

BLOQUE 3

Magnetismo

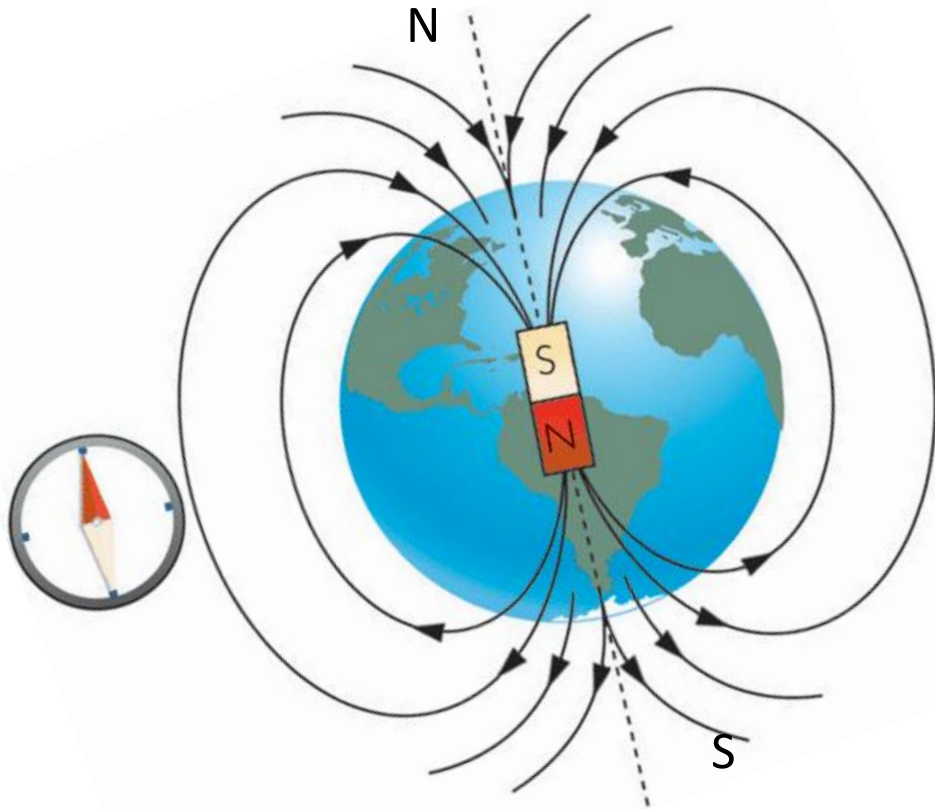
Generación y medición de campo magnético



LABORATORIO 3
1er cuatrimestre 2026

Campo Magnético

Fenómenos magnéticos → 2600 años
Magnetita del Meandro → Magnetita
(imán permanente natural)



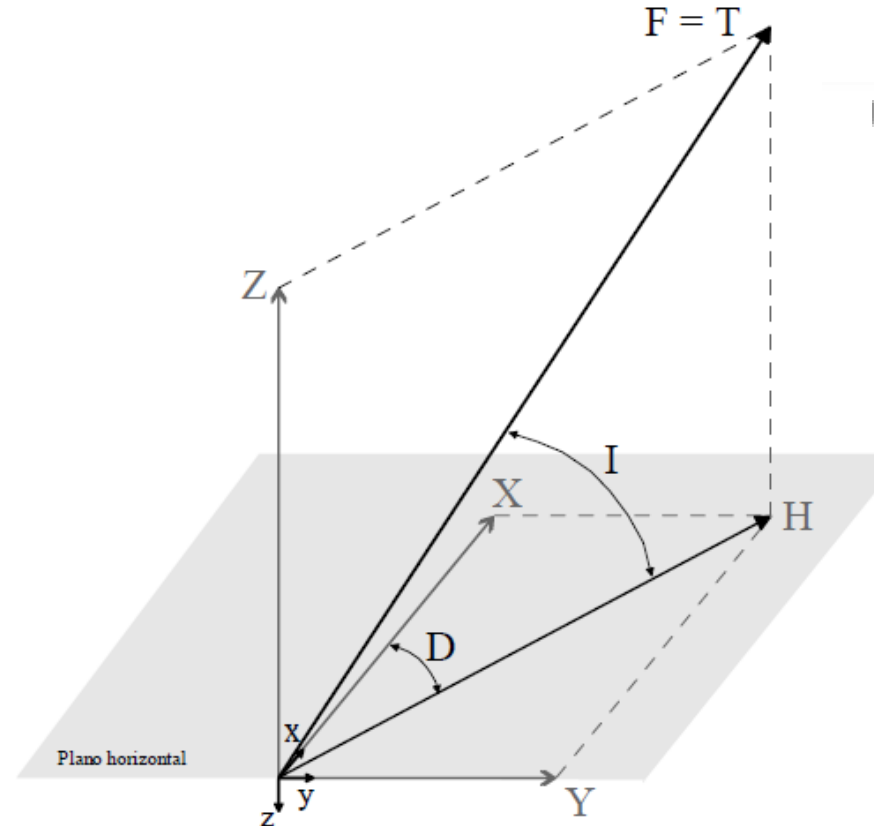
La Tierra se comporta
como un imán
1600 – William Gilbert

Campo magnético terrestre

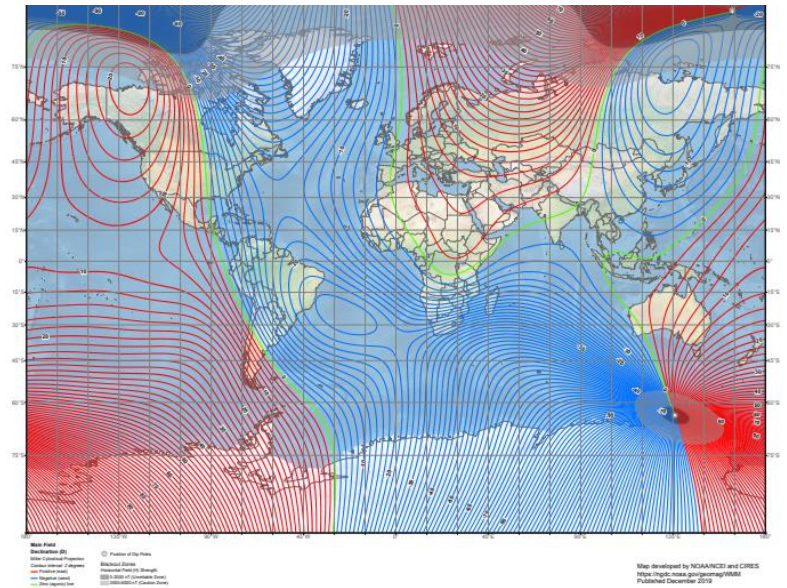
Representación del campo en coordenadas cartesianas

X= Norte geográfico
Y= Este geográfico
Z= + hacia el centro de la Tierra

H= Componente horizontal /
Norte magnético
F = Intensidad total
I = Inclínación /- en
hemisferio Sur
D = Declinación / + hacia el
Este



US/UK World Magnetic Model - Epoch 2020.0
Main Field Declination (D)

