



Tema 6

Fundamentos de las propiedades magnéticas de la materia.

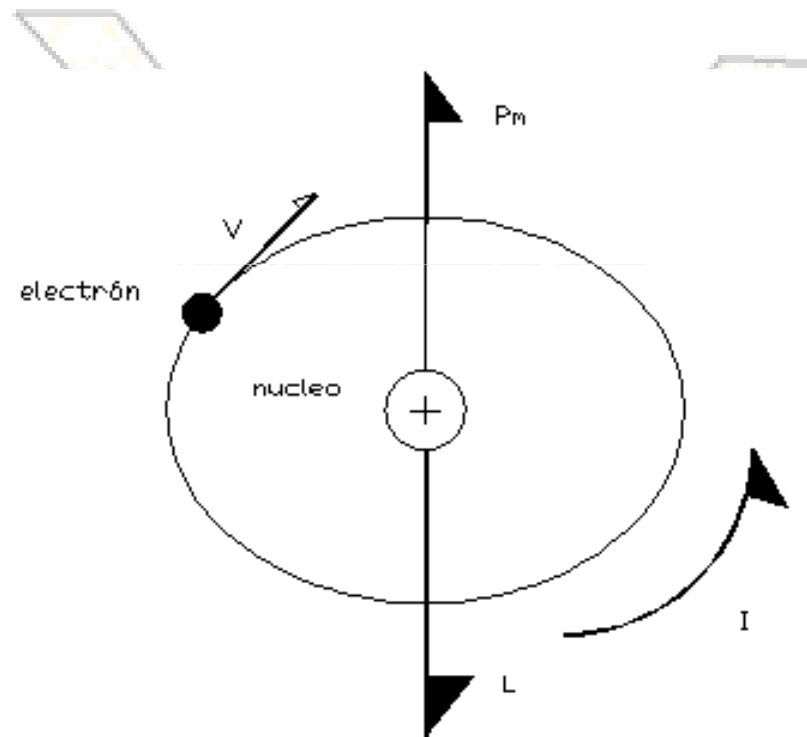
Objetivo: El alumno describirá las características magnéticas de los materiales.



Contribución magnética de los átomos.



El comportamiento de los materiales se puede explicar por el giro de los electrones alrededor del núcleo.





Contribución magnética de los átomos.



El electrón representa una espira de corriente, ya que en cada segundo puede pasar varias veces por un punto cualquiera de la trayectoria circular.

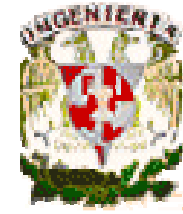
$$i = q_e f \text{ [A]}$$

donde

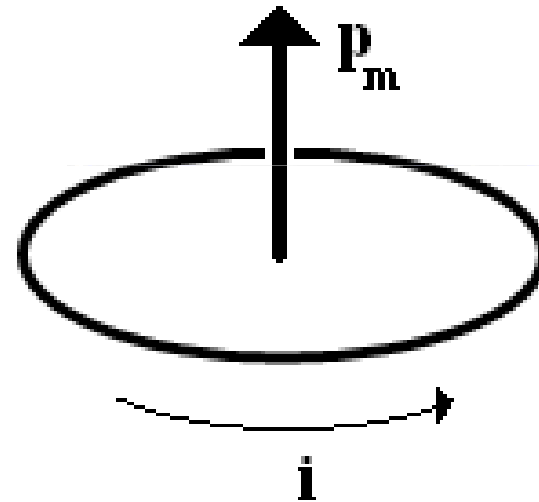
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{r 2\pi}$$

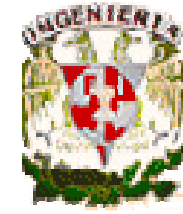


Momento dipolar magnético



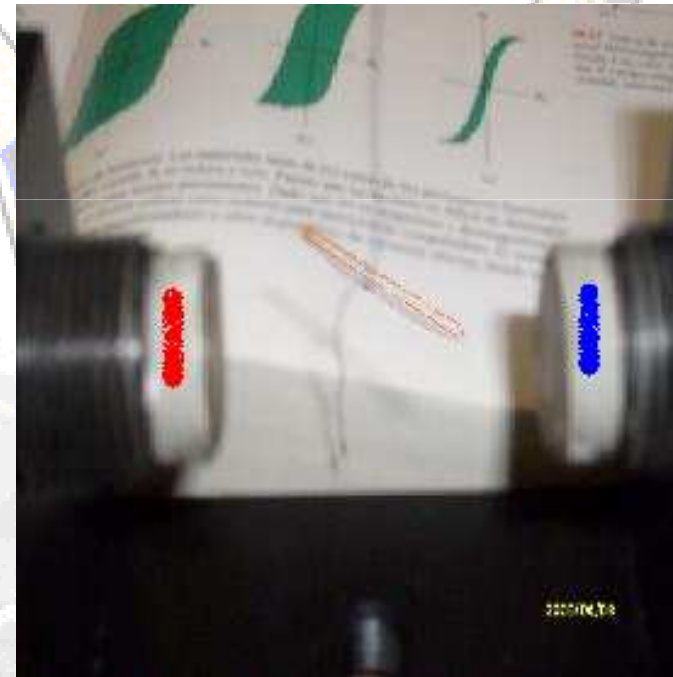
La corriente produce un momento dipolar magnético ρ_m , como se muestra en la figura.

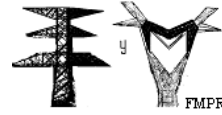




Materiales diamagnéticos

Materiales que tienden a orientarse en sentido contrario a las líneas del campo magnético. A estos materiales se les llama **diamagnéticos**, como ejemplo típico se encuentra el carbón, el plomo, el cobre, el agua, etc.

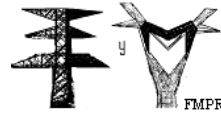




Materiales paramagnéticos.

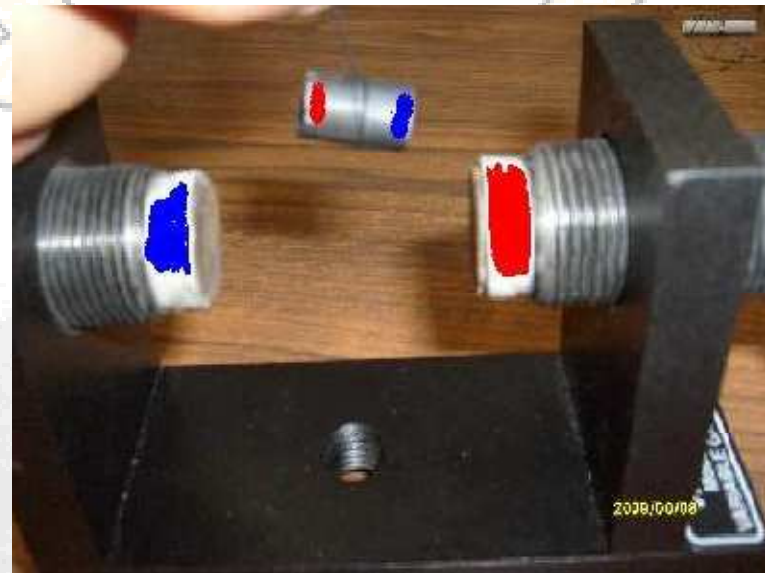
Materiales que experimentan una fuerza en la dirección del campo, es decir, son atraídos por el imán pero de manera muy débil. A estos se les conoce como **paramagnéticos**, como ejemplo se menciona al aluminio, al sodio, al platino, etc.





Materiales ferromagnéticos.

Materiales que son atraídos con mayor fuerza que los anteriores, por el imán, se les llama **ferromagnéticos** y el ejemplo más conocido es el fierro.





Vector magnetización.



