar el fenomen de la inducció electromagnètica amb la variació de flux magnètic i conèixer les lleis de Lenz i Faraday.
- Distingir entre situacions de generació de fem i corrents induïts i saber determinar el sentit del corrent.
- Assenyalar els trets que caracteritzen un corrent altern, explicar com es genera i justificar-ne la idoneïtat per al transport i l'ús.
- Conèixer els conceptes d'intensitat eficaç, voltatge eficaç i potència mitjana d'un circuit de corrent altern.
- Saber com funcionen els transformadors i quina és la seva funció.

4.2 Activitats i Qüestions finals

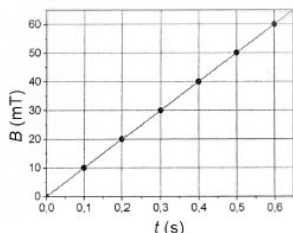


Figura 38. Gràfic per a la Qüestió 46

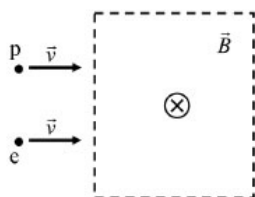


Figura 39. Esquema per a la Qüestió 47

ACTIVITAT 20 Mapa conceptual de la unitat

Feu un mapa conceptual amb els següents termes que apareixen al llarg de la unitat:

Camp magnètic, intensitat del camp magnètic, tesla, línies de camp magnètic, imants, corrents elèctrics, espira, electroimant, força electromagnètica, regla del cargol, espectròmetre de masses, motor elèctric, corrents de Foucault, velocitat de gir, nombre d'espires, flux del camp magnètic, força electromotriu induïda, superfície de l'espira, nombre d'espires, corrent altern, potència del corrent altern, potència mitjana, valors eficaços del corrent altern, transformador, nombre d'espires del primari, nombre d'espires del secundari.

Per tal de donar-vos una pista, penseu en els tres aspectes fonamentals del camp magnètic, dels quals podeu fer tres direccions en el mapa: Generació de camp magnètic i caracterització d'aquest, forces exercides pel camp magnètic i, per últim, inducció electromagnètica. Intenteu situar els termes dins d'aquests tres grans apartats. Penseu que alguns estaran en els tres.

Qüestions selectivitat

46 En un circuit de 50 cm^2 de superfície, hi apliquem un camp magnètic perpendicular al pla que defineix el circuit. El seu mòdul varia amb el temps, tal com es representa en la gràfica de la Figura 38.

- Determineu l'equació amb què s'obté la variació del camp magnètic en funció del temps.
- Calculeu el valor de la força electromotriu induïda en el circuit.

Solució: $0,1 \text{ t}$
Solució: $5 \cdot 10^{-4} \text{ V}$

47 Un protó i un electró, amb la mateixa velocitat, entren en una regió de l'espai on hi ha un camp magnètic uniforme dirigit cap a l'interior del paper, tal com indica la Figura 39. Dibuixeu les forces que actuen sobre cada partícula en l'instant en què entren a la regió on hi ha el camp. Són iguals els mòduls d'aquestes forces? Descriviu i justifiqueu el moviment que seguirà cadascuna de les partícules.

Qüestions selectivitat

48 Es col·loca per sobre d'una balança un imant amb els pols N i S enfrontats. Tal com veiem en la Figura 40a, entre aquests dos pols passa un fil conductor horitzontal que no toca l'imant. El fil elèctric s'aguanta mitjançant dos suports aïllants que es recolzen sobre el plat de la balança. En absència de corrent elèctric pel fil, la balança indica un pes de 2,400 N. Quan circula corrent elèctric pel fil conductor, la balança indica pesos aparents més petits, que depenen de la intensitat del corrent, a causa de l'aparició d'una força magnètica cap amunt. S'han fet circular pel fil diverses intensitats i s'han obtingut els resultats que es mostren en la Figura 40b, en què F és el pes aparent registrat per la balança i I és la intensitat del corrent que circula pel fil conductor.

- (a) Determineu l'equació que relaciona la força amb la intensitat. Calculeu la força magnètica que actua sobre el fil elèctric quan la intensitat del corrent és 2,0 A i quan és 2,5 A.
- (b) Considereu que el tram de fil situat entre els pols de l'imant té una longitud de 6 cm i que el camp magnètic és uniforme (constant) dins d'aquesta zona i nul·l a fora. Calculeu el camp magnètic entre els pols de l'imant. En quin sentit circula el corrent elèctric?

