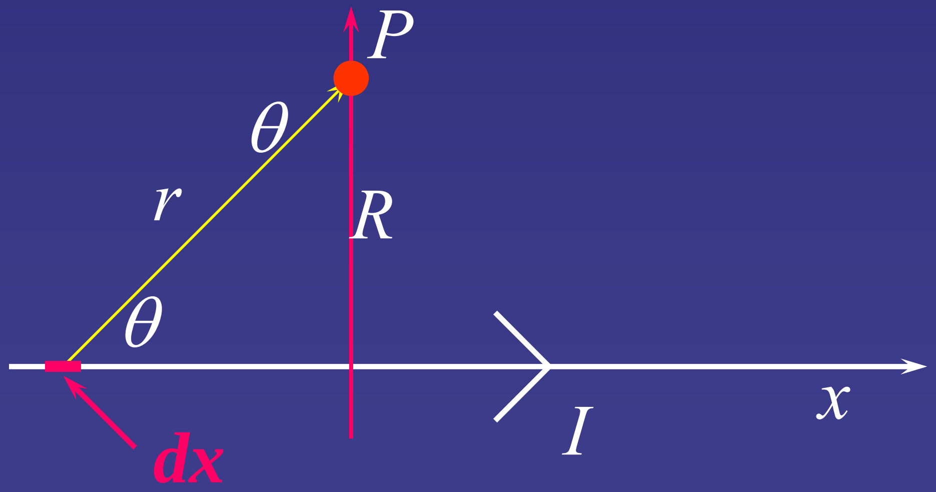
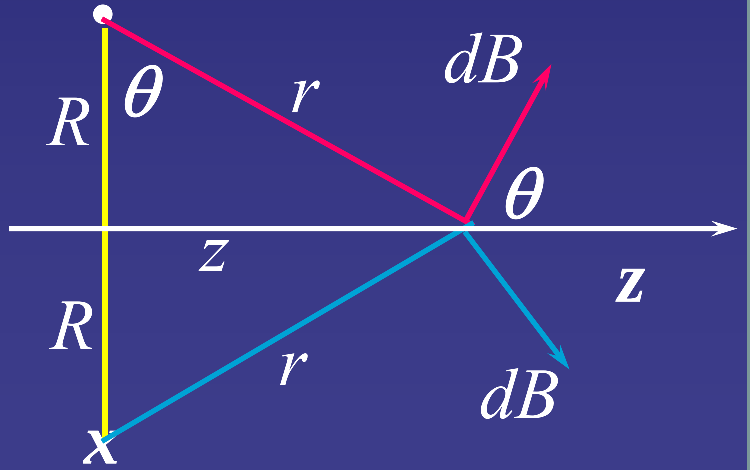
Magnetismo

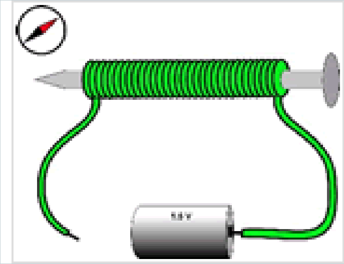
Las leyes de Biot-Savart y de Ampere



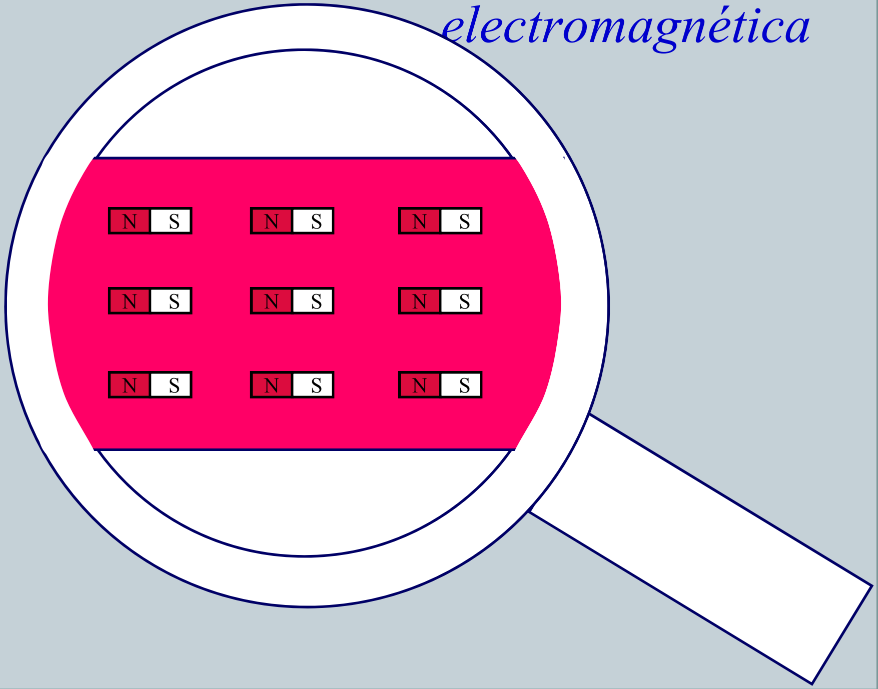


Campo Magnético Causado por Corrientes

- Como usted puede saber, es posible fabricar un magneto (imán) enrollando un alambre sobre un clavo y hacer pasar corriente a través del alambre.
- De éste y otros experimentos, se puede observar que las corrientes *crean* campos magnéticos.
- En verdad, ésta es la ***única*** forma en que el campo magnético puede ser creado.
- Si nosotros viéramos al interior de un imán permanente, encontraríamos que contiene un enorme número de átomos cuyas cargas giran creando minúsculas corrientes.



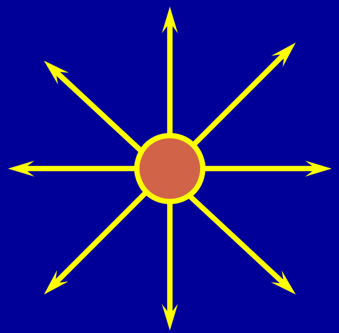
Grua electromagnética



Cálculo del Campo Eléctrico

- **Dos formas de calcular**
  - **Ley de Coulomb**

$$d\vec{E} = k\frac{dq}{r^2}\hat{r}$$



Para cualquier distribución de carga

  - **Ley de Gauss**

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} \bullet d\vec{S} = q$$

“Alta simetría"

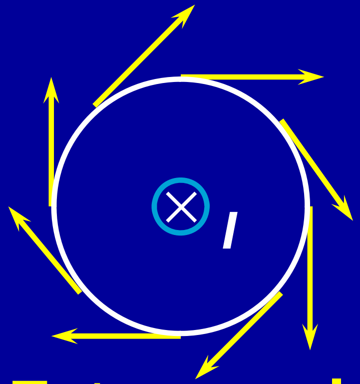
Cuáles son las ecuaciones análogas para el Campo Magnético?

Cálculo del Campo Magnético

- **Dos formas de calcular**
  - **Ley de Biot-Savart ("Cualquier distribución de corriente")**
  - **Ley de Ampere ("Alta simetría")**

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

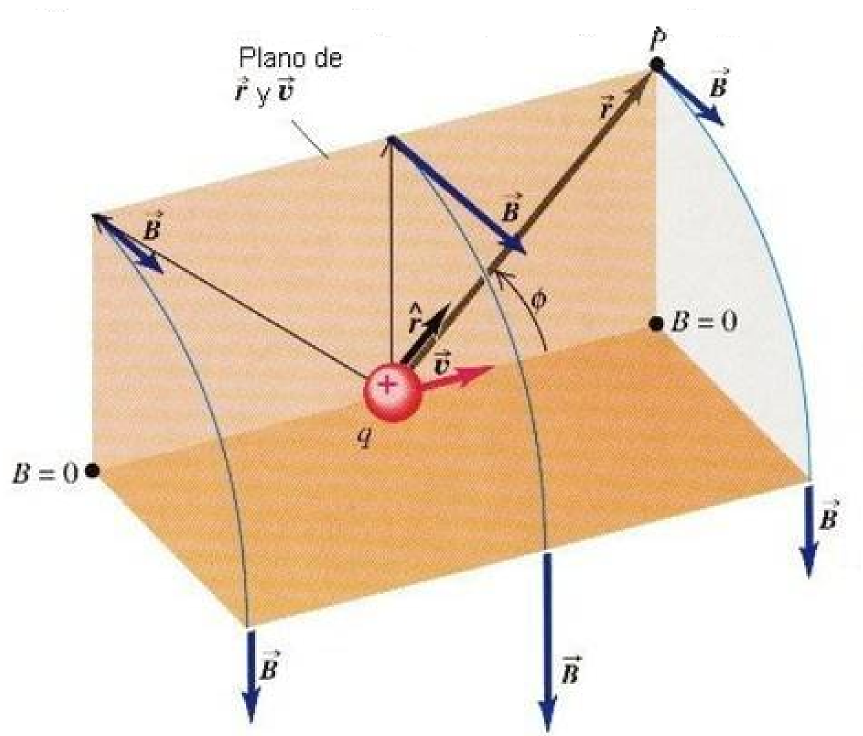
$$\oint \vec{B} \bullet d\vec{l} = \mu_0 I$$



–Superficie Amperiana (Trayectoria Amp.)

Estas son las ecuaciones análogas

El Campo Magnético en un punto *p* *generado por una carga q en movimiento*, siempre apunta Perpendicular al plano formado entre la Posición del punto *p* (*r*) y la velocidad de la partícula (*v*).



$$g = \frac{Gm}{r^2} \qquad E = \frac{kq}{r^2} \qquad B \,\alpha\, \frac{Kqv}{r^2}$$

¿Cómo representamos la condición de que **B** es perpendicular a ***v*** y ***r***?

$$\vec{B} = \frac{Kq\vec{v} \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{q\vec{v}x\hat{r}}{r^2} \qquad B = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{qvsen\phi}{r^2}$$

La paradoja que dio origen a la teoría especial de la relatividad

$$F_E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q^2}{r^2} \qquad F_B = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{q^2v^2}{r^2}$$

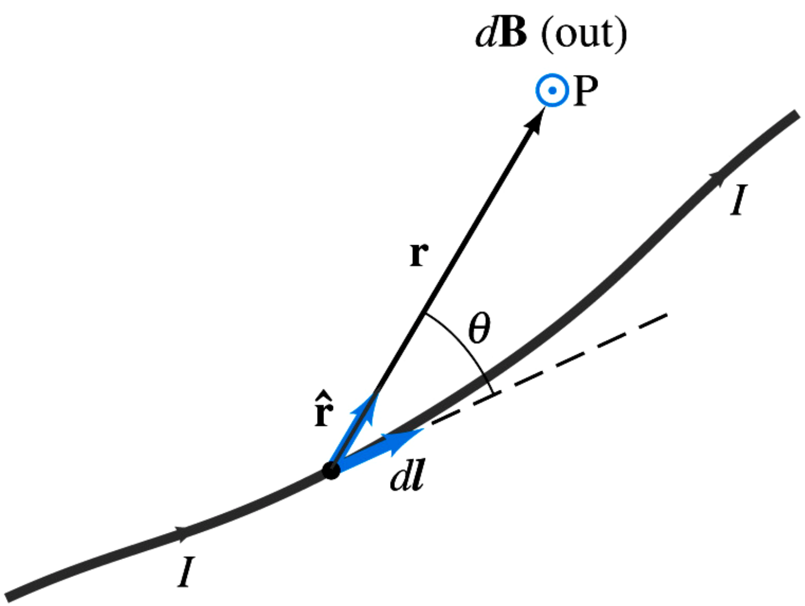
$$\frac{F_B}{F_E} = \mu_o\varepsilon_o v^2 \qquad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o\varepsilon_o}}$$

$$\frac{F_B}{F_E} = \frac{v^2}{c^2}$$

Cuando v es pequeña comparada con c, la fuerza magnética es mucho menor que la fuerza eléctrica

LA LEY DE BIOT-SAVART

Contribucion diferencial del campo magnetico (***dB***) en el punto P generado por un tramo diferencial (***dl***) de conductor con corriente (*I*)



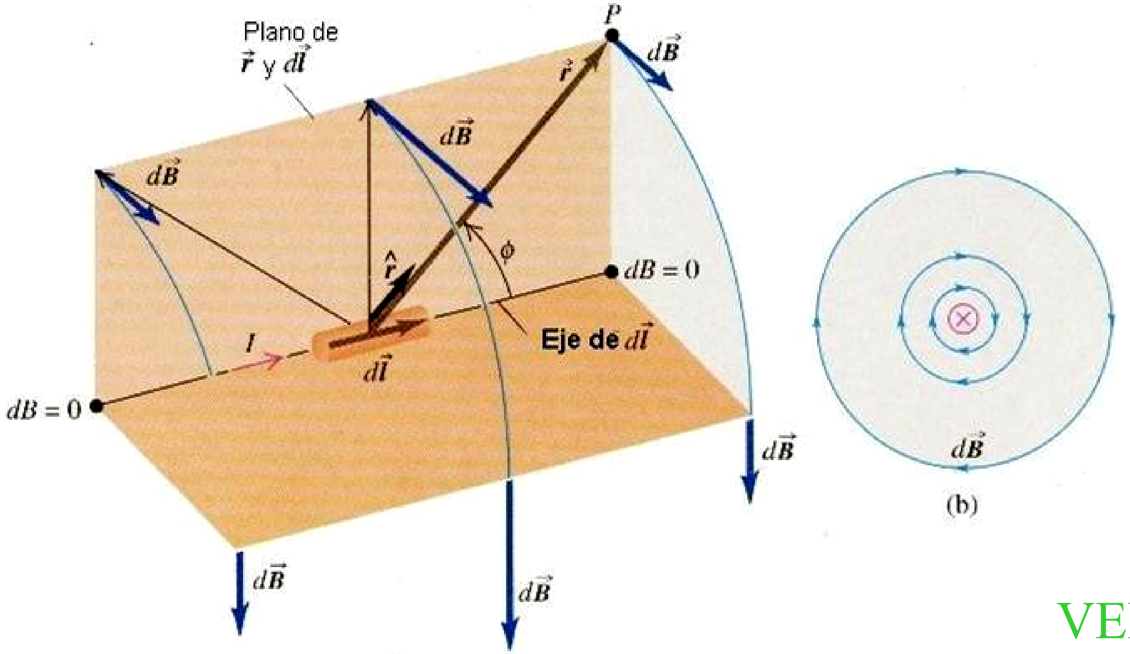
$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{q\,\vec{v}\,x\,\hat{r}}{r^2}$$

Tenemos que adaptar la expresión para el campo B de una carga al de un "flujo" de cargas

CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A UN ELEMENTO DE CORRIENTE

LA LEY DE BIOT-SAVART

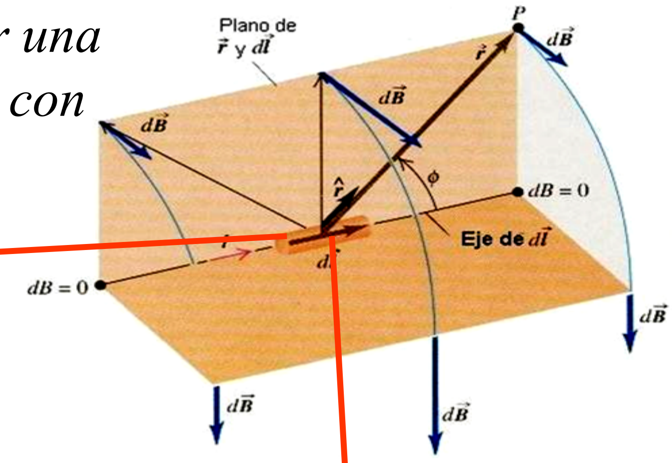
El campo magnético total generado por varias cargas en movimiento es la suma vectorial de los campos generados por las cargas individuales



VER ANIMACIÓN

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{qvsen\phi}{r^2}$$

Campo generado por una carga *q* moviéndose con velocidad *v*

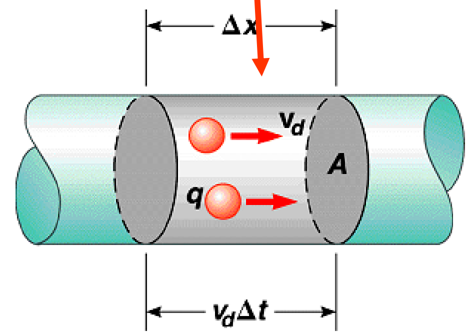


$$dq = n(Adl)e$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{dq\,v_d\,sen\phi}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{(nAdle)v_d sen\phi}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{(nAv_d\,e)dlsen\phi}{r^2}$$



Corriente convencional: movimiento de "portadores positivos" de carga

$$\boxed{dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{Idlsen\phi}{r^2}}$$