Si en un material de volumen V , se tienen N dipolos magnéticos, el momento dipolar magnético total se expresa por:

$$\vec{p}_{mT} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi}$$

El vector magnetización se \vec{M} define como el momento dipolar magnético total por unidad de volumen

$$\vec{M} = \frac{\vec{p}_{mT}}{V} \left[\frac{A}{m} \right]$$



Materiales ferromagnéticos

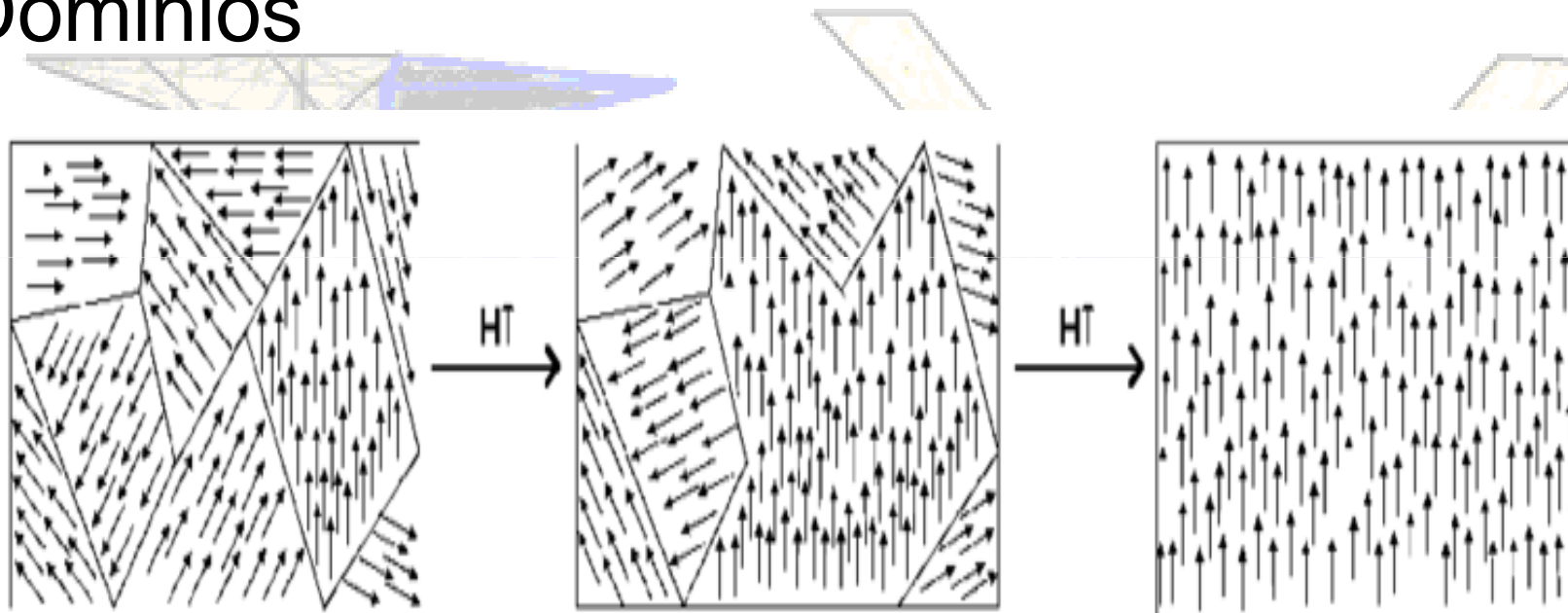
En esta clase de materiales los momentos dipolares tienden a alinearse, aun sin la existencia de campo magnético externo, formando regiones dentro del material denominadas dominios.

Cuando se aplica un campo magnético externo estos dominios crecen a expensas de otros en la dirección del campo magnético aplicado, obteniendo un vector magnetización.



Materiales ferromagnéticos.

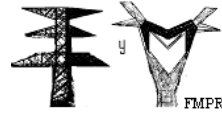
Dominios





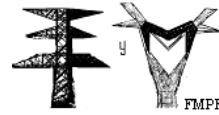
Materiales ferromagnéticos.

- Los materiales ferromagnéticos, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, gadolinio, níquel y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes. Sus permeabilidades relativas son mucho mayor que la unidad.
- <http://www.paginadigital.org/articulos/2004/2004seg/tecnologia1/sica26cccc-3pl.asp>
- **Imán y desarmador es un buen ejemplo.**



Magnetización de la materia

Cuando el material es homogéneo la magnetización tiene la dirección del campo magnético aplicado y es causante de producir un campo magnético como un imán..



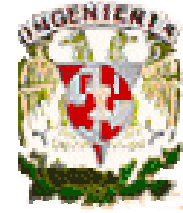
Magnetización de la materia

El vector intensidad de campo magnético es el vector resultante de la diferencia del campo magnético y el vector magnetización y da una **indicación del campo magnético en todo el material.**

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \left[\frac{A}{m} \right]; \quad \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$



Parámetros usados para describir el comportamiento magnético de las sustancias



El campo vector intensidad magnética (**H**) (que se ha considerado tradicionalmente el campo principal, ya que se puede relacionar con las *cargas, masas o polos magnéticos*) y el vector *magnetización (momento dipolar magnético promedio por átomo por número de átomos por unidad de volumen)* se relacionan a través de la *susceptibilidad magnética*:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \left[\frac{A}{m} \right]$$

