



EL 6000

Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables

Clase 2: PRINCIPIOS BASICOS DE ELECTROMAGNETISMO



Tecnologías de ERNC

SOLAR

PV: 0.1 → 1 MW

CSP: 1 → 500 MW



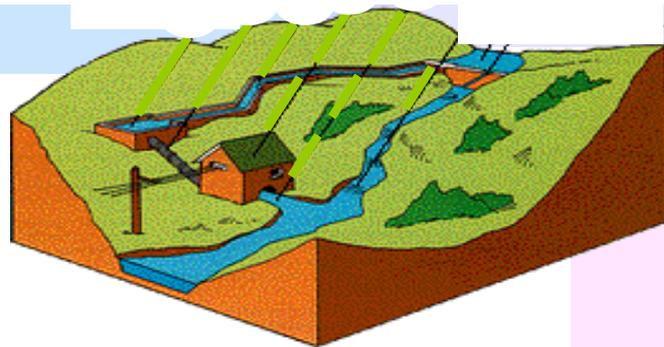
EOLICAS

1 MW → 50 MW



Biomasa

1 → 10 MW



MAREOMOTRIZ

0.1 → 10 MW

GEOTERMICAS

5 MW → 50 MW

MINIHIDRO 1 → 9
MW



CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Eólica

1887-88: Charles F. Brush, construye la primera turbina eólica (de giro lento). Rotor de 17 [m] de diámetro, 144 aspas de cedro, 12 [kW]

Hoy: 2 - 4 MW

100-160 m





fcfm

Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Eólica



Dinamarca, 160 MW en granja eólica off-shore



CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Eólica

Tres turbinas V47 (VESTAS) de 660 [kW] c/u, ubicadas a 40 [m] de altura.

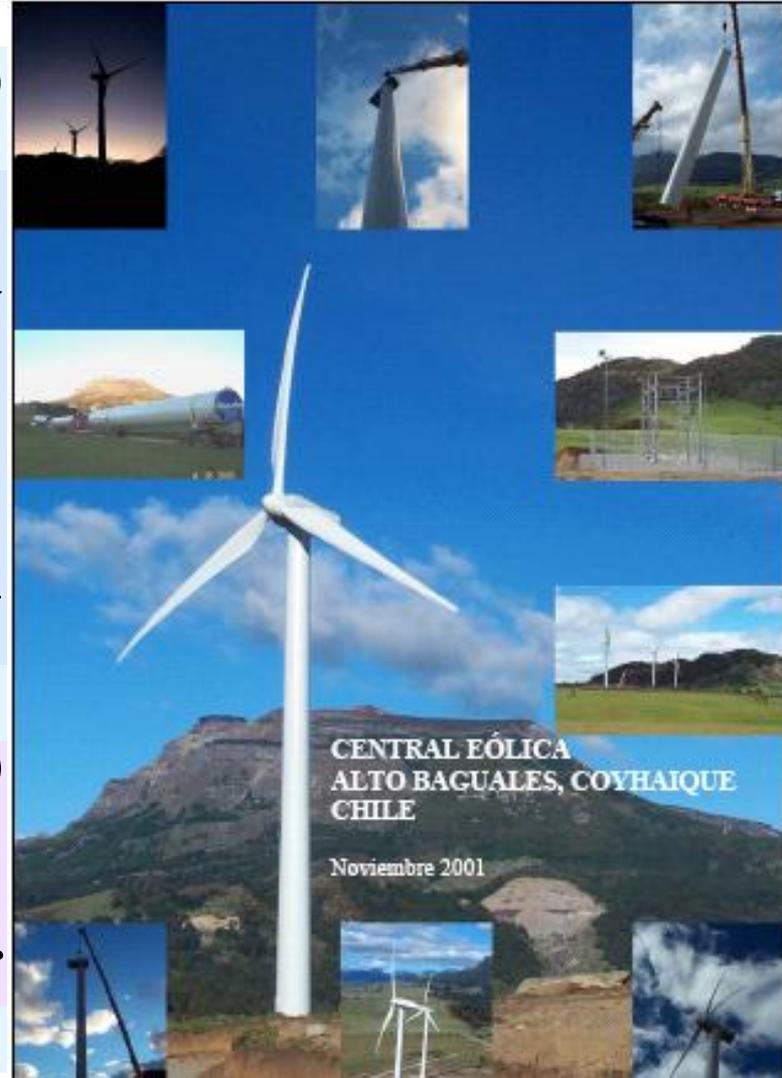
Representa cerca del 10% del sistema de la región de Aysén.

Rotor de 47 [m], tres aspas.

Generador asíncrono, de velocidad variable.

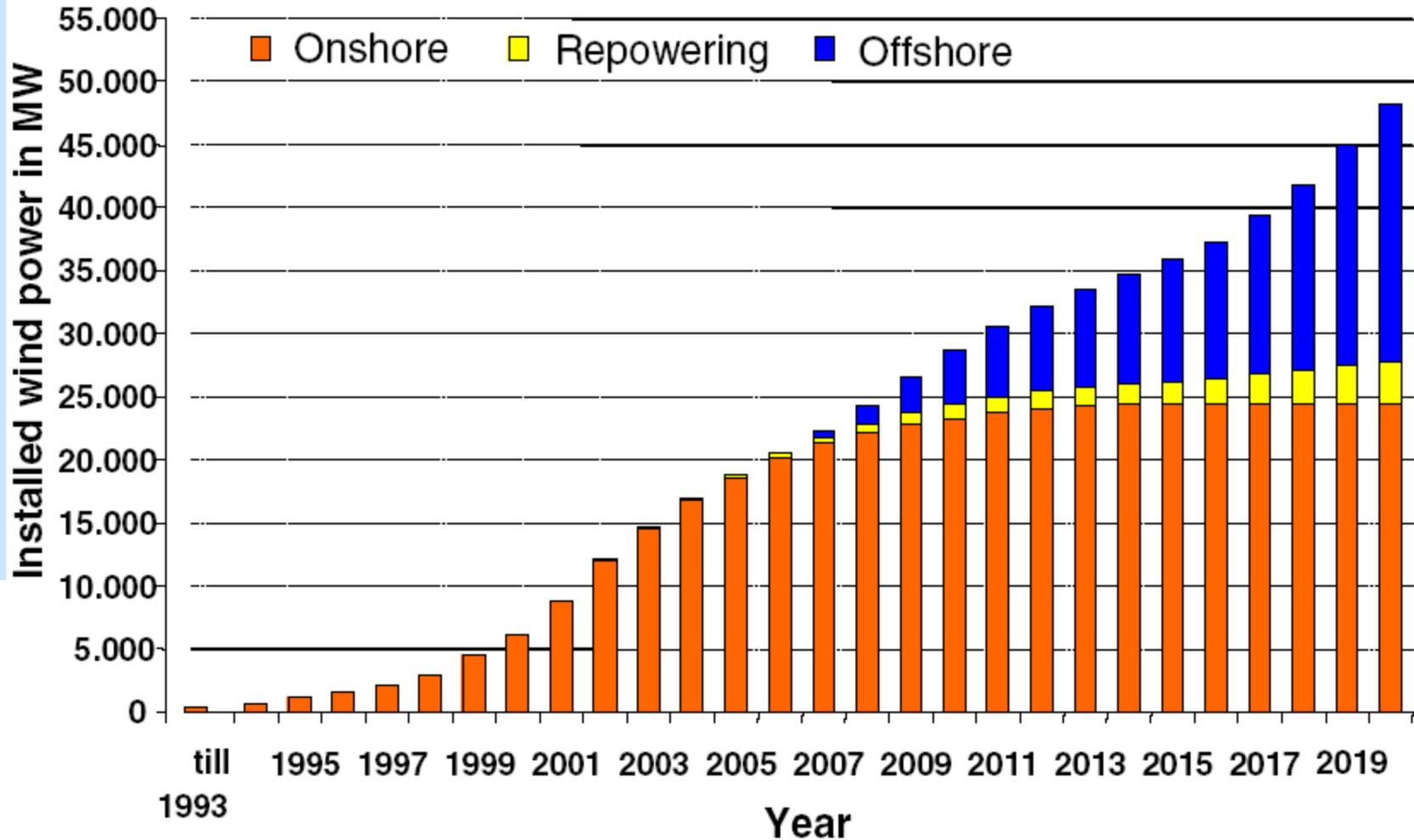
Operan directamente con la red (50 [Hz]).

Requieren de un transformador elevador 690/33000 [V].



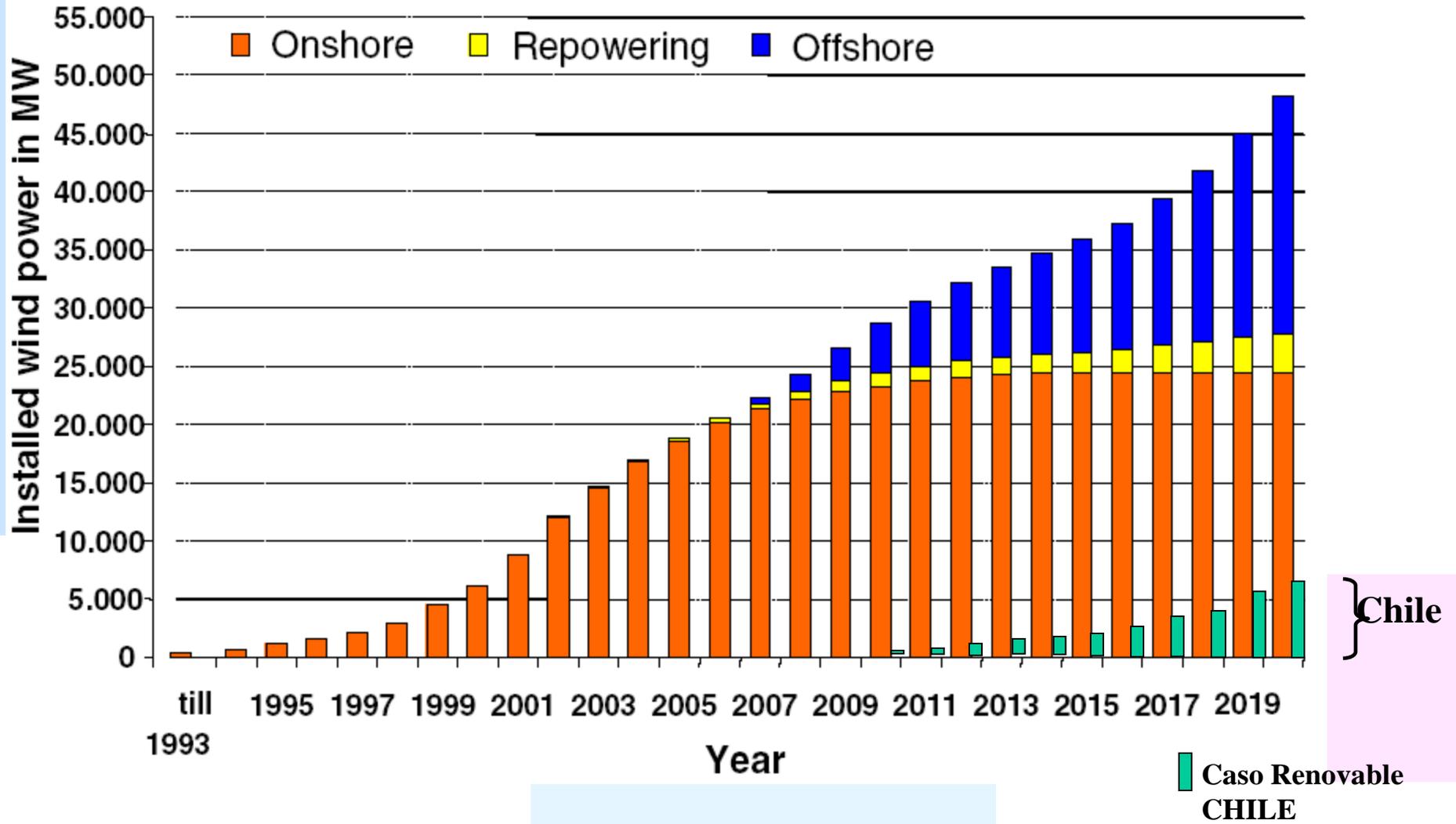


EJEMPLO 1: ALEMANIA 1993-2020





EJEMPLO 1: ALEMANIA 1993-2020





Land Surface Germany: 357.031 km²

Land Surface Chile : 756.950 km²



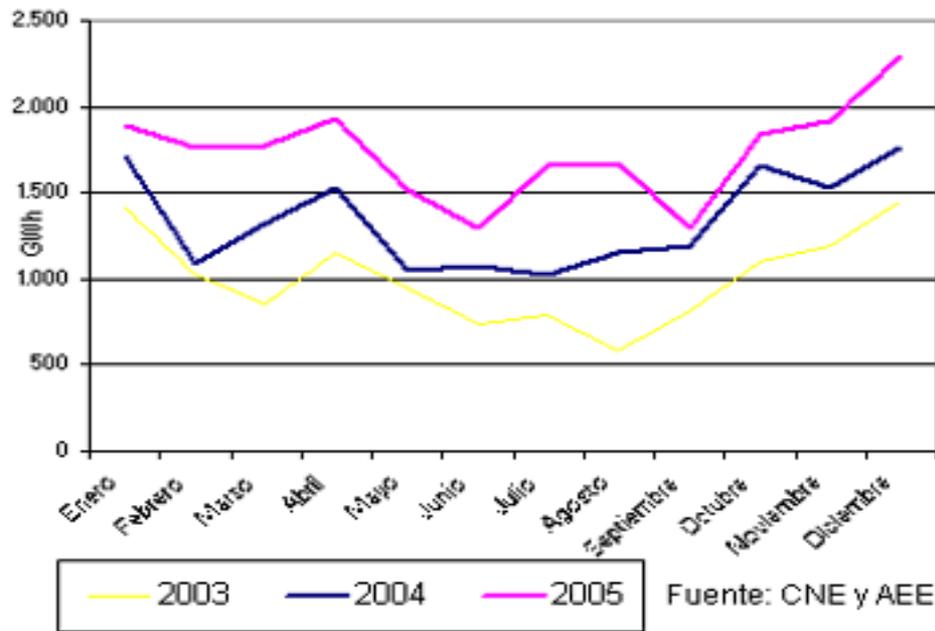
Wind resources, probably the same or better in Chile