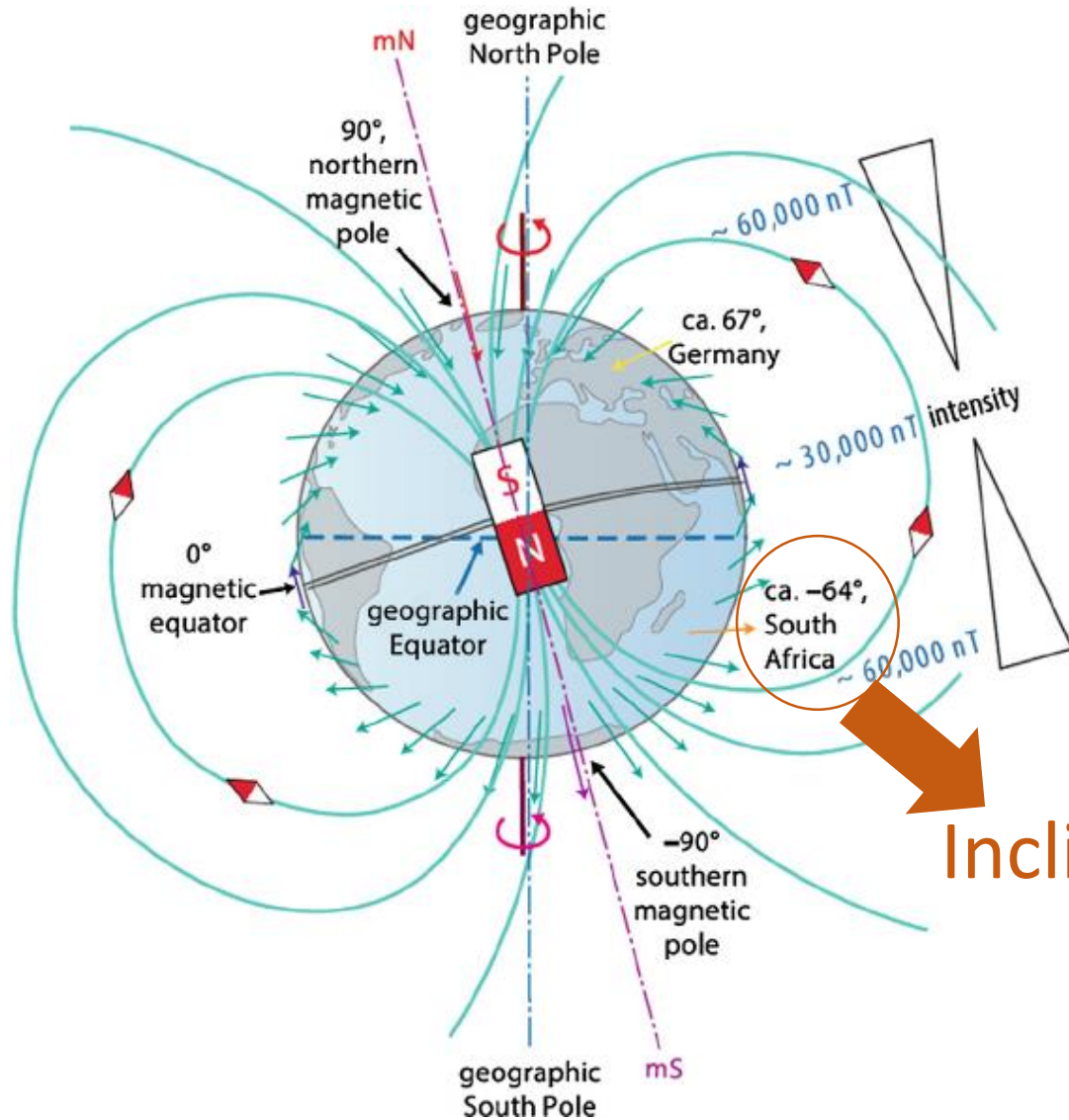


Isógonas – pto de igual D
Isóclinas – pto de igual I

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>

Campo Magnético terrestre

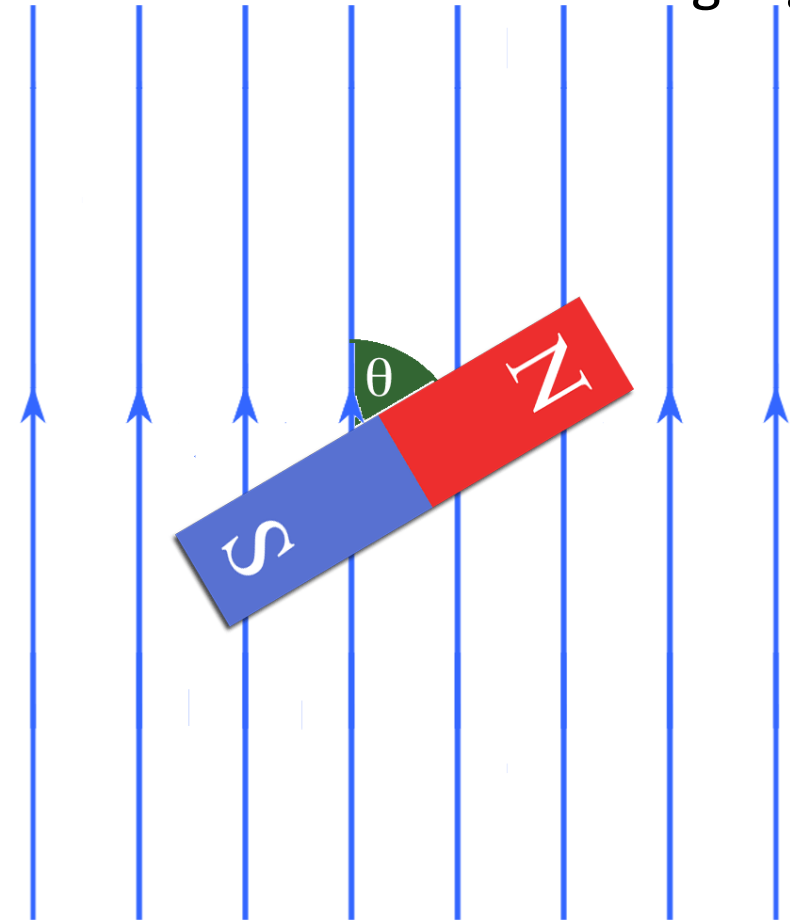
Unidades: 1 Tesla [T] = 10 000 Gauss [G]

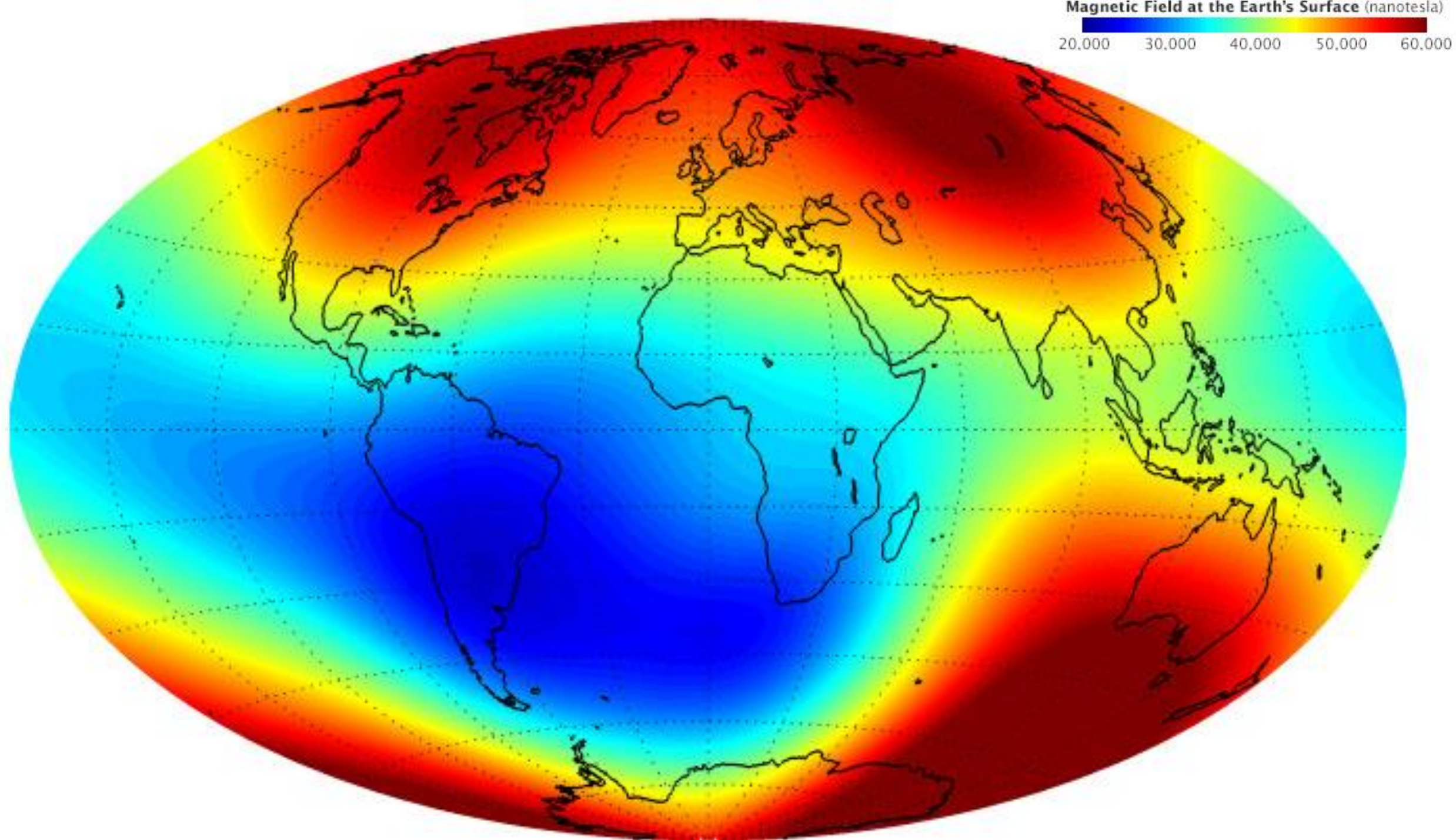


Inclinación

Declinación

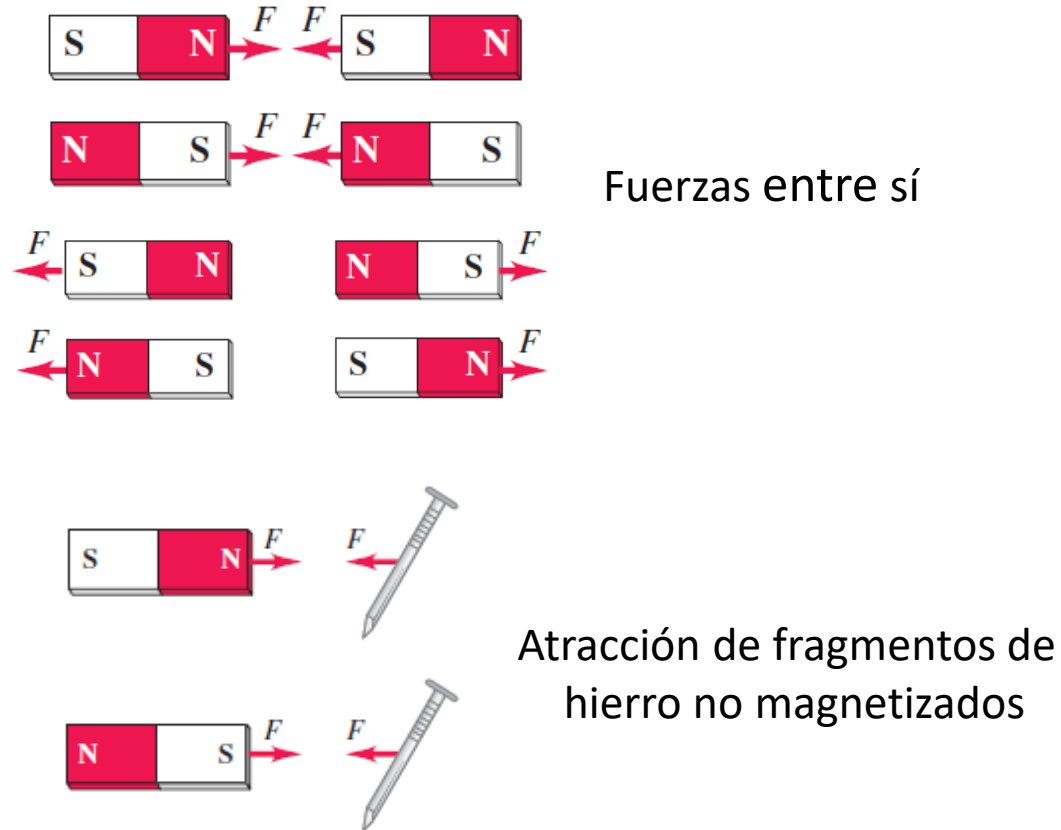
N geográfico





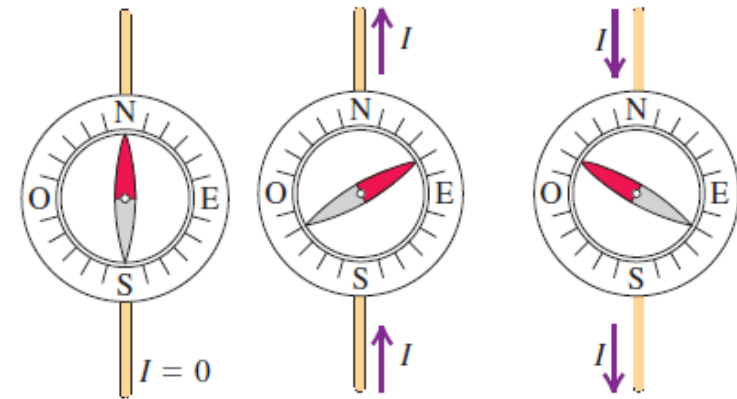
Campo Magnético

Imanes Permanentes Gilbert 1600



Experimento de Oersted 1819

Cuando por un cable circula corriente, genera un campo magnético que modifica la dirección de la brújula