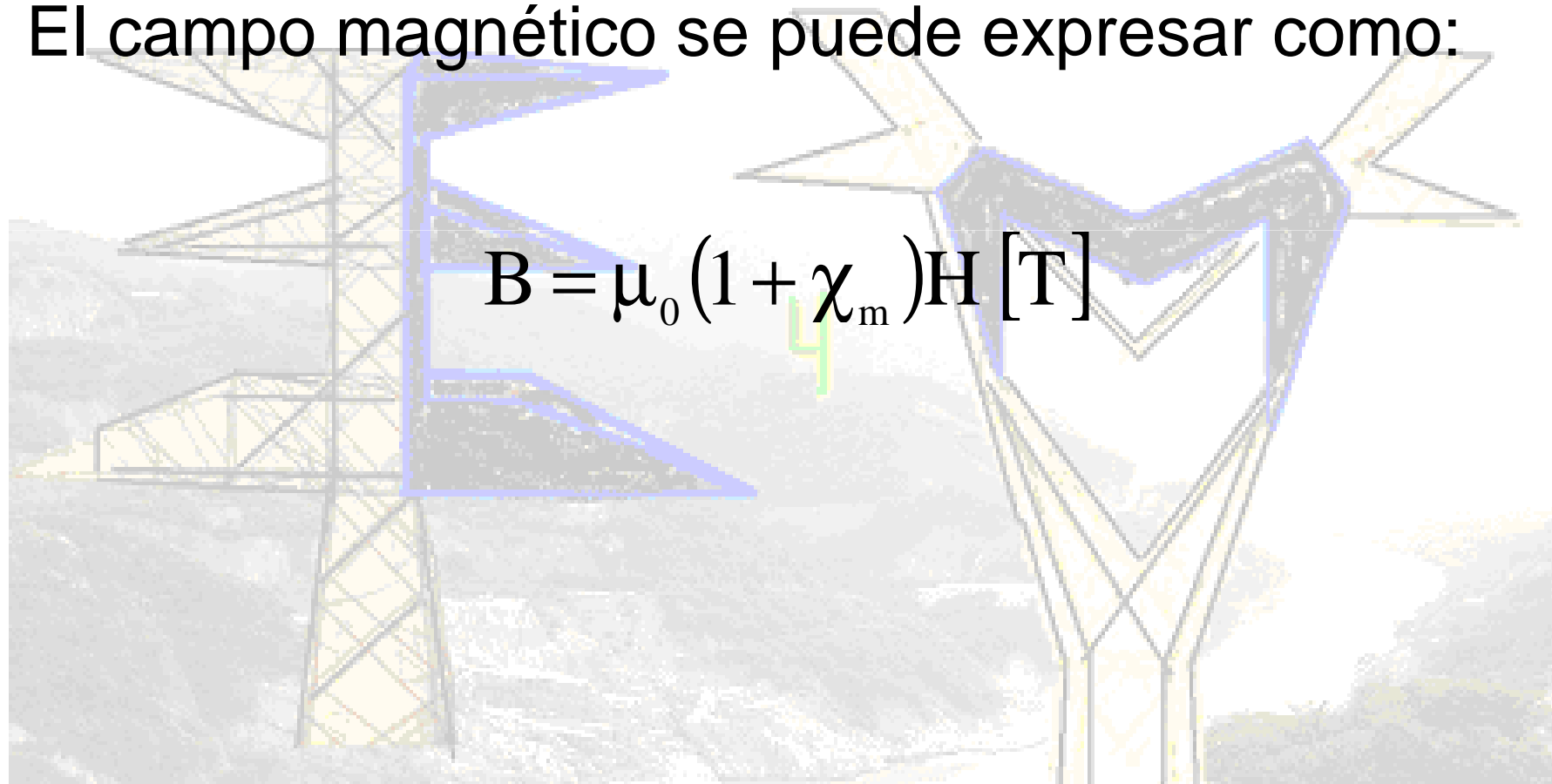


Parámetros usados para describir el comportamiento magnético de las sustancias



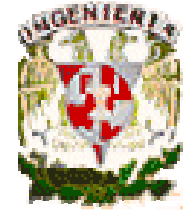
El campo magnético se puede expresar como:

$$B = \mu_0 (1 + \chi_m) H \text{ [T]}$$





Parámetros usados para describir el comportamiento magnético de las sustancias



De manera análoga al caso de los dieléctricos, se puede definir la permeabilidad del medio como:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \left[\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$$

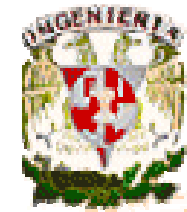
Por lo tanto:

$$B = \mu H \text{ [T]}$$



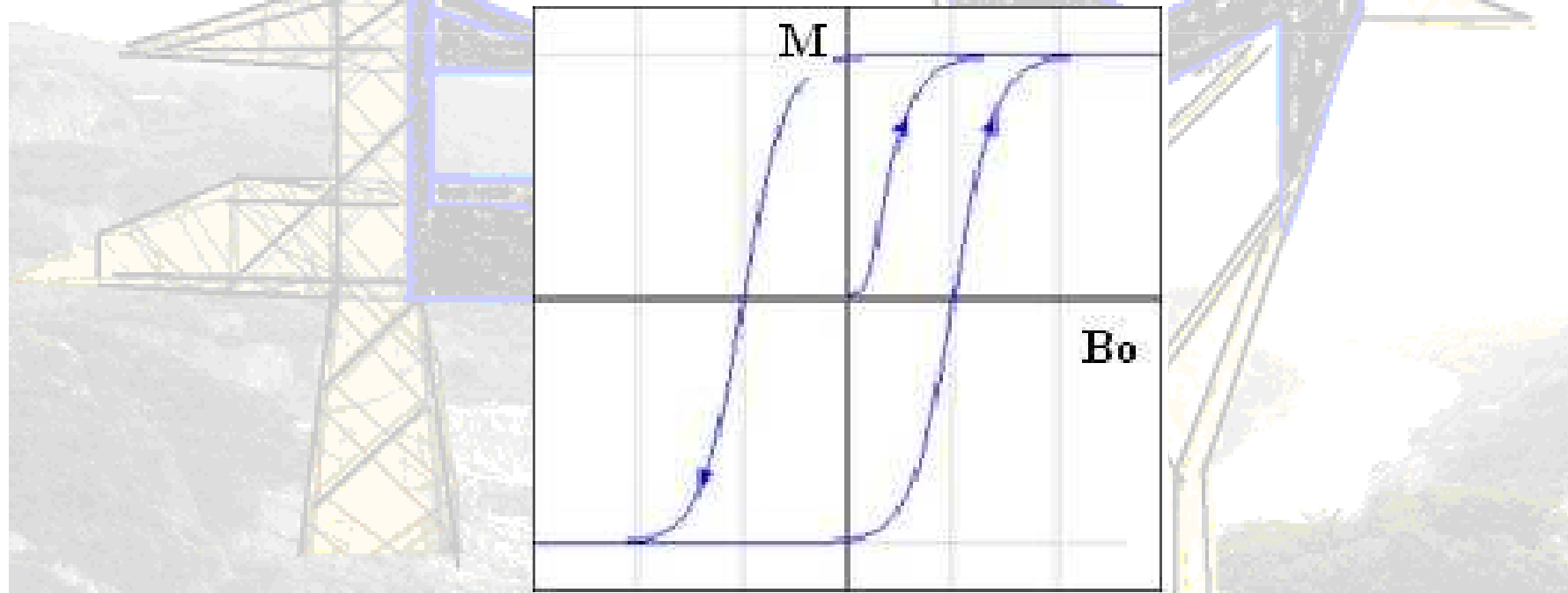
Curvas de histéresis

En muchos materiales ferromagnéticos la relación entre la magnetización y el campo magnético externo es diferente cuando el campo magnético externo está aumentando que cuando está disminuyendo. Este comportamiento se llama histéresis y generalmente la información se proporciona por medio de curvas o ciclos de histéresis.



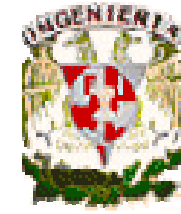
Curvas de histéresis

Curva de histéresis o ciclo de histéresis para un material ferromagnético.

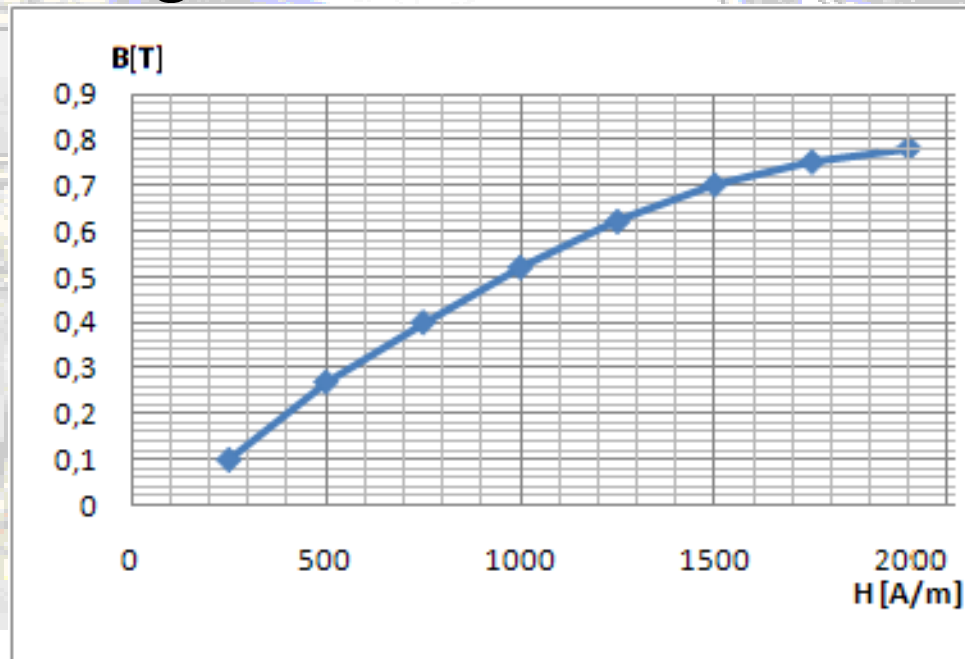




Curva de magnetización.



La curva que relaciona el campo magnético y el vector intensidad magnética se denomina curva de magnetización.





Circuitos magnéticos



Existe un grupo particular de problemas que involucran materiales ferromagnéticos, muy común en ciertas áreas de ingeniería, en los cuales es posible aplicar los procedimientos de análisis desarrollados para circuitos resistivos, haciendo analogías entre estos fenómenos y algunos que involucran materiales ferromagnéticos.



