

Mesura del cicle d'histèresi dinàmic d'un material ferromagnètic

Jordi-Roger Riba Ruiz* i Òscar Bertran Cánovas†

Introducció

Els materials ferromagnètics tenen moltes aplicacions. Per exemple, en el camp de l'electricitat industrial, sense aquests materials no seria possible la construcció de la major part de les màquines i dels dispositius electro-mecànics com ara transformadors, generadors, motors, contactors, etc. Els materials ferromagnètics també tenen moltes altres aplicacions, s'usen en la fabricació d'ímants permanents i en aplicacions com, per exemple, bandes magnètiques per a targetes de crèdit o bitllets de transport públic, discs durs d'ordinadors, cintes de so i de vídeo, aplicacions en el camp dels sensors, etc. Cada aplicació requereix un material ferromagnètic amb unes propietats magnètiques adequades. Per tant, són materials amb un present i un futur molt prometedors. El cicle d'histèresi d'un material ferromagnètic permet determinar-ne les característiques magnètiques més representatives i, per tant, les aplicacions que pot tenir. A més, l'àrea tancada dins del cicle d'histèresi ens informa de la dissipació d'energia en forma de calor que es produeix en cada cicle a causa de la reordenació dels dominis ferromagnètics de l'interior del material. En aquest treball es proposa una pràctica senzilla que permet mesurar i visualitzar experimentalment el cicle d'histèresi dinàmic d'un material ferromagnètic.

Classificació dels materials ferromagnètics

Els materials ferromagnètics són aquells que presenten una permeabilitat magnètica relativa molt superior a la unitat; és a dir, a causa de l'orientació dels dominis ferromagnètics en la direcció d'un camp magnètic extern, el camp magnètic a l'interior del material serà superior al camp magnètic extern aplicat. Els materials ferromagnètics es classifiquen en dos grans grups: els materials ferromagnètics tous i els materials ferromagnètics durs. Els *materials ferromagnètics tous* presenten un cicle d'histèresi alt i estret, i són aptes per als nuclis de la major part de les màquines elèctriques ja que tenen un magnetisme romanent B_r i un camp coercitiu H_c baixos. Això indica que, en anul·lar-se el camp magnetitzador exterior, pràcticament no queden magnetitzats. Alguns

exemples d'aquests materials són els aliatges ferro-silici (molt utilitzats en els nuclis de la major part de les màquines elèctriques), els aliatges níquel-ferro, les ferrites toves (utilitzades en aplicacions d'alta freqüència), etc. Els materials ferromagnètics durs també s'empren per fer pantalles de camp magnètic. Per contra, els *materials ferromagnètics durs* tenen un cicle d'histèresi més quadrat i presenten un magnetisme romanent B_r i un camp coercitiu H_c més intensos; per tant, són més difícils de desmagnetar que els materials ferromagnètics tous. Aquests materials resten fortament magnetitzats en anul·lar-se el camp magnetitzador H exterior i són aptes per fer ímants permanents. Entre els materials ferromagnètics durs utilitzats per fer ímants permanents podem esmentar les ferrites dures, els aliatges tipus Al-Ni-Co (aliatges de ferro amb alumini, níquel i cobalt) i els aliatges Sm-Co i Nd-Fe-B (material que permet fer ímants més potents). Un dels criteris de qualitat més utilitzats en els ímants permanents és que el valor màxim de $(B \cdot H)_{\text{màx}}/2$ sigui com més elevat millor.

El cicle d'histèresi

En els materials ferromagnètics el valor de la inducció magnètica B que es produeix a l'interior del material a causa d'una determinada excitació magnètica exterior H no és una funció lineal, sinó que depèn de la història del material. Per tant, com que es compleix que $B = \mu \cdot H$, això indica que el valor de la permeabilitat magnètica μ no és constant, sinó que té una dependència complexa en relació amb el valor de l'excitació magnètica H . Quan s'introdueix una mostra de material ferromagnètic a l'interior d'una bobina i es fa variar l'excitació magnètica H modificant la intensitat del corrent que hi circula, s'obté la corba de la figura 1, anomenada *cicle d'histèresi*.