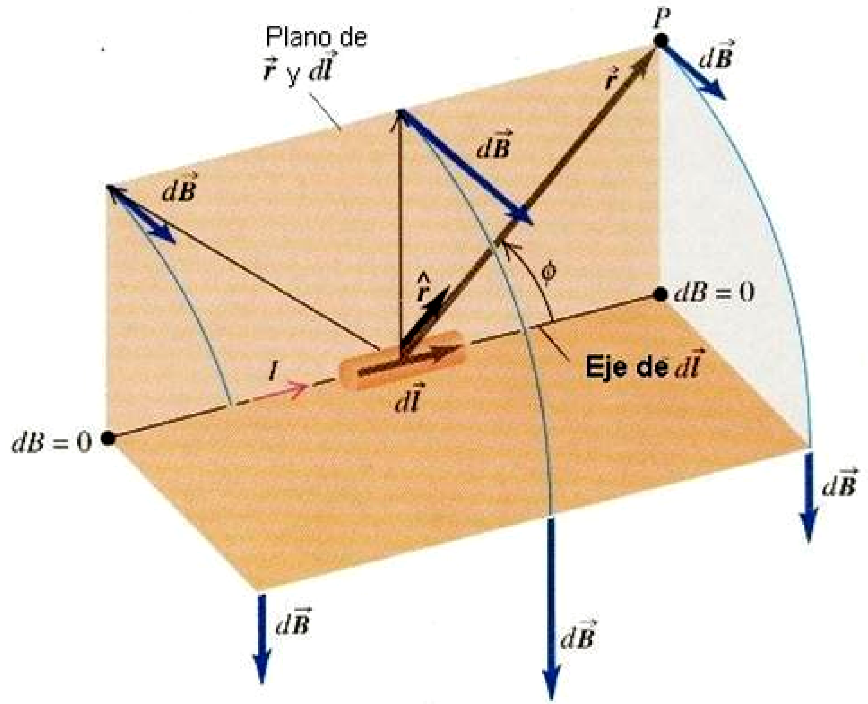
$$\boxed{d\vec{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi}\frac{d\vec{l}x\hat{r}}{r^2}}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi}\frac{d\vec{l} x \hat{r}}{r^2}$$

Expresión vectorial

$$dB = \frac{\mu_o i}{4\pi}\frac{dl sen\phi}{r^2}$$

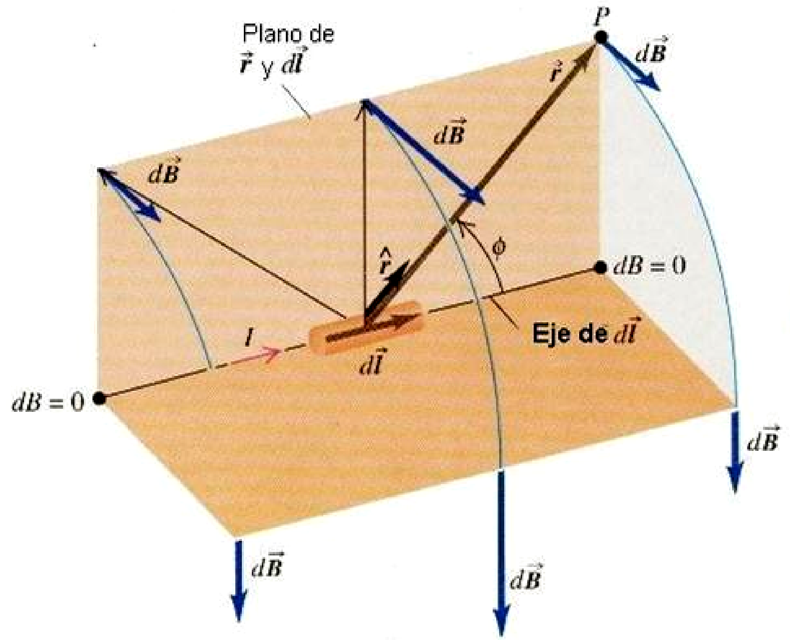
Expresión escalar



r - es la magnitud del vector posición *r*, éste vector apunta desde el diferencial d***l*** del conductor hasta el punto *p* donde se mide la contribución del campo.

d*l* - es la magnitud del vector d***l***, éste vector es tangente al conductor y apunta en la dirección de la corriente convencional.

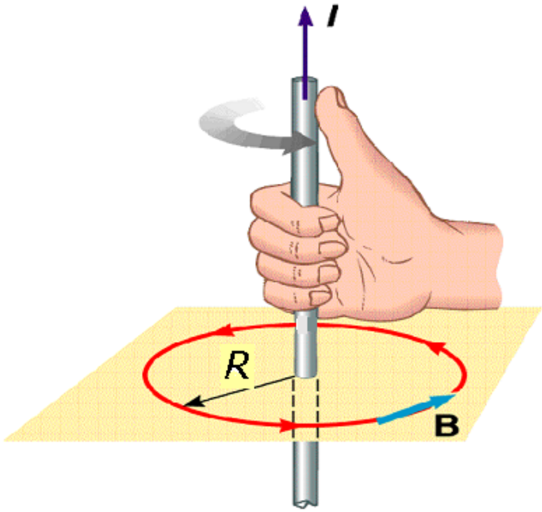
$$dB = \frac{\mu_o i}{4\pi}\frac{dl\,sen\phi}{r^2}$$

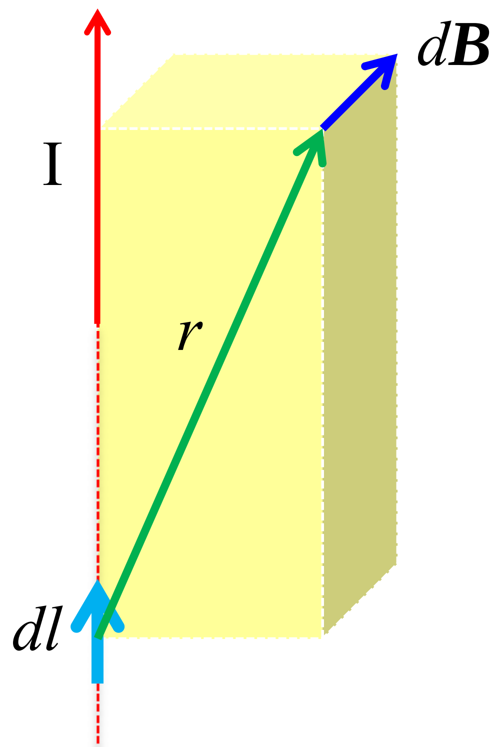


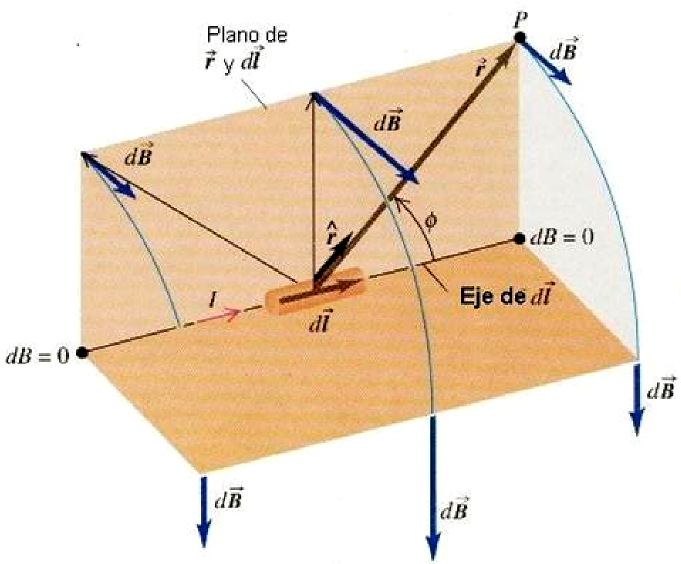
Φ- Representa el ángulo formado entre los vectores d*l* y *r*.

μo - Es una constante conocida como permeabilidad magnética del espacio libre (vacío), en el sistema internacional de unidades su valor es $4\pi x10^{-7}$ Wb/A.m ó (T.m/A)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$$

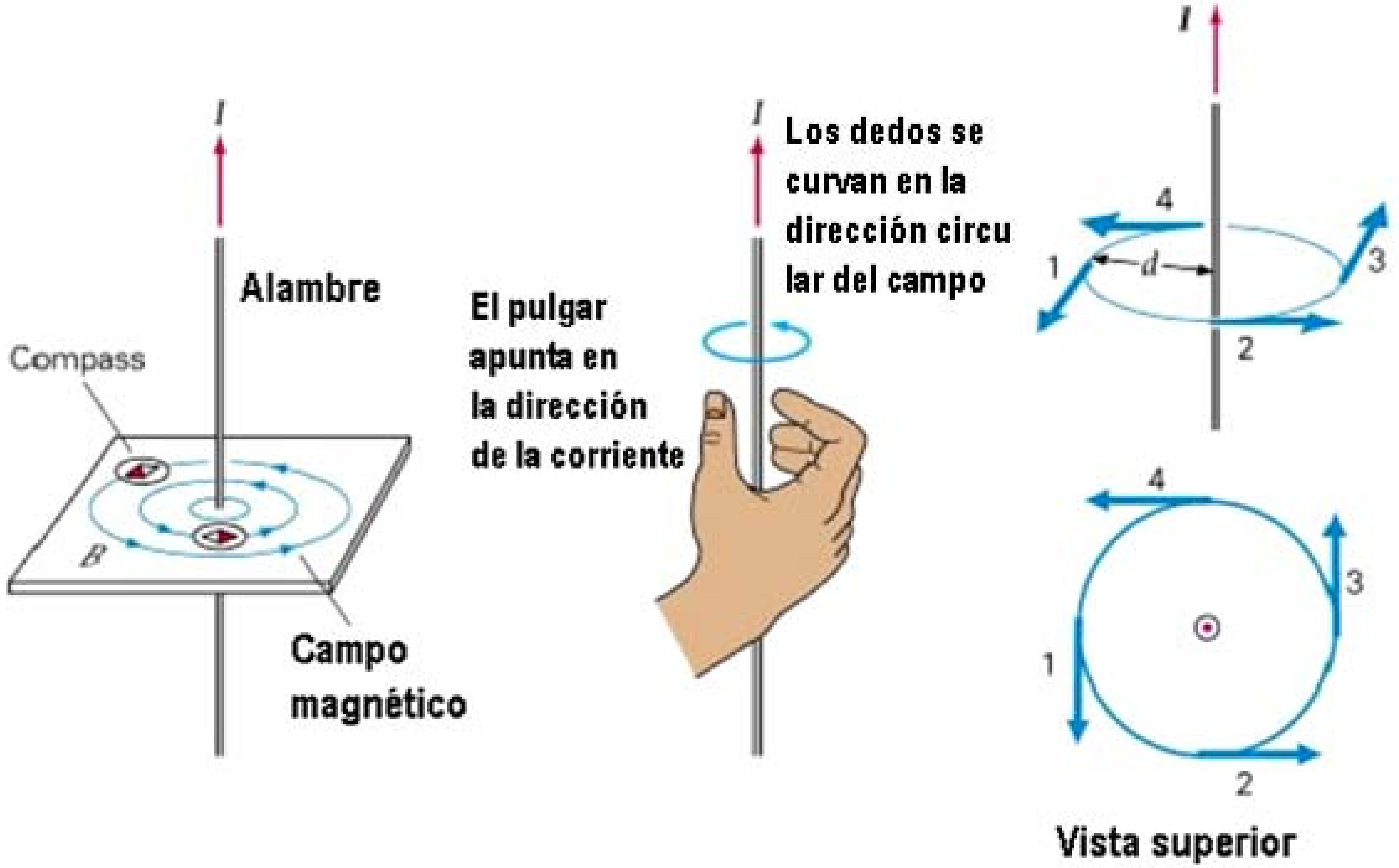






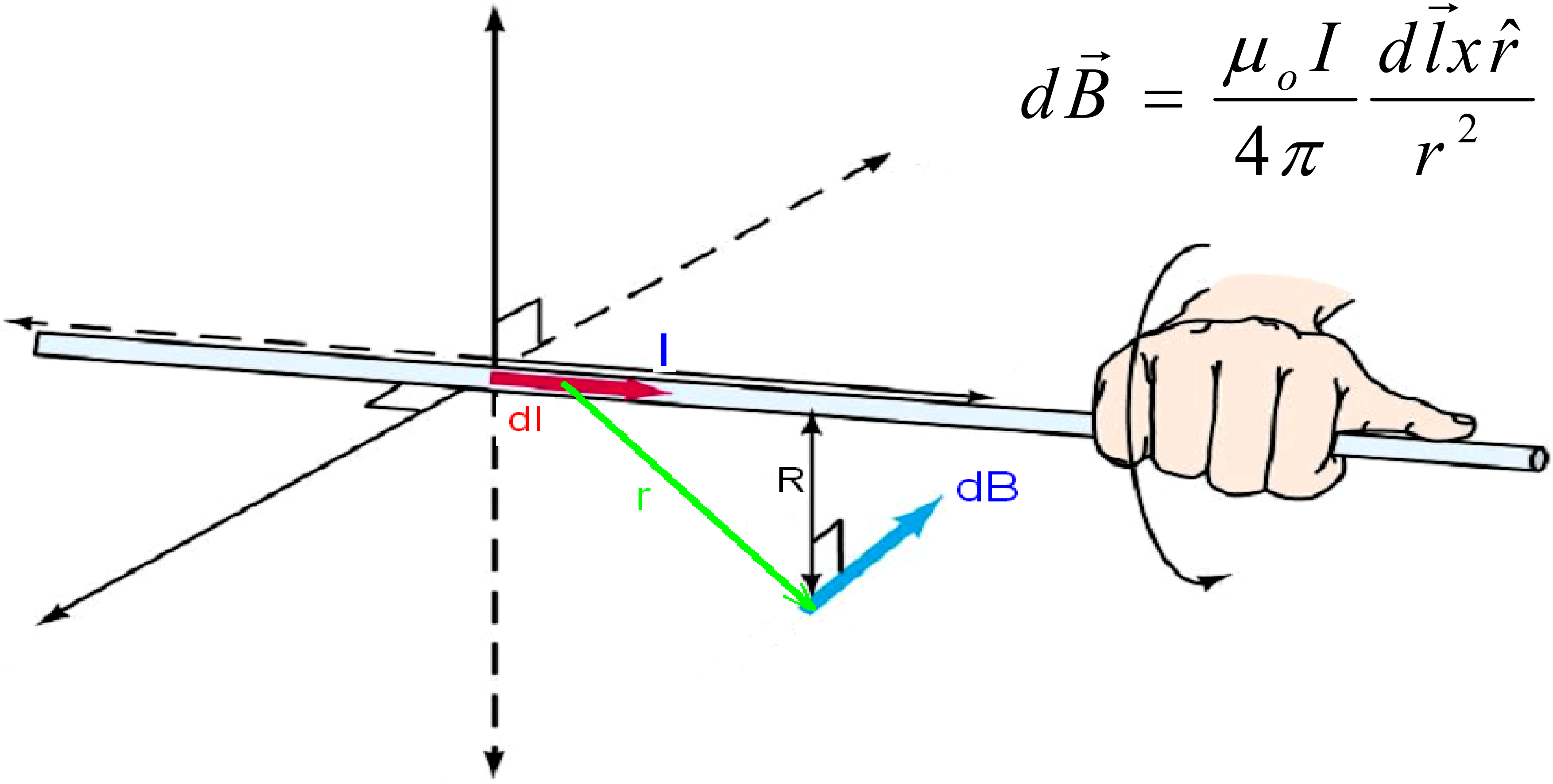
$$d\vec{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi}\frac{d\vec{l}x\hat{r}}{r^2}$$

CAMPO MAGNÉTICO DE ALAMBRES RECTOS



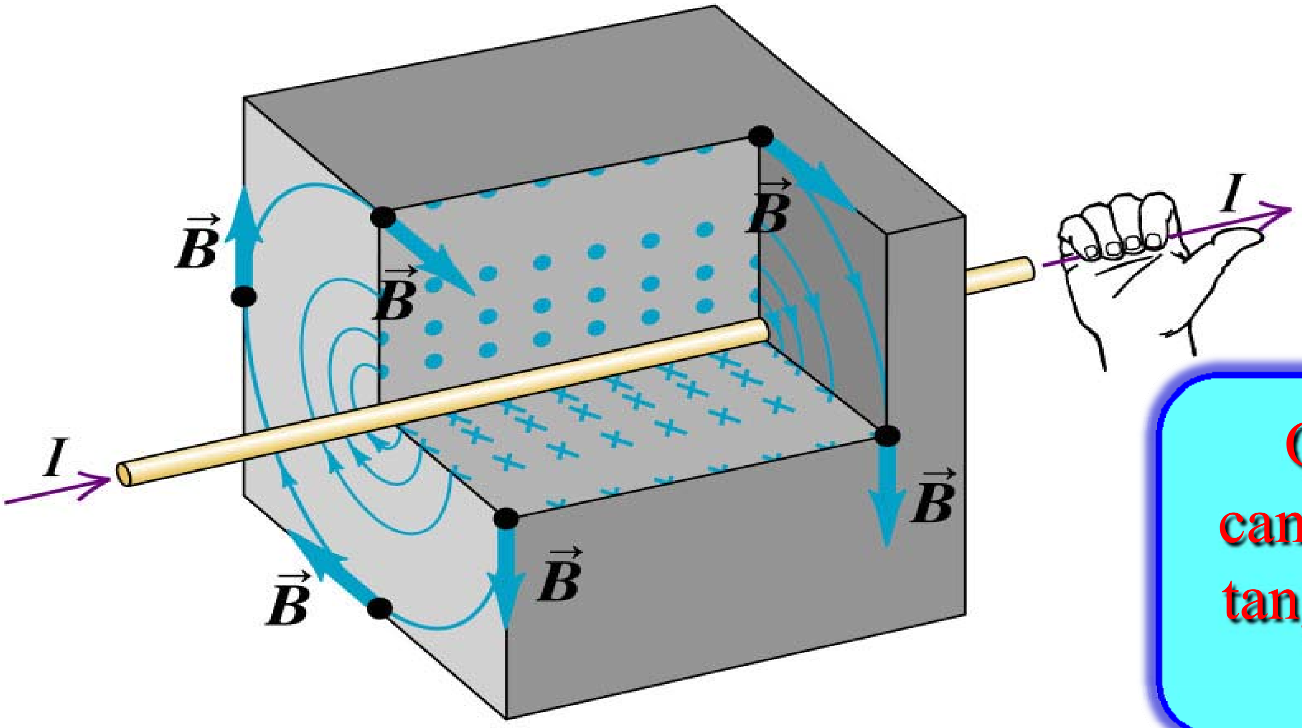
CALCULO DEL CAMPO MAGNETICO EN UN PUNTO EN LA VECINDAD (FUERA) DE UN ALAMBRE RECTO