Circuitos magnéticos.

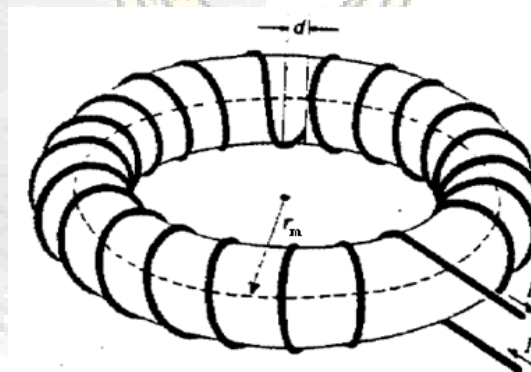


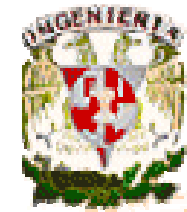
Estos problemas tienen que ver con el diseño y construcción de transformadores y se denomina circuito magnético. Un circuito magnético es un dispositivo en el que las líneas de fuerza del campo magnético están canalizadas en un camino cerrado. Se basa en que los materiales ferromagnéticos tienen una permeabilidad mucho más alta que el aire o el espacio y por tanto el campo magnético tiende a quedarse dentro del material.



Circuitos magnéticos

Un circuito magnético sencillo es un anillo de una material ferromagnético con un arrollamiento por el que circula una corriente. Se puede demostrar que las relaciones obtenidas son independientes de la forma geométrica del circuito magnético.





Circuitos magnéticos

El vector intensidad de campo magnético \vec{H} a través de la trayectoria de radio r_m es:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = H\ell$$

De acuerdo con la Ley de Ampere sabemos que:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = NI$$

A esta expresión se le denomina fuerza magnetomotriz y se representa por

$$\mathcal{F} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} [\text{A} \cdot \text{vuelta}]$$



Circuitos magnéticos



De la relación $H = \frac{B}{\mu}$ multiplicando por l/l y A/A se tiene:

$$H \cdot l = \frac{B}{\mu} l \left(\frac{A}{A} \right) = \frac{BA}{\mu A} l$$

Como $\phi_b = BA$

Por lo tanto: $\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = Hl = \frac{l}{\mu A} \phi_b = NI$



Circuitos magnéticos

Al término $\frac{\ell}{\mu A} = \mathcal{R}$ se le denomina reluctancia (resistencia magnética) por su analogía con la resistencia.

$$R = \rho \frac{\ell}{A} = \frac{\ell}{\sigma A}$$

$$\mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu A} \left[\frac{\text{m}}{\text{Wb}} = \frac{\text{A} \cdot \text{vuelta}}{\text{Wb}} = \frac{1}{\text{henry}} = \frac{1}{\text{H}} \right]$$



Circuitos magnéticos



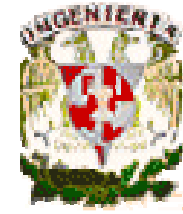
Por lo tanto

$$\mathcal{I} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \frac{\ell}{\mu A} \varphi_b = \mathcal{R} \varphi_b \text{ [A} \cdot \text{vuelta]}$$

$$\mathcal{I} = \mathcal{R} \varphi_b$$



Circuitos magnéticos



Los resultados anteriores se pueden generalizar a cualquier forma de núcleo e inclusive que no sean continuos, es decir, que tengan espacios de aire llamados entrehierros. Los circuitos magnéticos son importantes en todas las áreas donde se utilizan los transformadores, motores eléctricos, interruptores automáticos, relevadores, etc. Dependiendo de la aplicación y de la construcción de estos circuitos magnéticos se pueden tener reluctancias en serie o en paralelo.



Circuitos magnéticos. Ejemplo

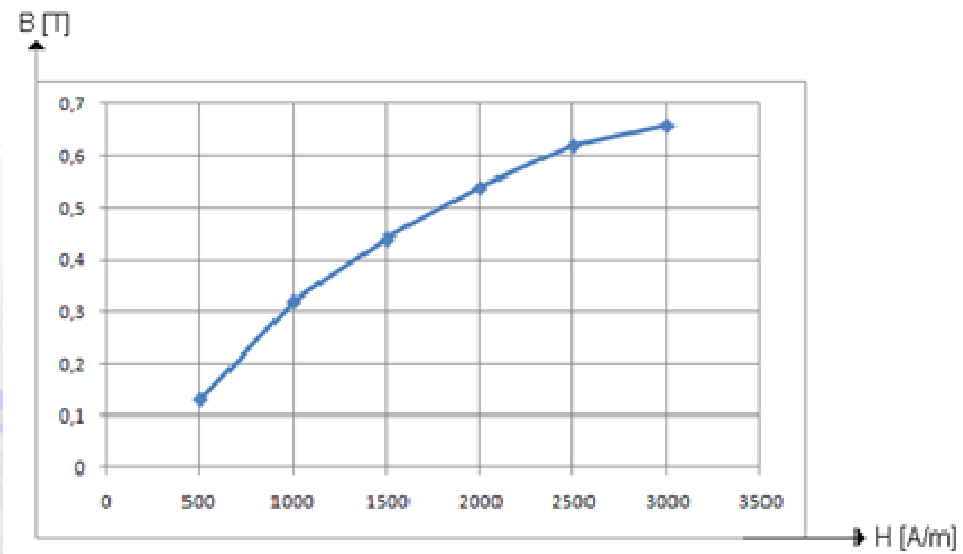
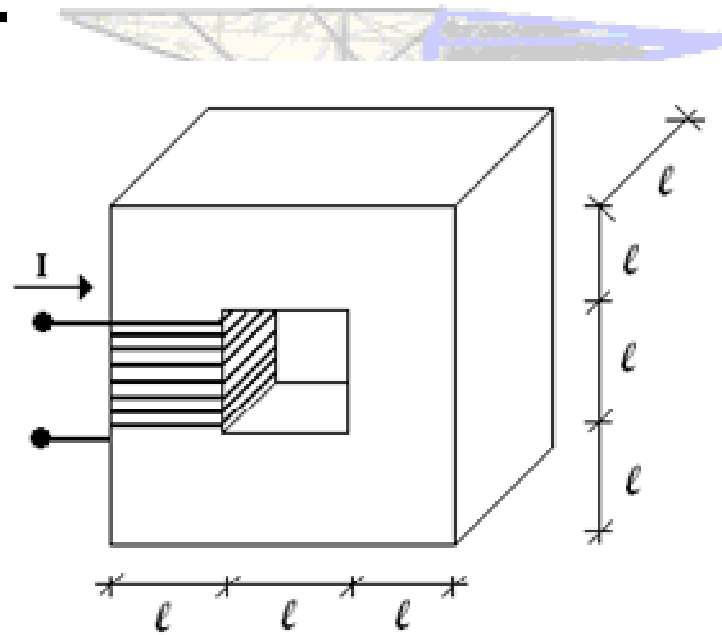


En la figura se tiene una bobina de 200 [vueltas] devanadas sobre un núcleo ferromagnético cuya curva de magnetización aparece en la gráfica. Si $I=1.6$ [A] y $l=2$ [cm], obtenga:

- La magnitud de la intensidad de campo magnético H en el núcleo.
- La magnitud del campo magnético B en el núcleo.
- La reluctancia R del núcleo.
- El circuito magnético y su flujo.