Problemas de intermitencia y desconexión intempestiva SUPERADOS

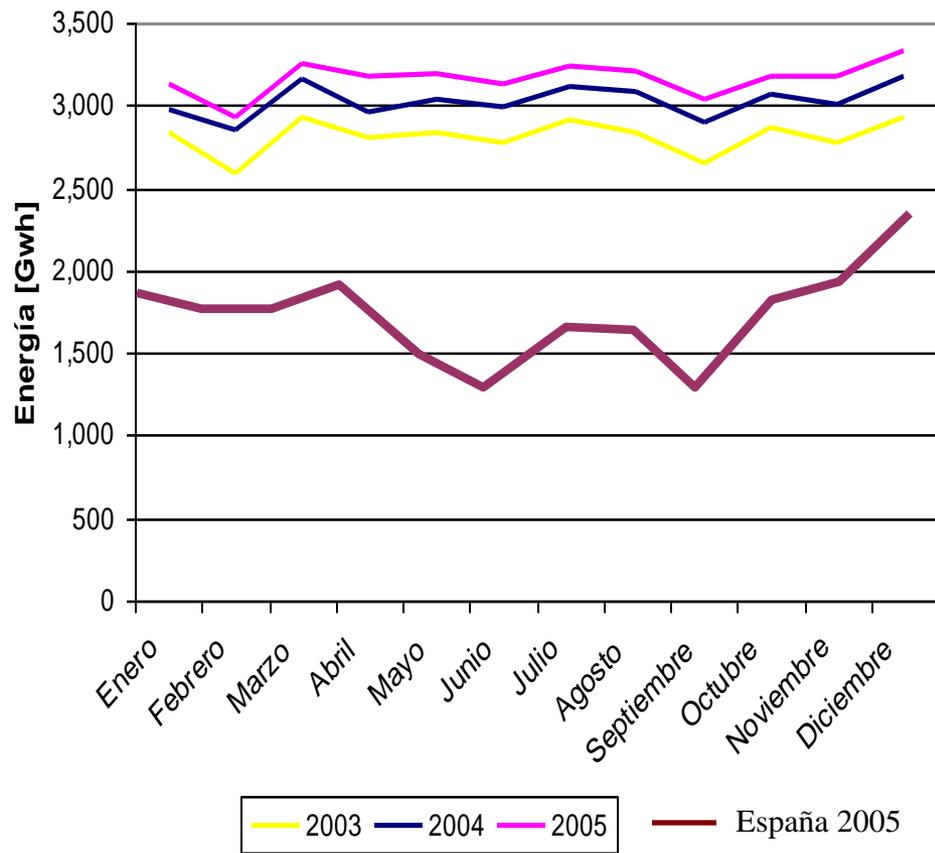


EJEMPLO 2: Energía Eólica en España

EVOLUCIÓN MENSUAL DE LA GENERACIÓN EÓLICA



Generación real SIC GWh



Máx. producción en 7.300 MW, cubriendo el 24% de la demanda eléctrica.



CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Eólica

Central ECO Endesa - Parque Eólico Canela

20 MW

**Producción media 25.949 MWh
(factor de planta 30%)**

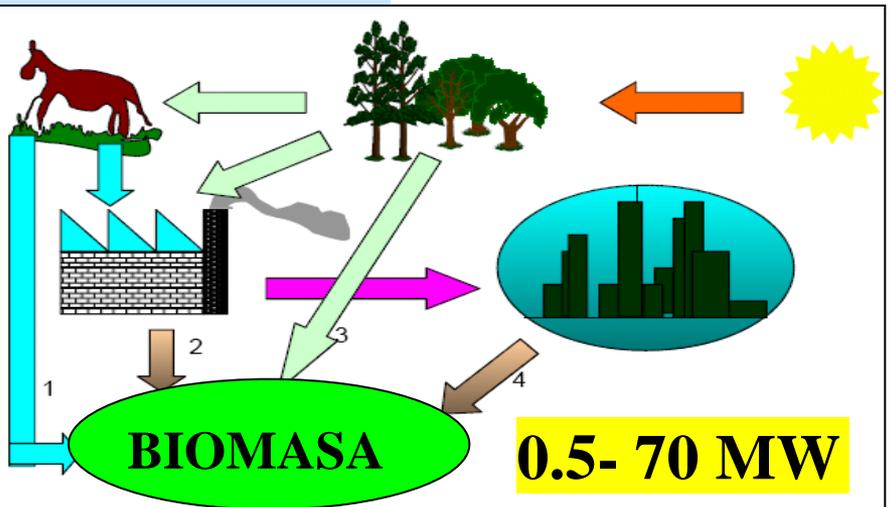
Altura de torre 65 m

Diámetro de rotor 80 m





CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Biomasa



Desechos agrícolas y forestales

Industria de alimentos

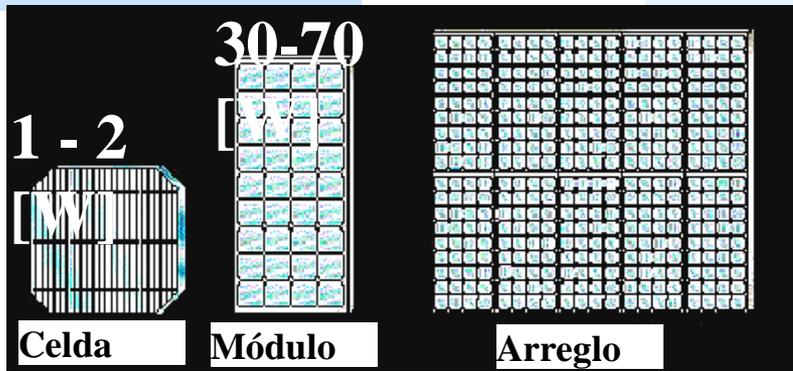
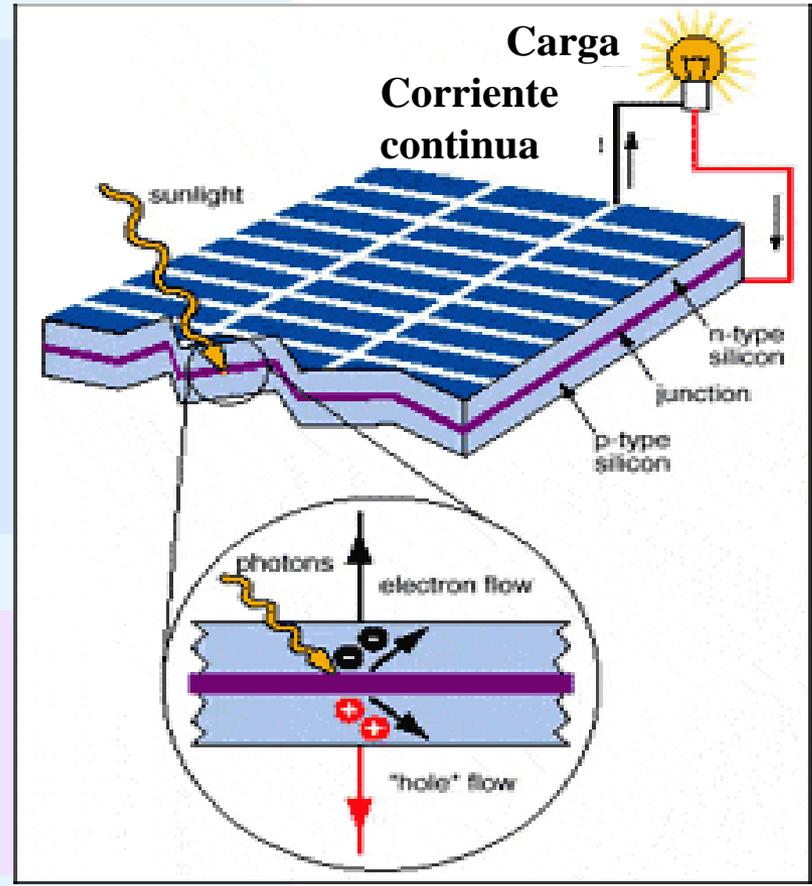
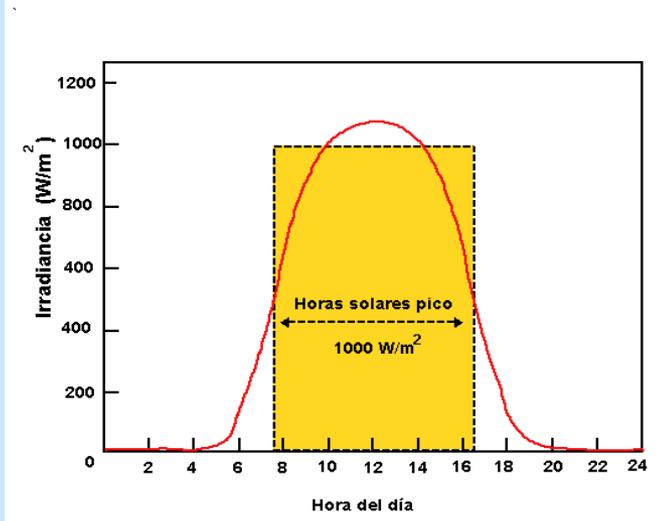


- Electricidad
- Calor
- Biogás
- Biomasa, Excretas animales, Riles, etc.



CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Energía Solar

Sistemas Fotovoltaicos (PV)





CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: PV

**10 MW in Pocking, Germany, inaugurada en Abril 27
2006, costo estimado 40 millones de euro**





CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Energía Solar

Sistemas de Energía Solar Concentrada



Figure 4 Parabolic trough concentrating solar collector field of the 150 MW (5 x 30 MW) steam cycle solar electricity generating systems at Kramer Junction, California (Source: KJC)



Figure 6 The EURO-DISH parabolic dish concentrator with a Stirling motor-generator in the focal point at the CIEMAT solarthermal test centre Plataforma Solar de Almería, Spain (Source: SBP)





CARACTERIZACION TECNOLOGIAS: Energía Solar

**En el desierto Mojave
de California.**

**En operación por dos
décadas**

**9 plantas con un total
de 350 MWe**









Conceptos de Electromagnetismo

- **Campo Magnético**
- **Ley Circuital de Ampere**
- **Ley de Biot y Savarat**
- **Torque eléctrico y**
- **Motor elemental.**

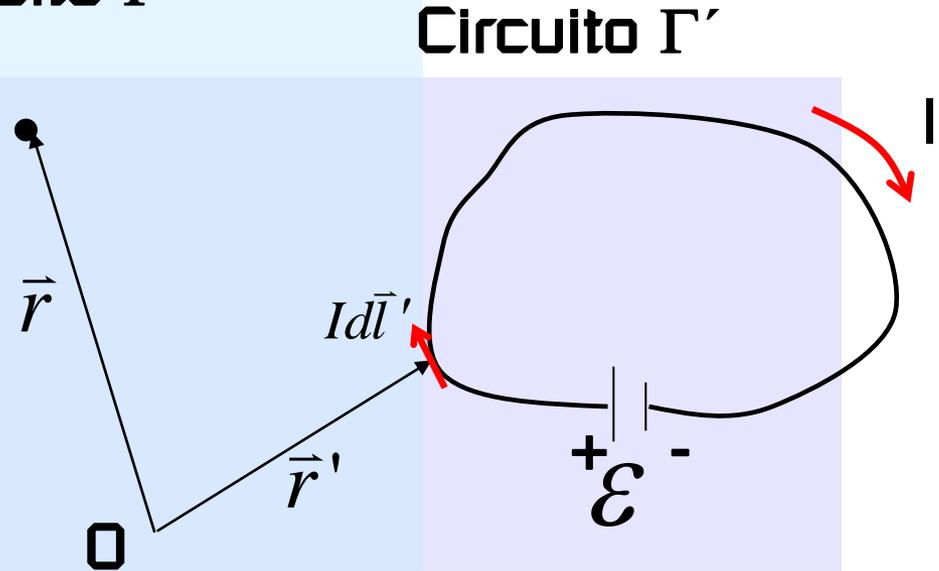


Campo magnético

Campo producido por circuito Γ'

$$\vec{B} = \oint_{\Gamma'} \frac{\mu_0 I d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}')}{4\pi \|\vec{r} - \vec{r}'\|^3}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$



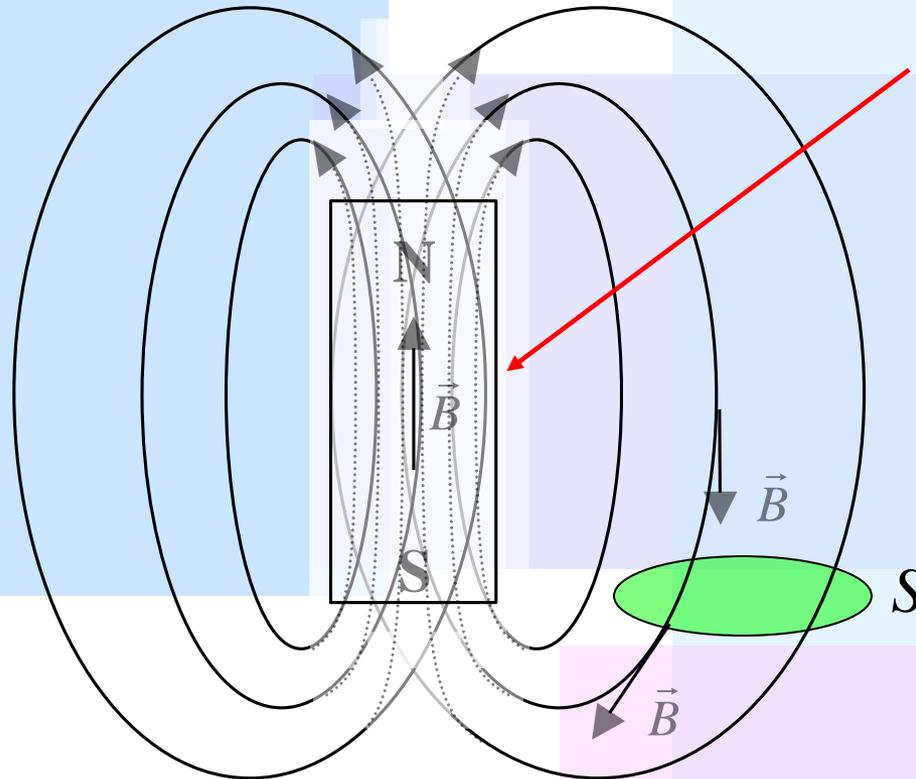
\vec{B} : Vector campo magnético

\vec{H} : Vector intensidad de campo magnético

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H/m]$: permeabilidad magnética del medio



Campo magnético



Imán permanente

Flujo de líneas de campo a través de una superficie S :

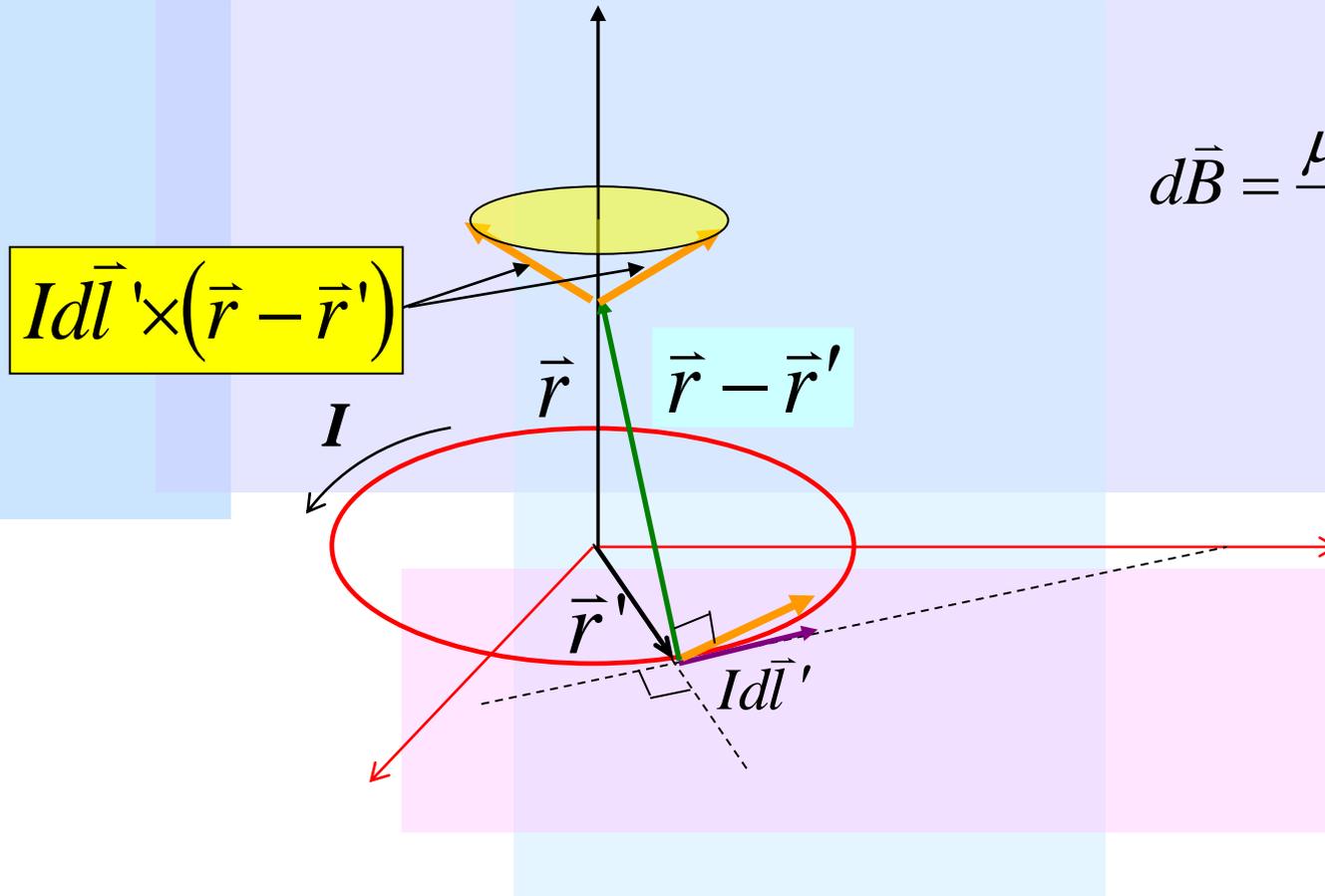
$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$



Campo magnético: Regla de la mano derecha

Dirección de campo está dado por el producto

$$Id\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}')$$

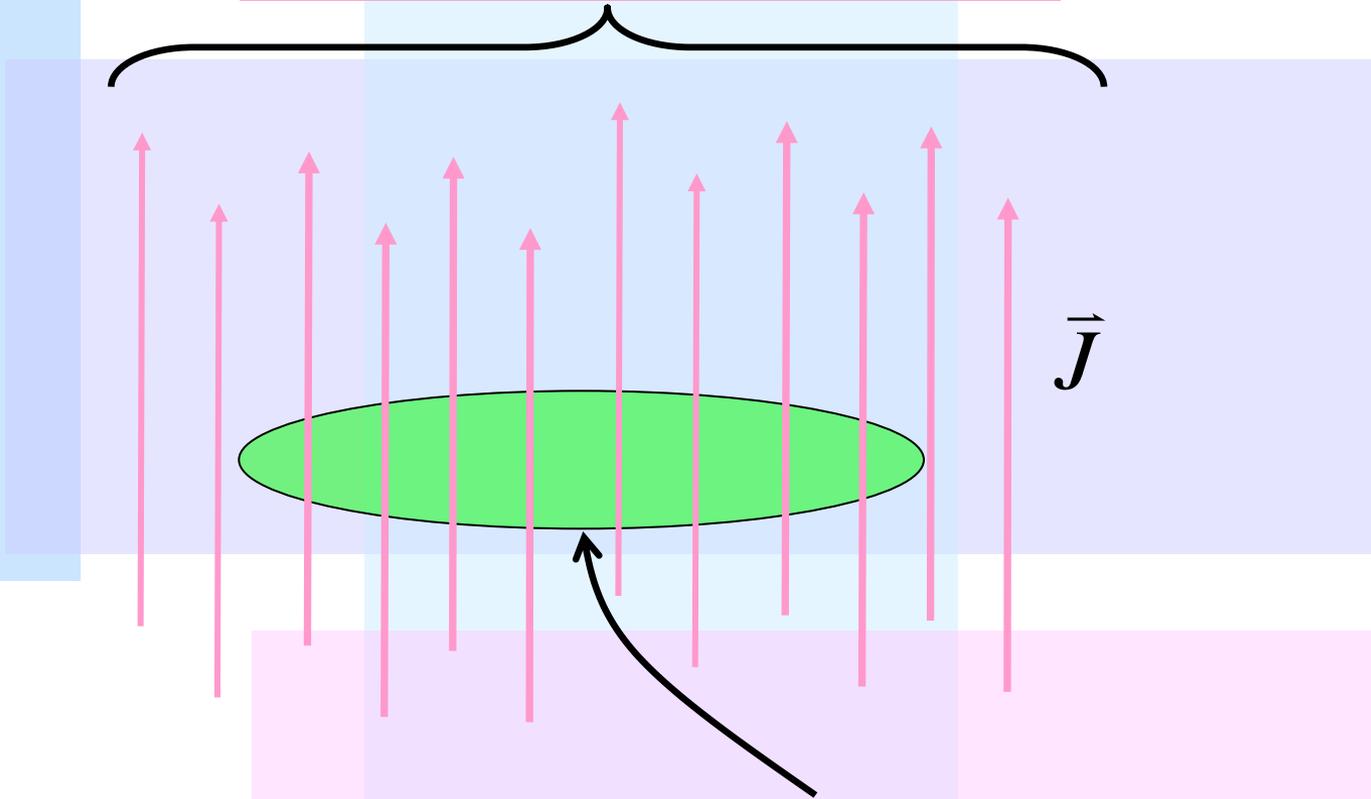


$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 Id\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}')}{4\pi \|\vec{r} - \vec{r}'\|^3}$$