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi}\frac{d\vec{l}x\hat{r}}{r^2}$$



VER ANIMACIÓN

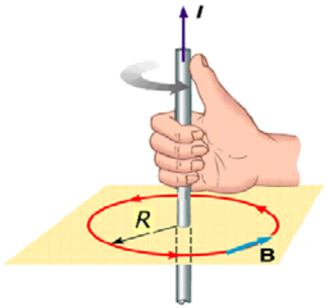
El campo magnético “circula” alrededor del alambre

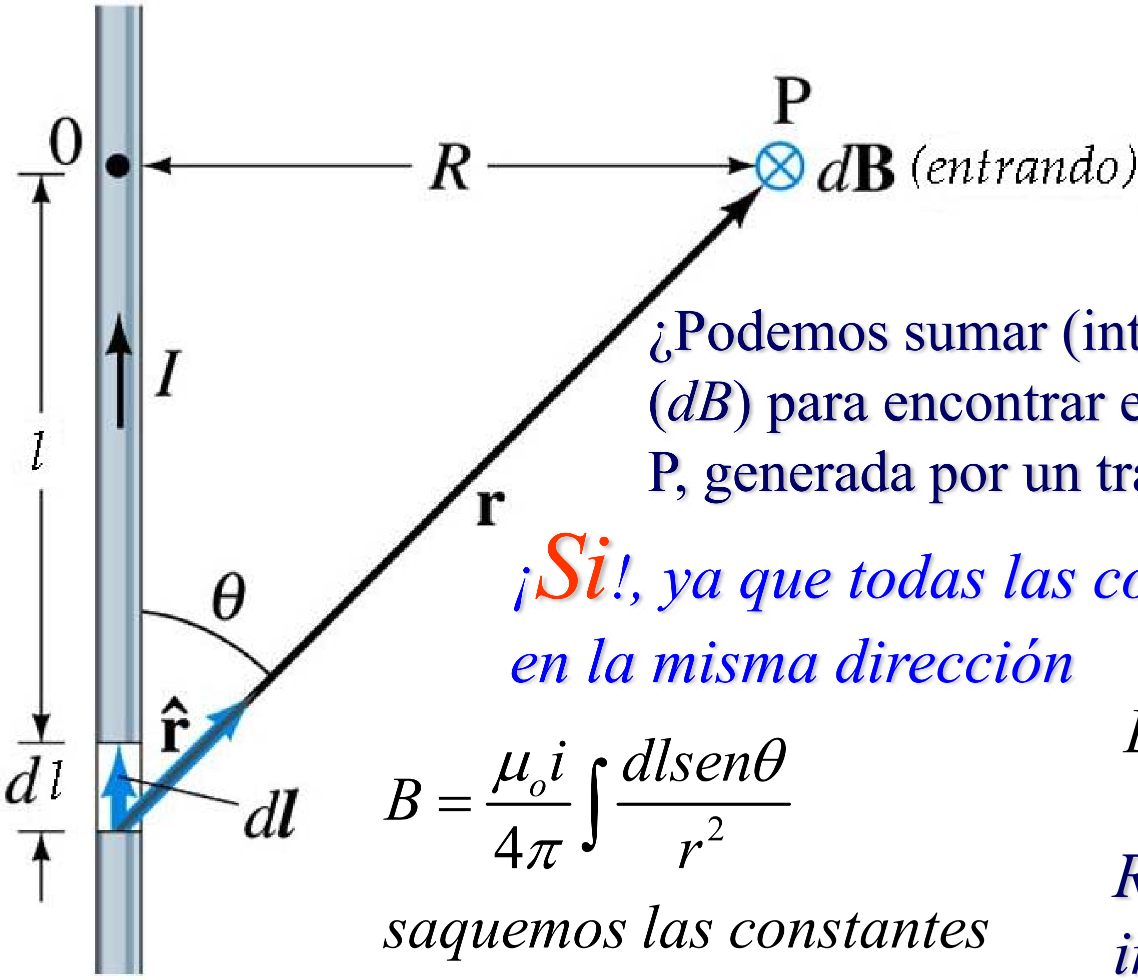


Observe que el campo B es siempre tangente a una línea de campo.

Mientras más nos aproximamos al alambre, el campo se vuelve más intenso

El punto P y el alambre se encuentran en el plano de la "pizarra"





$$dB = \frac{\mu_o i}{4\pi}\frac{dl sen\theta}{r^2}$$

¿Podemos sumar (integrar) esta contribución (*dB*) para encontrar el campo total en el punto P, generada por un tramo de una longitud *L*?

¡Si!, ya que todas las contribuciones dB apuntan en la misma dirección

$$B = \int dB = \int \frac{\mu_o i}{4\pi}\frac{dl sen\theta}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi}\int \frac{dl sen\theta}{r^2}$$

saquemos las constantes fuera de la integral

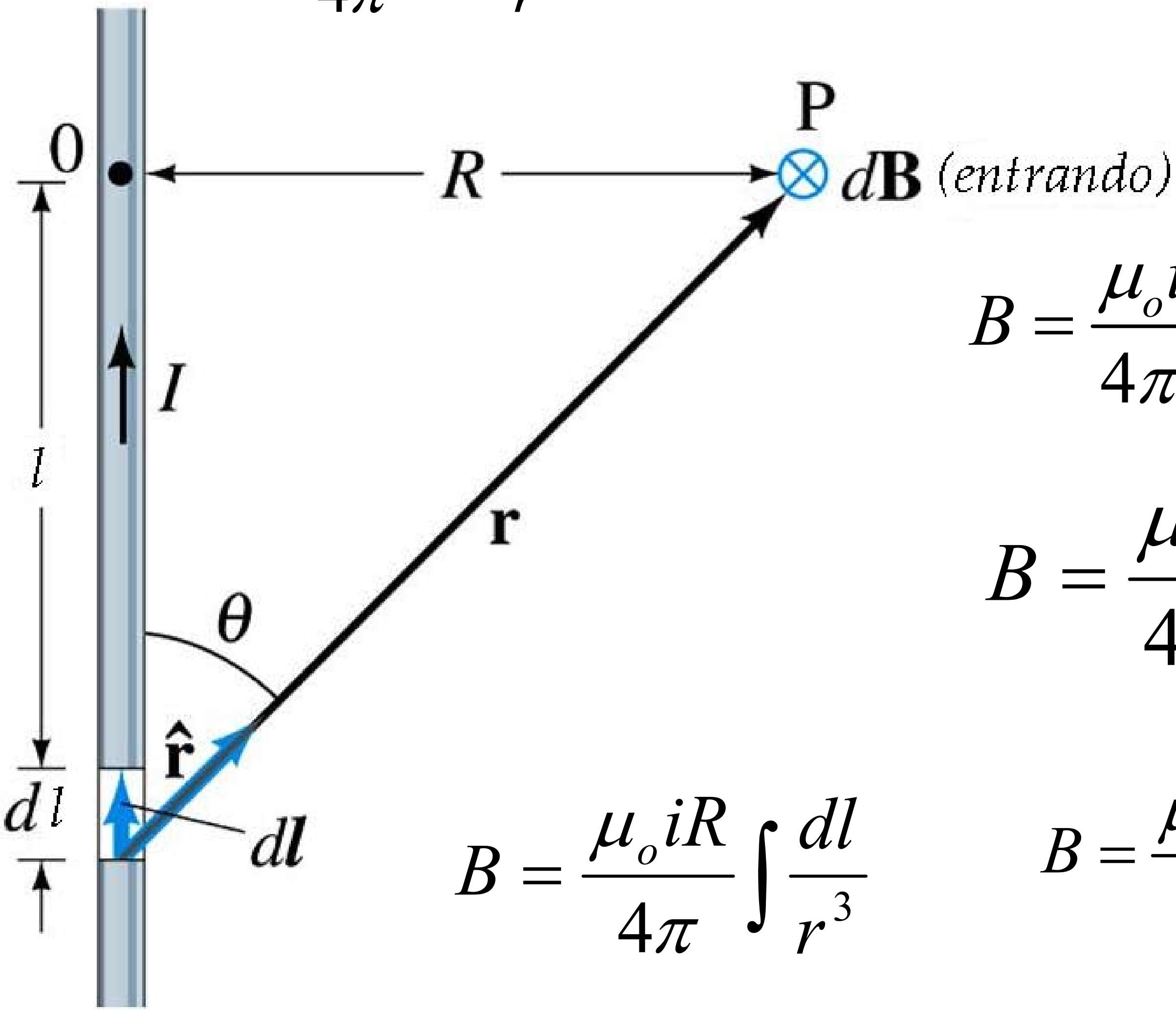
Recuerde que es una integral de línea, aquí vemos 3 "variables".

$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi}\int \frac{dl sen\theta}{r^2}$$

Pongamos r y θ en función de l

$$sen\theta = \frac{R}{r}$$

$$r^2 = R^2 + l^2$$



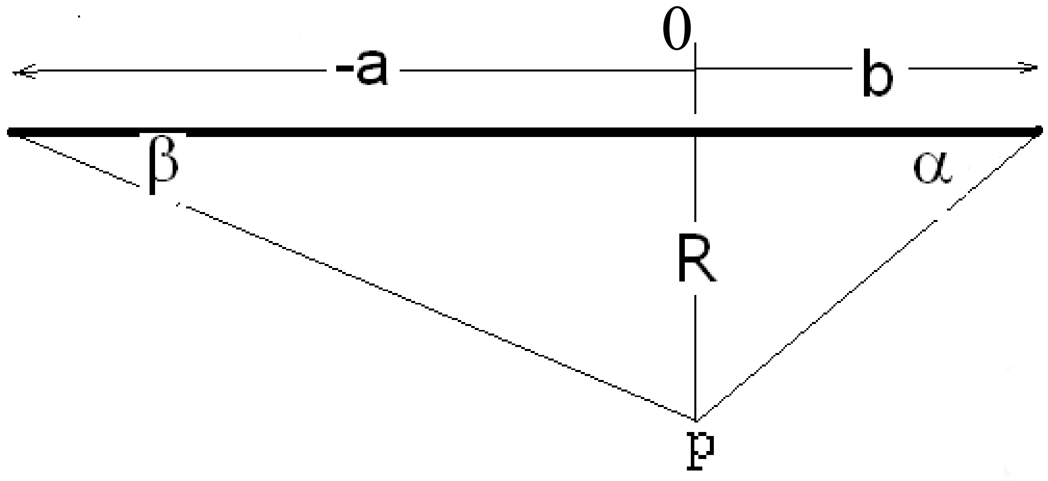
$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi}\int \frac{dl sen\theta}{r^2}$$

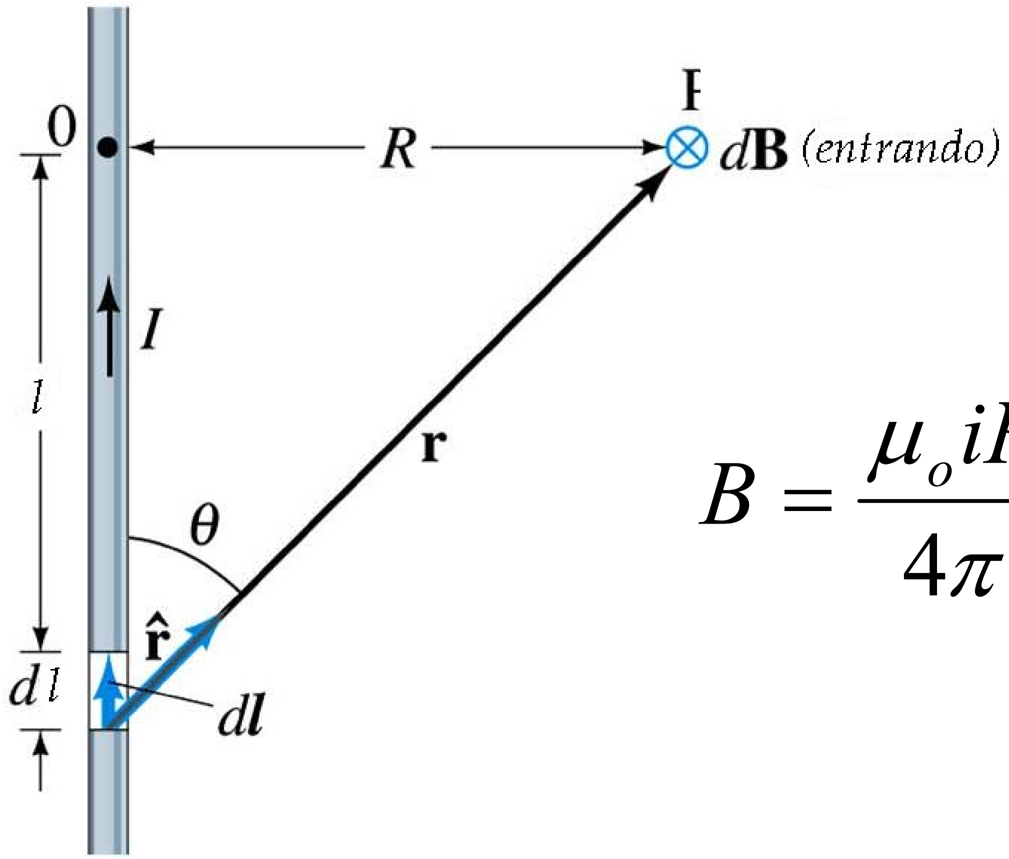
$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi}\int \frac{dl}{r^2}\frac{R}{r}$$

$$B = \frac{\mu_o iR}{4\pi}\int \frac{dl}{r^3}$$

$$B = \frac{\mu_o iR}{4\pi}\int \frac{dl}{\left(R^2 + l^2\right)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_o i R}{4\pi}\int \frac{dl}{(R^2+l^2)^{\frac{3}{2}}}$$





$$B = \frac{\mu_o i R}{4\pi}\int_{-a}^{b} \frac{dl}{(R^2+l^2)^{3/2}}$$

Integrales útiles de recordar.

$$\int \frac{dx}{(x^2+a^2)^{3/2}} = \frac{x}{a^2}\frac{1}{(x^2+a^2)^{1/2}} \quad (1)$$

$$\int \frac{xdx}{(x^2+a^2)^{3/2}} = -\frac{1}{(x^2+a^2)^{1/2}} \quad (2)$$

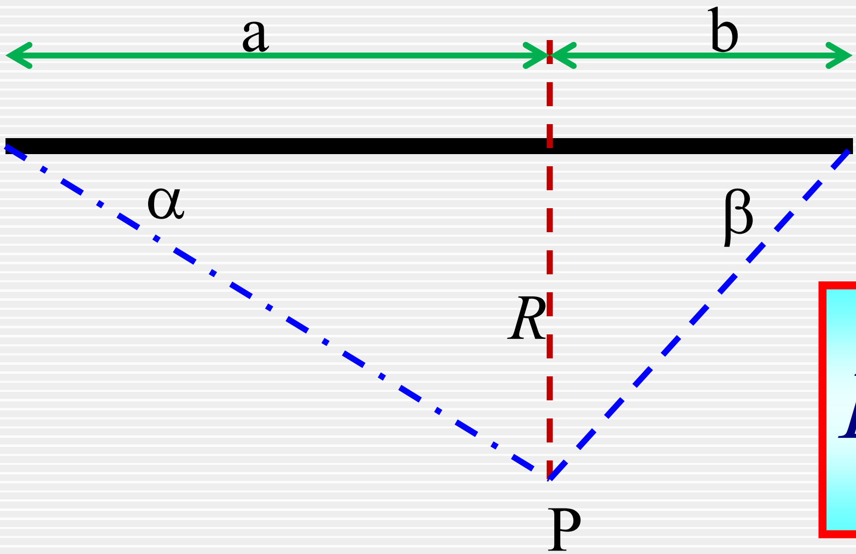
Utilicemos el resultado de la integral (1)

$$B = \frac{\mu_o iR}{4\pi}\int_{-a}^{b} \frac{dl}{(R^2+l^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_o iR}{4\pi}\left[\frac{l}{R^2}\frac{1}{(l^2+R^2)^{1/2}}\right]_{-a}^{b}$$

$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi R}\left[\frac{b}{(b^2+R^2)^{1/2}} + \frac{a}{(a^2+R^2)^{1/2}}\right]$$