Circuitos magnéticos





Circuitos magnéticos



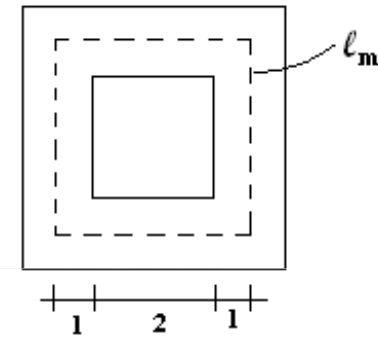
$$6. a) H = \frac{NI}{l_m} = \frac{200(1.6)}{4(0.04)} = 2000 \left[\frac{A}{m} \right]$$

b) De la gráfica se observa que $B=0.54$ [T]

c)

$$B = \mu H \rightarrow \mu = \frac{B}{H} = \frac{0.54}{2000} = 2.7 \times 10^{-4} \left[\frac{T \cdot m}{A} \right] = 2.7 \times 10^{-4} \left[\frac{Wb}{A \cdot m} \right]$$

$$\mathcal{R} = \frac{l_m}{\mu A} = \frac{16 \times 10^{-2}}{2.7 \times 10^{-4} (2 \times 10^{-2})^2} = 1.4815 \times 10^6 \left[\frac{A}{Wb} \right]$$

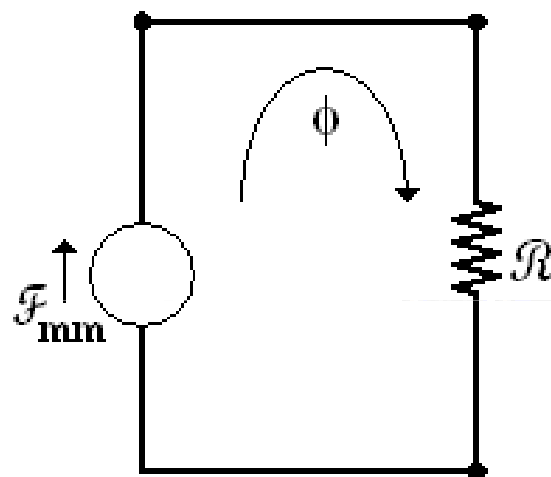




Circuitos magnéticos



d)



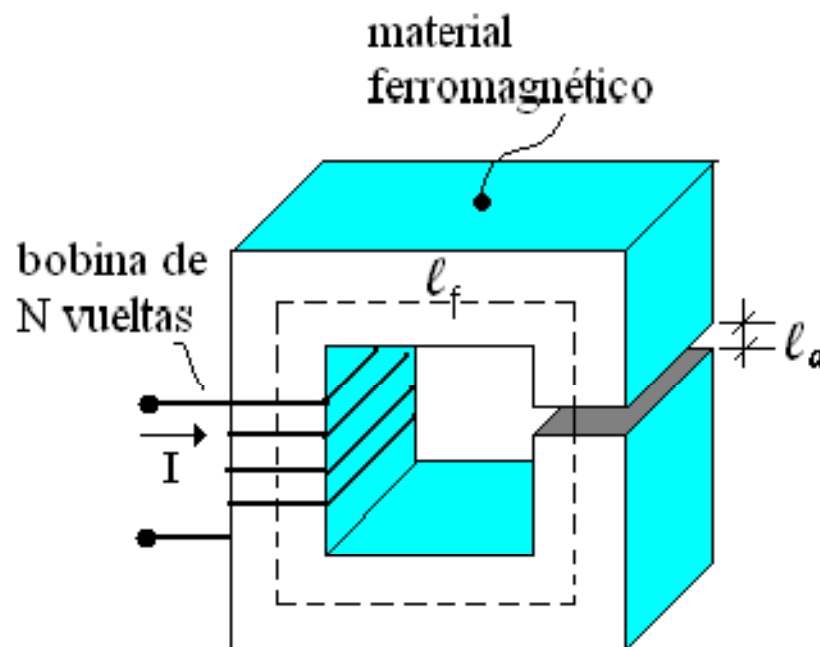
$$\mathcal{I} = NI = 200(1.6) = 320[\text{A} \cdot \text{vuelta}]$$

$$\mathcal{I} = \mathcal{R}\phi \quad \rightarrow \quad \phi = \frac{\mathcal{I}}{\mathcal{R}} = \frac{320}{1.4815 \times 10^6} = 2.16 \times 10^{-4} [\text{Wb}]$$



Reluctancia en serie

Un circuito magnético se puede construir con un núcleo macizo de material ferromagnético que posee un espacio de aire o entrehierro de espesor l_a , como se muestra en la figura.





Reluctancia en serie

Determinar el flujo magnético cuando se aplica una fuerza magnetomotriz.

Sabemos : $\mathcal{F} = NI = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell}$ [A · vuelta]

Esta integral cerrada puede ser evaluada a través de la trayectoria media indicada, la cual consta de dos partes. Una en el material ferromagnético y la otra en el entrehierro.



Reluctancia en serie

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \oint \vec{H}_f \cdot d\vec{\ell}_f + \oint \vec{H}_a \cdot d\vec{\ell}_a$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = H_f \ell_f + H_a \ell_a = NI$$

- De las relaciones:

$$H_f = \frac{B_f}{\mu_f}$$

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_a}$$



Reluctancia en serie

- Al multiplicar por las longitudes

$$H_f l_f = \frac{B_f}{\mu_f} l_f \left(\frac{A_f}{A_f} \right) = \frac{l_f}{\mu_f A_f} \phi_f$$

$$H_a l_a = \frac{B_a}{\mu_a} l_a \left(\frac{A_a}{A_a} \right) = \frac{l_a}{\mu_a A_a} \phi_a$$



Reluctancia en serie

- Recordando que la reluctancia es:

$$\mathcal{R}_f = \frac{l_f}{\mu_f A_f} \quad \text{y} \quad \mathcal{R}_a = \frac{l_a}{\mu_a A_a}$$

Además: $\phi_f = \phi_a = \phi$

Por lo tanto: $\mathcal{I} = NI = \mathcal{R}_f \phi + \mathcal{R}_a \phi$

O $\mathcal{I} = NI = H_f l_f + \mathcal{R}_a \phi$



Reluctancia en serie

Por lo que:

$$H_f l_f = \frac{B_f}{\mu_f} l_f \left(\frac{A_f}{A_f} \right) = \frac{l_f}{\mu_f A_f} \phi_f = \mathcal{R}_f \phi_f$$

$$H_a l_a = \frac{B_a}{\mu_a} l_a \left(\frac{A_a}{A_a} \right) = \frac{l_a}{\mu_a A_a} \phi_a = \mathcal{R}_a \phi_a$$



Reluctancia en serie

- Si los datos son la fuerza magnetomotriz y las dimensiones del núcleo, es necesario conocer la intensidad magnética del material y el flujo, por lo tanto