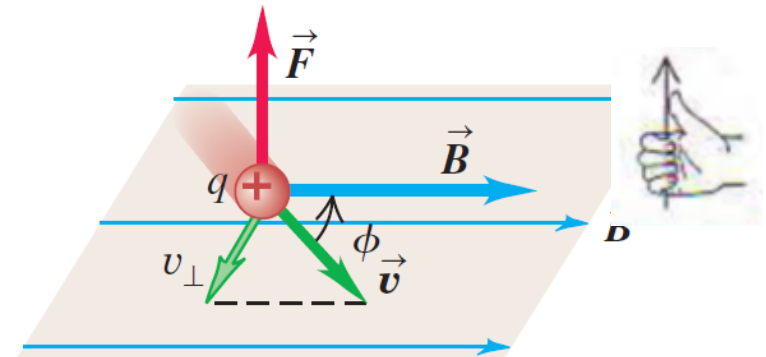


Fuerza magnética – Lorentz 1880

- Una carga en movimiento o corriente genera un campo magnético en el espacio circundante (además de su campo eléctrico)
- El campo magnético ejerce una fuerza F sobre cualquier otra carga en movimiento o corriente presente en el campo

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

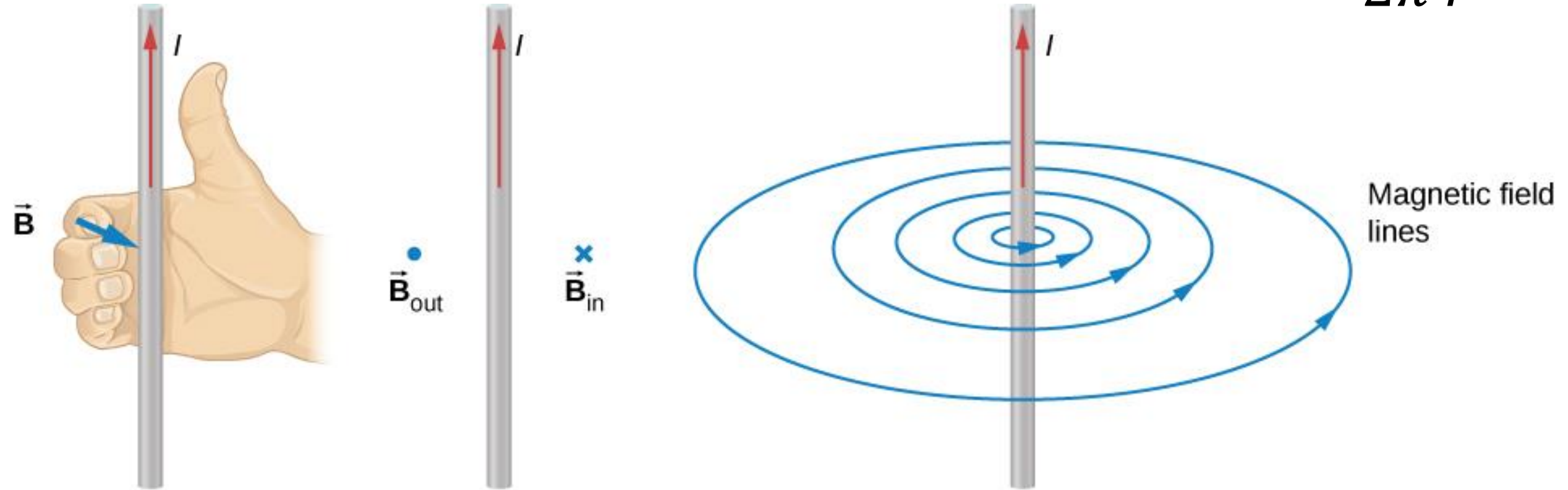
1 Tesla: campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo



Fuerza sobre una carga en movimiento

Campo magnético **producido** por una corriente eléctrica

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r} \hat{\phi}$$



Un campo vectorial queda unívocamente definido por el **flujo** y la **circulación**

Flujo a través de cualquier **superficie cerrada**

$$\oiint_{S(V)} \vec{B}(\vec{r}) d\vec{S} = 0$$

Circulación a través de cualquier **curva cerrada**

$$\oint_C \vec{B}(\vec{r}) d\vec{\ell} = \mu_0 I$$

Forma diferencial

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$



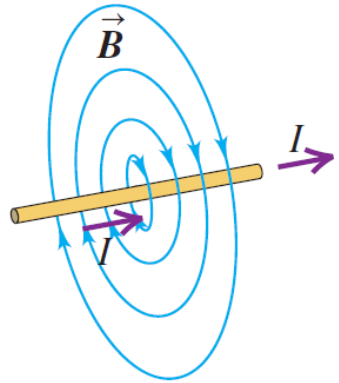
Divergencia del campo magnético

Rotor del campo magnético

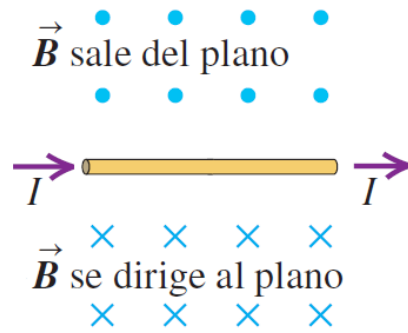


$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

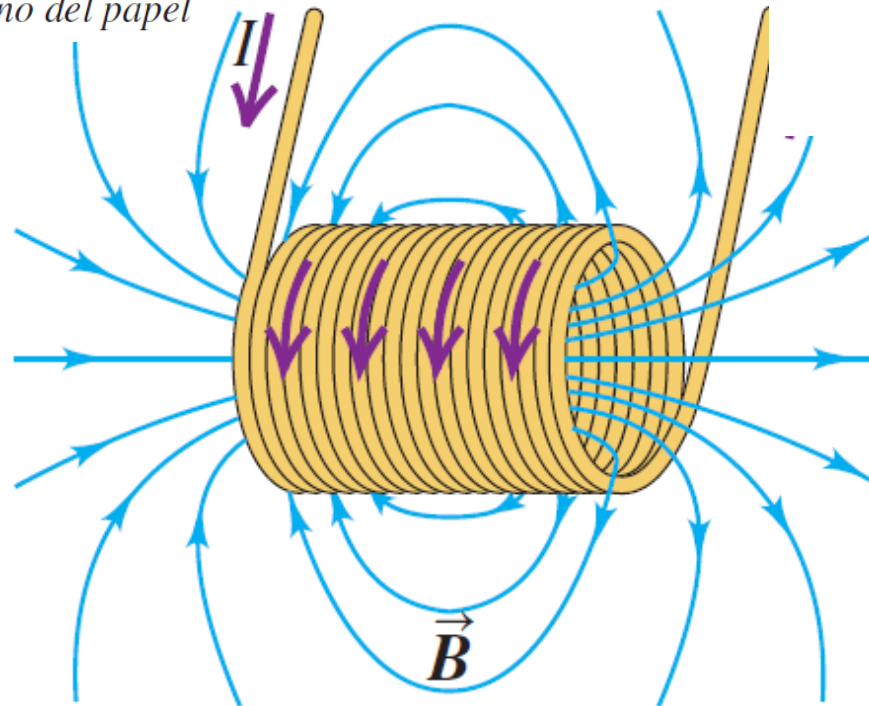
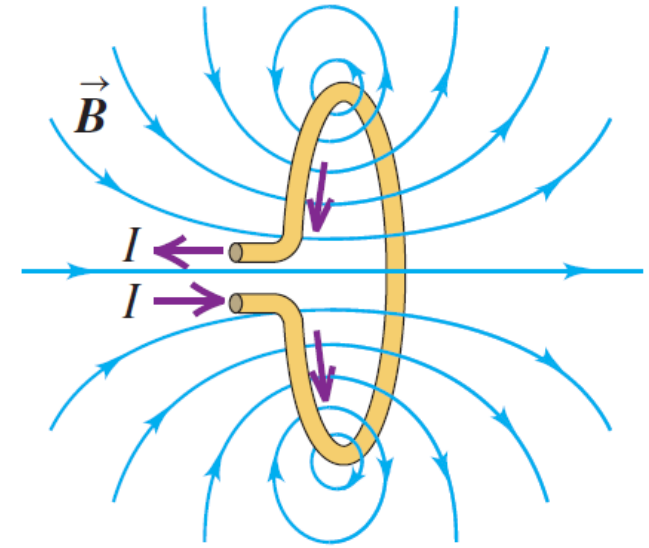
Generación de campos magnéticos



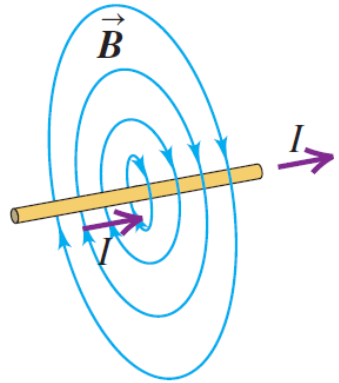
Vista en perspectiva



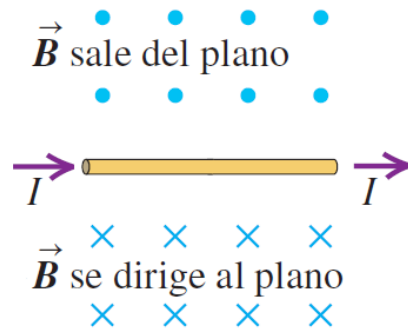
El alambre está en el plano del papel



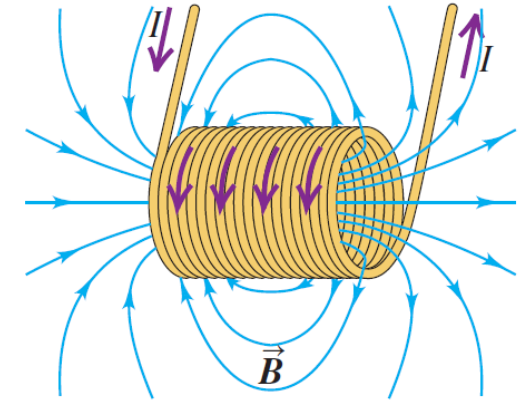
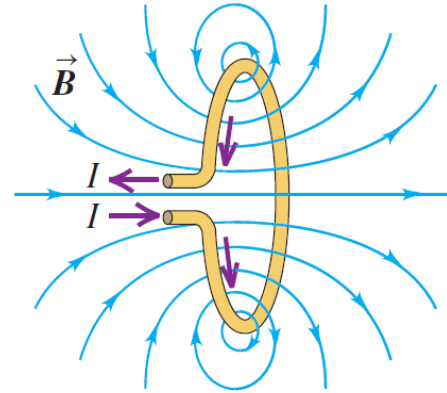
Generación de campos magnéticos