Este resultado lo podemos simplificar



$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi R}\left[\frac{b}{(b^2+R^2)^{1/2}} + \frac{a}{(a^2+R^2)^{1/2}}\right]$$

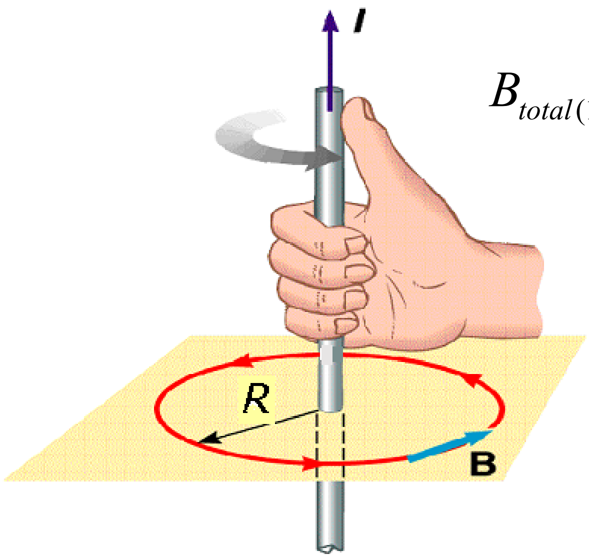
$$\boxed{B = \frac{\mu_o i}{4\pi R}(\cos\beta + \cos\alpha)}$$

Alambre muy largo *(infinito), o R es pequeña comparada con la longitud del alambre, los ángulos α y β tienden a cero grados*

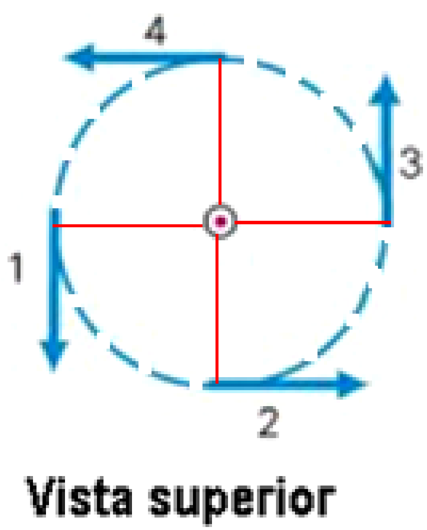
$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi R}(\cos 0^o + \cos 0^o)$$

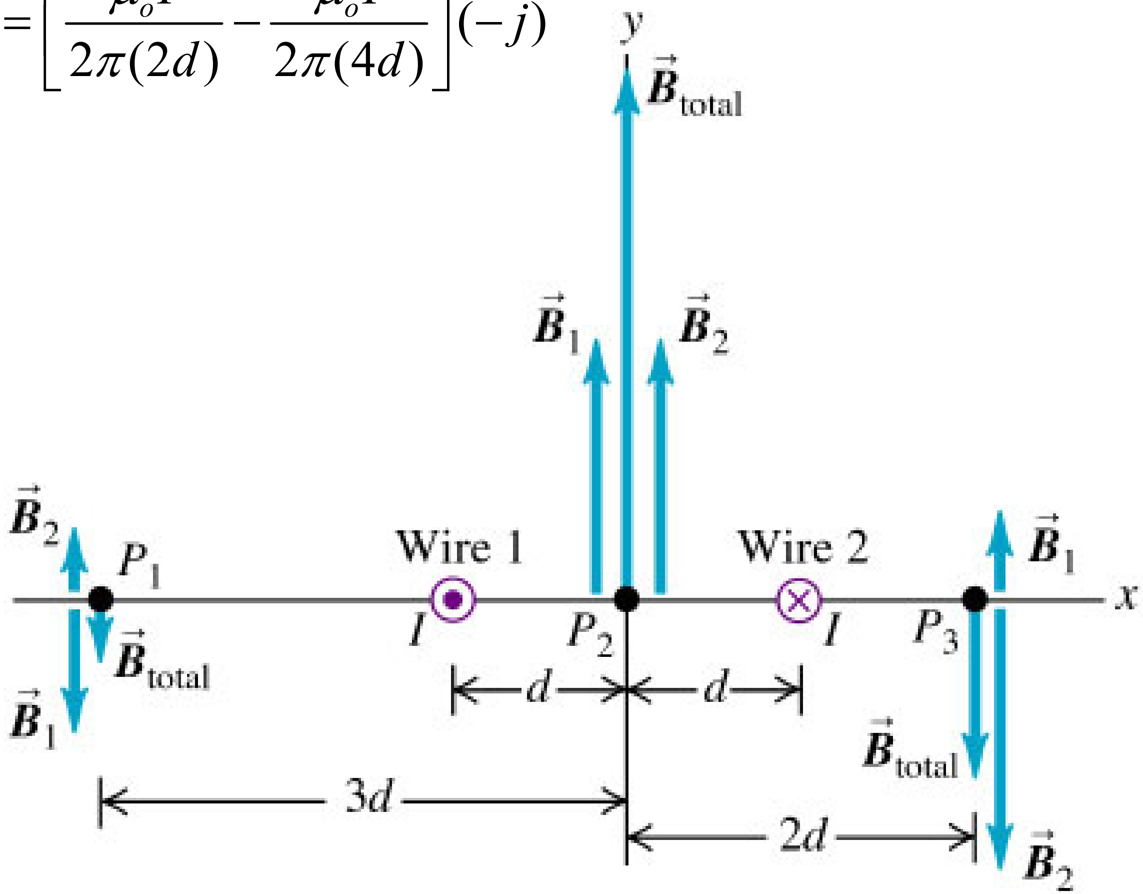
$$\boxed{B = \frac{\mu_o i}{2\pi R}}$$

Válida para puntos ubicados fuera del alambre



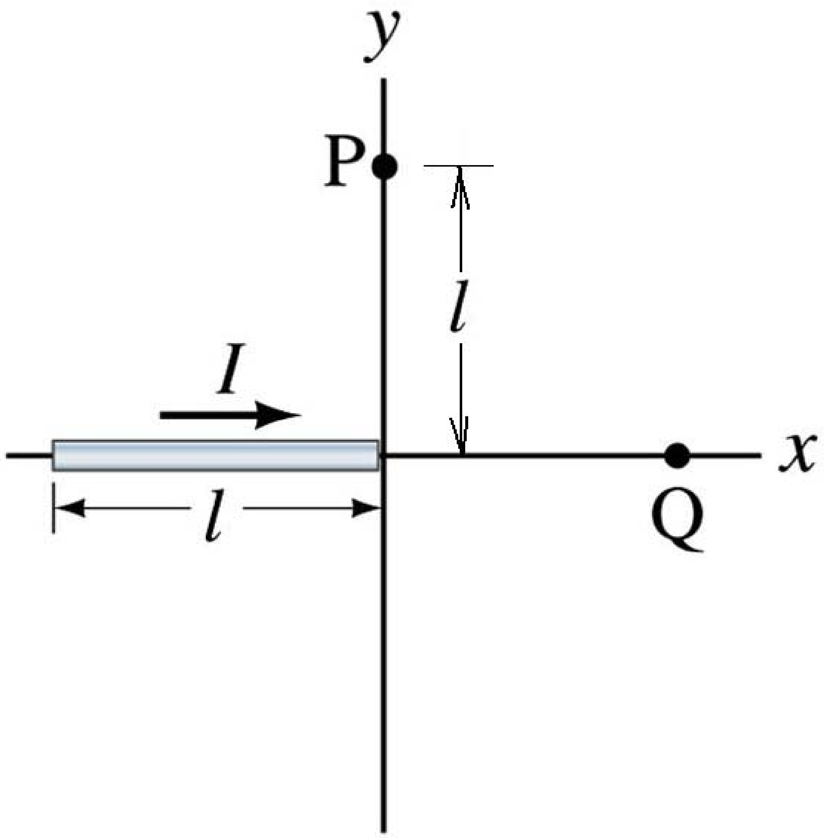
$$B_{total(1)} = \left[\frac{\mu_o I}{2\pi(2d)} - \frac{\mu_o I}{2\pi(4d)} \right](-\hat{j})$$





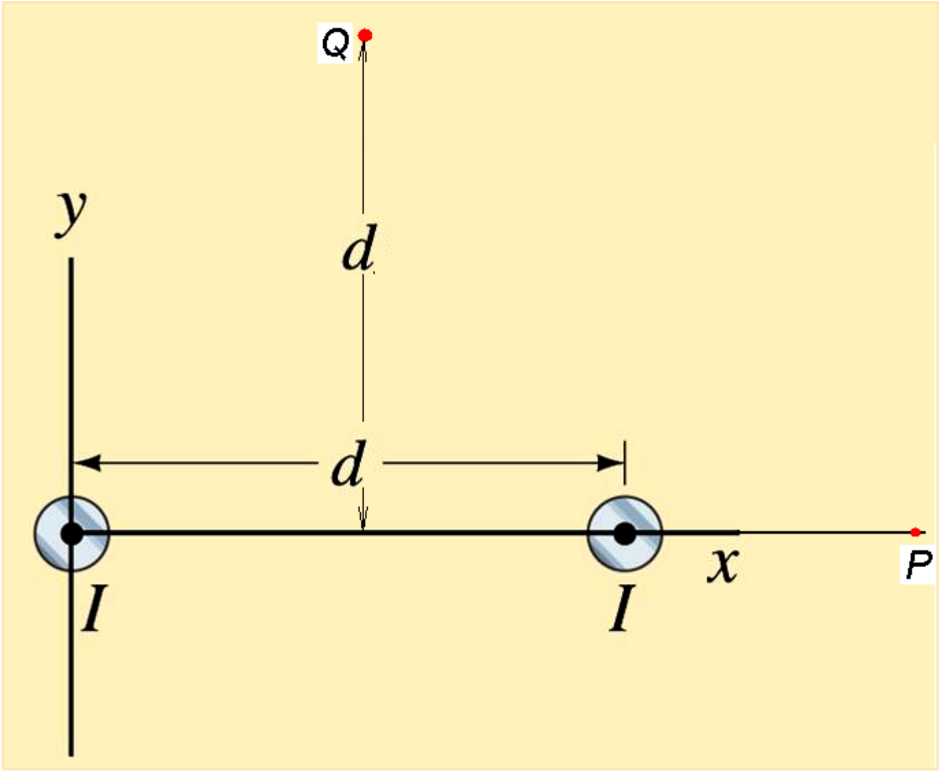
Campo magnético generado por dos alambres paralelos perpendiculares a la pizarra, en puntos sobre el eje "x"

DETERMINE LA MAGNITUD Y DIRECCION DEL CAMPO MAGNETICO EN LOS PUNTOS P Y Q, GENERADO POR UN TRAMO DE ALAMBRE RECTO COMO SE INDICA EN LA FIGURA.

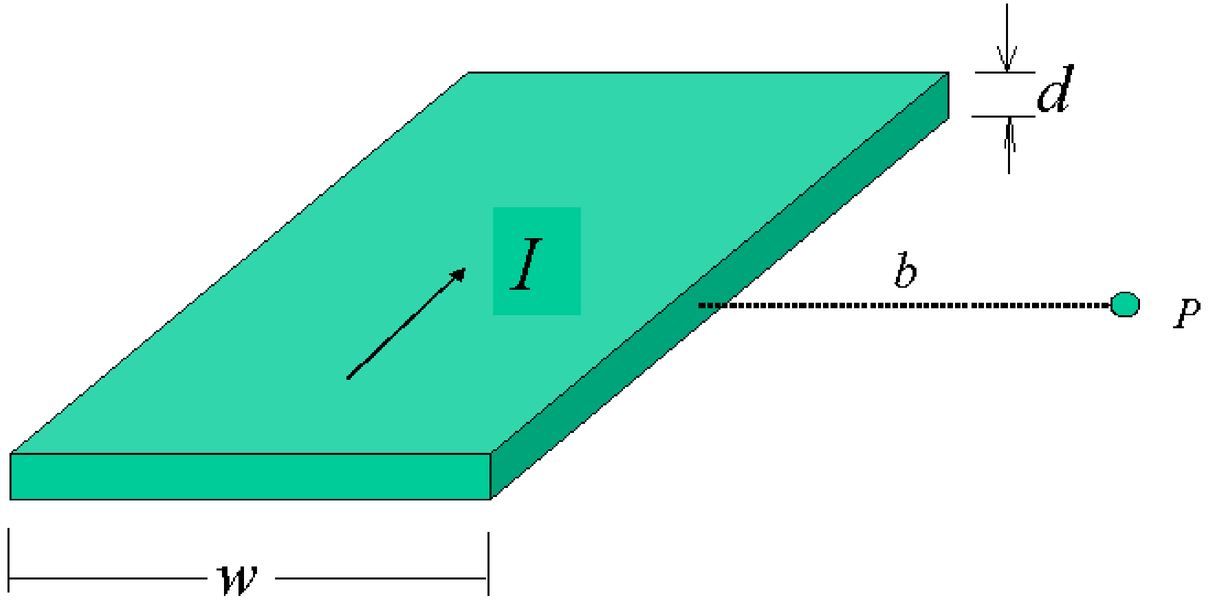


DETERMINE LA MAGNITUD Y DIRECCION DEL CAMPO MAGNETICO EN LOS PUNTOS P Y Q, GENERADO POR LOS DOS ALAMBRES RECTOS Y MUY LARGOS QUE TRANSPORTAN LA MISMA CORRIENTE

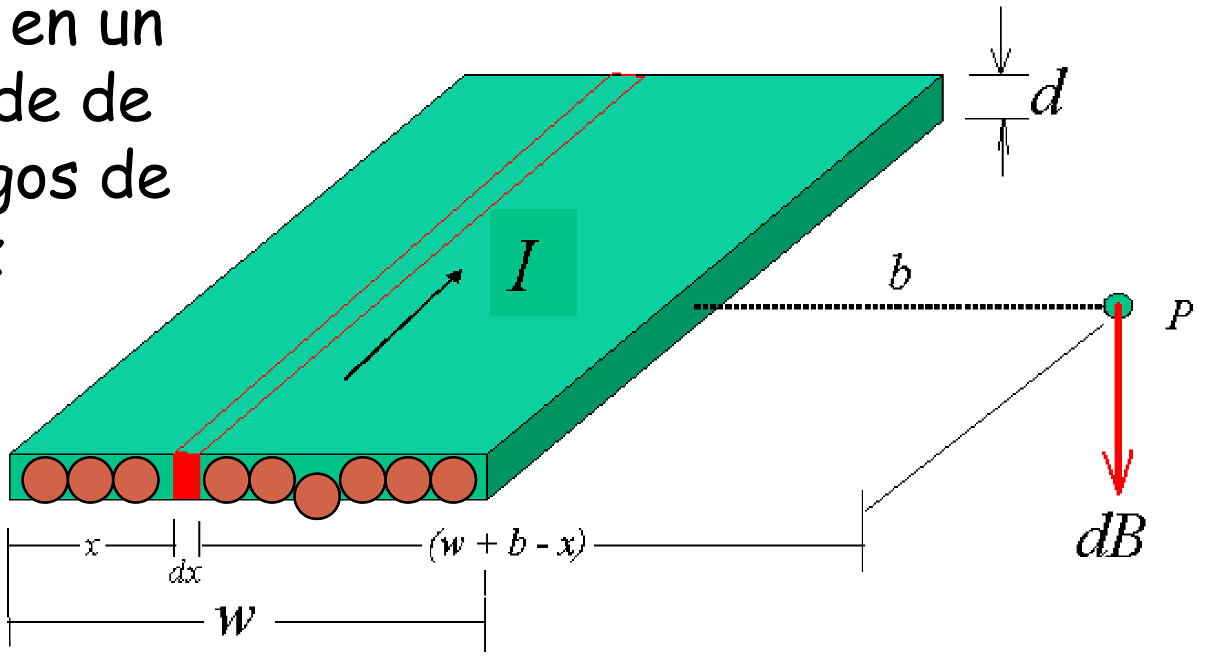
(los alambres llevan corriente perpendicular al plano de la figura)



Una lámina conductora muy larga de ancho w y espesor muy delgado d, transporta corriente I como se indica en la figura. Determine el campo magnético en el punto p ubicado a una distancia b sobre el plano del conductor.