$$\phi = B_a A_a = B_f A_f \text{ [Wb]}$$

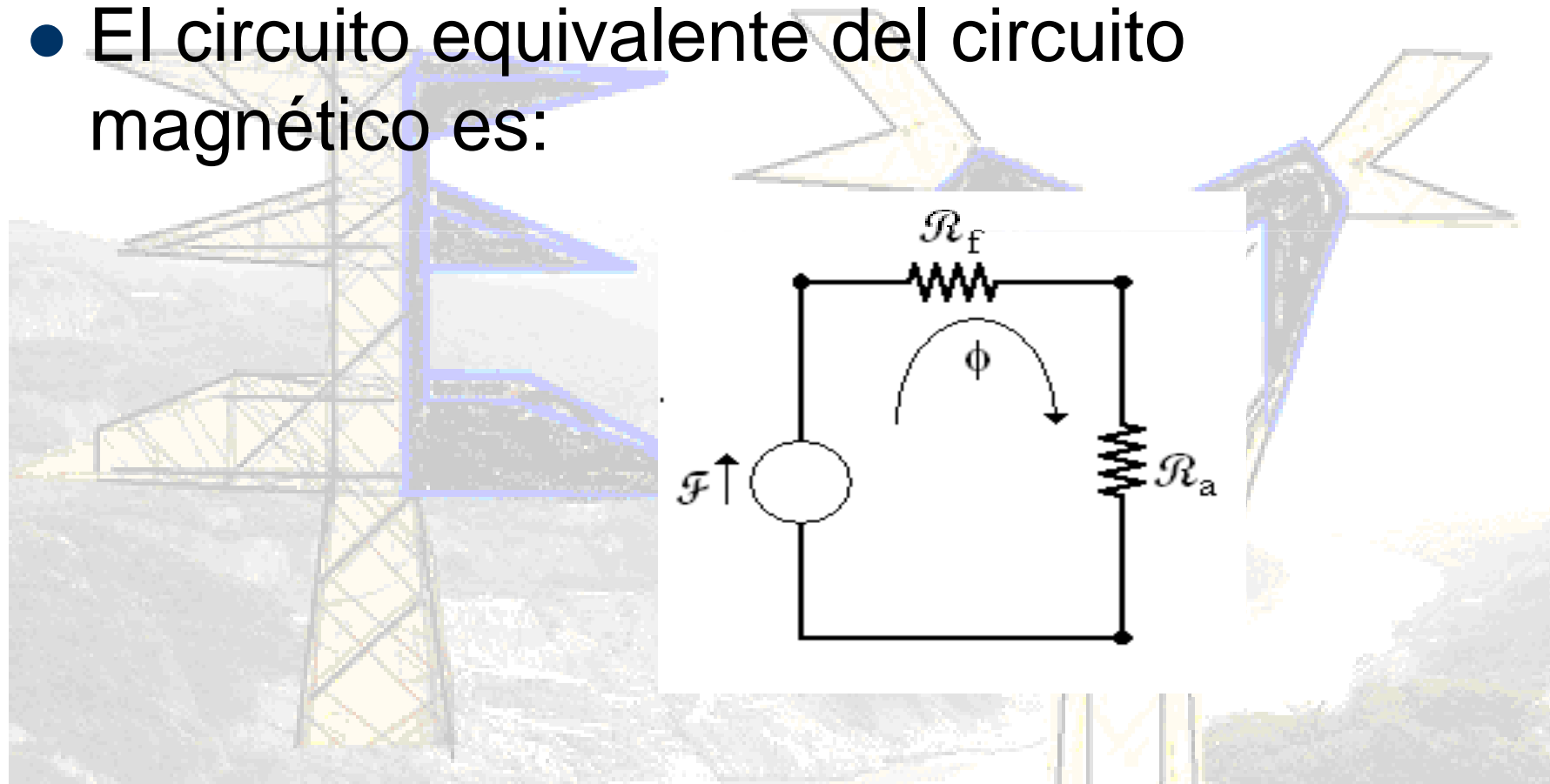
de donde

$$B_f = \frac{B_a A_a}{A_f} = \frac{\phi}{A_f} \text{ [T]}$$



Reluctancia en serie

- El circuito equivalente del circuito magnético es:





Reluctancia en serie

Ejemplo: Para el circuito magnético mostrado en la figura, construido por dos materiales ferromagnéticos distintos, el primero de ellos es una aleación níquel-hierro y el segundo es acero-silicio, determinar:

- La magnitud del flujo magnético en el segundo material.
- La magnitud de la intensidad magnética en el segundo material.
- El valor del flujo;

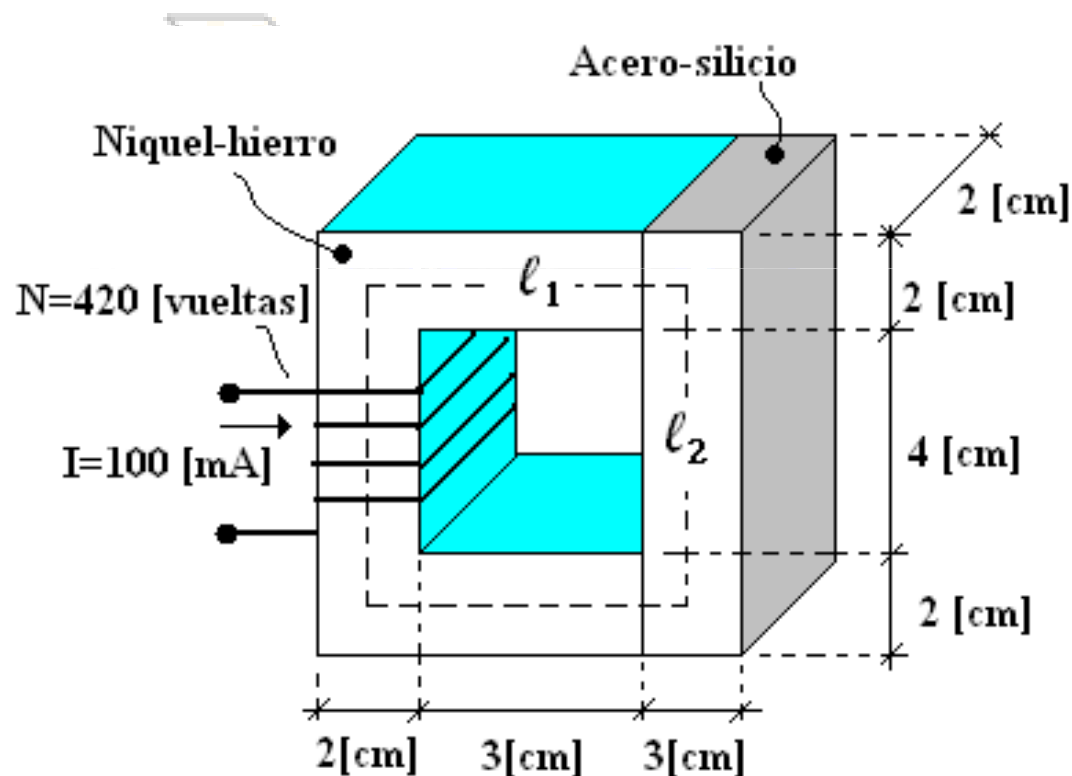
Si la fuerza magnetomotriz $\mathcal{F} = NI = 42[\text{A} \cdot \text{vuelta}]$, y la densidad de flujo magnético y la magnitud de la intensidad magnética en el primer material son:

$$B_1 = 1.21[\text{T}] \text{ y } H_1 = 228 \left| \frac{\text{A}}{\text{m}} \right| \text{ respectivamente.}$$



Reluctancia en serie

Circuito magnético formado por dos materiales ferromagnéticos





Reluctancia en serie

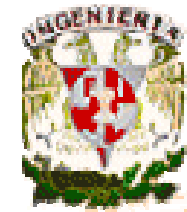
Sabemos que: $B_1 = B_2 \frac{A_2}{A_1} = 1.5B_2$