Solució: 2,388 N; 2,385 N
Solució: 0,1 T

49 Un imant penja d'una molla sobre una bobina conductora, fixada a terra, i un voltímetre tanca el circuit de la bobina, tal com mostra la Figura 41. Quan es produeix un terratrèmol, l'imant es manté immòbil, mentre que la bobina puja i baixa seguint els moviments del terra.

- (a) Expliqueu què indicarà el voltímetre en les tres situacions següents:
- (b) 1. El terra puja.
- (c) 2. El terra baixa.
- (d) 3. No hi ha cap terratrèmol (i el terra no es mou).
- (e) Si retirem el voltímetre i apliquem un corrent elèctric altern a la bobina, quin efecte es produirà en l'imant suspès a sobre? Justifiqueu la resposta.

50 En una regió àmplia de l'espai hi ha un camp magnètic dirigit en la direcció de l'eix y , de mòdul $5,0 \cdot 10^{-5}$ T, tal com mostra la Figura 42a. Calculeu:

- (a) El mòdul i el sentit que ha de tenir la velocitat d'un electró que es mou en la direcció de l'eix x , perquè la força magnètica sigui vertical (eix z), de mòdul igual que el pes de l'electró i de sentit contrari.
- (b) Una espira quadrada de $0,025 \text{ m}^2$ de superfície gira, en la regió on hi ha el camp magnètic anterior, amb una velocitat angular constant de $100\pi \text{ rad/s}$, al voltant d'un eix fix que passa per la meitat de dos dels seus costats oposats, tal com s'indica en la Figura 42b. Calculeu l'expressió de la força electromotriu induïda en funció del temps.
- (c) DADES: $m_{\text{electró}} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $q_{\text{electró}} = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $g = 9,80 \text{ m/s}^2$.

Solució: $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Solució:

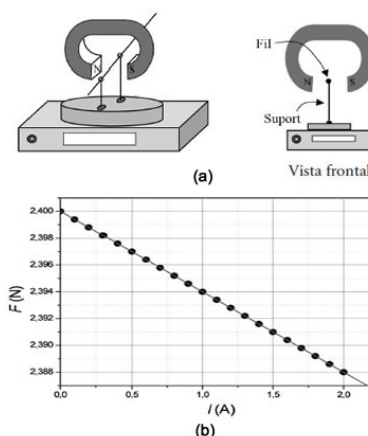


Figura 40. (a) Esquema del muntatge experimental per a la Qüestió 48. (b) Gràfic corresponent a la Qüestió 48

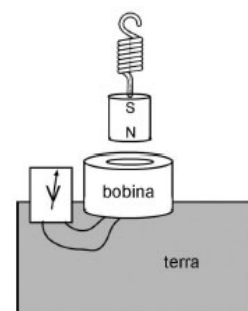


Figura 41. Imatge per a la Qüestió 49

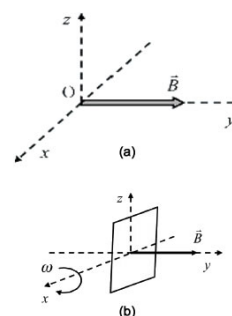


Figura 42. Imatge per a la Qüestió 50

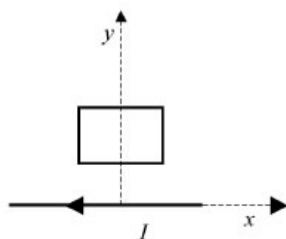


Figura 43. Esquema per a la Qüestió 51

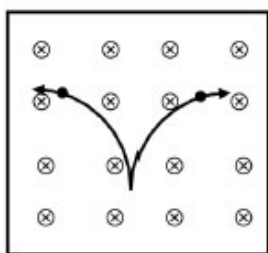


Figura 44. Esquema per a la Qüestió 52

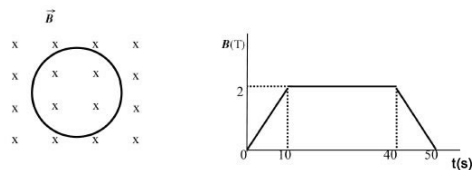


Figura 45. Imatge per a la Qüestió 54

Qüestions selectivitat

51 Tenim una espira a prop d'un fil rectilini indefinit, tal com indica la Figura 43:

- Justifiquem si apareixerà un corrent induït en l'espira si
- la movem en la direcció x .
- la movem en la direcció y .
- Dibuixem el camp magnètic creat pel fil rectilini indefinit i la força que actua sobre cada costat de l'espira, quan hi circula un corrent elèctric en sentit horari. De les dues forces que actuen sobre els dos costats paral·lels al fil rectilini indefinit, quina és la més gran? Justifiquem la resposta.