Dividimos la lámina en un conjunto muy grande de "alambres" muy largos de "diámetro" dx



$$B = \frac{\mu_o i}{2\pi R}$$

Adaptamos ésta expresión para el "alambre"

$$dB = \frac{\mu_o I'}{2\pi(w+b-x)}$$

$$\frac{I}{wd} = \frac{I'}{dxd}$$

$$I' = \frac{dx}{w} I$$

$$dB = \frac{\mu_o I dx}{2\pi w(w+b-x)}$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi w}\int_0^w \frac{dx}{w+b-x}$$

Campo magnético en un punto *p* ubicado sobre el eje de una espira circular con corriente.

$$dB = \frac{\mu_o I}{4\pi}\frac{dl sen\alpha}{r^2}$$

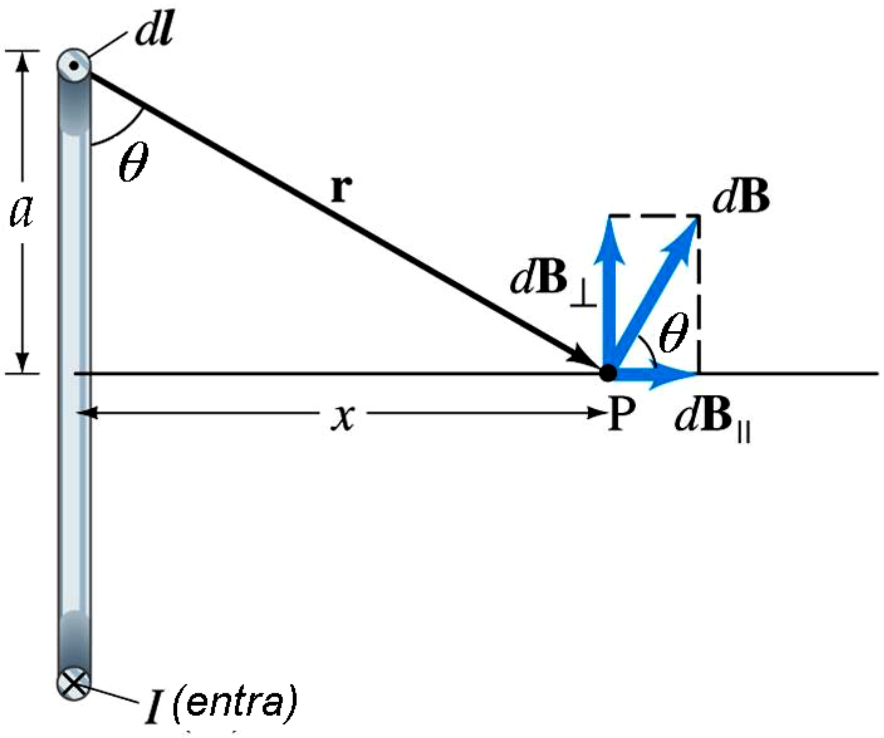
$$B\perp = \int dB\perp = 0$$

Por simetria las componentes perpendiculares a "x" se cancelan

α: ángulo entre dl y r

$$B = \int dB// = \int dB\cos\theta$$

Suma de todas las contribuciones paralelas a "x"

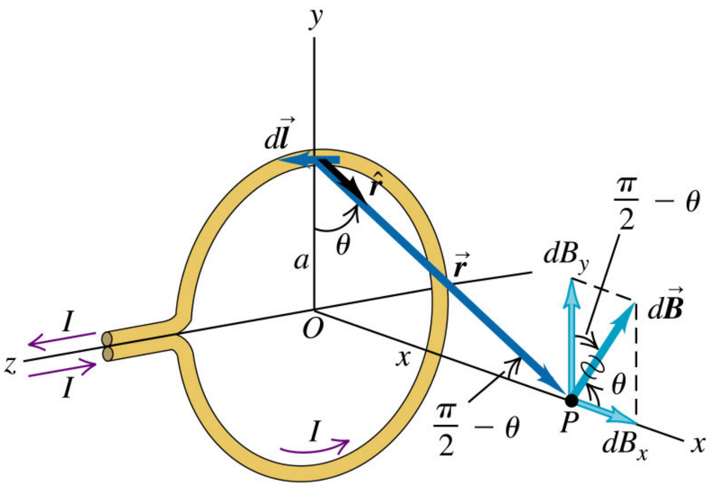


$$B = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{dl\, sen\alpha}{r^2}\cos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{a}{r}$$

$$sen\alpha = 1$$

$$\boxed{B = \int \frac{\mu_o I}{4\pi}\frac{a dl}{r^3}}$$

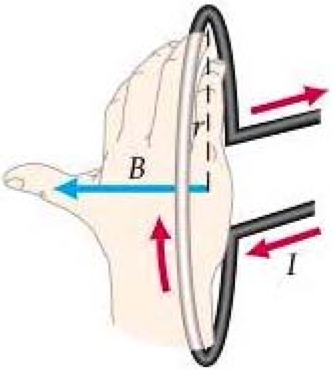


$$B = \frac{\mu_o I a}{4\pi r^3}\int dl$$

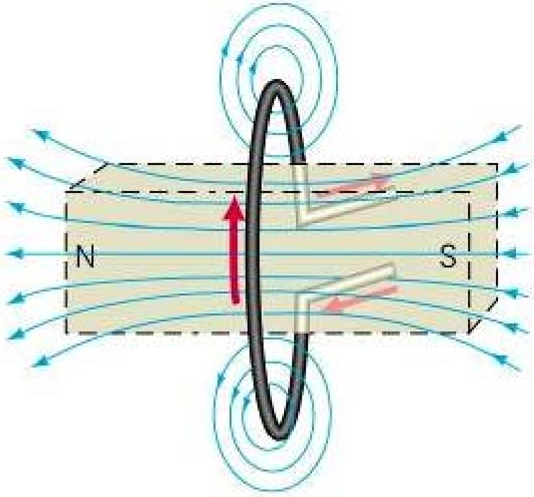
$$B = \frac{\mu_o I a}{4\pi(x^2 + a^2)^{3/2}}(2\pi a)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_o I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}\hat{i}$$

Espira con corriente

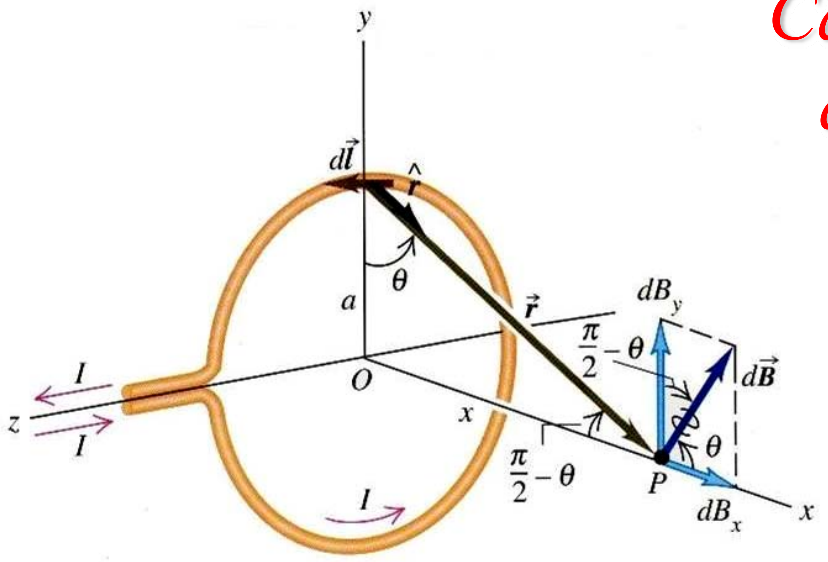


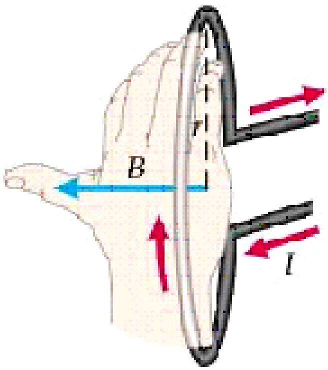
Regla de la mano derecha



Campo similar al generado por un magneto

Campo en un punto en el centro de una espira circular (x=0)



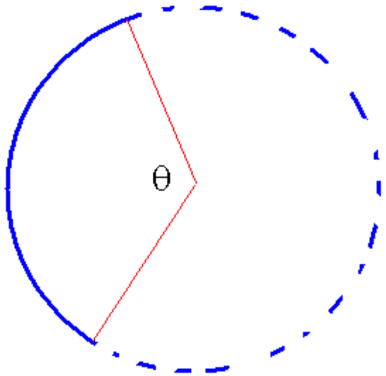


$$B = \frac{\mu_o I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2a}$$

Para cualquier punto sobre el eje de la espira

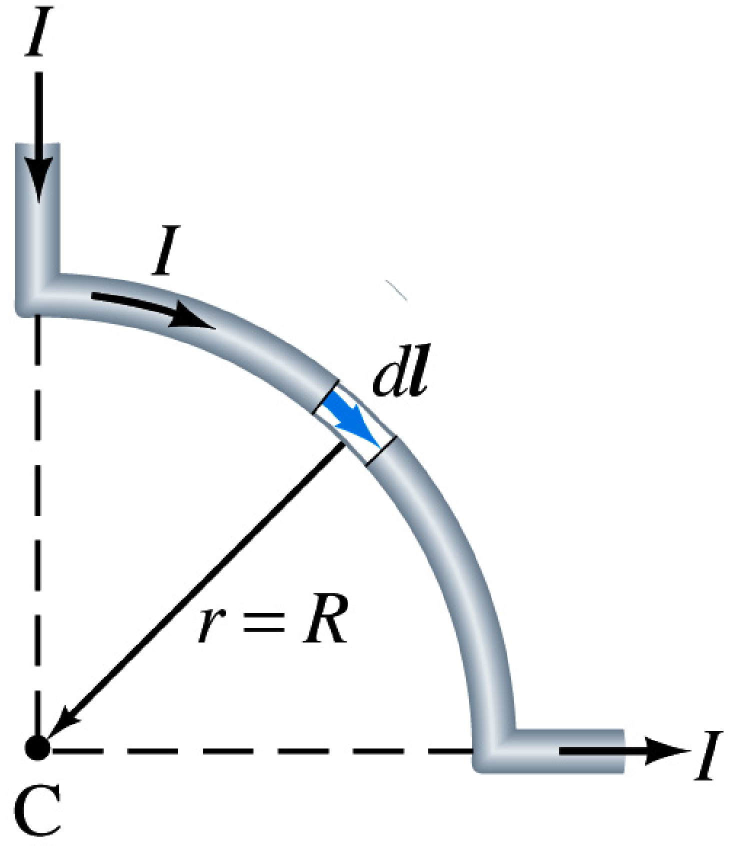
Para un arco de circunferencia

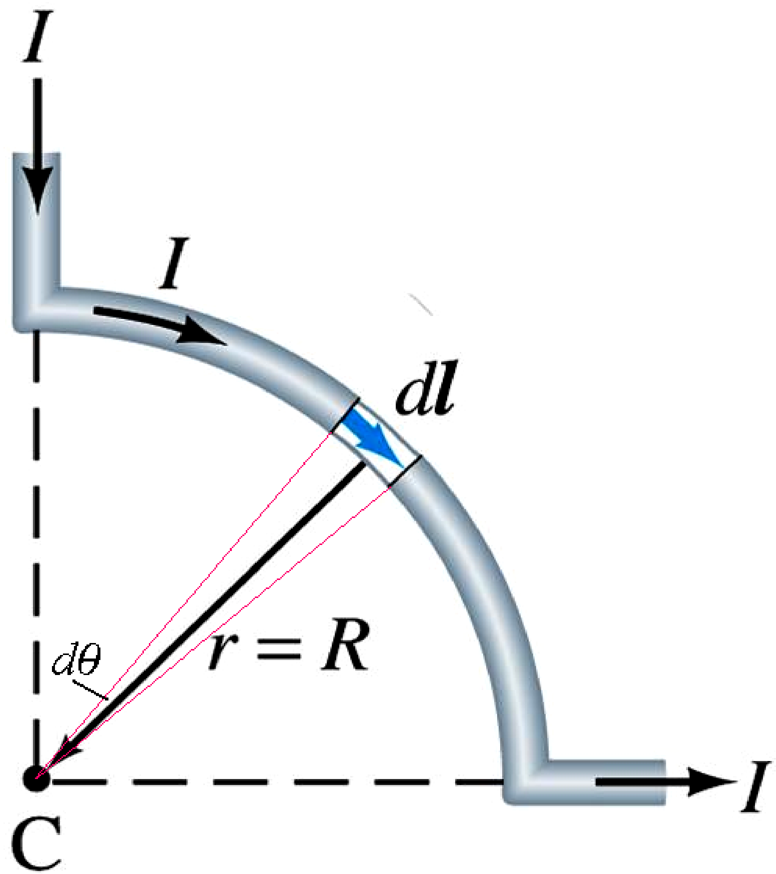


$$B = \frac{\mu_o I}{2a}\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)$$

Ver animacion

DETERMINE LA MAGNITUD Y DIRECCION DEL CAMPO MAGNETICO EN EL PUNTO C, GENERADO POR UN ALAMBRE DOBLADO COMO SE INDICA EN LA FIGURA.





$$dB = \frac{\mu_o i}{4\pi}\frac{dl\,sen\phi}{r^2}$$

Φ: Angulo formado entre dl y r

$$dB = \frac{\mu_o I}{4\pi}\frac{rd\theta}{r^2}$$

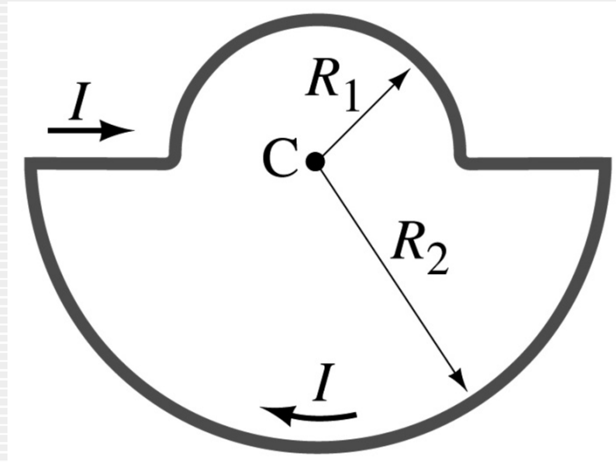
$$B = \frac{\mu_o I}{2r}\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)$$

dB entrando en el plano en el punto C

$$B = \frac{\mu_o I}{2r}\left(\frac{\pi/2}{2\pi}\right) \rightarrow \quad B = \frac{\mu_o I}{8r}$$

Entrando al plano en el punto C.

Los tramos horizontales no contribuyen al campo en C.



$$B = \frac{\mu_o I}{2a}\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)$$

Campo generado por un arco de circunferencia

$$\boxed{B = \frac{\mu_o I}{4r}}$$

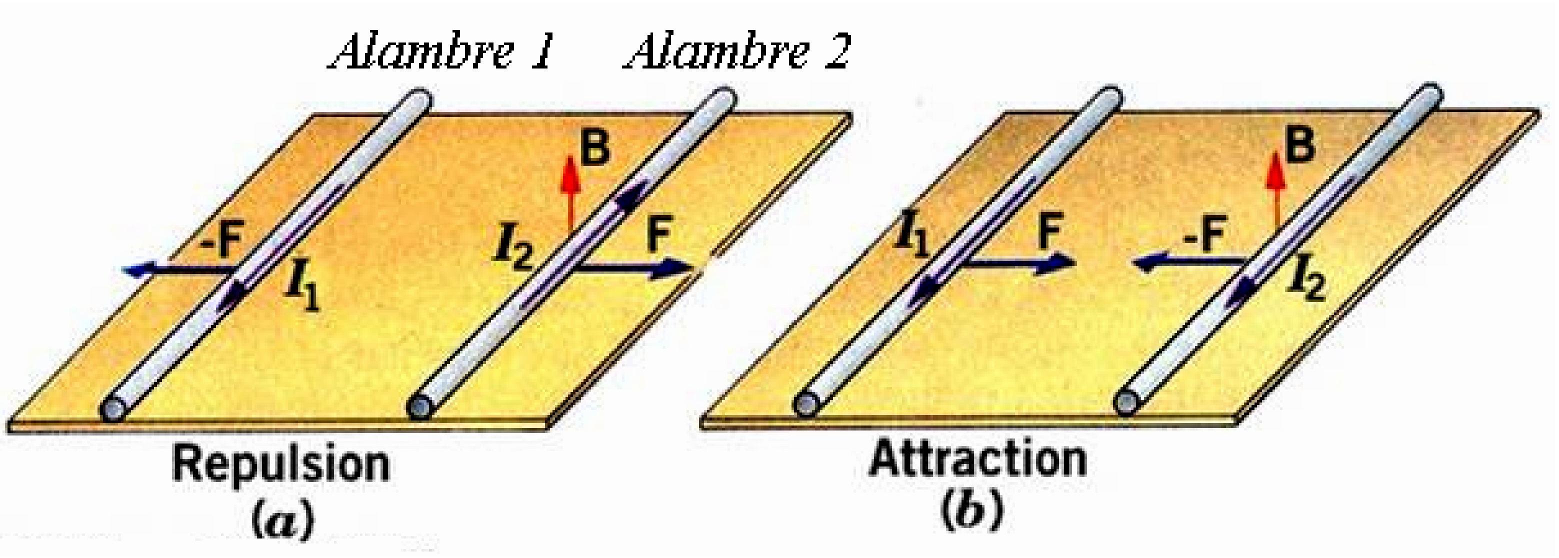
Las contribuciones de los dos tramos circulares estan en la misma direccion

$$B = B_1 + B_2$$

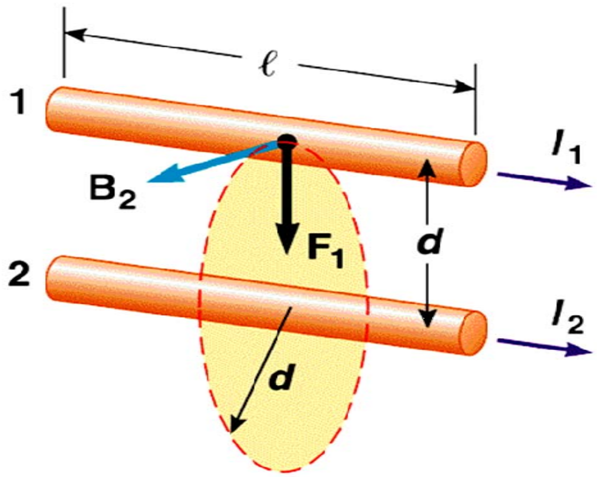
$$B = \frac{\mu_o I}{4}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Entrando al plano del papel en el punto C.