Por lo que

$$B_2 = 0.81[\text{T}]$$

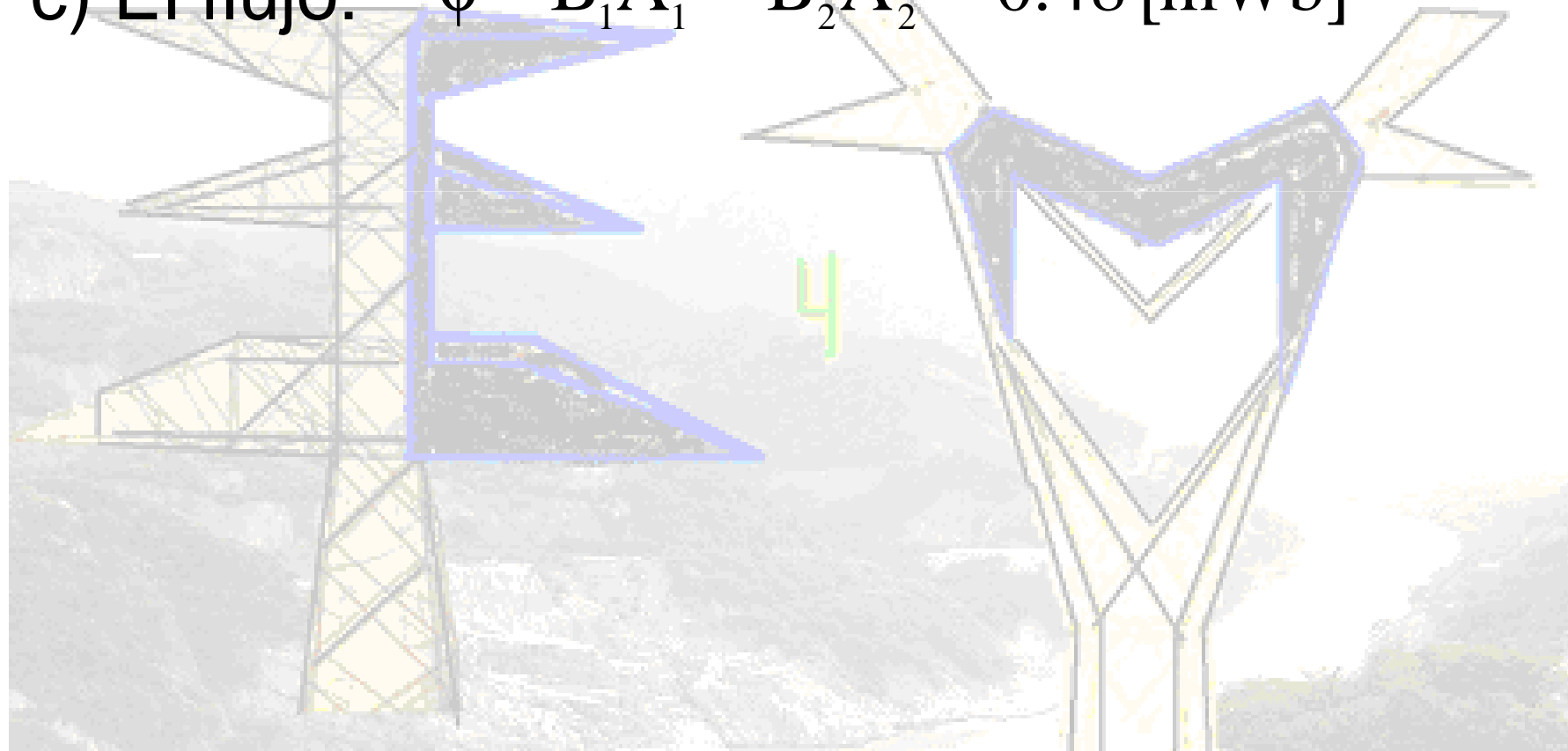
También: $H_1 = \frac{\mathcal{F}}{l_1} - H_2 \frac{l_2}{l_1} = 300 - 0.643H_2 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$

Despejando: $H_2 = 112 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$



Reluctancia en serie

c) El flujo: $\phi = B_1 A_1 = B_2 A_2 = 0.48 \text{ [mWb]}$





Reluctancia en paralelo



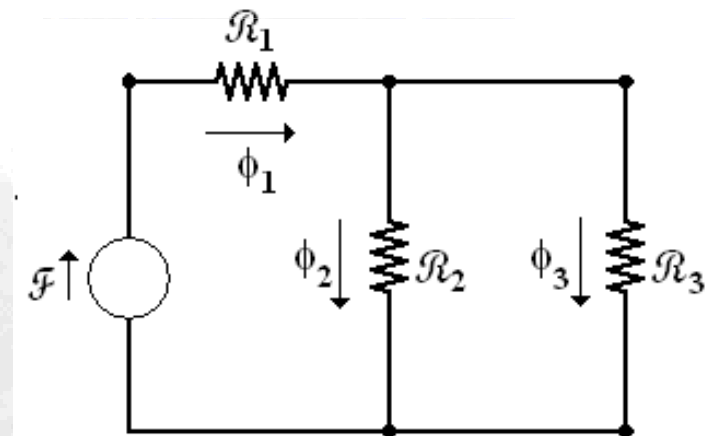
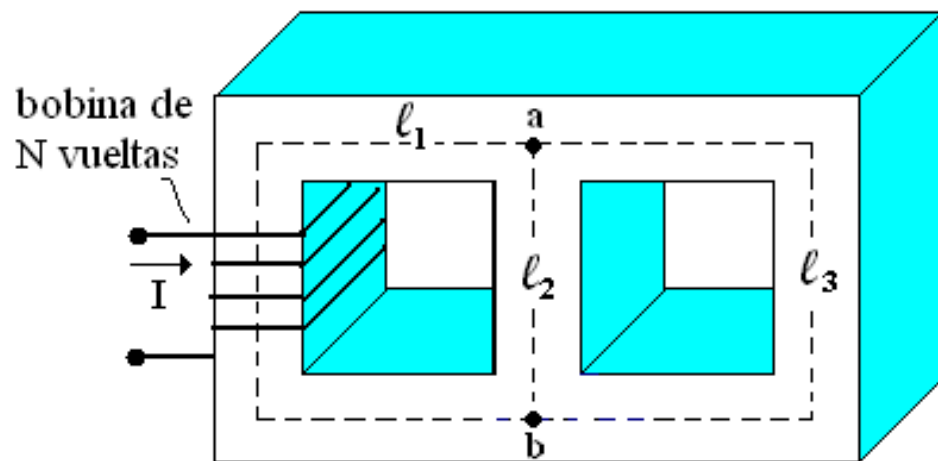
El circuito magnético mostrado en la figura está construido con un solo material ferromagnético y una fuente magnetomotriz. En esta caso las reluctancias están en paralelo y el circuito magnético equivalente sería el siguiente.



Reluctancia en paralelo



Circuito magnético con reluctancia en paralelo y su representación.





Reluctancia en paralelo



Para este circuito se puede plantear las siguientes ecuaciones:

$$\mathcal{I} - \mathcal{R}_1 \phi_1 = \mathcal{R}_2 \phi_2 = \mathcal{R}_3 \phi_3$$

O:

$$\mathcal{I} - H_1 \ell_1 = H_2 \ell_2 = H_3 \ell_3$$

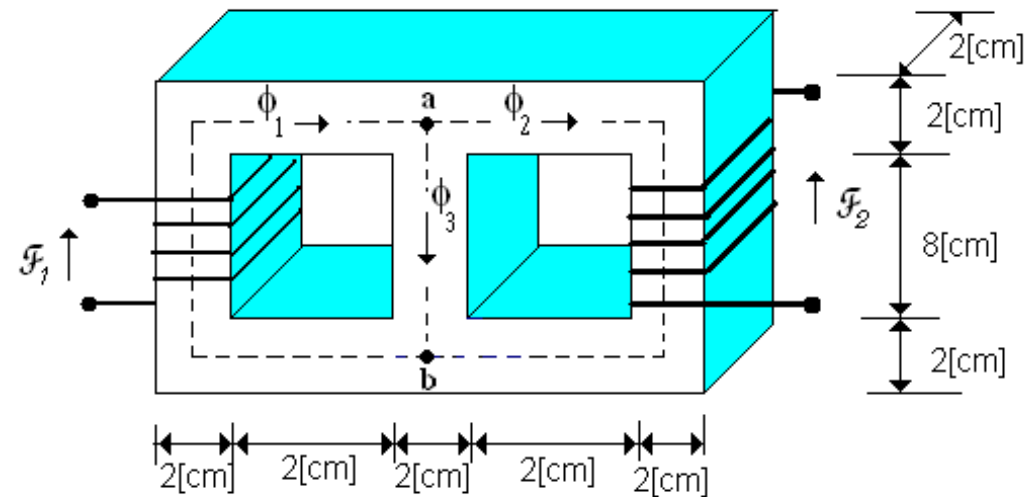
$$\text{También: } \phi_1 = \phi_2 + \phi_3$$



Reluctancia en paralelo



En la figura se muestra un circuito magnético construido de hierro colado, utilizando la siguiente curva de magnetización, compruebe que:

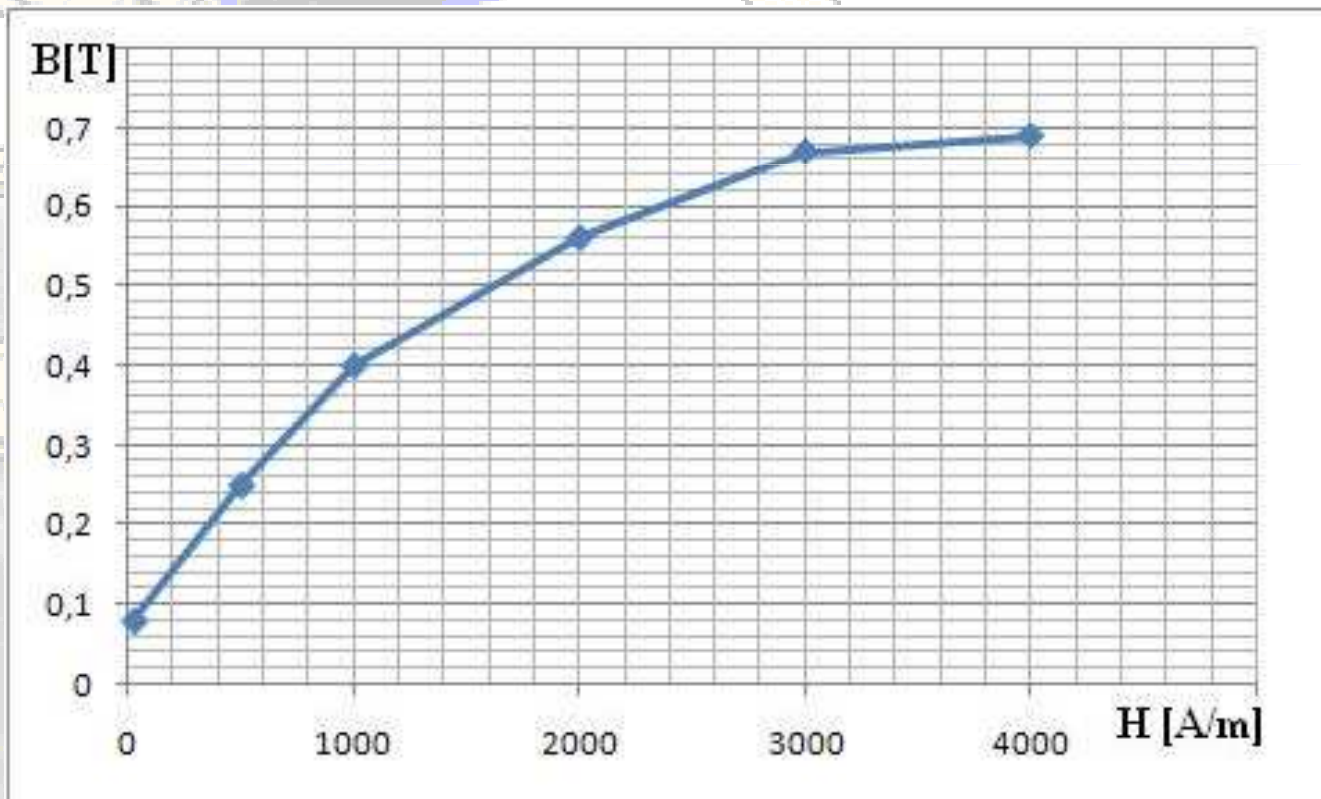




Reluctancia en paralelo



Curva de magnetización del hierro colado.





Reluctancia en paralelo



$$\phi_1 = 0.118 [\text{mWb}]$$

$$B_1 = 0.295 [\text{T}]$$

$$H_1 = 650 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

$$\mu_1 = 4538 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$$

$$\phi_2 = 0.119 [\text{mWb}]$$

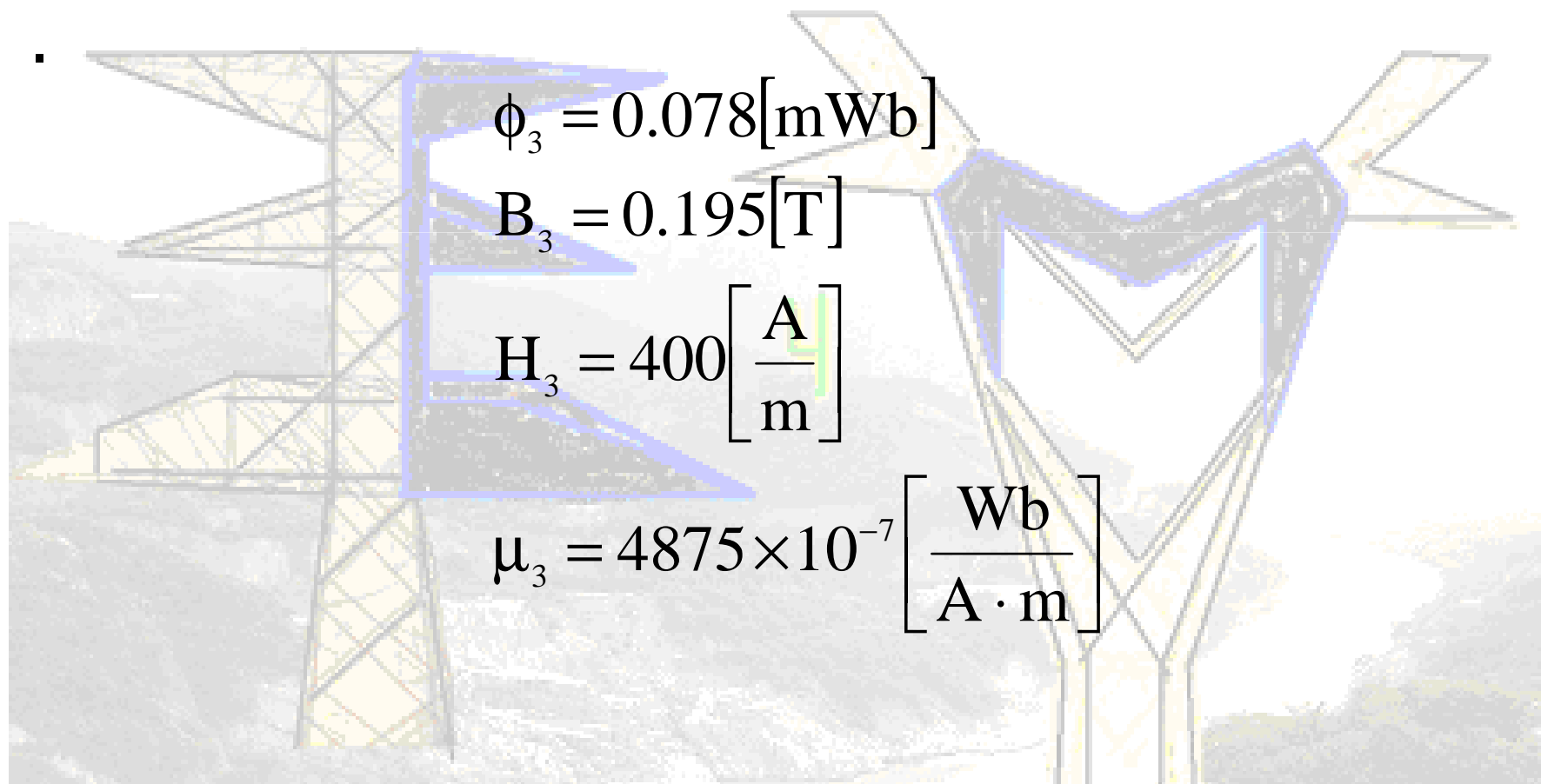
$$B_2 = 0.497 [\text{T}]$$

$$H_2 = 1600 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

$$\mu_2 = 306 \times 10^{-7} \left[\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$$

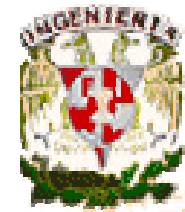


Reluctancia en paralelo





Bibliografía



Gabriel A. Jaramillo Morales, Alfonso A.
Alvarado Castellanos.

Electricidad y magnetismo.

Ed. Trillas. México 2003

Sears, Zemansky, Young, Freedman

Física Universitaria

Ed. PEARSON. México 2005