Ley Circuital de Ampere

Líneas de corriente

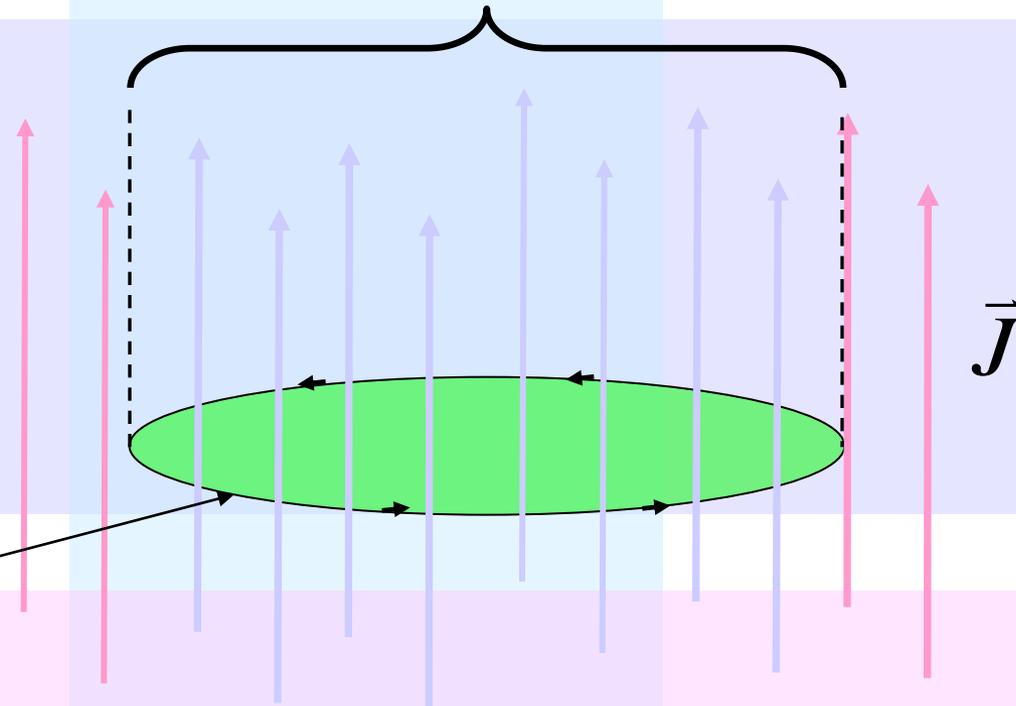


Plano S por donde atraviesan líneas de corriente



Ley Circuital de Ampere

$$I_{enlazada} = \text{Corriente enlazada por } \Gamma(s)$$



Trayectoria
cerrada $\Gamma(s)$

$$\oint_{\Gamma(s)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enlazada}$$

Ley Circuital de Ampere

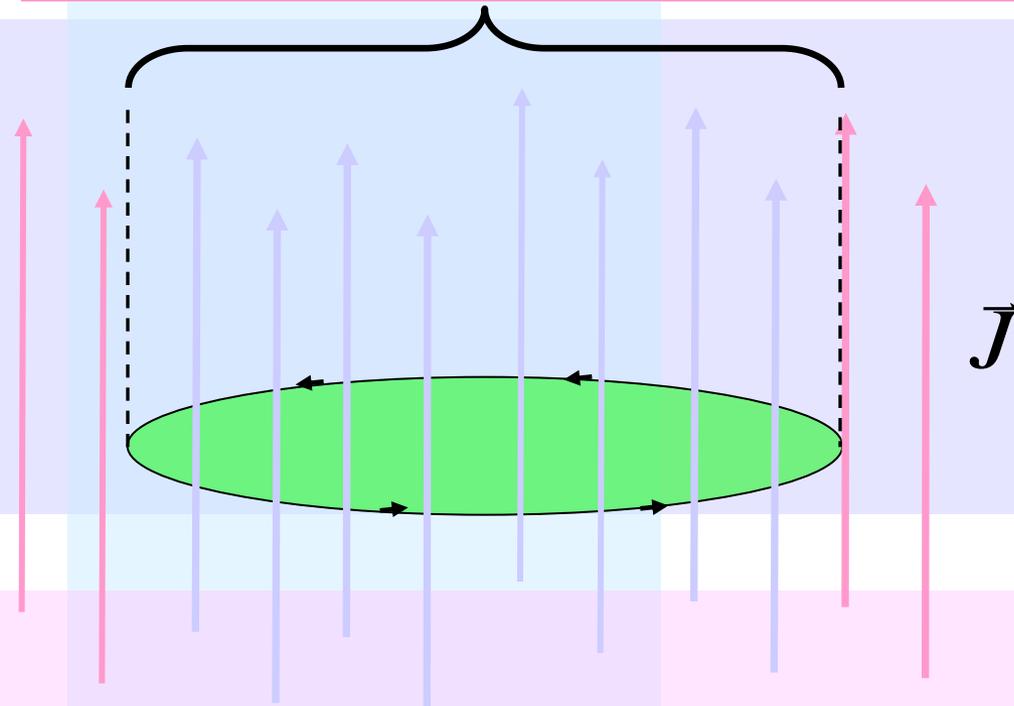


Ley Circuital de Ampere

$I_{enlazada}$ = Corriente enlazada por $\Gamma(s)$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

\vec{H} : Vector
Intensidad de
Campo Magnético



$$\oint_{\Gamma(s)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enlazada}$$

Ley Circuital de Ampere



Ejemplo 1

Calcular el campo magnético de una corriente unifilar infinita

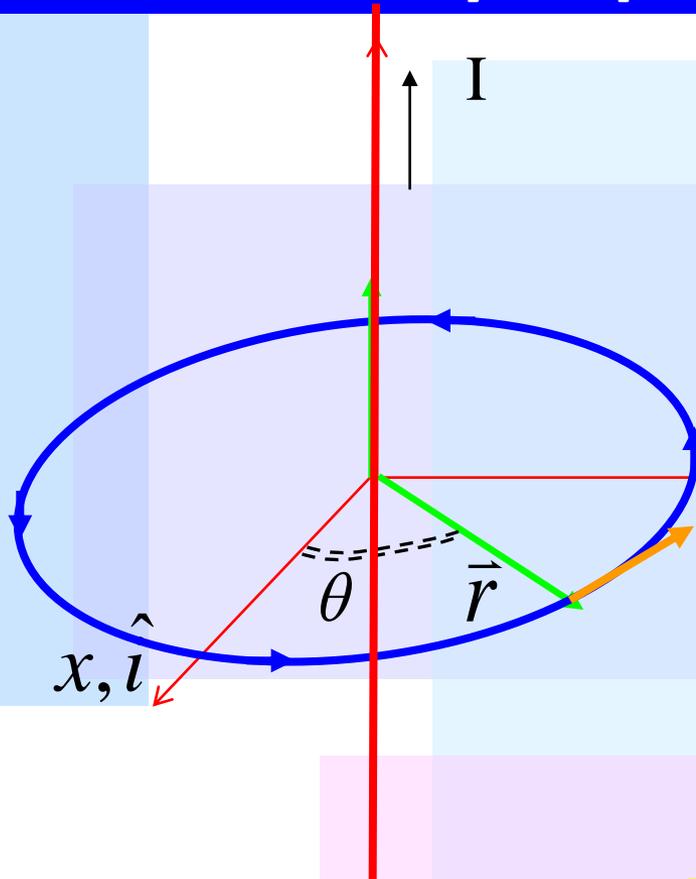
I

$$\vec{B} = ?$$

I



Ejemplo 1



Sabemos que el campo es tangencial a la corriente

$$\vec{B} = B\hat{\theta}, \quad \vec{H} = H\hat{\theta}$$

$$d\vec{B} = dB\hat{\theta} \quad y, \hat{j}$$

Además sólo depende de la distancia radial r

$$\vec{B} = B(r)\hat{\theta}, \quad \vec{H} = H(r)\hat{\theta}$$



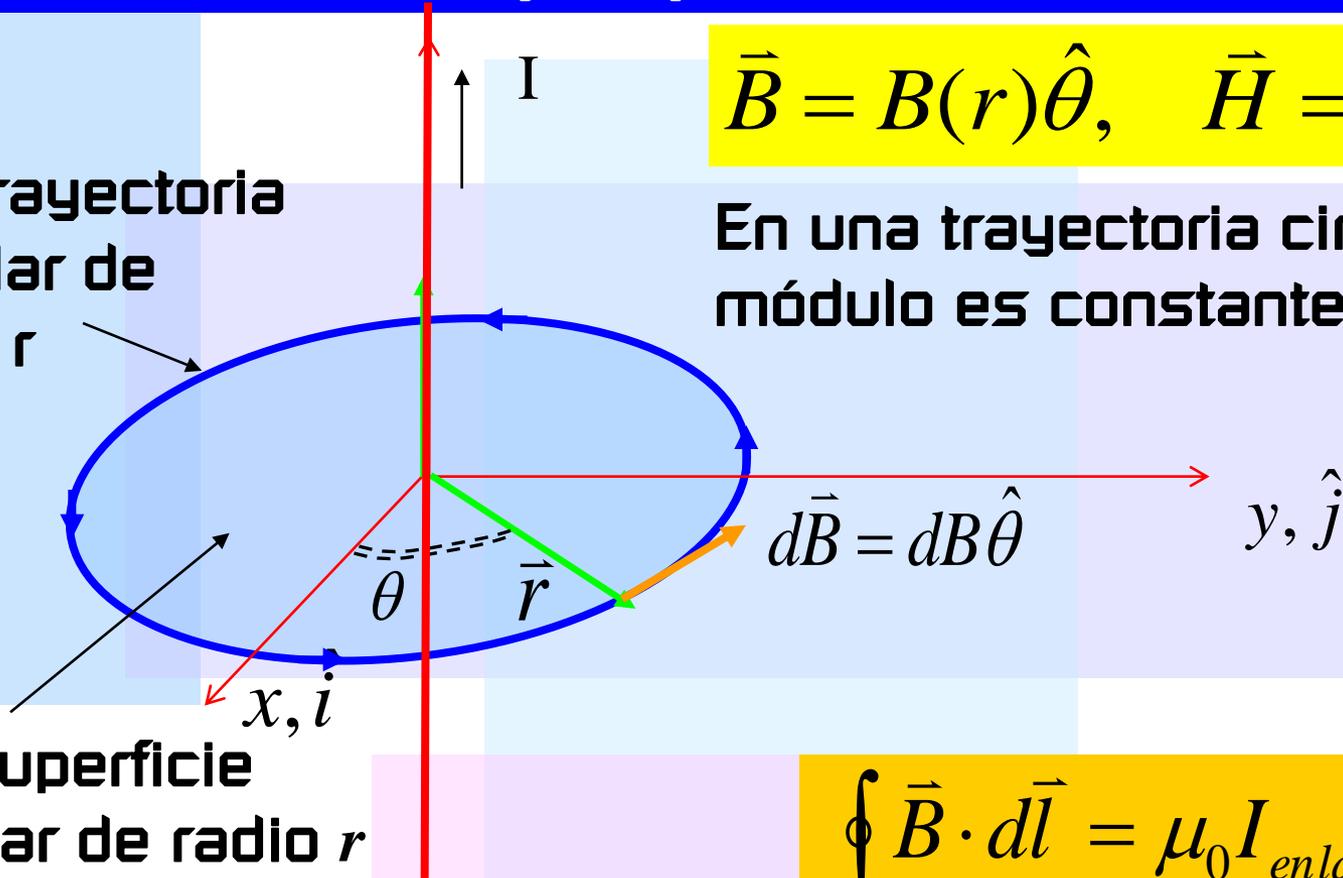
Ejemplo 1

$$\vec{B} = B(r)\hat{\theta}, \quad \vec{H} = H(r)\hat{\theta}$$

En una trayectoria circular el módulo es constante

Γ : trayectoria circular de radio r

S : superficie circular de radio r



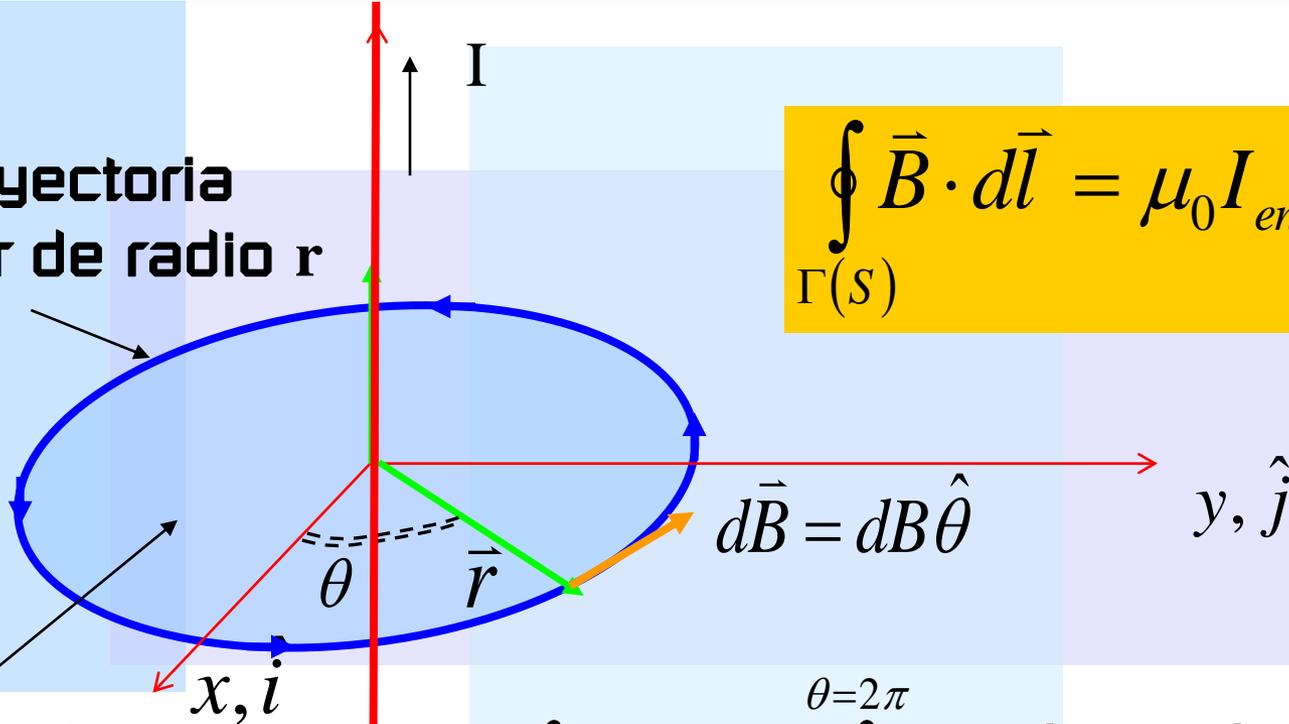
$$\oint_{\Gamma(S)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enlazada}(S)$$