Fuerza magnética entre conductores paralelos



La corriente en cada uno de los alambres está inmersa en el campo generado por la corriente vecina.



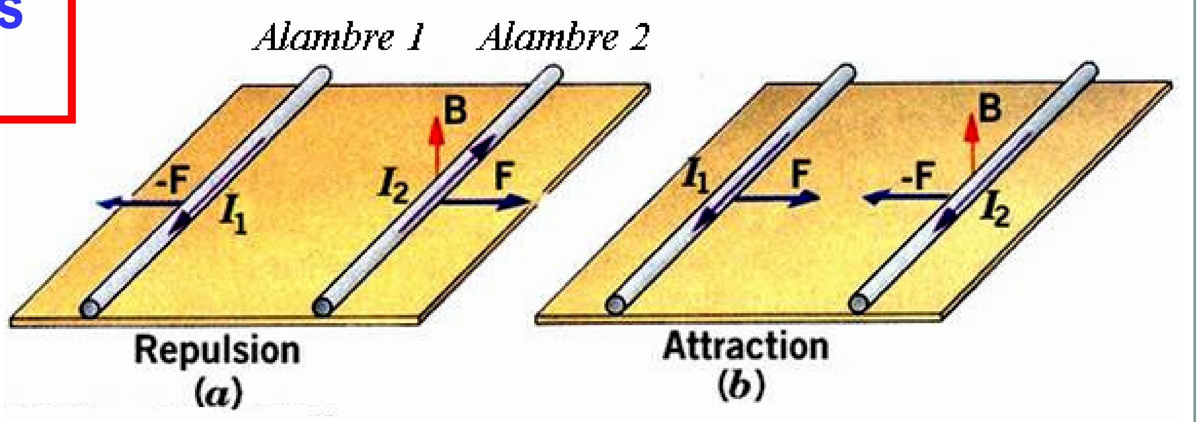
$$d\vec{F} = Id\vec{l}x\vec{B}$$

$$dF_1 = I_1 dl B_2 sen 90^o$$

$$dF_1 = I_1\, dl\, \frac{\mu_o I_2}{2\pi d}$$

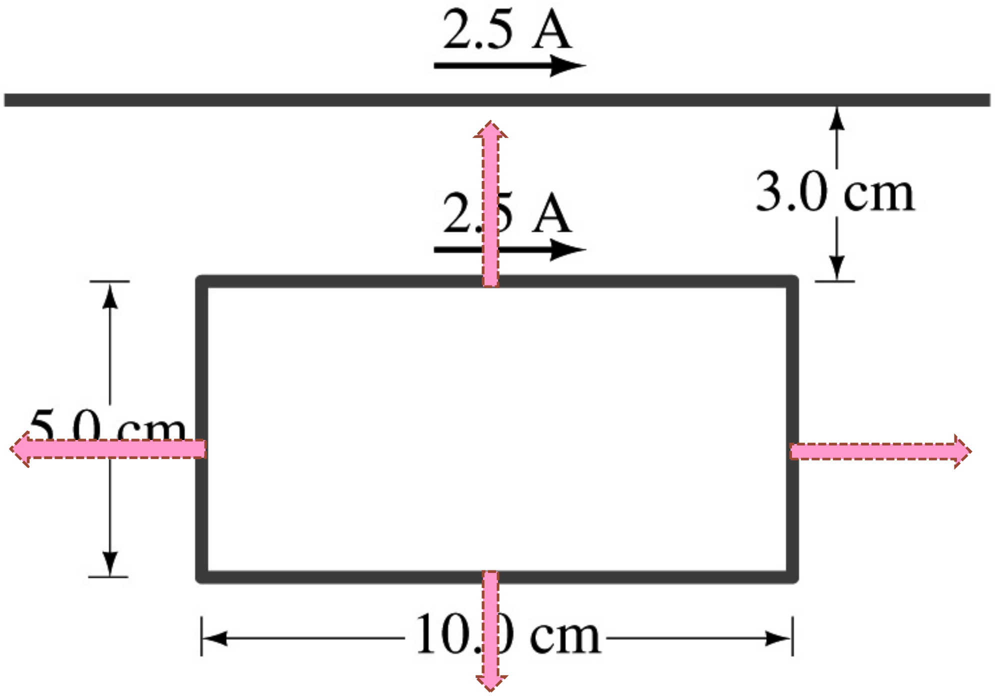
$$F_1 = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi d}\int_0^L dl \qquad \frac{F_1}{L} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi d}$$

Corrientes en la misma dirección *se atraen*. **Corrientes en direcciones contrarias** *se repelen*.

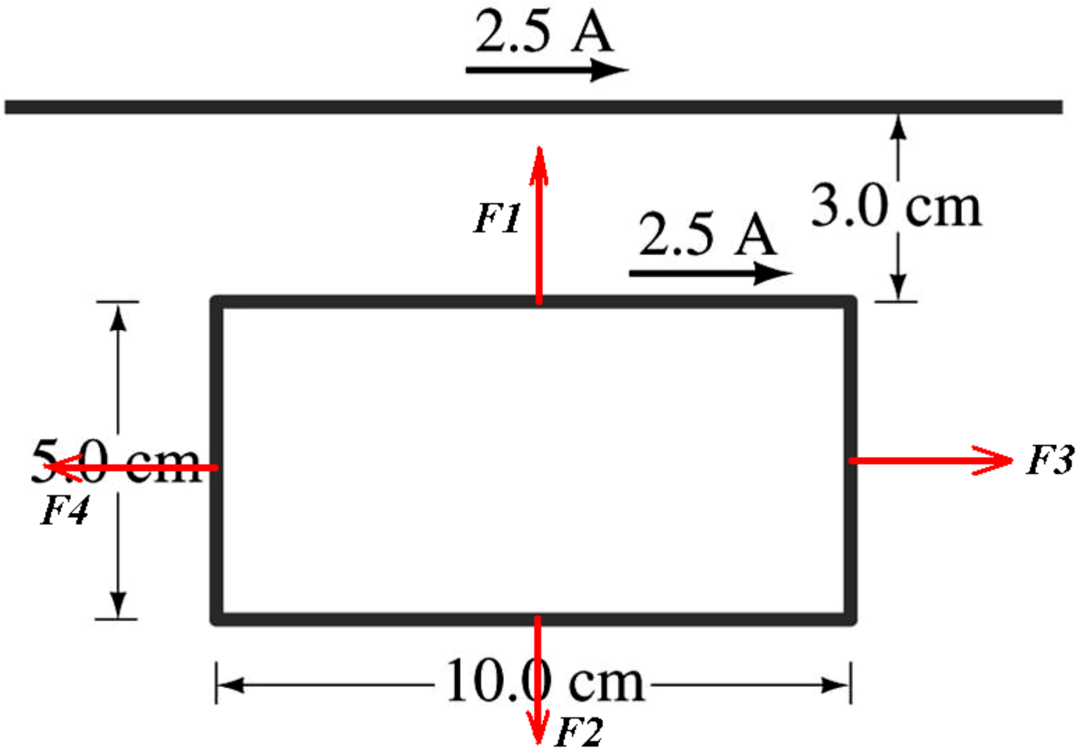


Ver animacion

LA ESPIRA RECTANGULAR Y EL ALAMBRE MUY LARGO SE ENCUENTRAN SOBRE UN PLANO HORIZONTAL. DETERMINE LA MAGNITUD Y DIRECCION DE LA FUERZA MAGNETICA ENTRE EL ALAMBRE RECTO Y LA ESPIRA.



$$\frac{F_1}{L} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi d}$$



Las fuerzas F_3 y F_4 se cancelan

$$F = F_1 - F_2$$

$$F_1 = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi d_1}$$

$$F_2 = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi d_2}$$

$$\vec{F} = \frac{\mu_o I^2 L}{2\pi}\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)\hat{j}$$

$d_1=0,03m$, $d_2=0,08m$, $L=0,1m$

RESUMEN: LEY DE BIOT-SAVART

$$dB = \frac{\mu_o i}{4\pi}\frac{dl\,sen\phi}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi R}(\cos\beta + \cos\alpha)$$

ALAMBRES RECTOS

$$B = \frac{\mu_o I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}$$

ESPIRAS CIRCULARES

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2a}\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)$$

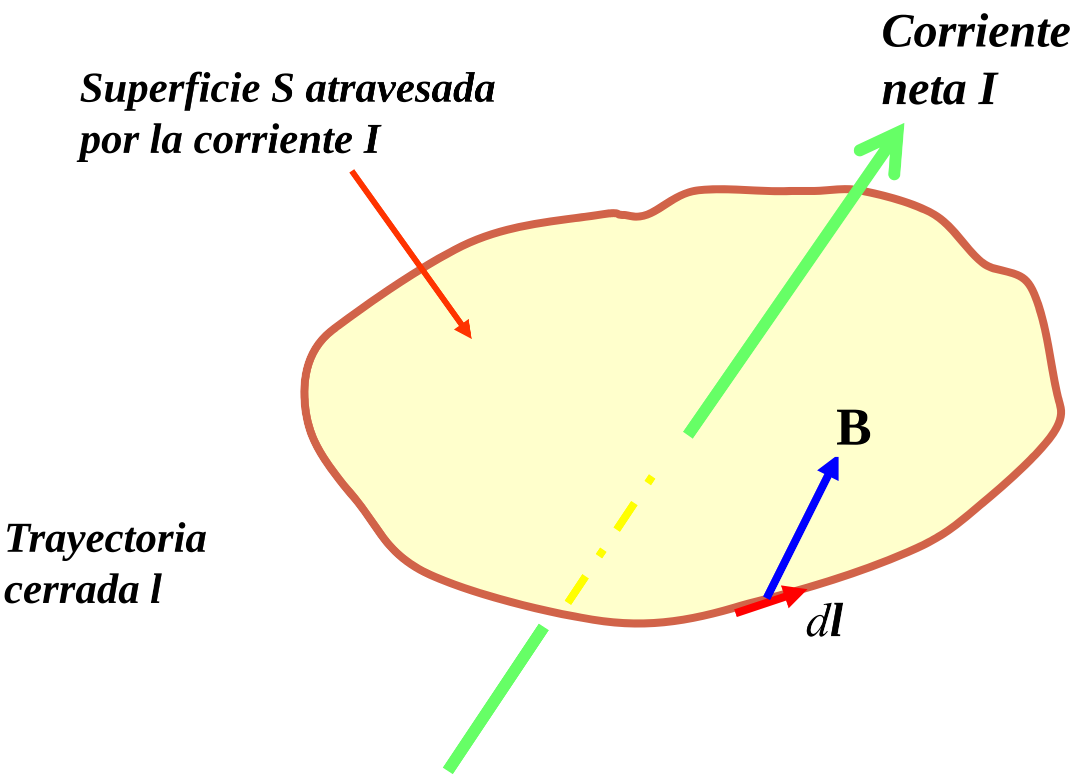
SEGMENTO CIRCULAR

ALAMBRES RECTOS MUY LARGOS

LA LEY DE AMPERE

La ley de Ampere es de mucha utilidad en los casos que presentan extrema simetría, muy similar a la ley de Gauss para el campo eléctrico, esta ley es de fácil aplicación en los casos que presentan distribuciones simétricas de campos magnéticos, producidos por determinadas configuraciones de conductores con corriente.

La ley de Ampere establece que la suma de todos los productos **B**·d*l* a lo largo de la trayectoria cerrada *l* (*circulación del campo magnético*), es directamente proporcional a la *corriente neta* que atraviesa la superficie S limitada por la trayectoria *l*.



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \;\alpha\; I$$

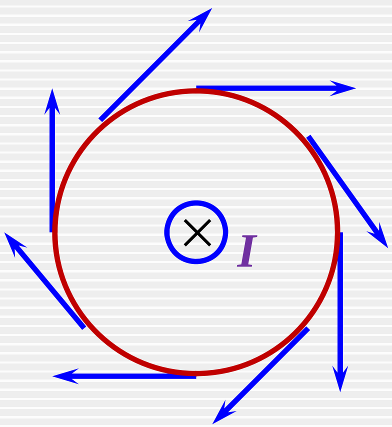
La suma de todos los productos ***Bdl*** a lo largo de una trayectoria cerrada, es proporcional a la corriente neta ***I*** que la encierra.

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_o I$$

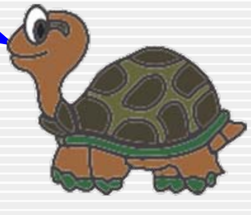
$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_o I$$

Integral alrededor de una trayectoria cerrada … con suerte que sea simple

Corriente “encerrada” por la trayectoria

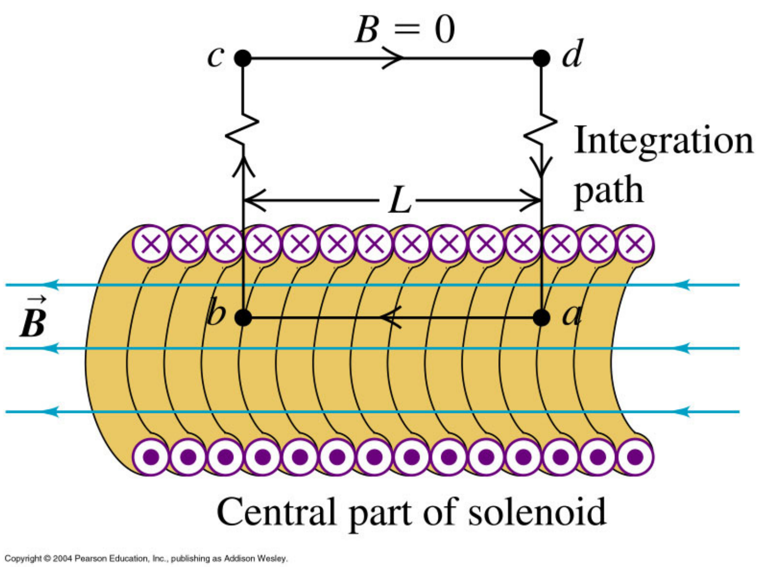


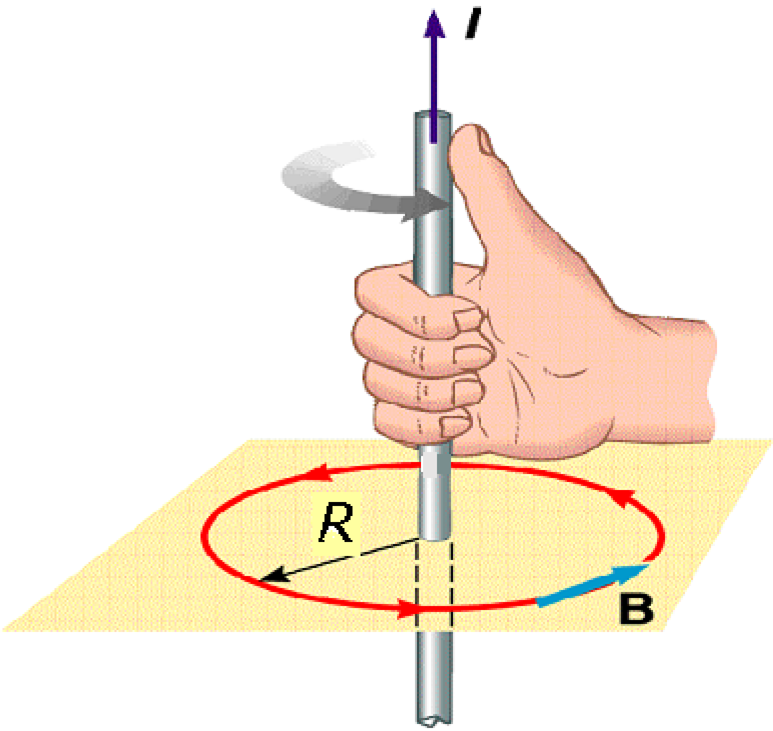
Usualmente la trayectoria cerrada coincide con una línea de inducción



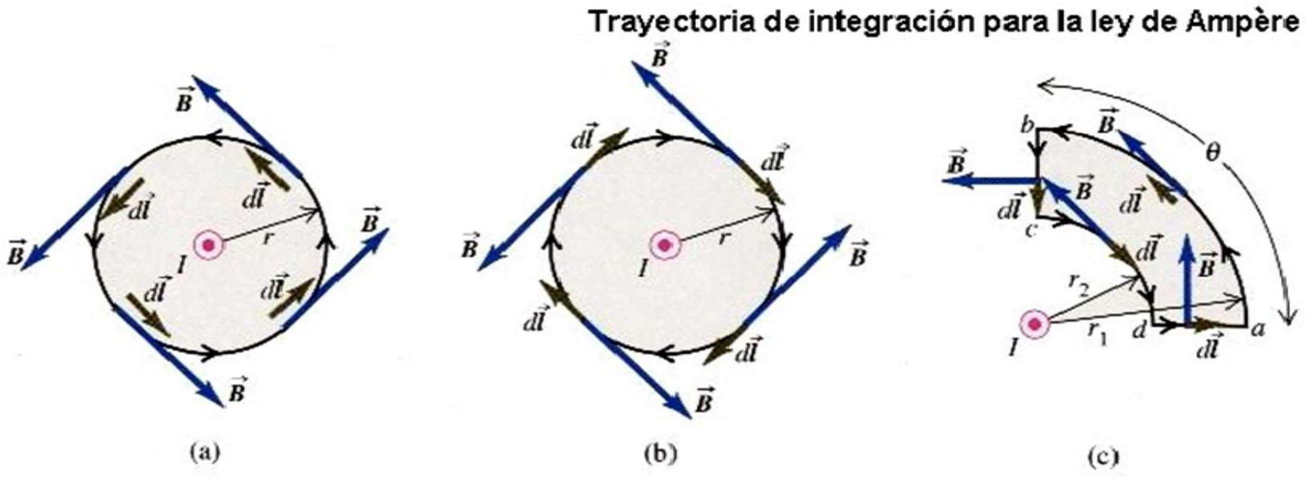
Los pasos que hay que seguir para aplicar la ley de Ampère son similares a los de la ley de Gauss.