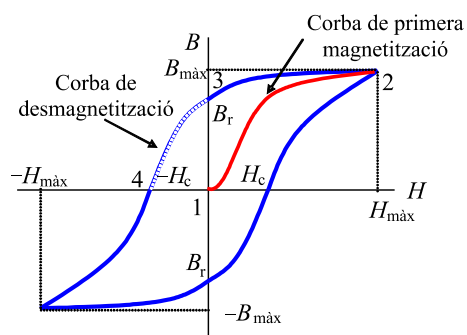


Figura 1: Cicle d'histèresi d'un material ferromagnètic

*Jordi-Roger Riba Ruiz (Igualada, 1966) és doctor en Ciències Físiques per la UB i és professor de l'EUETI d'Igualada i de l'ETSEI de Terrassa (jordi@euetii.upc.edu).

† Òscar Bertran Cánovas (Igualada, 1967) és doctor en Ciències Físiques per la UB i és professor de l'EUETI d'Igualada (oscar@euetii.upc.edu).

Observant la figura 1, en el punt 1 el material ferromagnètic està desmagnetitzat. En aplicar un camp magnetitzant H creixent, també augmenta la inducció magnètica B a l'interior del material fins que s'assoleix el punt 2 que correspon a $H = H_{\max}$ i $B = B_{\max}$. La no-linealitat de la corba entre els punts 1 i 2 implica que la permeabilitat magnètica μ no és constant. Si ara es disminueix el valor del camp magnetitzant H , també es redueix el valor de la inducció magnètica B a l'interior del material, però seguint un camí diferent al recorregut per passar d'1 a 2. Quan es fa $H = 0$, punt 3, encara resta una certa magnetització $B = B_r$ en el material, anomenada *inducció romanent*, que constitueix l'estat de magnetització permanent de la mostra. Quan $B = 0$, punt 4, H presenta un valor H_c denominat *camp coercitiu*, que és el camp oposat que cal aplicar per desmagnetitzar la mostra. La part del cicle d'histèresi compresa entre els punts 3 i 4 s'anomena *corba de desmagnetització*. Si es continua disminuint H fins assolir $H = -H_{\max}$, i després s'augmenta H , s'arriba a formar la corba tancada de la figura 1 anomenada *cicle d'histèresi*. El cicle d'histèresi és una representació gràfica dels diferents estats pels quals passa el material ferromagnètic al llarg del cicle de treball. L'àrea tancada a l'interior de la corba BH correspon a la densitat d'energia dissipada en forma de calor pel material en un cicle d'histèresi complet. Per tant, com que l'àrea interior del cicle d'histèresi dels materials tous és més petita que la dels materials ferromagnètics durs, els primers dissipen menys energia en cada cicle.

La figura 2 mostra el cicle d'histèresi corresponent a un material ferromagnètic tou i a un material dur. En la

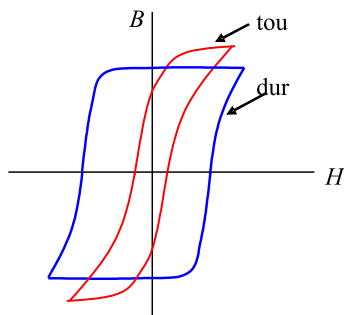


Figura 2: Cicles d'histèresi d'un material ferromagnètic tou i d'un material ferromagnètic dur

figura 2 s'observa que els materials tous (emprats en els nuclis de les bobines i de les màquines elèctriques) tenen un camp coercitiu H_c petit, és a dir, són fàcils de desmagnetitzar, mentre que els materials durs (emprats en imants permanents) presenten un H_c elevat i, per tant, són difícils de desmagnetitzar. D'altra banda, els materials ferromagnètics tous tenen menys pèrdues magnètiques que els materials durs perquè l'àrea del cicle d'histèresi és més petita. La figura 3 mostra la corba de

primera magnetització d'un material ferromagnètic tou i la permeabilitat magnètica relativa $\mu_r = B/(\mu_0 \cdot H)$ en cada punt:

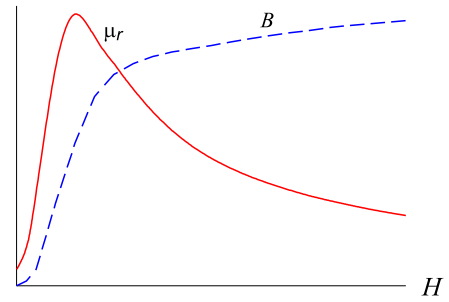


Figura 3: Corbes de primera magnetització i de la permeabilitat relativa d'un material ferromagnètic