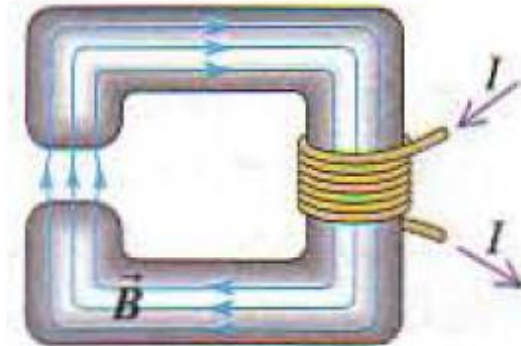
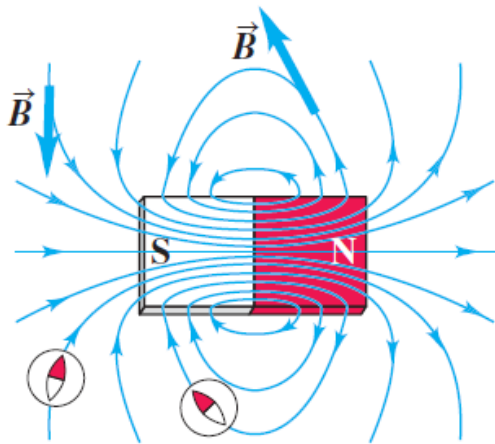
Vista en perspectiva



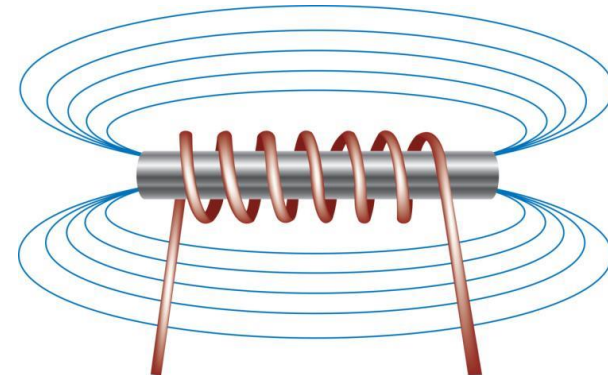
El alambre está en el plano del papel



En medios materiales



Electroimán



Generación de campos magnéticos

Fuente de B

Campo magnético terrestre

Campo magnético de un imán de heladera

Imanes de laboratorio

Solenoides en aire

Electroimanes industriales

Campos magnéticos generados por superconductores en laboratorios

Campos magnéticos usados para resonancias en Institutos médicos

Valor de campo [T]

5×10^{-5}

5×10^{-3}

0.01 a 1

0.0001 a 0.01

2

18

1.5 a 3



Campo magnético en el eje de un solenoide

Radio a y largo L

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \hat{z}$$

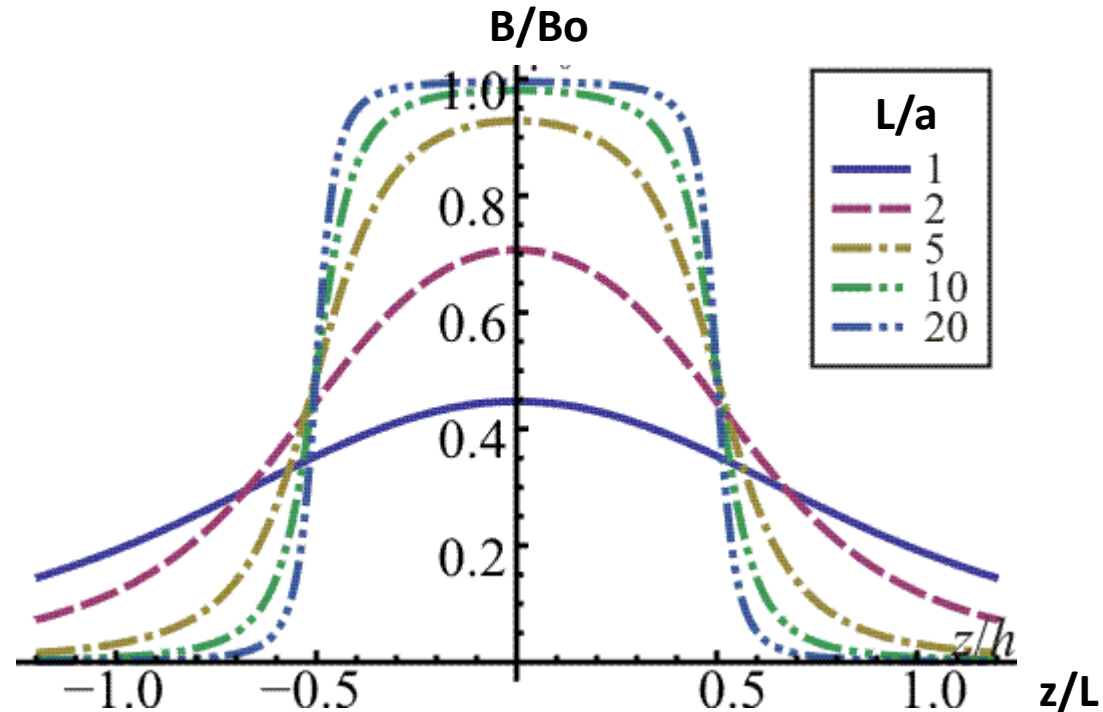
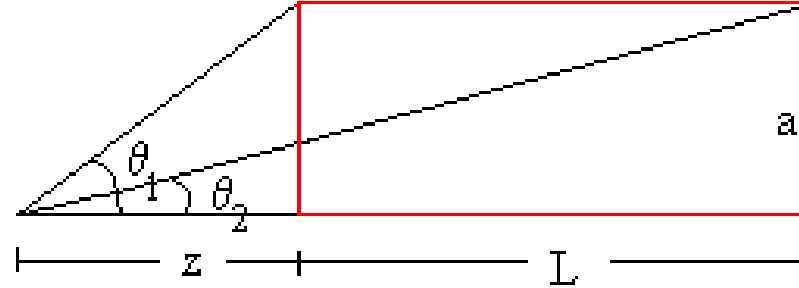
$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 n I}{2} \left(\frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + a^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \right) \hat{z}$$

Si $z \gg L, a$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 n I a^2 L}{2} \frac{1}{z^3} \hat{z}$$

Solenoide infinito: $\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = 0$

$$B_0 = \mu_0 n I$$



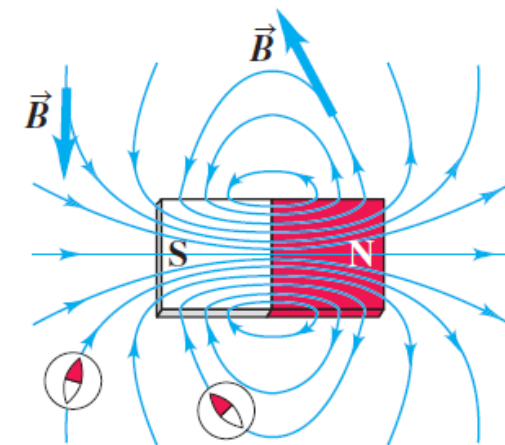
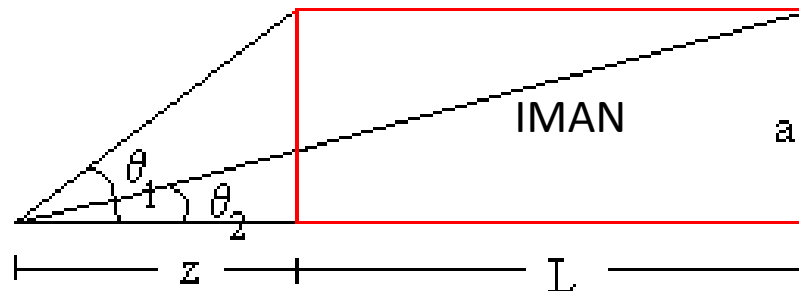
Si $L \gg a$,
en la zona
central vale la
aproximación de
solenoide
infinito

Campo magnético en el eje de un imán

Radio a y largo L

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \hat{z}$$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M}{2} \left(\frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + a^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \right) \hat{z}$$



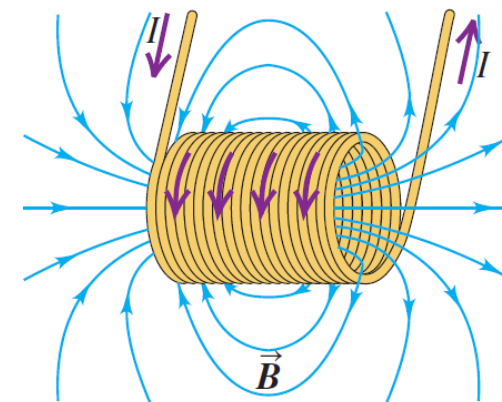
$$\vec{B}_s(z) = \frac{\mu_0 \cdot M}{2} \left(\frac{L}{\sqrt{L^2 + a^2}} \right) \hat{z} \quad z = 0 \quad (\text{en la superficie})$$

Si $L \gg a$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot a^2}{4} \left(\frac{1}{z^2} - \frac{1}{(z+L)^2} \right) \hat{z}$$

Si $z \gg L$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot a^2 \cdot L}{2} \cdot \frac{1}{z^3} \hat{z}$$



Dipolo magnético de momento dipolar m obtenemos la misma expresión reemplazando

$$M = \frac{m}{\pi \cdot a^2 \cdot L}$$

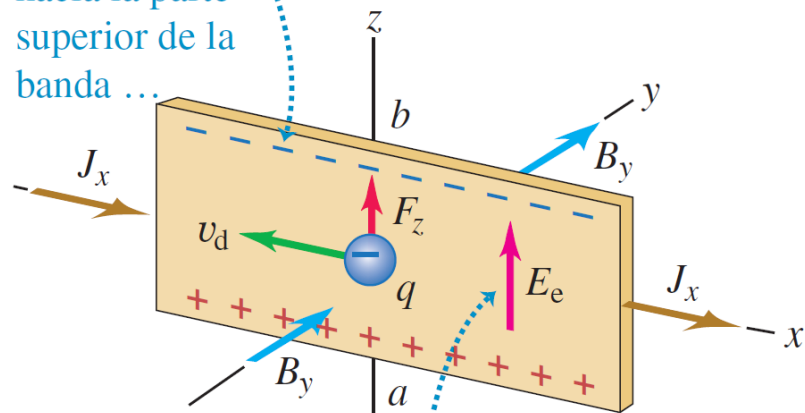
Solenoides con corriente I y densidad de espiras n obtenemos la misma expresión reemplazando

$$M = I \cdot n$$

Efecto Hall

Conducción de electrones

Los portadores de carga son empujados hacia la parte superior de la banda ...