Ejemplo 1

Γ : trayectoria circular de radio r

$$\oint_{\Gamma(S)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enlazada}(S)$$



S : superficie circular de radio r

$$\oint_{\Gamma(S)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} B(r) \hat{\theta} \cdot r d\theta \hat{\theta} = B(r) r \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} d\theta$$

$$\Rightarrow \oint_{\Gamma(S)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = 2\pi B(r) r$$



Ejemplo 1

$$\oint_{\Gamma(S)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enlazada}(S)$$

$$I_{enlazada}(S) = I$$

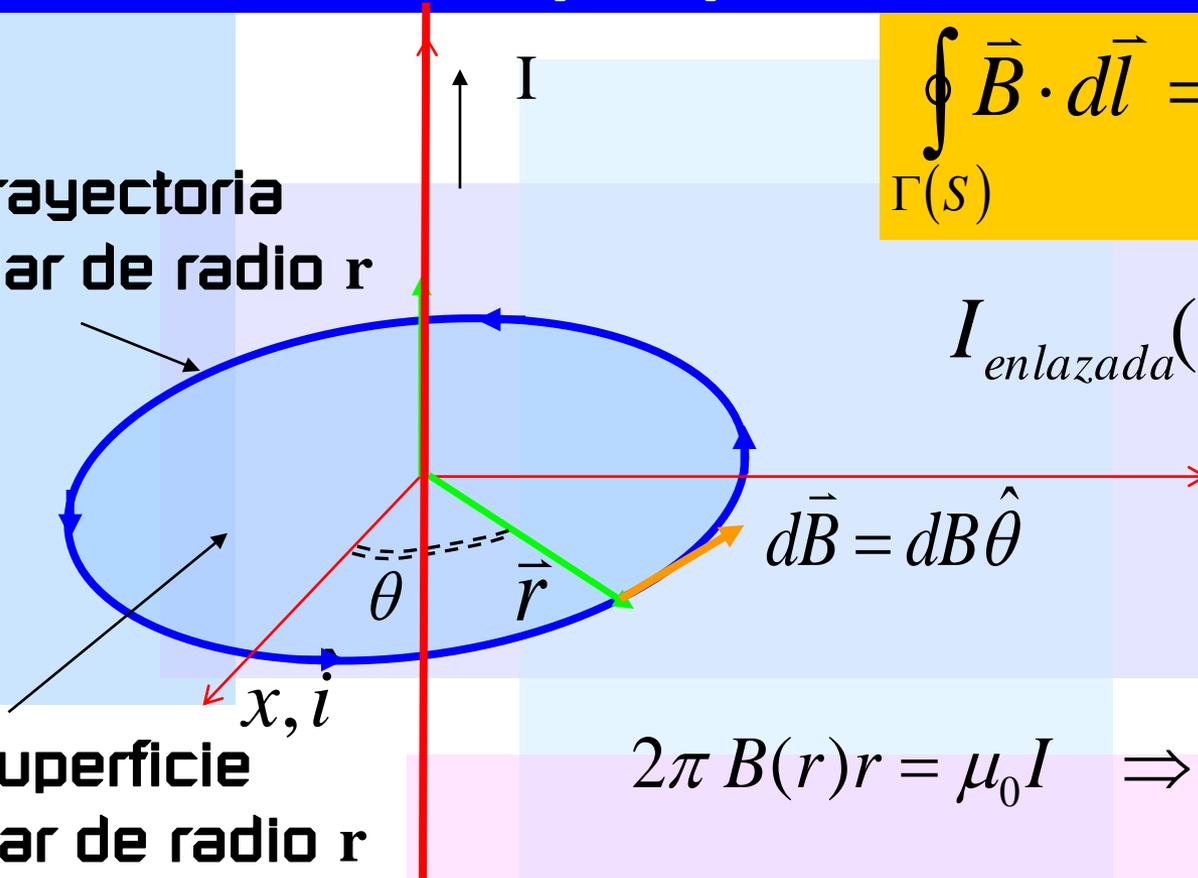
$$d\vec{B} = dB \hat{\theta} \quad y, \hat{j}$$

$$2\pi B(r)r = \mu_0 I \Rightarrow B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$\therefore \vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{\theta}$$

Γ : trayectoria circular de radio r

S : superficie circular de radio r

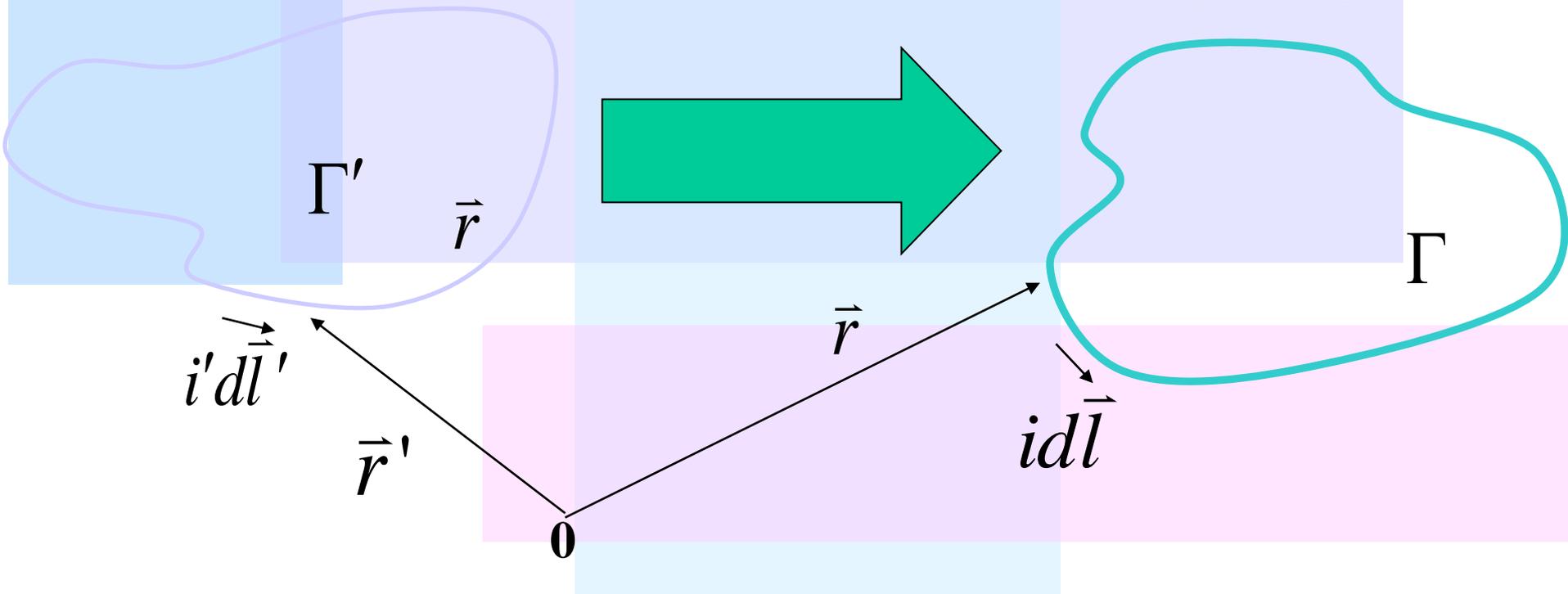




Ley de Biot y Savarat

Fuerza que ejerce circuito Γ' sobre circuito Γ

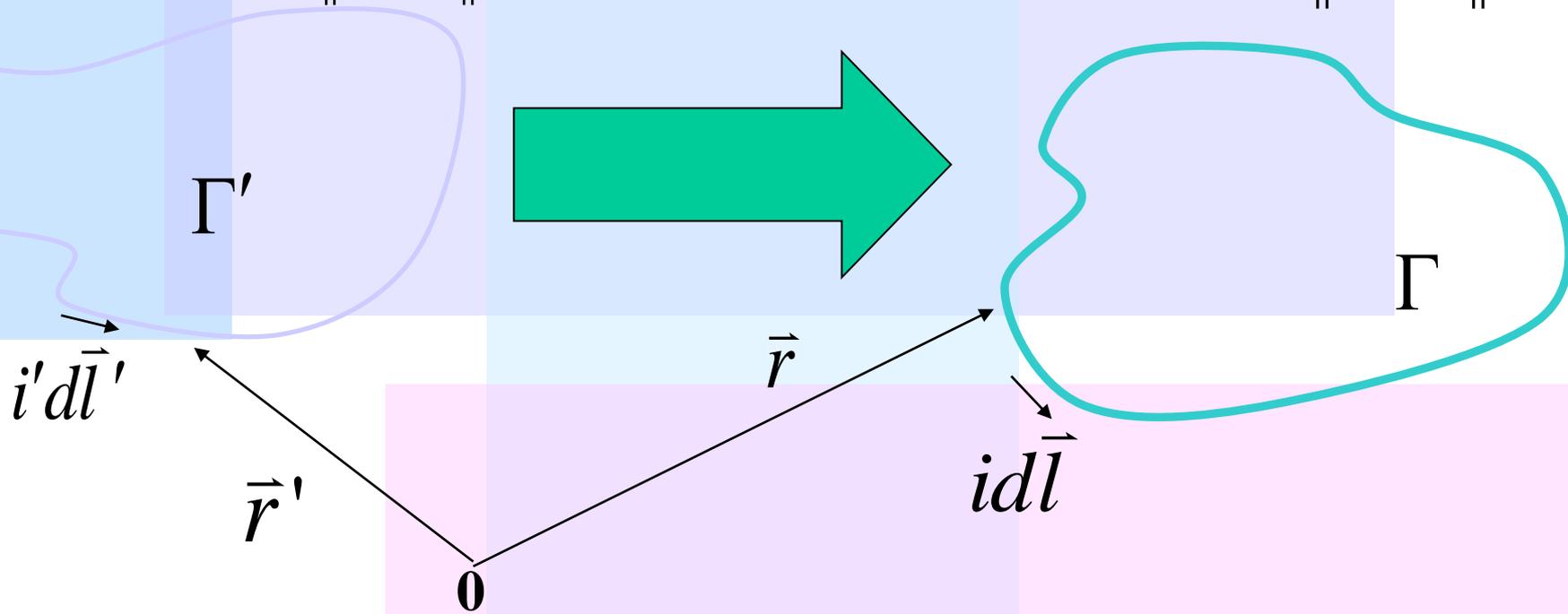
$$\vec{F}_{\Gamma' \rightarrow \Gamma} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\Gamma} \oint_{\Gamma'} \frac{I' Id\vec{l} \times (d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}'))}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3}$$





Ley de Biot y Savarat

$$\vec{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\Gamma} \oint_{\Gamma'} \frac{I' Id\vec{l} \times (d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}'))}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} \rightarrow d\vec{F} = \frac{Id\vec{l} \times \mu_0}{4\pi} \oint_{\Gamma'} \frac{I' d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3}$$