A partir de la figura 3 es comprova que la permeabilitat relativa dels materials ferromagnètics depèn fortament del camp exterior H aplicat i que aquesta disminueix molt per intensitats de camp molt febles i en la zona de saturació magnètica del material. El cicle d'histèresi es pot obtenir o bé aplicant una tensió alterna a una bobina amb nucli de material ferromagnètic (cicle d'histèresi dinàmic) o bé aplicant una tensió contínua l'amplitud de la qual es va variant lentament (cicle d'histèresi normal). En el cas del cicle d'histèresi dinàmic, a més de les pèrdues degudes a la histèresi pròpia del material, es produeixen pèrdues degudes als corrents paràsits de Foucault, fet que produeix que l'àrea tancada pel cicle dinàmic sigui una mica més gran que en el cas del cicle normal.

Muntatge experimental per a la mesura del cicle d'histèresi dinàmic

La figura 4a mostra un possible muntatge experimental per a la mesura del cicle d'histèresi dinàmic. En aquest circuit, però, els terres del primari i del secundari són diferents i no tots els oscil·loscopis permeten treballar amb dues referències.

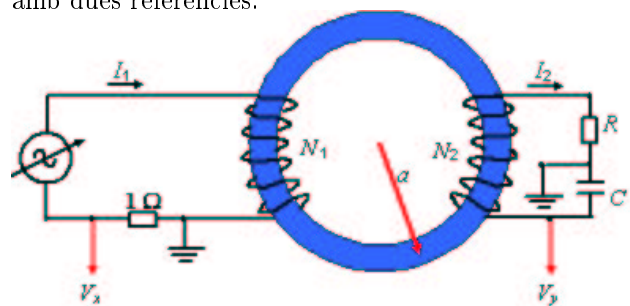


Figura 4a: Dispositiu experimental per a la mesura del cicle d'histèresi dinàmic d'un material ferromagnètic amb integrador al secundari

Per solucionar el problema anterior, es pot utilitzar el circuit de la figura 4b. Aquesta figura mostra el muntatge experimental utilitzat en aquesta experiència per

a la mesura experimental del cycle d'histeresi d'un material ferromagnètic usant un oscil·loscopi de dos canals.

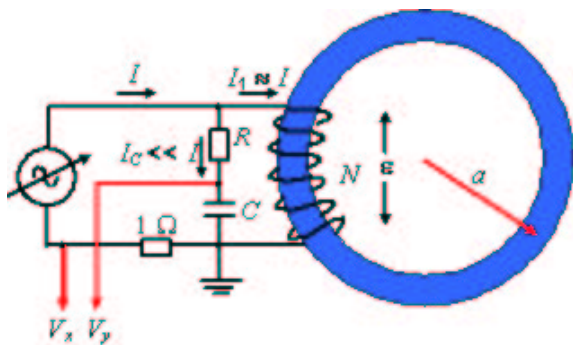


Figura 4b: Dispositiu experimental per a la mesura del cycle d'histeresi dinàmica d'un material ferromagnètic

El material necessari per dur a terme aquest experiment és el següent:

- 1) Una font de tensió alterna regulable de 50 Hz amb el terra aïllat de la xarxa elèctrica.
- 2) Una bobina de N espires amb un nucli ferromagnètic laminat de secció S i longitud mitjana del circuit magnètic l (en el cas d'un nucli toroidal de radi mitjà a , resulta $l = 2\pi a$; el nucli es lamina per evitar les pèrdues degudes als corrents paràsits de Foucault). En les botigues de material elèctric es poden aconseguir transformadors toroidals a baix preu i, eliminant un dels dos enrotllaments, s'obté la bobina sola. La bobina utilitzada té una tensió d'alimentació nominal de 12 V.
- 3) Una resistència $R = 1M\Omega$ d'un quart de watt i un



Figura 5: Bobina utilitzada en l'experiment

condensador de corrent altern de capacitat $C = 1\mu F$.

4) Una resistència $R = 1\Omega$ (serveix per mesurar la intensitat del corrent en un oscil·loscopi, l'hem agafada d'un watt de màxima dissipació de potència). Suposarem negligible el seu efecte en el circuit; per tant, és com si no hi fos.

5) El cycle d'histeresi es mesura amb un oscil·loscopi de dos canals en mode XY (V_x és la tensió que mesura la sonda X i V_y és la tensió mesurada per la sonda Y).