52 La Figura 44 representa una cambra d'ionització en què s'observa l'aparició d'un electró i d'un positró que tenen la mateixa energia. El camp magnètic que hi ha a la cambra d'ionització és de $2 \cdot 10^{-4}$ T i està dirigit cap a l'interior del paper. Indiqueu la trajectòria del positró i la de l'electró i justifiqueu la resposta. Si les dues trajectòries tenen un radi equivalent de 5,80 m, determineu la velocitat de les partícules.
Dades: $q_{\text{electró}} = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C; $q_{\text{positró}} = +1,602 \cdot 10^{-19}$ C; $m_{\text{electró}} = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg

Solució: $2,04 \cdot 10^8$ m·s⁻¹

53 Un timbre funciona a 12,0 V de tensió i 0,200 A d'intensitat. Per tal de poder-lo connectar a la xarxa elèctrica i que funcioni correctament, disposa d'un transformador ideal que té 20 espires en el secundari.

- Connectem el primari del transformador a un corrent altern de 220 V. Calculeu quantes espires té el primari i quina intensitat de corrent hi circula.
- Si connectem el primari d'aquest transformador a un corrent continu de 24 V, quina intensitat de corrent circularà pel timbre? Justifiquem la resposta.

Solució: 0,011 A; 367 espires

54 Una espira de radi $r = 25$ cm està sotmesa a un camp magnètic que és perpendicular a la superfície que delimita l'espira i de sentit entrant. En la Figura 45 es mostra el valor de la inducció magnètica B en funció del temps:

- Expliqueu raonadament si circula corrent elèctric per l'espira en cadascun dels intervals de temps indicats i determineu-ne, si s'escau, el sentit de circulació.

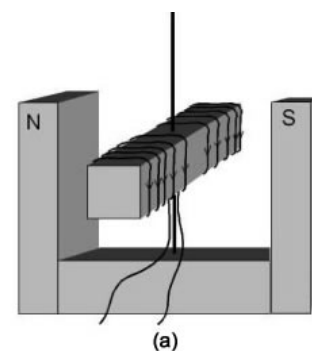
- Calculeu la intensitat de corrent elèctric en cada interval de temps, si la resistència de l'espira és 5 Ω . Recordeu que la llei d'Ohm estableix que $I = \frac{\Delta V}{R}$

Solució: $3,93 \cdot 10^{-2}$ V; $7,85 \cdot 10^{-3}$ A

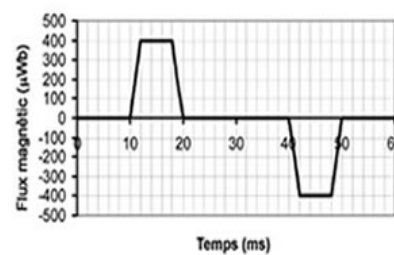
Qüestions selectivitat

55 En la Figura 46a es mostra un dispositiu format per una barra de ferro que pot girar lliurement al voltant d'un eix vertical entre els pols d'un imant permanent de ferradura. Un fil elèctric aïllat envolta la barra.

- (a) Fem circular un corrent continu pel fil elèctric en el sentit indicat en la figura. Dibuixeu les línies del camp magnètic generat per l'electroimant i expliqueu raonadament com es mourà la barra.
- (b) Si fem girar la barra sense fer circular cap corrent elèctric, tenim un generador. En la gràfica de la Figura 46b es mostra la variació del flux magnètic (Φ) a través de la bobina en funció del temps quan la barra gira. Expliqueu raonadament en quins moments hi ha força electromotriu (FEM) induïda en les espires.



(a)



(b)

Figura 46. Esquema per a la Qüestió 55