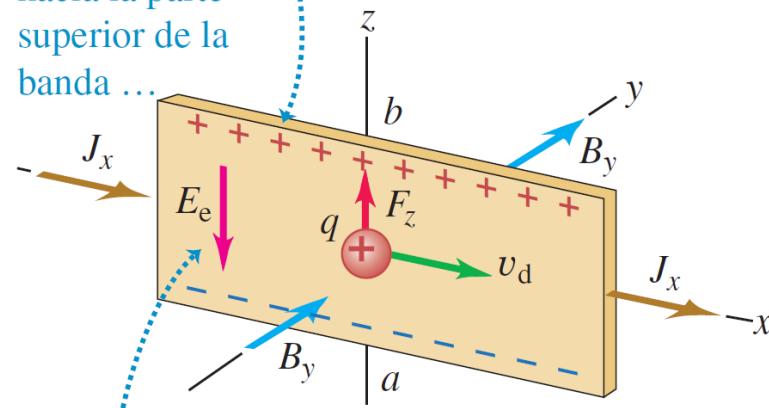
... por lo que el punto *a* tiene un potencial mayor que el punto *b*.

Acumulación de carga

$$J_x = n \cdot q \cdot v_d$$

Conducción de Huecos

Los portadores de carga otra vez son empujados hacia la parte superior de la banda ...



... de modo que la polaridad de la diferencia de potencial es opuesta a la de los portadores de carga negativa.

Generación de campo eléctrico
Que contrarrestara a F_z

$$\text{Equilibrio: } q \cdot E_z + q \cdot v_d \cdot B_y = 0$$

q : Carga electrón
 n : Concentración de cargas

Fuerza magnética siempre hacia arriba

$$F_z = |q|v_d B$$

Diferencia de potencial
Voltaje de Hall

$$B_y = \frac{-E_z \cdot n \cdot q}{J_x}$$

Sonda Hall

- Aprovecha el efecto Hall para medir el campo magnético
- Dada una corriente fija, esta tensión resulta proporcional a la componente normal del campo magnético.



$$V(B_{\perp}) = V_0 + ASB_{\perp}$$

- S : Sensibilidad (en mV/T)
- A : Ganancia del amplificador
- V_0 : Offset

Para medir usamos la calibración de fábrica y medimos el campo en las direcciones opuestas

$$B = \frac{B_0 - B_{180}}{2} \quad (\text{manteniendo el signo de } B_{180})$$

Mediciones de campo magnético con celulares

Magneto Resistencias

- Son elementos que varían su resistencia en presencia de un campo magnético

Aplicaciones para ANDROID

Phyphox - Magnetómetro

Compass Galaxy (brújula)

Gauss meter

Medición del campo magnético

-Magnetic Field Sensor – Vernier
(Hoja de datos en la página de la materia)

12-bit resolution	$\pm 0.32 \text{ mT}$ range: 0.0002 mT $\pm 6.4 \text{ mT}$ range: 0.004 mT
-------------------	--

Rango: $\pm 0,32 \text{ mT}$
 $\pm 6,4 \text{ mT}$

-Adquisición con DAQ
(Conversor analógico digital de 12 bits)

-Software: SensorDAQ

Permite variar:

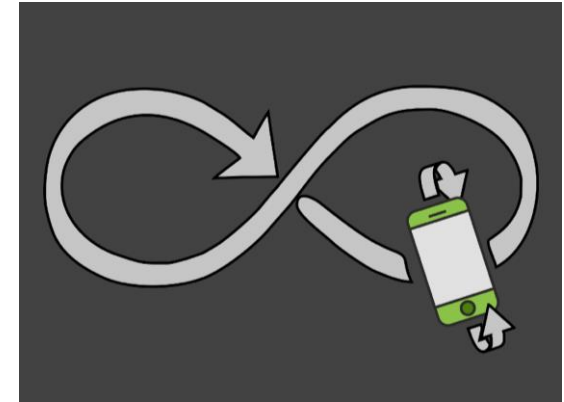
- Tiempo de medición
- Frecuencia de adquisición (Max 10 kHz)

Al medir señales con valor “constante” se puede hacer un análisis estadístico

Medición del campo magnético



Calibración del sensor



Durante la medición desplazar el teléfono formando un 8 con rotación simultánea sobre sí mismo

Utilizar aplicación Gauss Meter

<http://www.keuwl.com/GaussMeter>

En iPhone o iPad

Tesla metal detector and magnetic field recorder + aplicación tipo brújula

Actividades propuestas

- Con Sonda Hall y con el celular (**comparar resultados**)

Determinar el norte magnético

Medir el campo magnético terrestre (determinar el campo paralelo al piso y el campo perpendicular al piso)

Con SONDA HALL

- Medir el campo magnético generado por un solenoide sobre el eje en el interior del solenoide (corriente máxima para el solenoide: 500 mA). *Opcional: completar con mediciones en el exterior*

Colocar el solenoide en la dirección perpendicular a la dirección N

Medir en el rango que permita el sensor – Invertir el campo invirtiendo la corriente

Proponer modelos para ajustar los resultados.

¿Qué magnitudes conviene graficar?

Inducción electromagnética

Ley de Faraday

Flujo magnético a través
de una superficie

$$fem = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \, d\vec{s}$$

Fuerza electromotriz inducida

Ley de Lenz

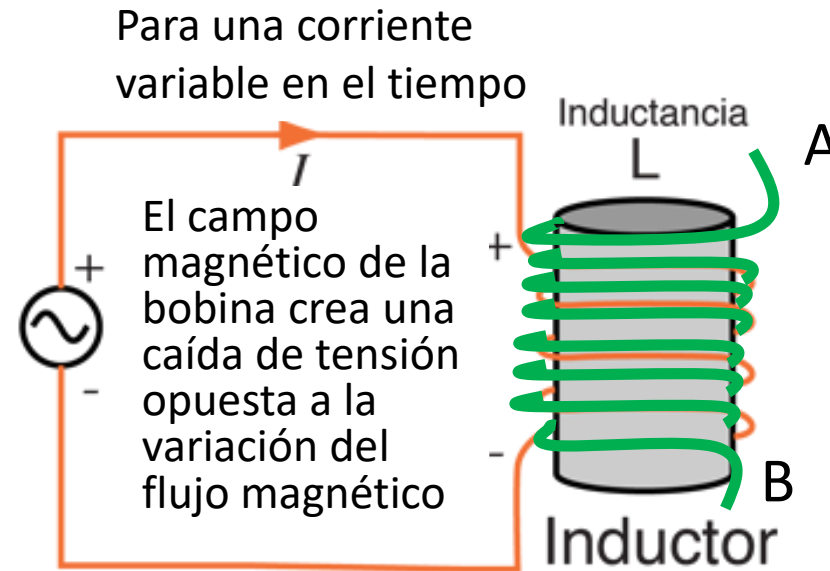
La ***fem*** inducida produce una corriente cuyo campo magnético se opone siempre a variaciones del campo existente.

Acoplamiento inductivo

Ley de Faraday

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_1}{dt}$$

$$\varepsilon = -N_1 A_1 \frac{dB}{dt} = -L_1 \frac{dI}{dt}$$



Agregamos una bobina concéntrica de N_2 espiras

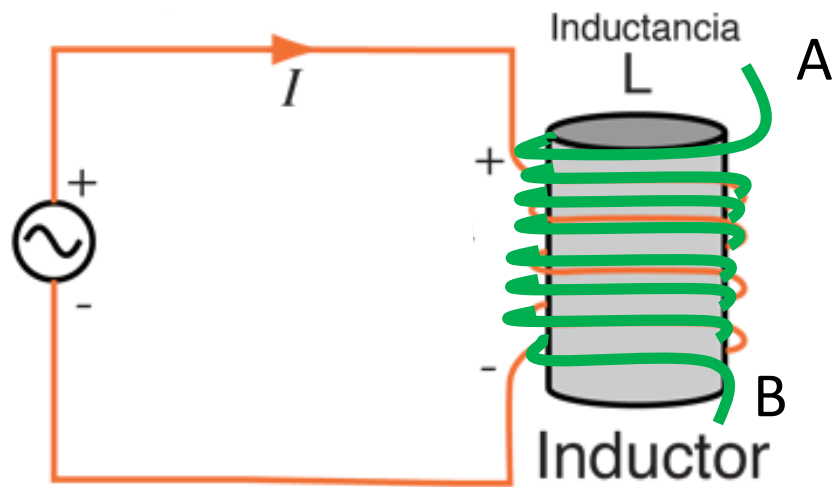
¿Cuánto vale V_{AB} si $I = \text{cte.}$? $\longrightarrow V_{AB} = 0$