La impedància resultant de connectar en sèrie la resistència $R = 1M\Omega$ i el condensador $C = 1\mu F$ a una

frequència de 50 Hz és:

$$\bar{Z} = R - jX_c = R - \frac{j}{2\pi fC} = 10^6 - j \cdot 3183,10 \Omega$$

d'on resulta:

$$|\bar{Z}| = 1000005,07\Omega \quad i \quad \varphi_{\bar{Z}} = 0,18^\circ$$

S'obté un valor molt elevat de la impedància i, per tant, el corrent que hi circula serà insignificant en comparació del corrent que circula per la bobina. Observant la figura 4b es complirà $I_1 \approx I$. A més la impedància es comporta pràcticament com una resistència pura perquè el seu angle de fase és quasi nul. El corrent $I_C \ll I$ a través d'aquesta impedància forçosament ha de ser sinusoidal, perquè, suposant negligible l'efecte de la resistència $R = 1\Omega$ (ja que $V_{R=1\Omega} \ll V_{font}$) en el circuit, la tensió en borns d'aquesta impedància és igual a la tensió fixada per la font (que és sinusoidal) i a la tensió en borns de la bobina. Aplicant la llei d'Ampère a la figura 4b resulta:

$$\oint H \cdot dl = NI \Rightarrow H_0 = \frac{NI_0}{l}$$

Com que $V_x = R_1\Omega I$, resulta:

$$H_0 = \frac{N}{lR_1\Omega} V_x.$$

Per tant, l'excitació magnètica H és proporcional al corrent I , i també a la tensió V_x . D'altra banda, si la bobina de N espires està alimentada per una tensió alterna sinusoidal que no arribi a saturar el material ferromagnètic del seu nucli, el flux magnètic en el nucli compleix:

$$\Phi = \int BdS = NBS \Rightarrow \Phi = NBS$$

$$\varepsilon_{bobina} = -\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{dB}{dt}S$$

La tensió ε_{bobina} ha de ser sinusoidal perquè és igual a la tensió de la font (negligint l'efecte de $R = 1\Omega$), que és sinusoidal. De l'expressió anterior, si ε_{bobina} és sinusoidal també ho serà la inducció magnètica B . Com que $B = B_0 \cos(2\pi ft)$, es compleix:

$$\varepsilon_{bobina} = NB_0 2\pi f \sin(2\pi ft)S$$

$$V_y = I_c X_c = \frac{\varepsilon_{bobina}}{Z} X_c = \frac{NB_0 2\pi f S}{Z} \cdot \frac{1}{2\pi f C} = \frac{NB_0 S}{ZC}$$

$$B_0 = \frac{ZC}{NS} V_y$$

Per tant, la inducció magnètica B és proporcional a la tensió V_y del condensador.

Nombre d'espires	$N = 196$
Secció nucli	$S = 26,4 \times 8,8 \text{ mm}^2 = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Radi mitjà	$a = 0,0735 \text{ m}$
$l = 2\pi a$	$l = 0,462 \text{ m}$
Material nucli	Ferro al silici

Taula 1: Característiques de la bobina utilitzada

Cicle d'histèresi dinàmic obtingut experimentalment

S'ha utilitzat una bobina amb un nucli de ferro al silici que té les característiques mostrades en la taula 1.

La figura 6 mostra el cicle d'histèresi obtingut experimentalment.

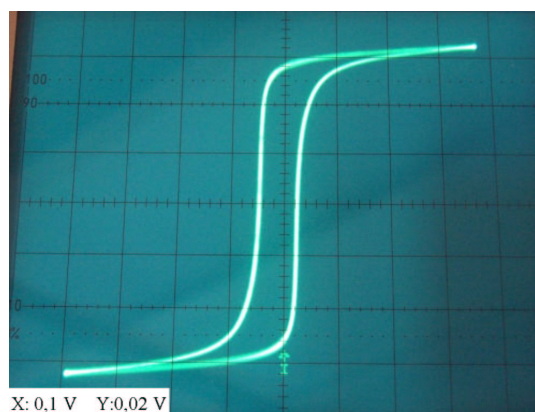


Figura 6: Cicle d'histèresi visualitzat a l'oscil·loscopi obtingut aplicant 13,7 V a la bobina

Substituint els valors dels paràmetres del circuit a les expressions H i B obtingudes anteriorment, resulta:

$$H_0 = \frac{N}{lR_{1\Omega}} V_x = \frac{196}{0,461 \cdot l} V_x = 424,41 V_x$$

$$B_0 = \frac{ZC}{NS} V_y = \frac{1000005,07 \cdot 10^{-6}}{196 \cdot 2,32 \cdot 10^{-4}} V_y = 21,99 V_y$$

Digitalitzant la figura 6 i aplicant els factors de conversió donats en les expressions anteriors s'obté el gràfic de la figura 7 (B en T i H en A/m) del cicle d'histèresi dinàmic.