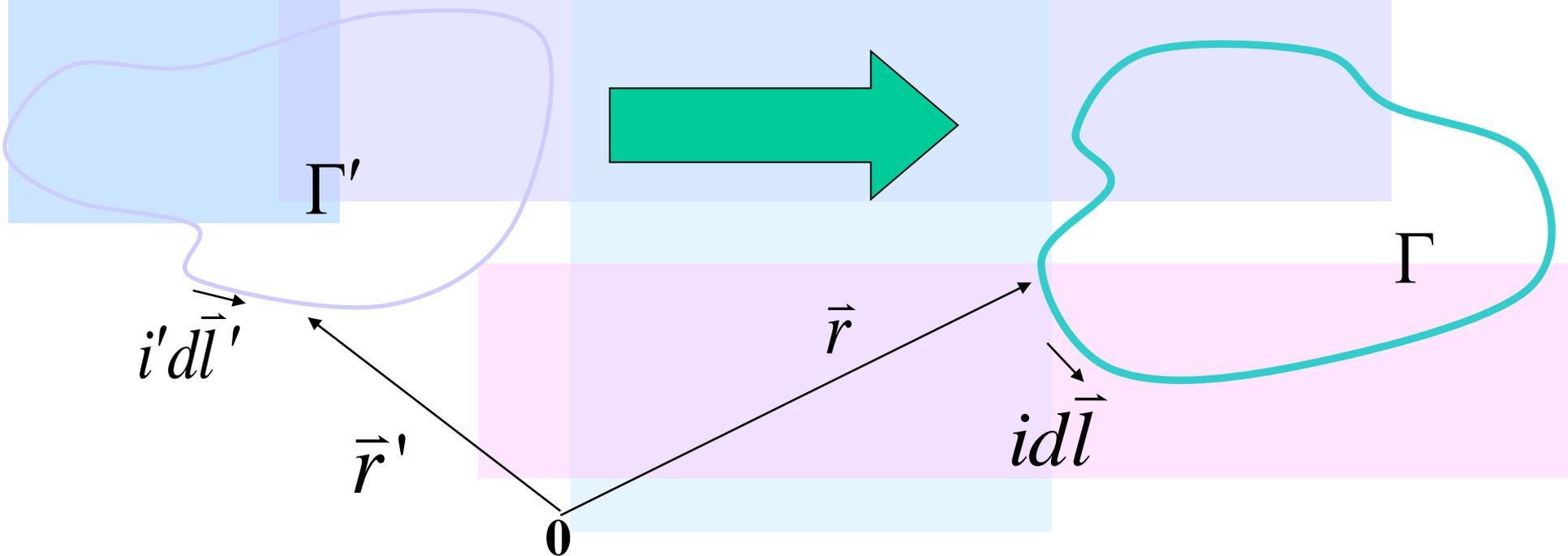


Ley de Biot y Savarat

$$d\vec{F} = \frac{Id\vec{l} \times \mu_0}{4\pi} \oint_{\Gamma'} \frac{I' d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3}$$

$$\therefore d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$$

Campo magnético producido por circuito Γ'



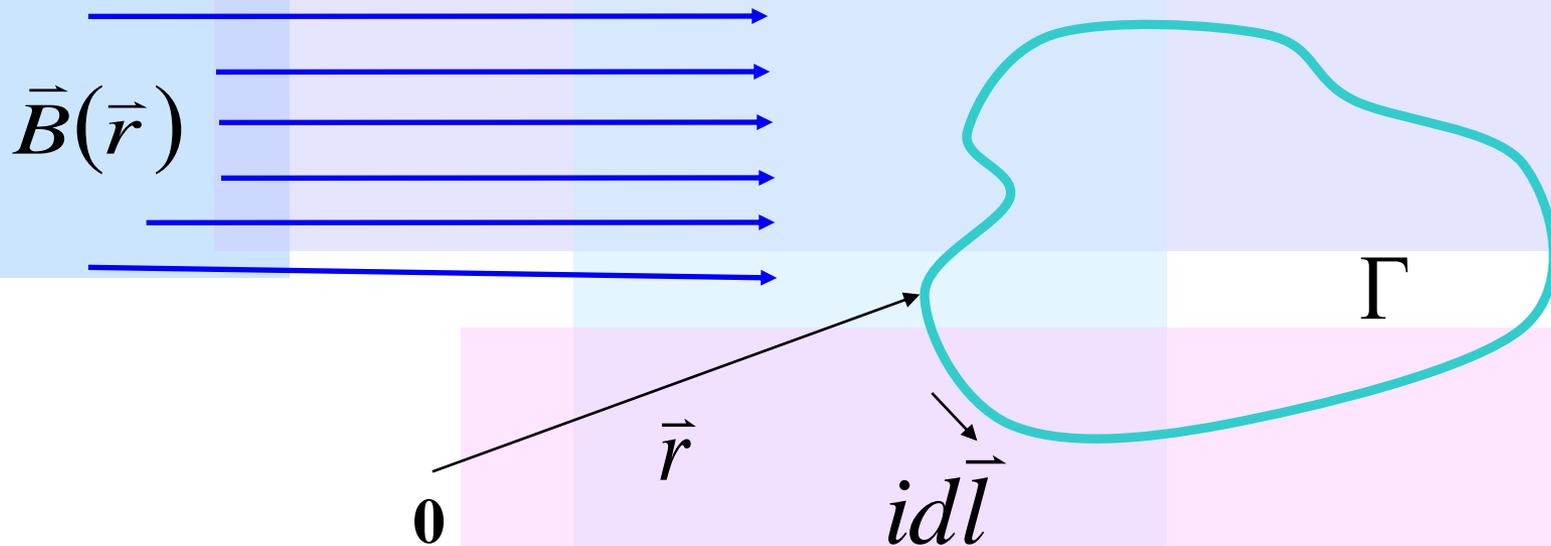


Ley de Biot y Savarat

Así, un circuito en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza dada por la ecuación

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$$

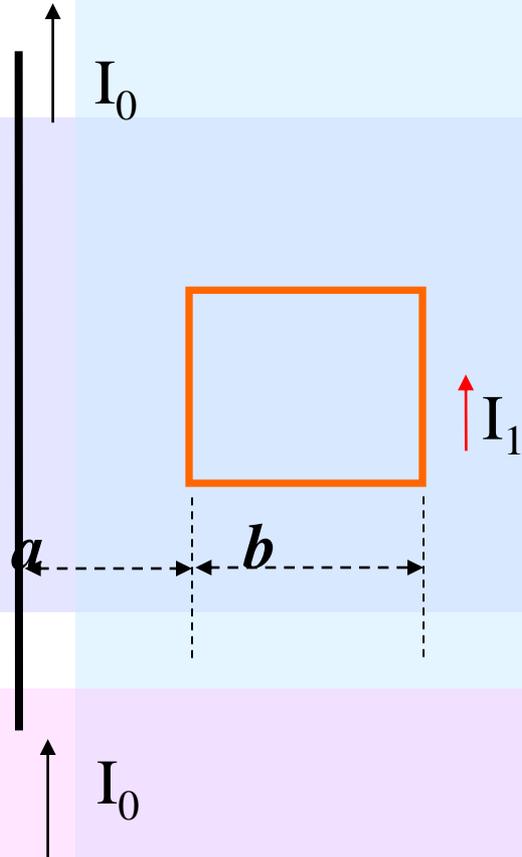
$$\therefore \vec{F} = \oint_{\Gamma} d\vec{F} = \oint_{\Gamma} Id\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$$





Ley de Biot y Savarat

Ejemplo

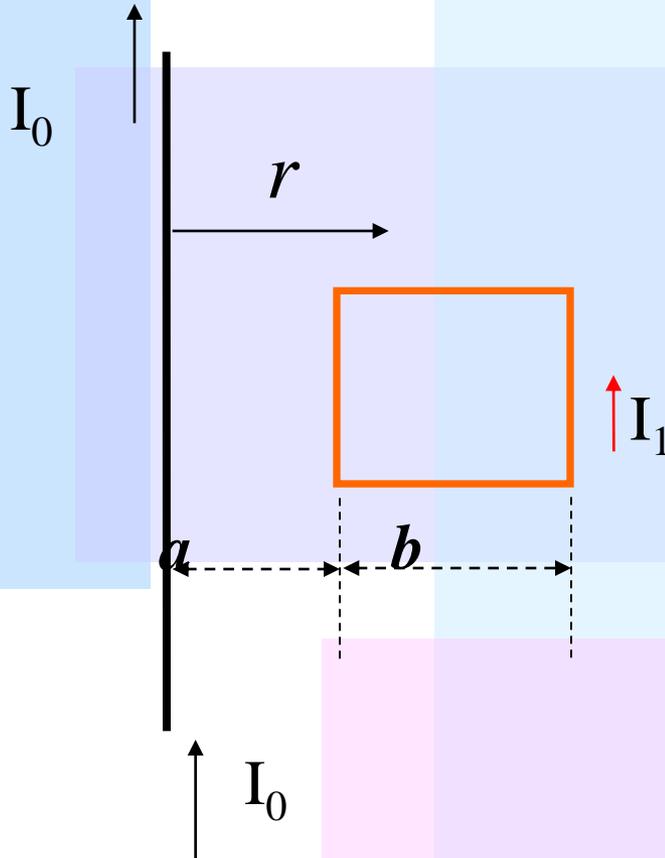


Calcular la fuerza sobre la espira cuadrada



Ley de Biot y Savarat

Ejemplo



Campo producido por el conductor infinito es

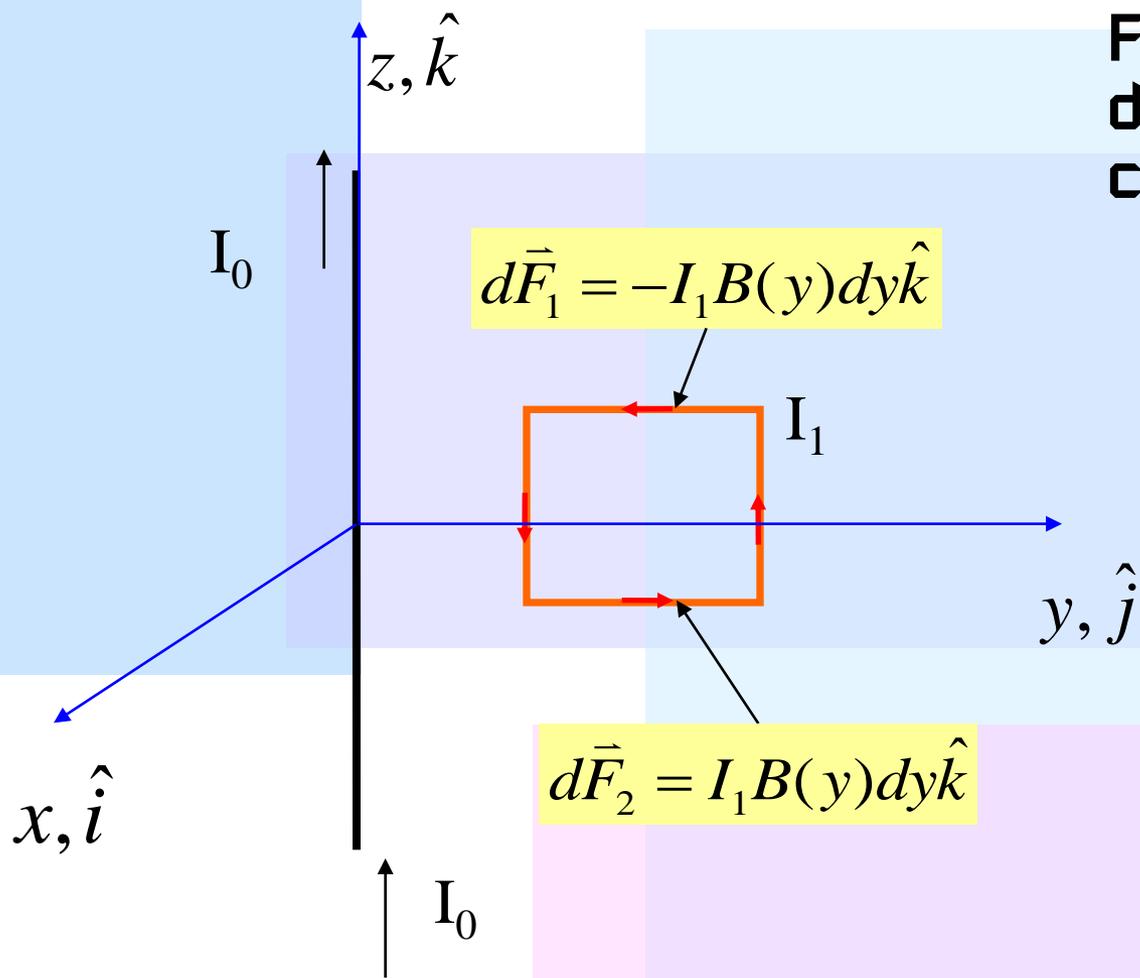
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \hat{\theta}$$

Fuerza sobre elemento de corriente de espira cuadrada

$$d\vec{F} = I_1 d\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$$



Ley de Biot y Savarat



$$d\vec{F}_1 = -I_1 B(y) dy \hat{k}$$

$$d\vec{F}_2 = I_1 B(y) dy \hat{k}$$

Fuerza sobre elemento de corriente de espira cuadrada

$$d\vec{F} = I_1 d\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = -B(y) \hat{i}$$