¿Cuánto vale V_{AB} si I varía con el tiempo? $\longrightarrow V_{AB} = - \frac{d\phi_{21}}{dt} =$

$$A_2 \leq A_1$$

$$V_{AB} = -N_2 A_2 \frac{dB}{dt} = -M \frac{dI}{dt}$$

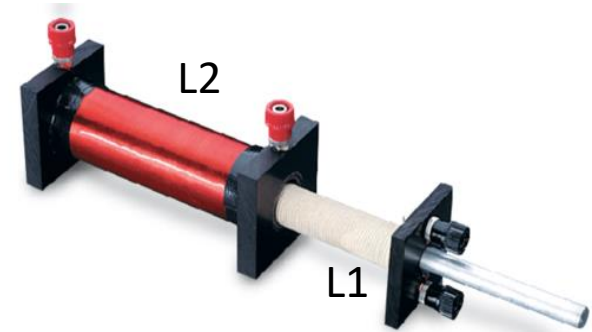
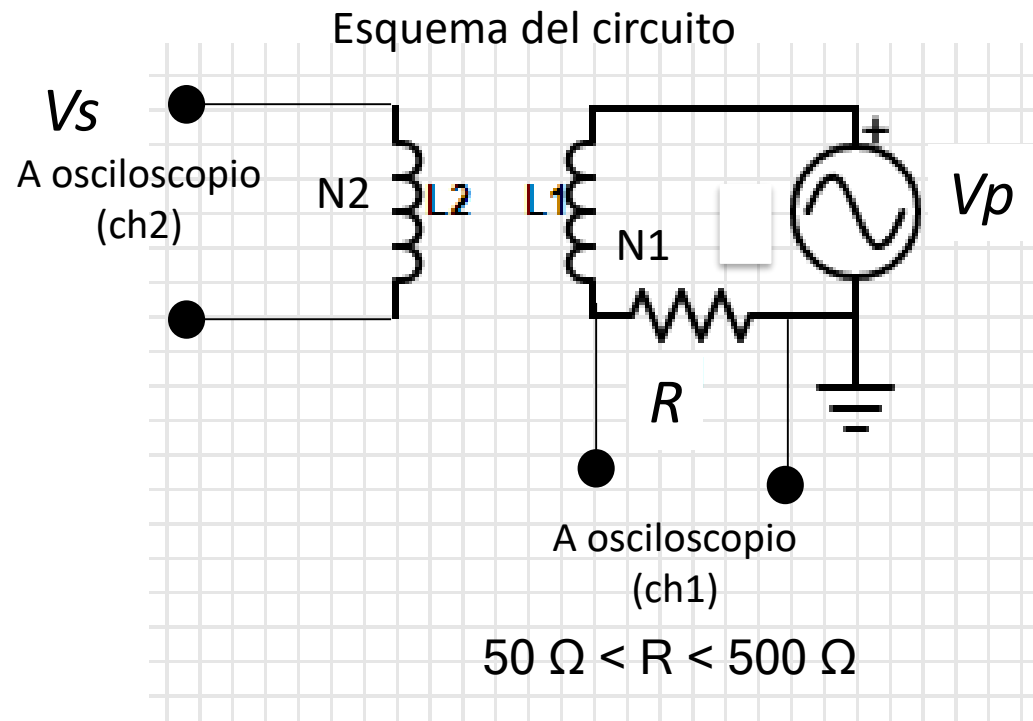
Acoplamiento inductivo



$$L_1 = \frac{\mu N_1^2 A}{h} \qquad L_2 = \frac{\mu N_2^2 A}{h}$$

$$M = \frac{\mu N_1 N_2 A}{h} = \sqrt{L_1 L_2}$$

Actividad: Medición de inducción entre dos bobinas



Variar ω . Estudiar V_s vs ω

Variar V_p . Estudiar V_s vs V_R

Repetir la experiencia colocando un **núcleo de hierro** en el interior de las bobinas

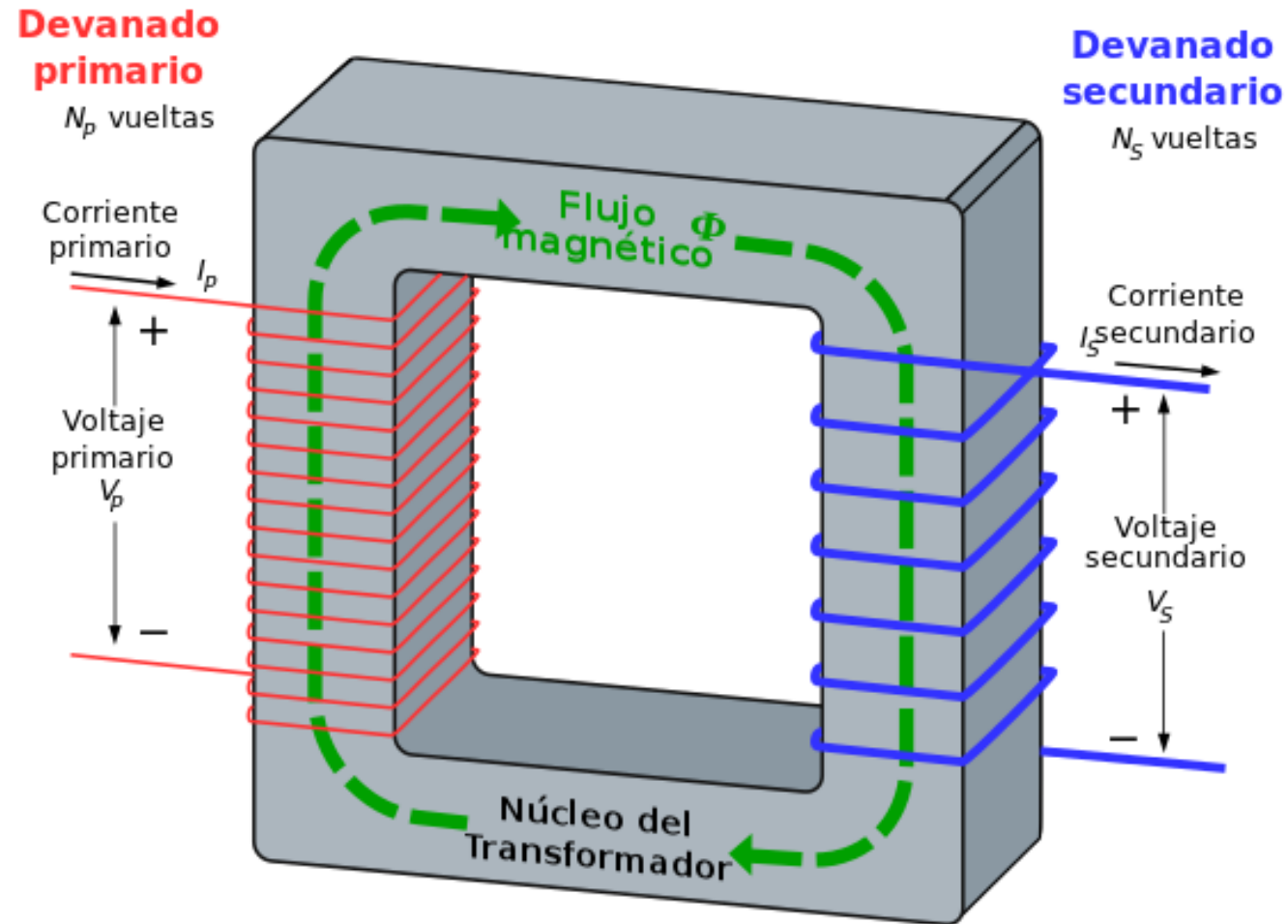
Actividad: Medición de inducción entre dos bobinas

- Variar ω . Estudiar V_s vs ω . ¿Cómo se puede explicar el comportamiento observado entre las magnitudes?
- Variar V_p . Estudiar V_s vs V_R . ¿Qué información se puede obtener del ajuste de la curva?
- Se repite la experiencia colocando un **núcleo de hierro** en el interior de las bobinas.
- Al estudiar V_s vs V_R con el núcleo de hierro ¿Qué información se puede obtener del ajuste de la curva? Comparar con los resultados del punto anterior (Se pueden graficar ambas curvas en un mismo gráfico).
- Pregunta: ¿Qué pasa si se aplica una señal triangular? ¿Por qué?

Observaciones

1. Con el generador se mide f (ciclos por unidad de tiempo) pero se pide graficar en función de ω .
2. Las tierras del generador de funciones y del osciloscopio deben coincidir
3. Las bobinas reales tienen resistencias internas intrínsecas (dado por el bobinado de los cables), por lo que se debe **medir a priori con un multímetro** y tener en cuenta en el circuito.

Transformadores:



Transformadores

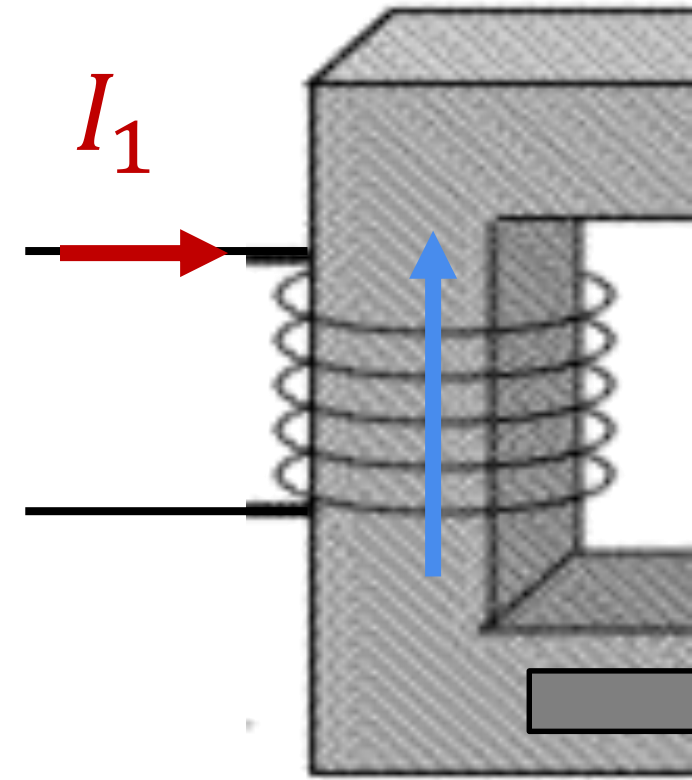
Corriente

Campo Magnético (B)