Cal tenir en compte que en les mesures que s'han dut a terme s'ha utilitzat una font de potència que fa que la tensió sigui sinusoidal (harmònica) i, per tant, la inducció magnètica B també serà harmònica. Així, a causa del fet que al llarg del cicle d'histèresi la permeabilitat relativa del material ferromagnètic és diferent en cada punt, l'excitació magnètica exterior H no serà harmònica. Si es volen determinar les pèrdues del cicle d'histèresi (l'àrea del cicle) corresponents a una excitació magnètica H harmònica de 50 Hz, cal utilitzar una

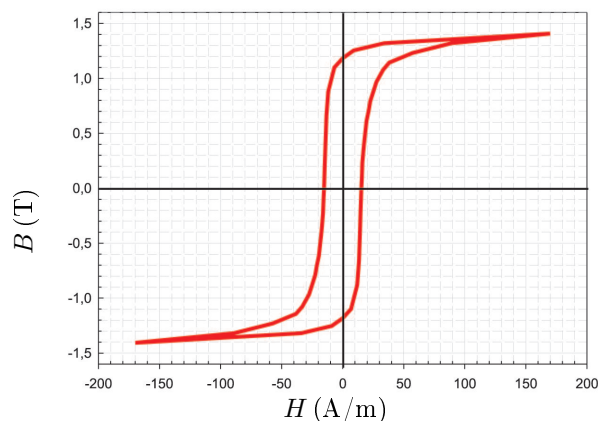


Figura 7: Cicle d'histèresi dinàmic en unitats físiques

font de potència de corrent, és a dir, una font que fixi un corrent a la bobina perfectament sinusoidal i de 50 Hz.

Corba dinàmica de primera magnetització

Partint del material completament desmagnetitzat, augmentant progressivament la tensió de la font s'obtingran cicles d'histèresi d'àrea creixent. En cada un dels cicles es mesuren les parelles de punts extrems ($H_{m\grave{a}x}$, $B_{m\grave{a}x}$) i es representen conjuntament totes aquestes parelles de valors, de manera que s'obté la corba dinàmica de primera magnetització de la figura 8.

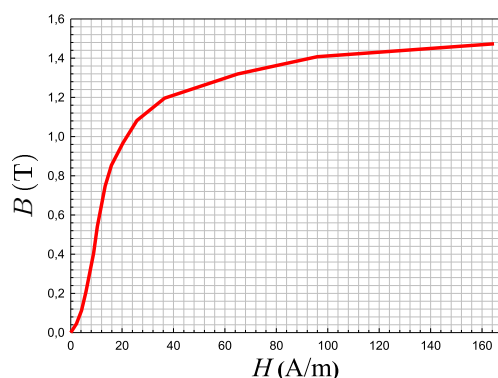


Figura 8: Corba dinàmica de primera magnetització experimental

Dependència de la permeabilitat dinàmica relativa amb el camp magnetitzant

Com s'ha explicat anteriorment, la permeabilitat relativa d'un material ferromagnètic no és constant perquè la inducció magnètica B a l'interior del material no té una dependència lineal amb el camp magnetitzant H . A partir dels parells de punts (H_0 , B_0) de la corba de primera magnetització es pot calcular la permeabilitat dinàmica relativa com $\mu_r = B_0/(\mu_0 H_0)$ i s'obté la corba de la figura 9.