Claramente

$$d\vec{F}_1 = -d\vec{F}_2$$



Ley de Biot y Savarat

$d\vec{F} = I_1 d\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$
 $\vec{B}(\vec{r}) = -B(y)\hat{i}$

$d\vec{F}_3 = I_1 B(y = a) dz \hat{j}$

$d\vec{F}_4 = -I_1 B(y = a + b) dz \hat{j}$

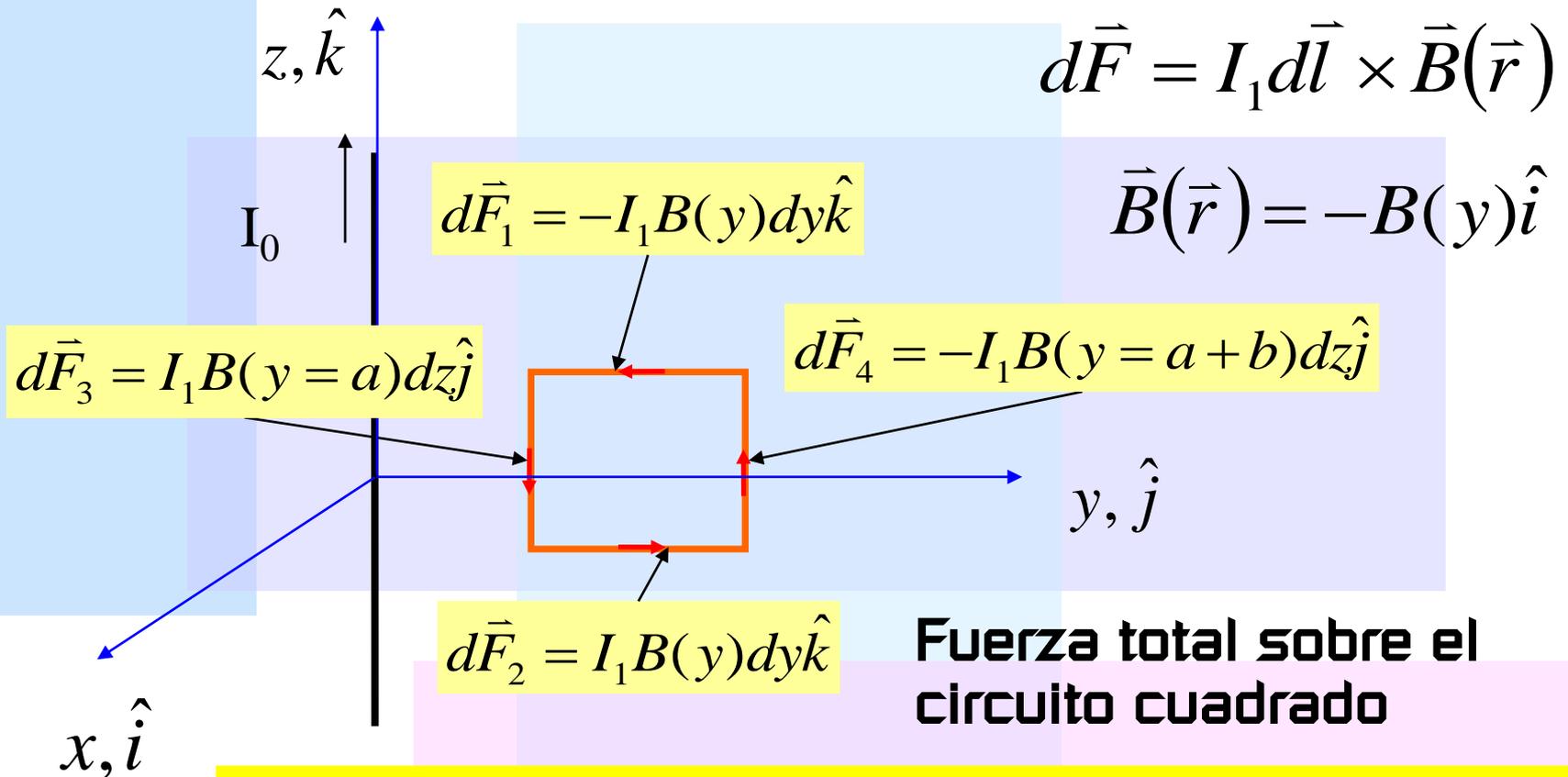
$d\vec{F}_3 = I_1 \frac{\mu_0 I_0}{2\pi a} dz \hat{j}$

$d\vec{F}_4 = -I_1 \frac{\mu_0 I_0}{2\pi a + b} dz \hat{j}$

Claramente



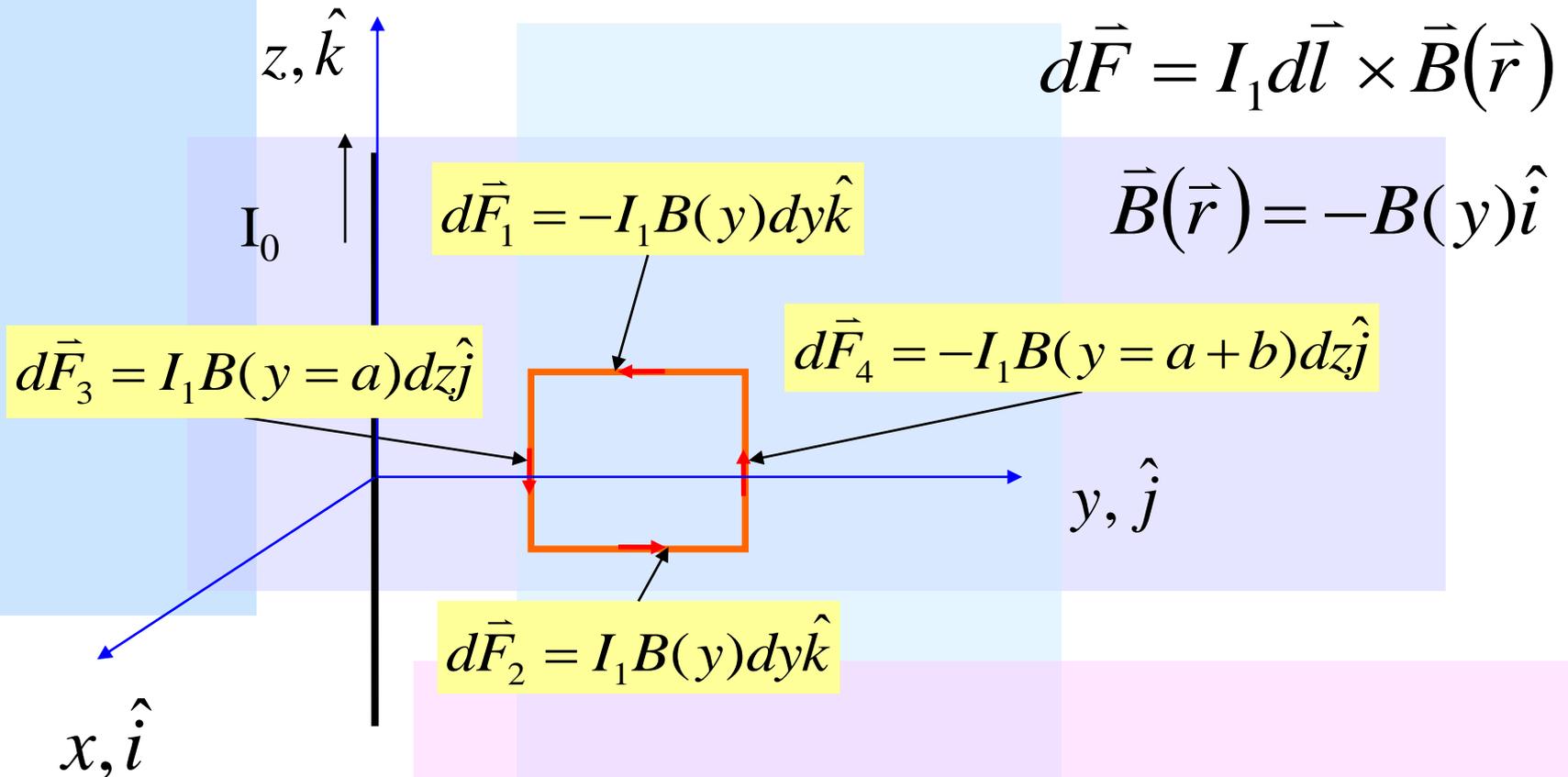
Ley de Biot y Savarat



$$\therefore \vec{F} = \oint_{\Gamma} d\vec{F} = \int_{y=a+b}^{y=a} d\vec{F}_1 + \int_{z=b/2}^{z=-b/2} d\vec{F}_3 + \int_{y=a}^{y=a+b} d\vec{F}_2 + \int_{z=-b/2}^{z=b/2} d\vec{F}_4$$



Ley de Biot y Savarat



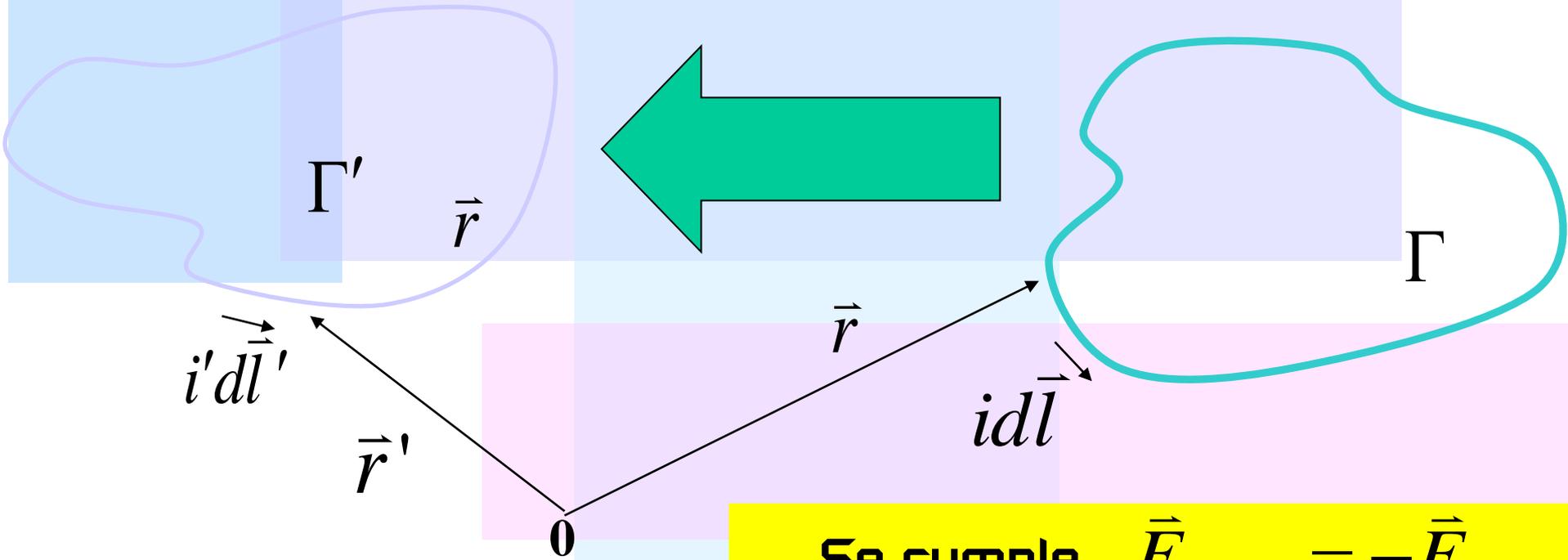
$$\vec{F} = \oint_{\Gamma} d\vec{F} = \int_{z=b/2}^{z=-b/2} \frac{\mu_0 I_1 I_0 \hat{j}}{2\pi a} dz - \int_{z=-b/2}^{z=b/2} \frac{\mu_0 I_1 I_0 \hat{j}}{2\pi(a+b)} dz = \frac{\mu_0 I_1 I_0 b^2}{2\pi(a+b)} \hat{j}$$



Ley de Biot y Savarat

Fuerza que ejerce circuito Γ sobre circuito Γ'

$$\vec{F}_{\Gamma \rightarrow \Gamma'} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{\Gamma' \Gamma} \frac{II' d\vec{l}' \times (d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}'))}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} = - \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{\Gamma \Gamma'} \frac{I'I d\vec{l} \times (d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}'))}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3}$$