$$fem_1 = - \frac{d(B S N_1)}{dt}$$

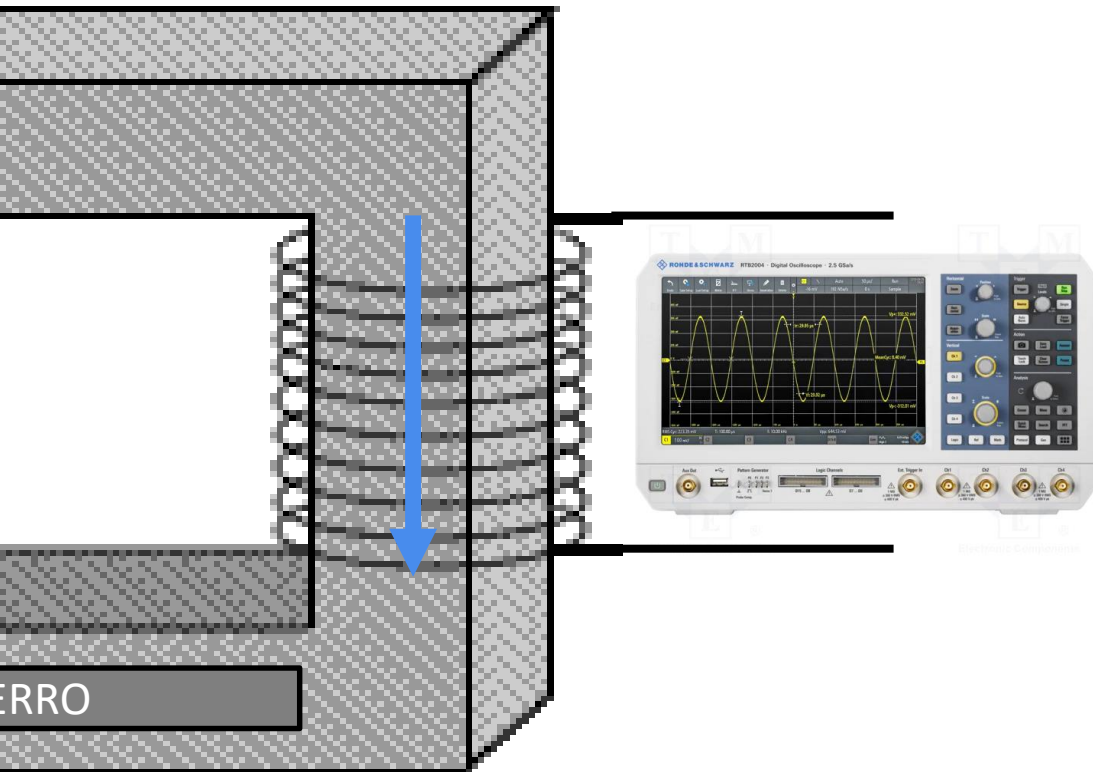
Fuente
de Corriente
Alterna
(Amplitud,
Frecuencia)

$$= -S N_1 \frac{dB}{dt}$$



Primario
(5 vueltas)

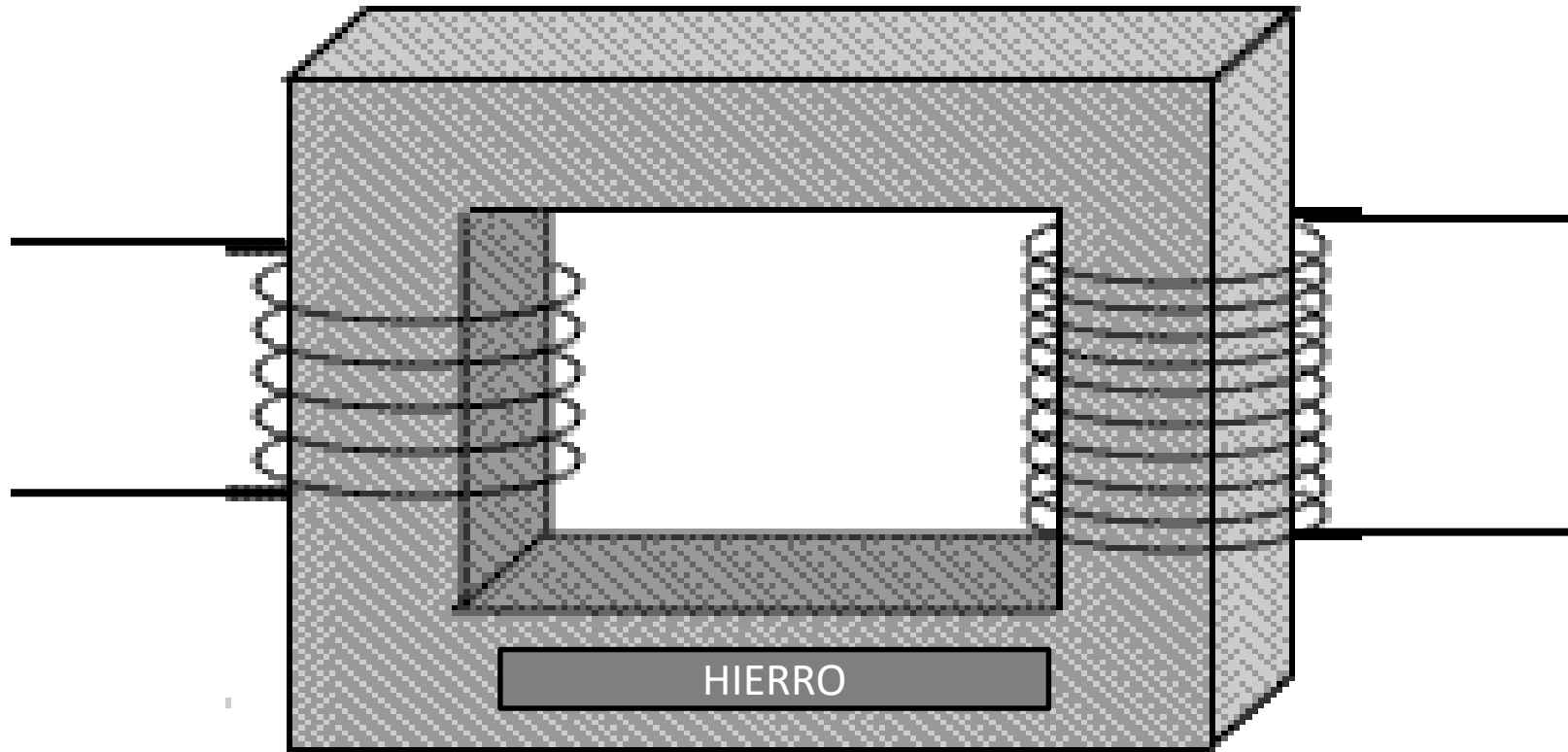
Transformadores



Secundario
(10 vueltas)

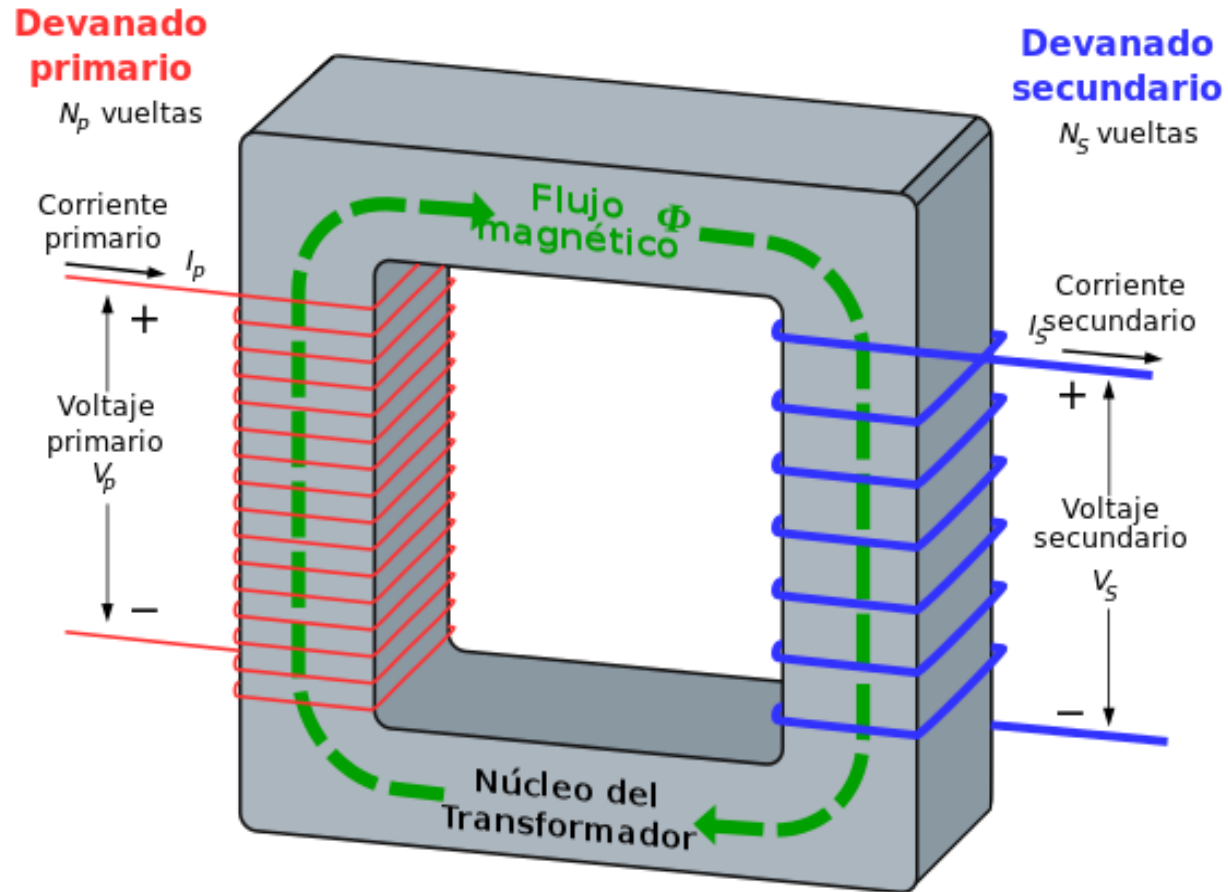
$$fem_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt}$$
$$= -S N_2 \frac{dB}{dt}$$