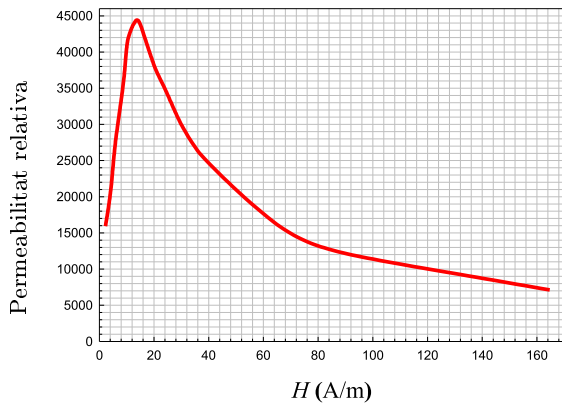


Figura 9: Permeabilitat dinàmica relativa en funció del camp magnetitzant H_0

Visualització del corrent absorbit per la bobina

El flux magnètic que circula pel nucli ferromagnètic d'una bobina de N espires es calcula com:

$$\Phi = \int B dS = NBS = N \frac{\mu NI}{l} S = LI$$

Per tant, el coeficient d'autoinducció L de la bobina amb nucli ve donada per:

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l}$$

De l'expressió anterior es dedueix que l'autoinducció de la bobina depèn de la permeabilitat magnètica del nucli i, com que aquesta depèn de l'excitació magnètica H , el valor de l'autoinducció dependrà del punt del cicle d'histeresi on ens trobem. Per tant, l'autoinducció d'una bobina amb nucli no presenta un valor constant sinó que depèn del corrent que hi circuli. Encara que la bobina estigui alimentada per una tensió alterna sinusoidal, el corrent que absorbeix la bobina no serà sinusoidal (cosa que és certa si la bobina té un nucli ferromagnètic). Això és degut al fet que la bobina compleix:

$$V_L = IX_L = I2\pi fL \Rightarrow I = \frac{V_L}{2\pi fL}$$

Per tant, el corrent a la bobina depèn de l'autoinducció L que, com s'ha explicat en les línies anteriors, alhora depèn de la μ del material. Com que la μ del nucli ferromagnètic depèn de la relació $B - H$, que és diferent en cada punt del cicle d'histeresi, això provoca que el corrent no sigui sinusoidal i que tingui l'aspecte de la figura 10.

Com s'acaba de comprovar, la intensitat de les bobines amb nucli ferromagnètic no és sinusoidal i, per tant, és una font d'harmònics de corrent.

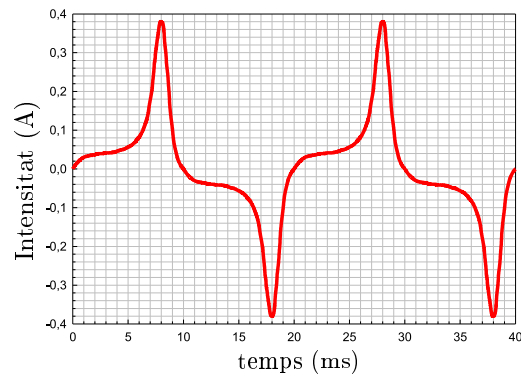


Figura 10: Corrent a la bobina mesurat en l'oscil·loscopi
Com desmagnetitzar un imant permanent

Per desmagnetitzar un material magnètic hi ha diverses possibilitats:

- La més comuna és allunyar-lo o acostar-lo a un camp magnètic intens generat per un electroïmant alimentat amb una intensitat alterna sinusoidal d'amplitud decreixent, de manera que s'anirà desmagnetitzant, tal com mostra la figura 11:

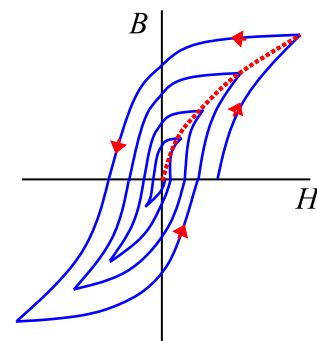


Figura 11: Desmagnetització d'un imant permanent

- La segona possibilitat consisteix a donar-li un cop fort, de manera que molts dels dominis ferromagnètics es desorientin.
- Una tercera manera per desorientar els dominis ferromagnètics és a base d'un increment important de la temperatura del material, de manera que per sobre de la temperatura crítica de Curie es perd l'orientació dels dominis i, per tant, el magnetisme romanent.

Referències

Materiales Magnéticos Documentos COTEC sobre oportunidades tecnológicas; 19, COTEC (Madrid, 2003). <http://www.cotec.es/publica/documentos/opportunidades19.html>.

JAKUBOVICS, J. P., *Magnetism and magnetic materials*, The Institute of Materials (London, 1994).

PLONUS, M. A., *Electromagnetismo Aplicado*, Reverté (Barcelona, 1994).