1. Dada la distribución de corrientes deducir la dirección del campo magnético





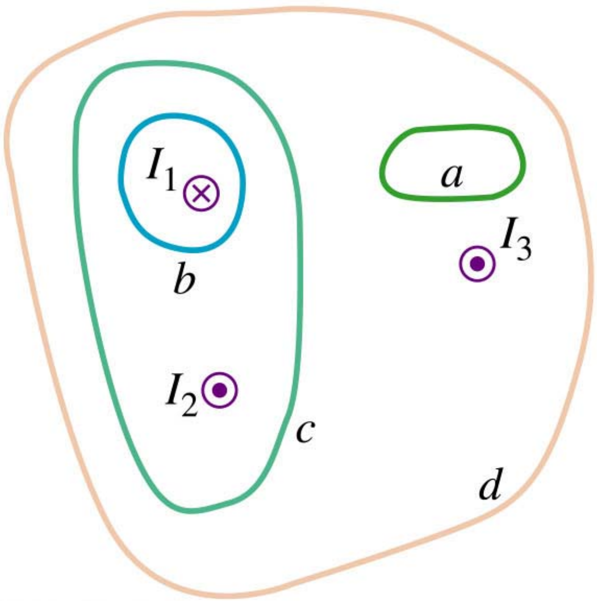
2. Elegir un camino cerrado apropiado, atravesado por corrientes y calcular la circulación del campo magnético. Generalmente el camino cerrado coincide con una línea de campo magnético



a) Corriente "positiva" por convención

b) Corriente "negativa" por convención

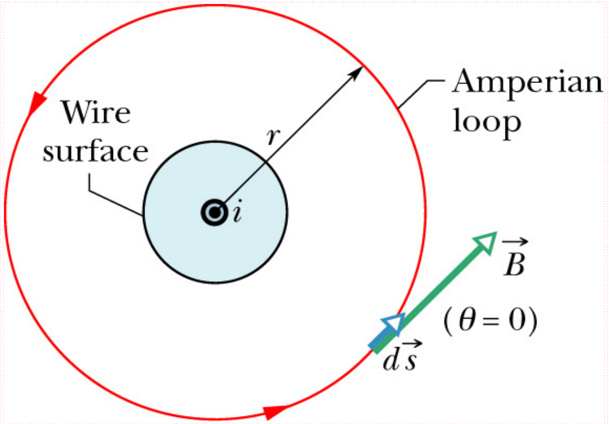
3.Determinar la intensidad de la corriente (corriente neta) que atraviesa el camino cerrado



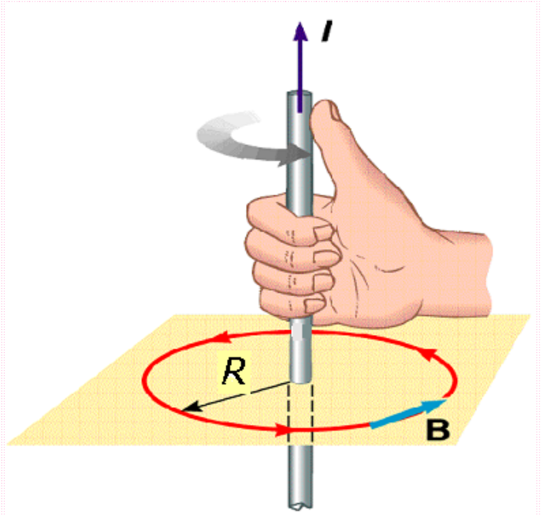
4. Aplicar la ley de Ampère y despejar el módulo del campo magnético.

CAMPO MAGNÉTICO GENERADO POR UN CONDUCTOR RECTO Y MUY LARGO CON CORRIENTE

Campo magnético producido por una corriente rectilínea



Elegimos como camino cerrado una circunferencia de radio *R*, centrada en la corriente rectilínea, y que coincida con una línea de inducción.



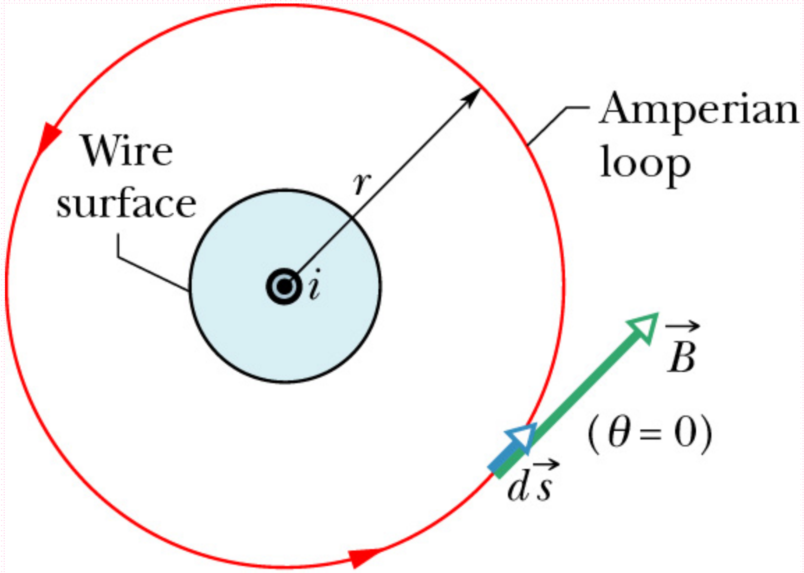
- El campo magnético **B** es tangente a la circunferencia de radio *r*, paralelo al vector **dl**.

- El campo magnético **B** tiene el mismo módulo en todos los puntos de dicha circunferencia.

La circulación (el primer miembro de la ley de Ampère) vale

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint B\,dl\cos\theta = B\oint dl = B\,2\pi r$$

La corriente rectilínea *i* atraviesa la circunferencia de radio *r*.



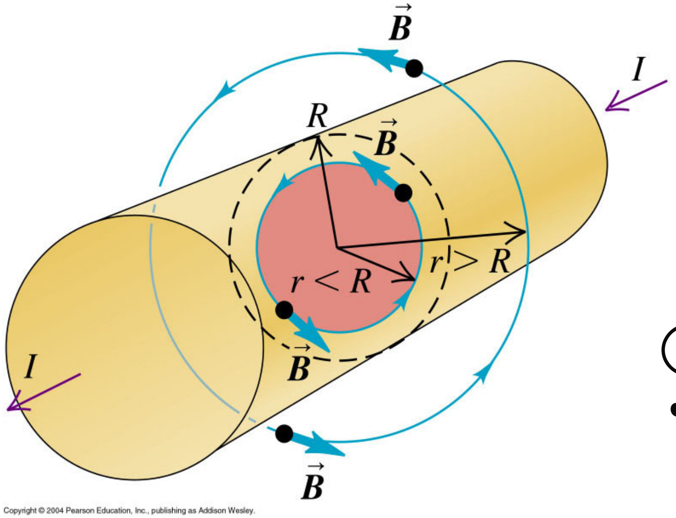
$$B\,2\pi r = \mu_o i$$

Despejamos el módulo del campo magnético B.

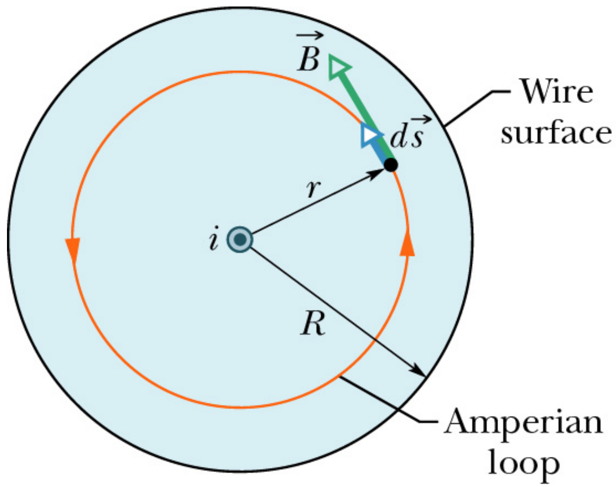
$$B = \frac{\mu_o i}{2\pi r}$$

Llegamos a la misma expresión obtenida aplicando la ley de Biot y Savart.

El campo magnético para puntos fuera del cable se comporta igual que si la corriente circulara a lo largo de su eje

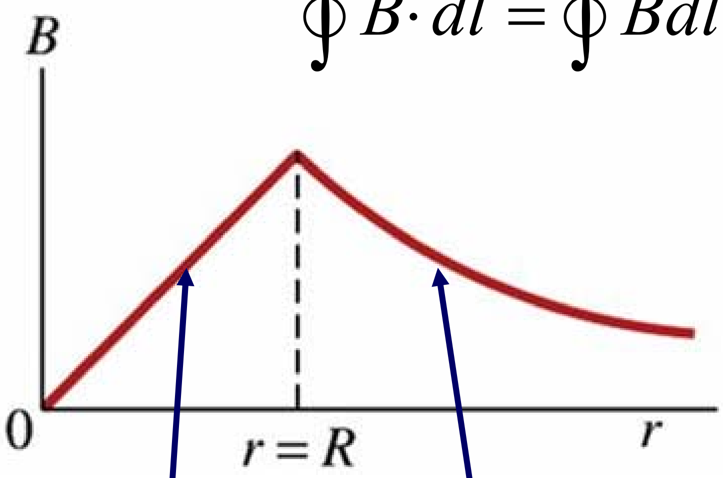


Para r < R



$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_o I$$

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \oint B dl Cos 0^o = B \oint dl = B(2\pi r)$$



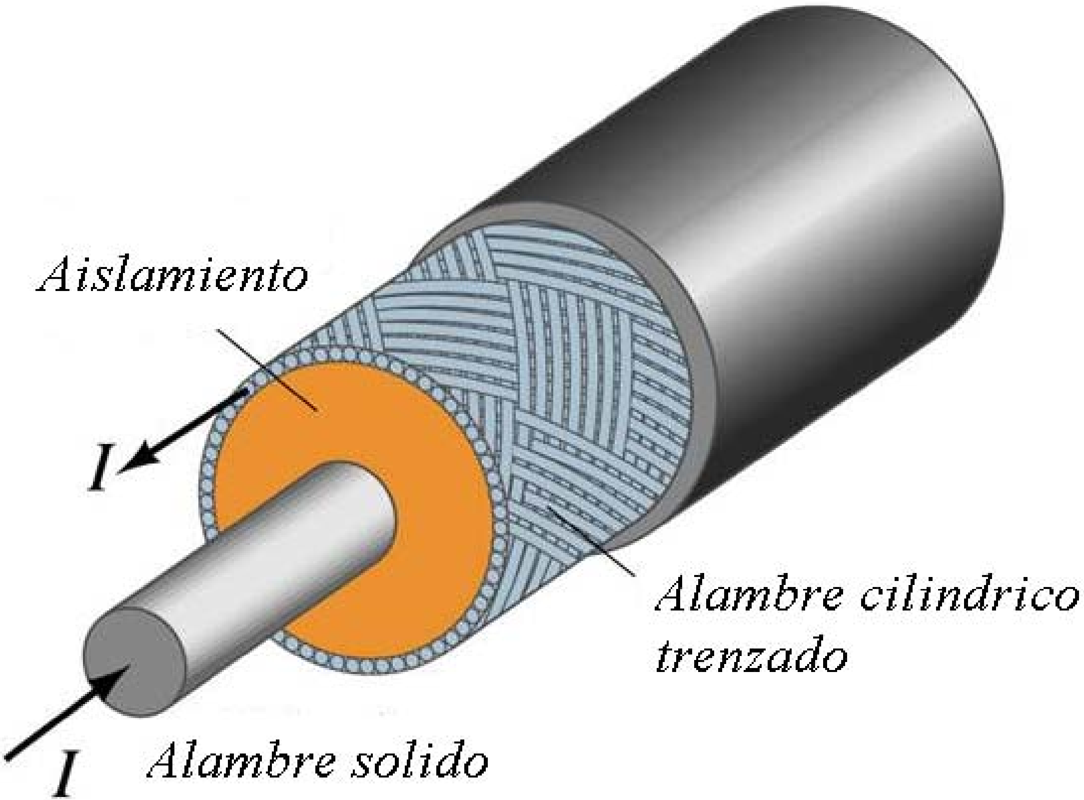
$$B(2\pi r) = \mu_0 I'$$

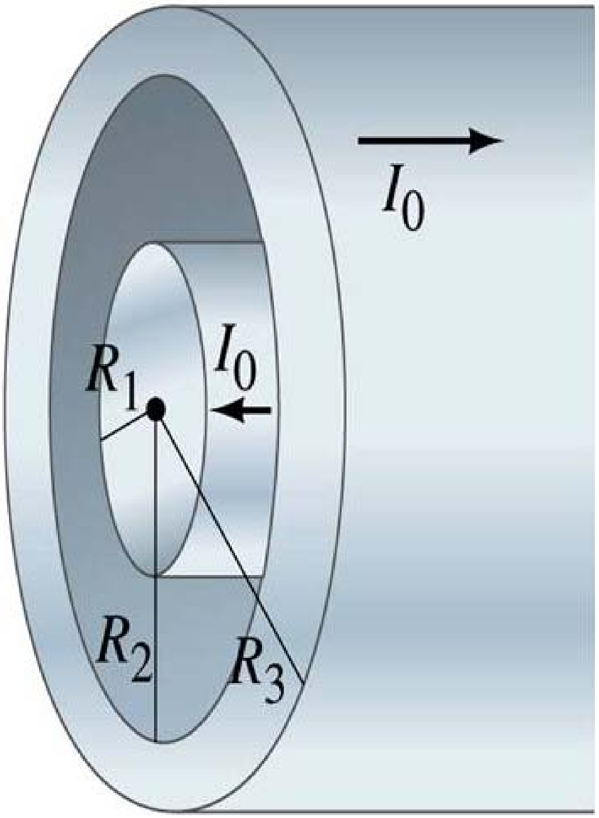
$$\frac{I'}{I} = \frac{\pi r^2}{\pi R^2}$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi R^2} r \qquad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

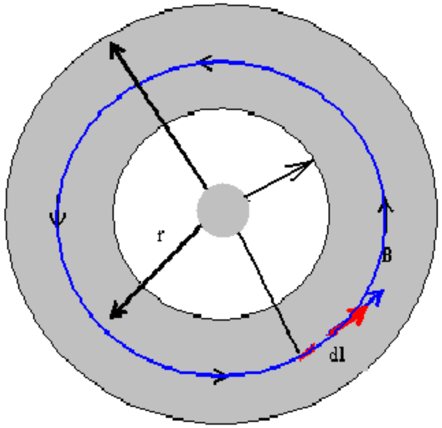
$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi R^2} r$$

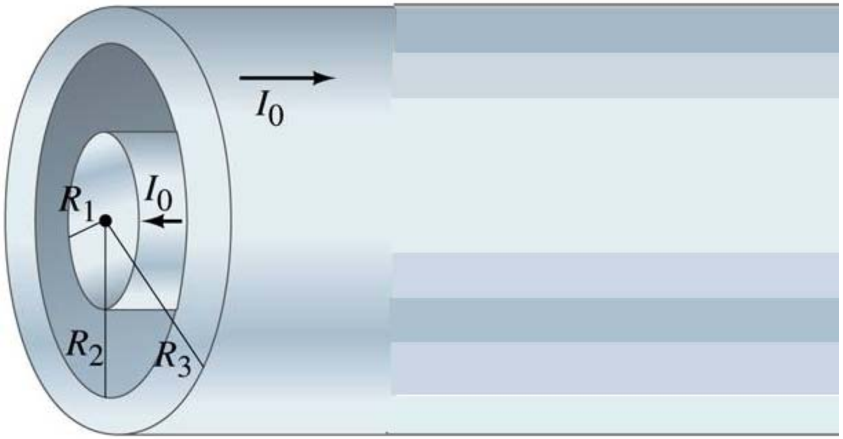
DETERMINE EL VALOR DEL CAMPO MAGNETICO EN LA VECINDAD DE UN CABLE COAXIAL.