Transformadores



$$\frac{fem_2}{fem_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Transformadores:



$$L_{p,s} = \mu N_{p,s}^2 \frac{A}{L} \quad n = \frac{N_s}{N_p}$$

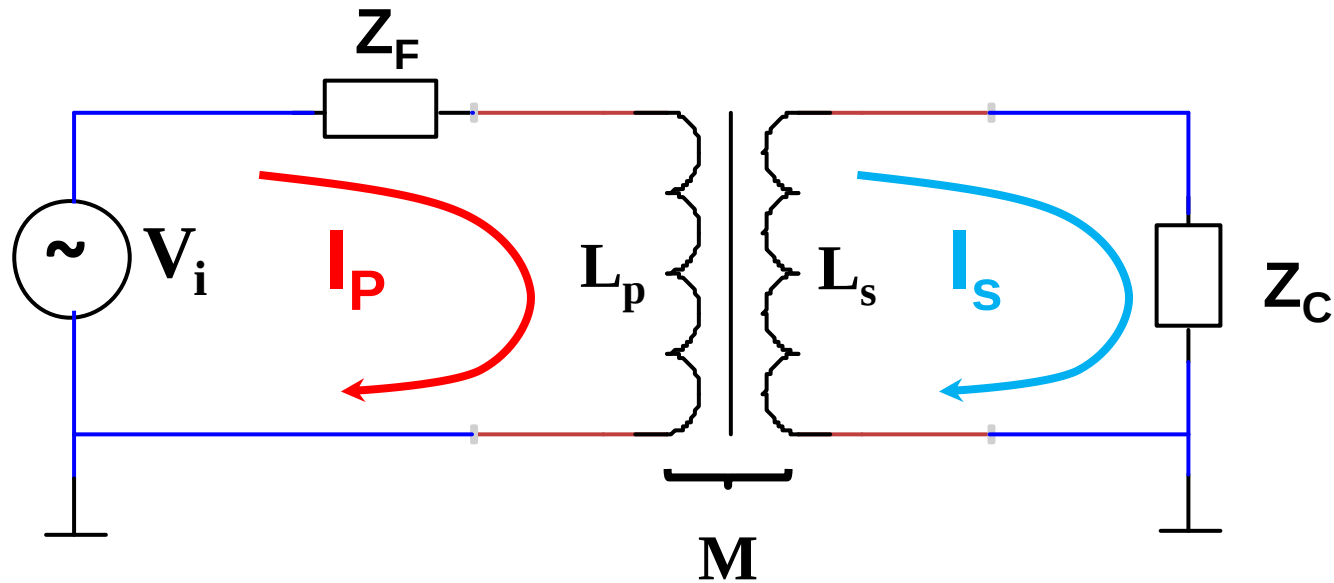
Transformador ideal

$$M = \sqrt{L_p L_s}$$

Transformador NO ideal

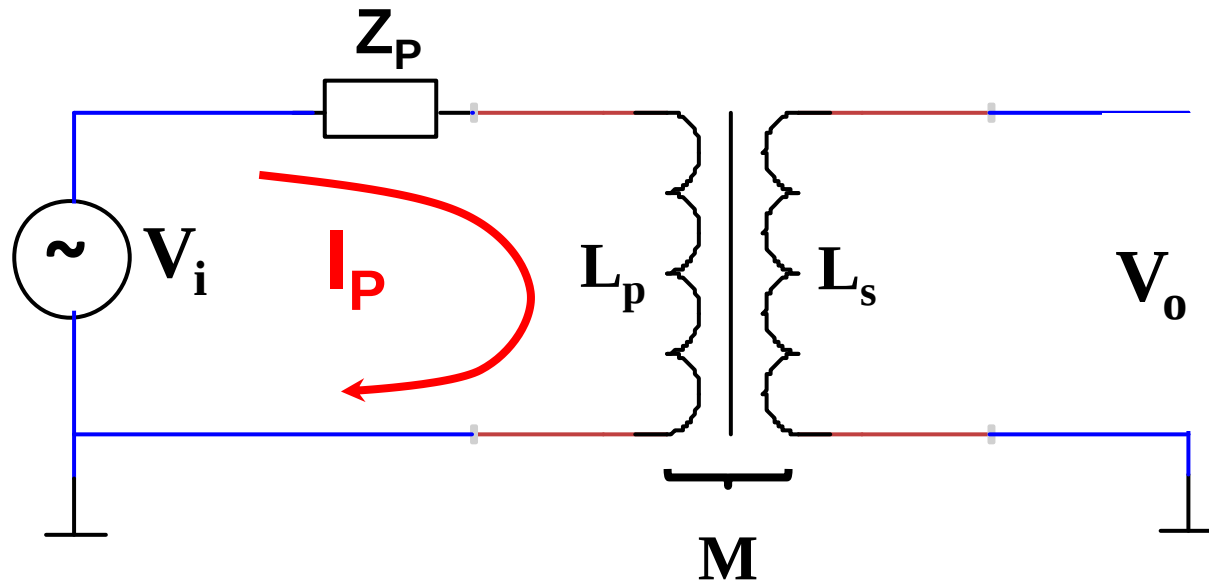
$$M = k \sqrt{L_p L_s} \quad k < 1$$

Transformadores:



$$\begin{cases} V_i = I_p (Z_F + j\omega L_p) \pm I_s j\omega M \\ 0 = \pm I_p j\omega M + I_s (Z_C + j\omega L_s) \end{cases}$$

Transformadores:



$$Z_C = \infty \longrightarrow I_s = 0$$

$$V_i = I_p (R_p + j\omega L_p) \quad Z_p = R_p$$

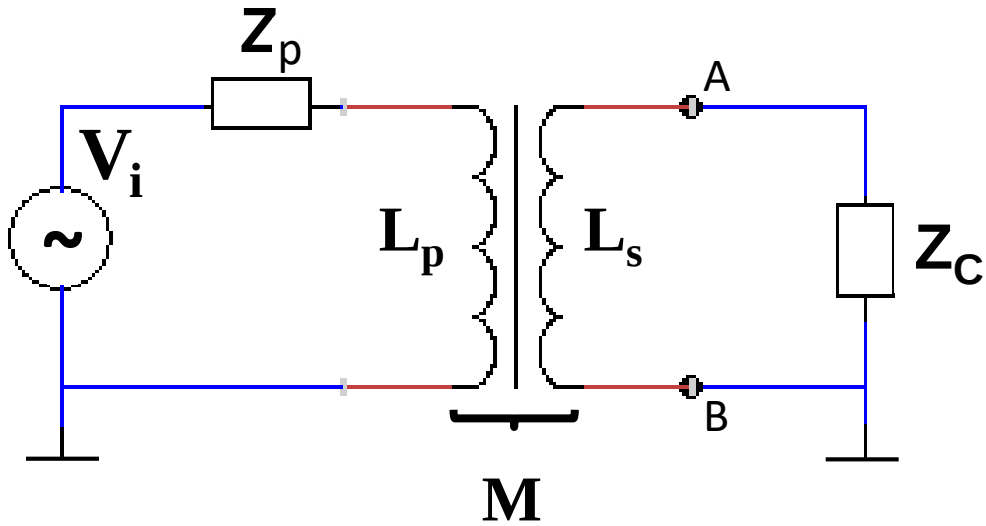
$$V_o = \pm I_p j\omega M$$

$$\begin{cases} V_i = I_p (Z_p + j\omega L_p) \pm I_s j\omega M \\ 0 = \pm I_p j\omega M + I_s (Z_C + j\omega L_s) \end{cases}$$

Transformador ideal $R_p \ll \omega L_p$

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{M}{L_p} = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} = n = \frac{N_s}{N_p} \quad \frac{L_s}{L_p} = n^2$$

Transformadores:



$$Z_C = 0 \quad \longrightarrow \quad I_s = I_{cc}$$

$$V_i = I_p (R_p + j\omega L_p) \mp jI_s \omega M$$

$$0 = \pm I_p j\omega M + jI_s \omega L_s$$

$$\begin{cases} V_i = I_p (Z_p + j\omega L_p) \pm I_s j\omega M \\ 0 = \pm I_p j\omega M + I_s (Z_C + j\omega L_s) \end{cases}$$

$$\left| \frac{I_s}{I_p} \right| = \frac{M}{L_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} = \frac{1}{n} = \frac{N_p}{N_s}$$

Actividad: Caracterización de un transformador

Armar un transformador con un núcleo de hierro cerrado.
Emplear una frecuencia f inferior a 500 Hz.

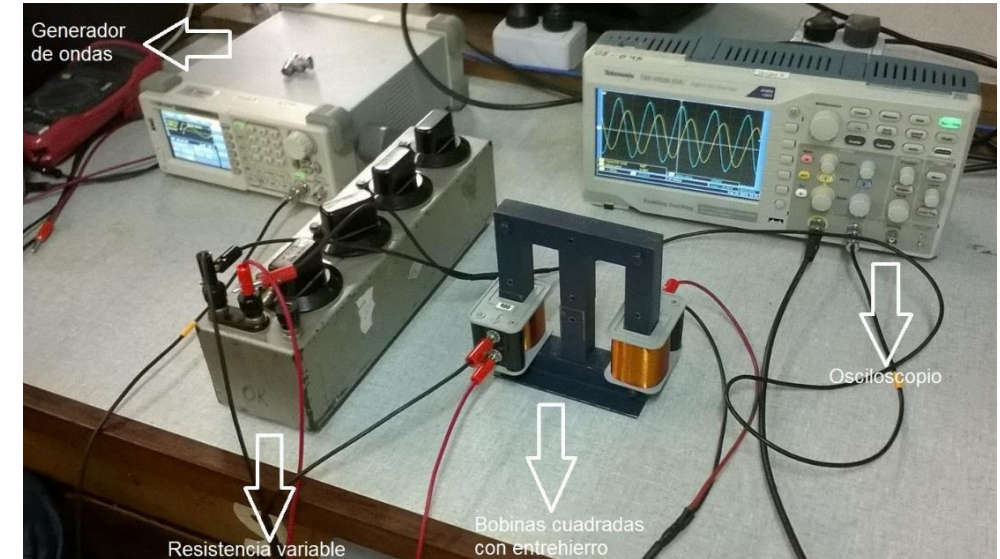
Para un valor fijo de N_{primario} y $N_{\text{secundario}}$ determinar las autoinductancias de primario y secundario y la inductancia mutua

Variar N_s cambiando las bobinas del circuito secundario.
Graficar y realizar un ajuste de $V_{\text{secundario}} / N_{\text{primario}}$ vs $RATIO = N_{\text{secundario}} / N_{\text{primario}}$.

¿Qué se puede analizar del valor obtenido en la pendiente?

Observación: Un valor de RATIO de 1 significa que la cantidad de espiras $N_{\text{primario}} = N_{\text{secundario}}$, mientras que un ratio de 0.1 significa que $N_{\text{primario}} = 10 N_{\text{secundario}}$.

Pregunta: ¿Qué pasa si alteramos el entrehierro?



Bloque 3 # Propuesta de trabajo

Grupos 1 al 5

19/5 – 26/5 Medición de campo magnético

26/5 – 2/6 Inducción electromagnética

Grupos 6 al 10

19/5 – 26/5 Inducción electromagnética

26/5 – 2/6 Medición de campo magnético

Bloque 3 # Material de lectura

Apuntes de Labo

Campo magnético sobre el eje de dos bobinas
Campo magnético de dos solenoides finitos

Manuales y ...

Manual Sonda Hall
Manuales de los equipos a usar

https://drive.google.com/drive/folders/1sqipPSqsQYbopn-rxhbmRB6uS_pJ0wuA

.... y su carpeta / libro de Física 3