Para $R_2 < r < R_3$





$$\oint BdlCos0^o = B\oint dl = B(2\pi r)$$

$$\frac{I'}{I_o} = \frac{\pi(r^2 - R_2^2)}{\pi(R_3^2 - R_2^2)}$$

$$I' = \frac{(r^2 - R_2^2)}{(R_3^2 - R_2^2)} I_o$$

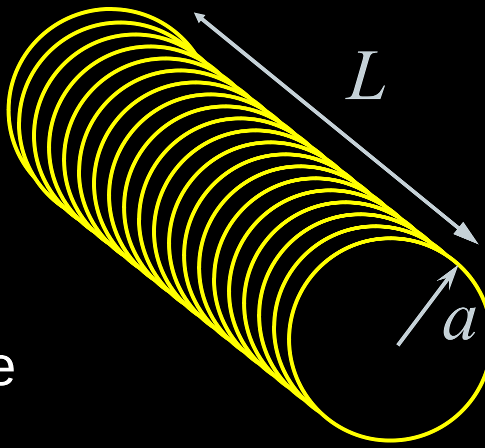
$$I_{neta} = I_o\left(1 - \frac{(r^2 - R_2^2)}{(R_3^2 - R_2^2)}\right)$$

$$B(2\pi r) = \mu_o I_o\left(\frac{R_3^2 - r^2}{R_3^2 - R_2^2}\right)$$

$$B = \frac{\mu_o I_o}{2\pi}\left(\frac{R_3^2 - r^2}{R_3^2 - R_2^2}\right)\frac{1}{r}$$

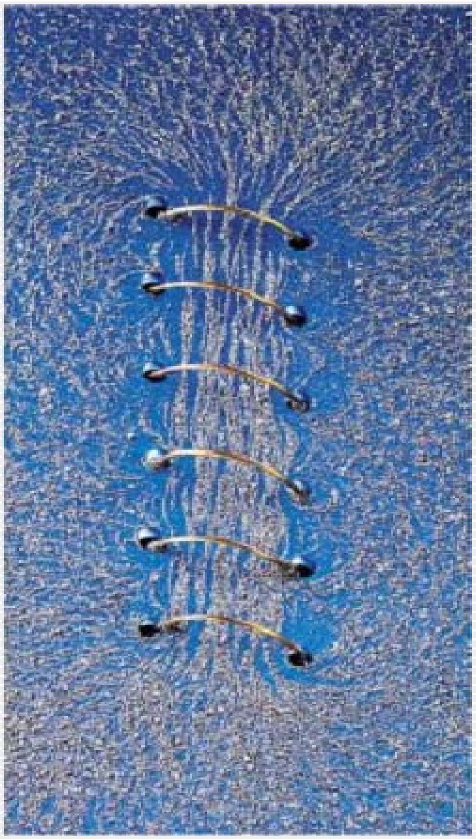
Campo B de un Solenoide

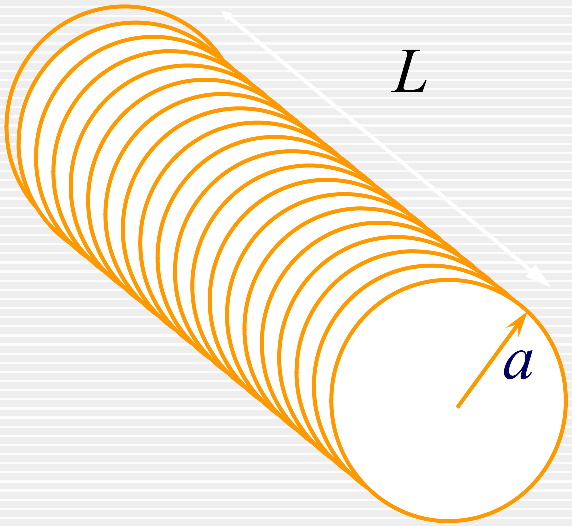
- Un campo magnético constante puede (en principio) ser producido por una lámina ¥ de corriente. En la práctica, sin embargo, un campo magnético constante es amenudo producido por un solenoide.



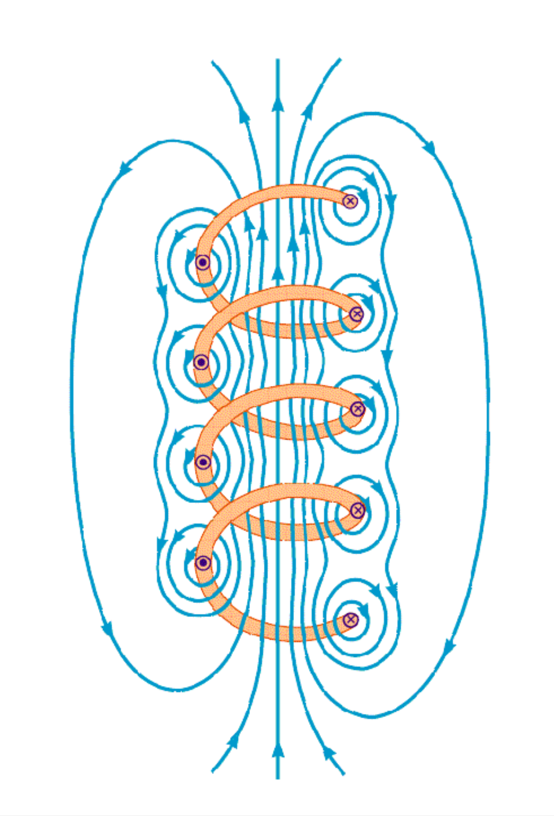
- Un solenoide es definido por una corriente i que fluye a través de un alambre que se dobla en n *vueltas por unidad de longitud* sobre un cilindro de radio a y longitud L.
- Para calcular correctamente el campo B, deberíamos usar Biot-Savart, y sumar el campo de cada uno de los diferentes lazos.
- Si $a << L$, el campo B contenido dentro del solenoide, en direccion axial es constante en magnitud. Bajo ésta condición, podemos calcular el campo usando la Ley de Ampere.

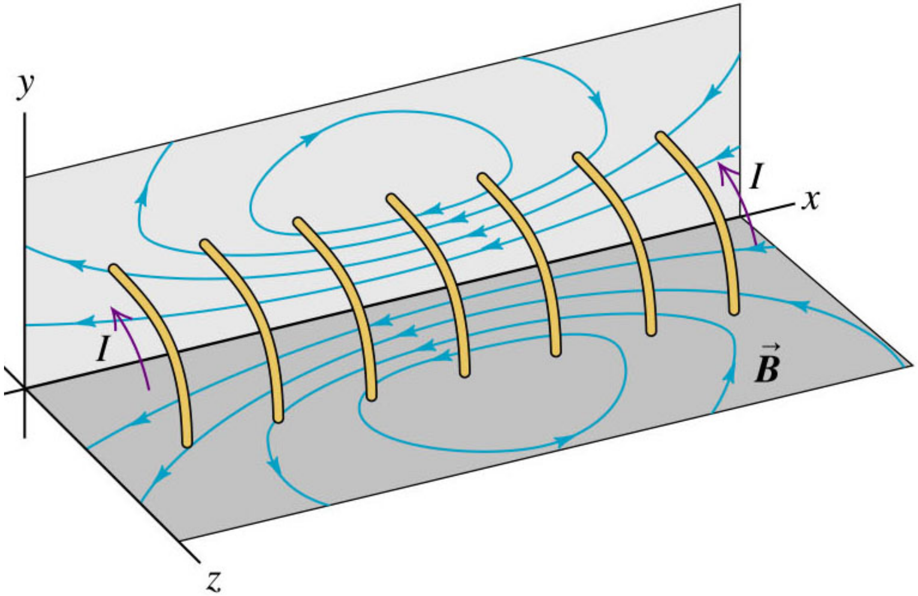
CAMPO MAGNÉTICO DE UN SOLENOIDE IDEAL



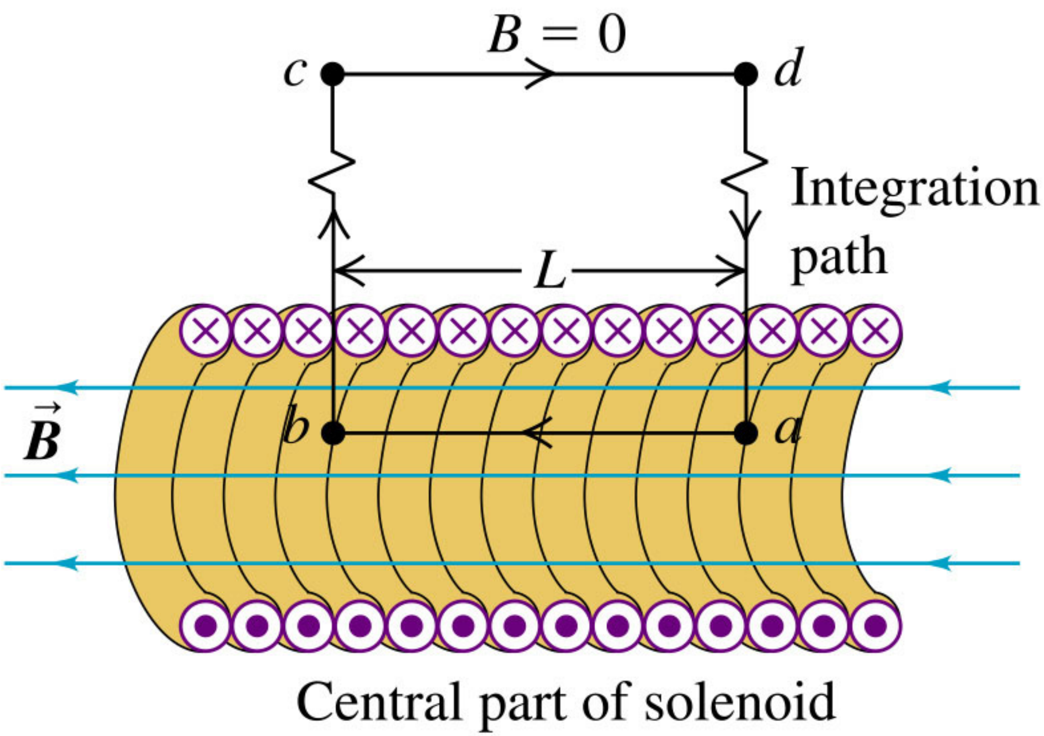


$$a << L$$





Las líneas de campo magnético salen de uno de los extremos del solenoide y retornan por el otro.

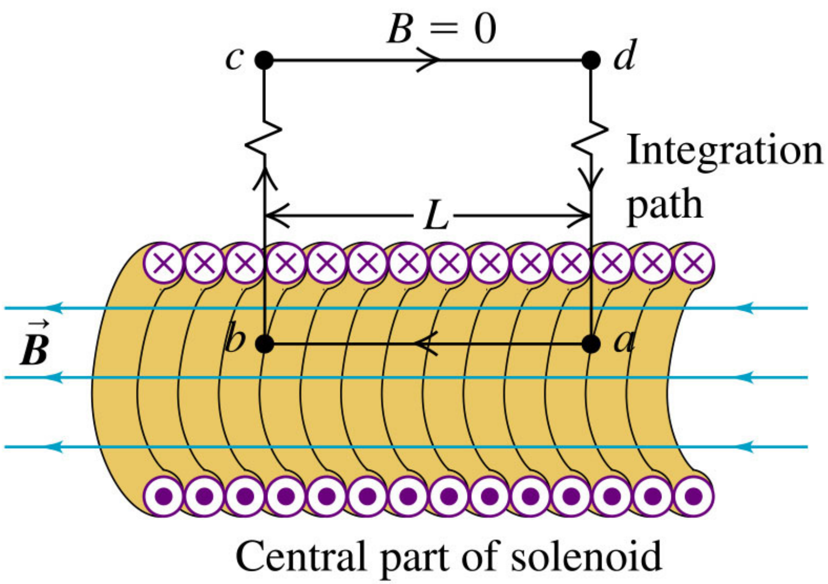


Las líneas de campo magnético se vuelven paralelas en la parte central del solenoide.

EL SOLENOIDE IDEAL

Tomemos como trayectoria de integración el rectángulo

$$\oint_{\substack{trayect.\\cerrada}} \vec{B}\cdot\vec{dl} = \mu_o I_{neta}$$



$$\int \vec{B}\cdot d\vec{l} = 0$$ *Para las trayectorias, excepto a-b*

$$\int \vec{B}\cdot\vec{dl} = \int Bdl = BL = \mu_o I_{neta}$$

I_{neta} = la corriente que atraviesa el rectángulo = nLI

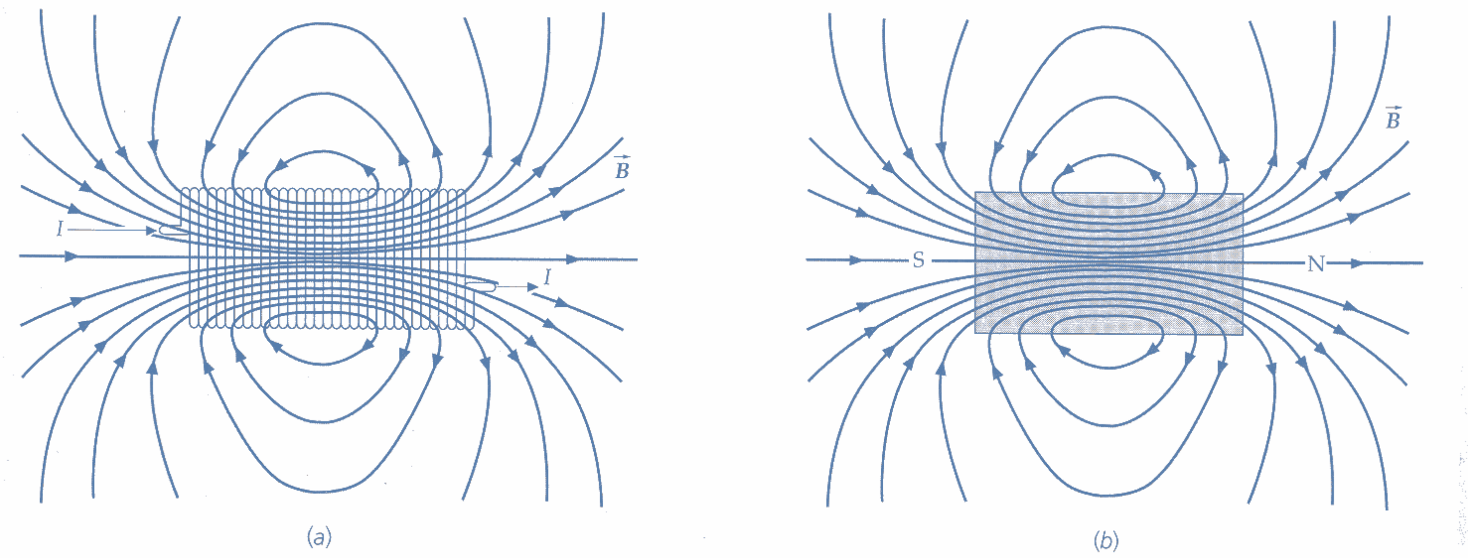
n: número de espiras por unidad de longitud

$$BL = \mu_o nLI$$

$$\mathbf{B = \mu_o\, n\, I}$$

Solenoides

El campo magnético de un solenoide es esencialmente idéntico al de una barra imantada.

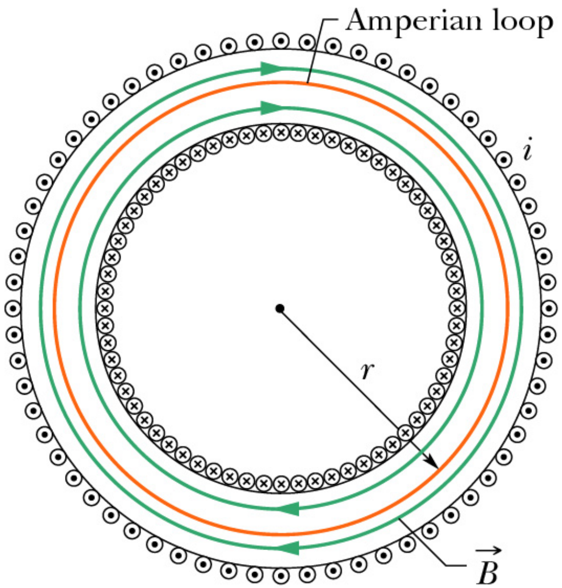


La grán diferencia es que nosotros podemos encender "*on*" y apagar "***off*** "! Y él atrae/repele otro imán permanente; siempre atrae materiales ferromagnéticos.

El Toroide

(a)

- El Toroide es definido por un numero total N de vueltas con corriente i.
- ***B*=0 fuera del toroide!** (Considere integrar B sobre un círculo fuera del toroide)
- Para encontrar *B* dentro, considere un círculo de radio *r*, centrado en el centro del toroide.



(b)

Aplique Ley de Ampere:

$$\oint \vec{B} \bullet d\vec{l} = B(2\pi r) = \mu_o I_{neta}$$

$$\oint \vec{B} \bullet d\vec{l} = \mu_0 I_{neta}$$

$$I_{neta} = Ni$$

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2\pi r}$$