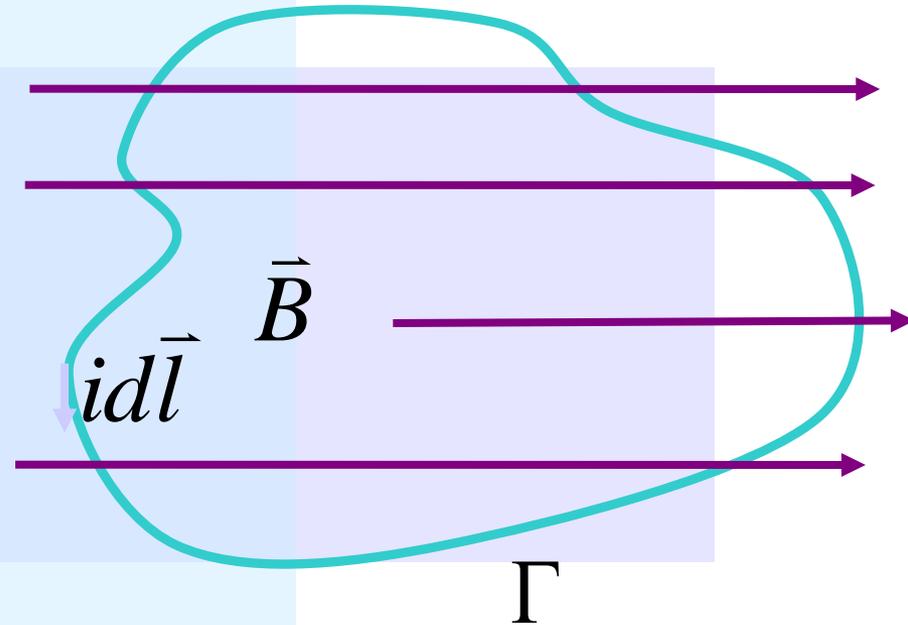
Se cumple $\vec{F}_{\Gamma' \rightarrow \Gamma} = -\vec{F}_{\Gamma \rightarrow \Gamma'}$

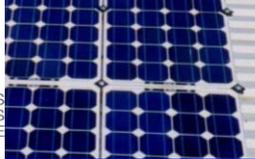


Torque Magnético

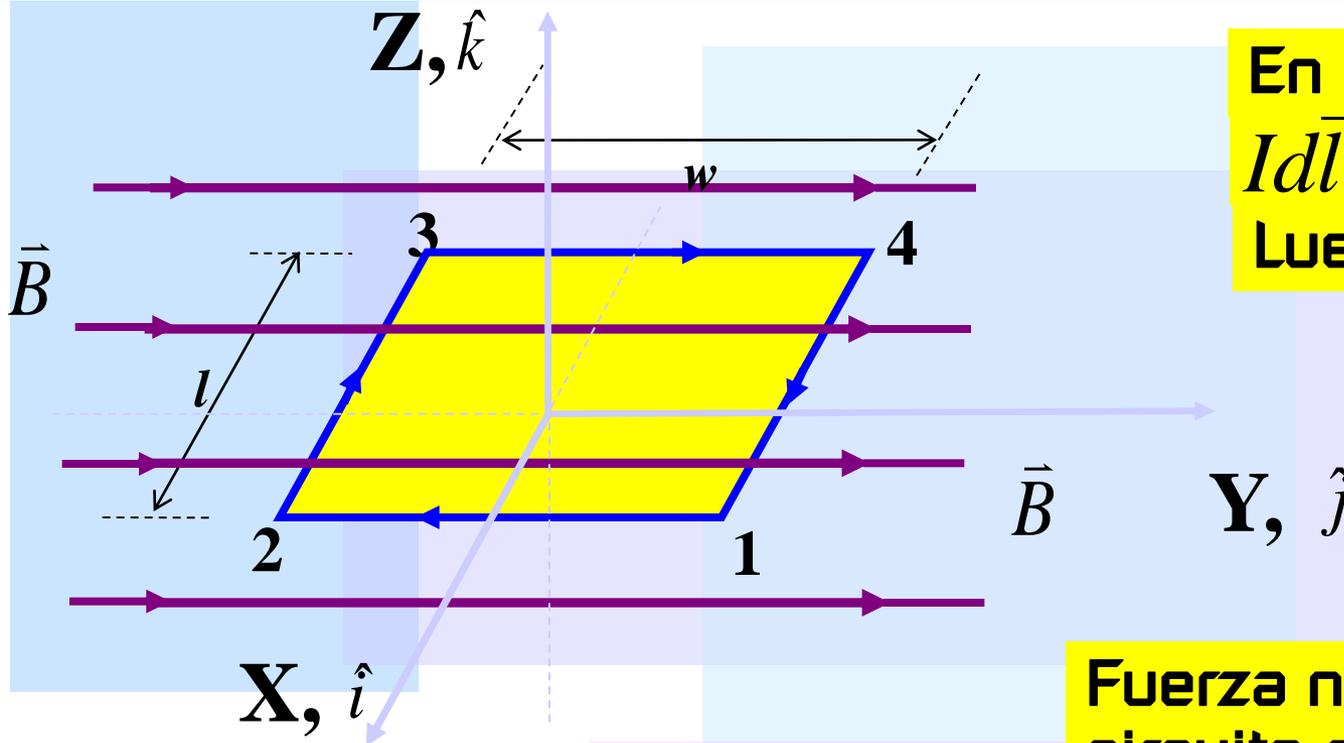
Ley de Biot y Savarat

$$\therefore d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$$





Torque Magnético



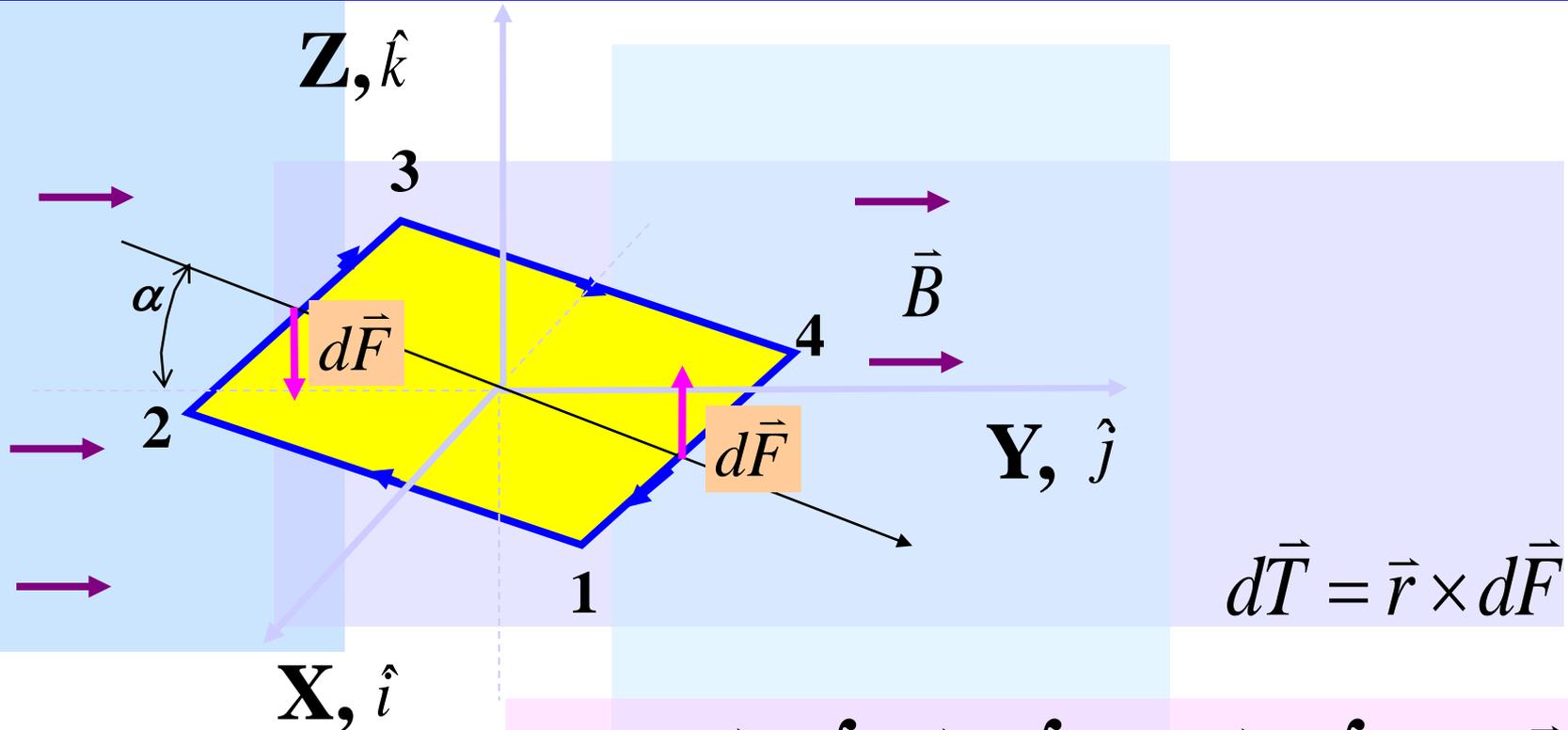
En lados 1-2 y 3-4
 $I d\vec{l}$ es paralelo a \vec{B}
 Luego $F=0$

Fuerza neta nula sobre el
 circuito si \vec{B} constante

$$\vec{F} = I \int_2^3 d\vec{l} \times \vec{B} + I \int_4^1 d\vec{l} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = I \int_2^3 dx(-\hat{i}) \times \vec{B} + I \int_4^1 dx(\hat{i}) \times \vec{B}$$



Torque Magnético

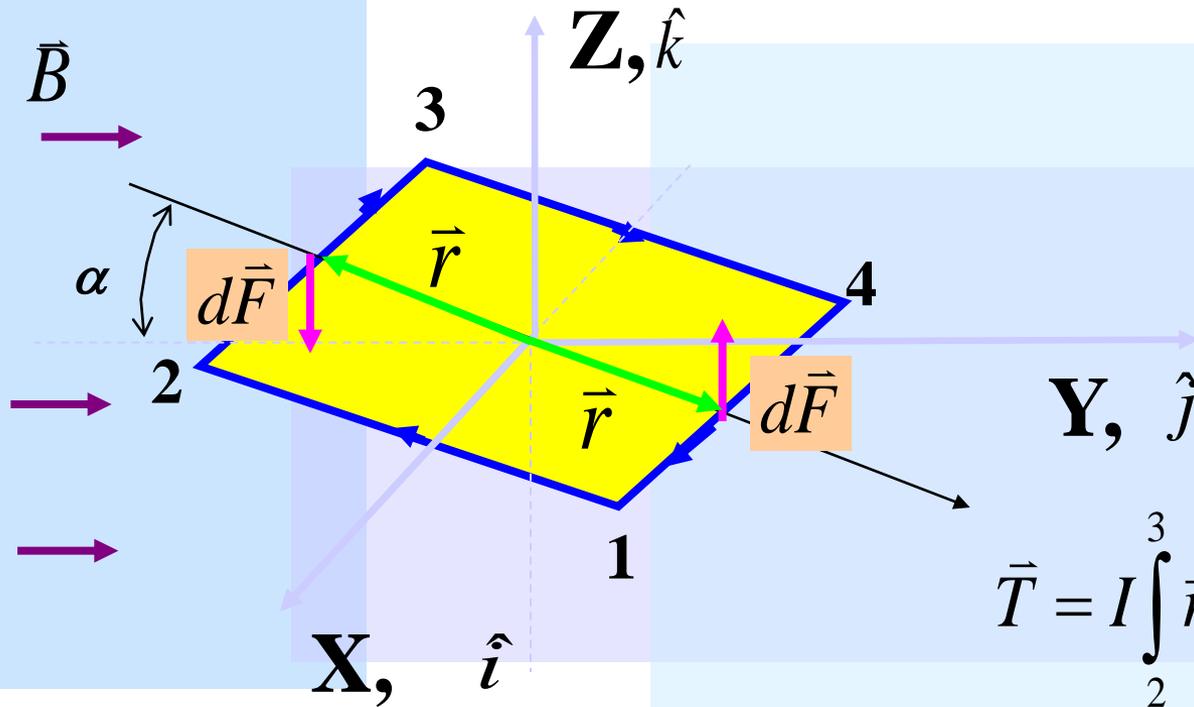


$$\vec{T} = \oint_c d\vec{T} = \oint_c \vec{r} \times d\vec{F} = \oint_c \vec{r} \times id\vec{l} \times \vec{B}$$

Torque neto no nulo sobre el circuito



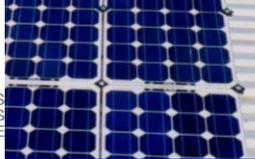
Torque Magnético



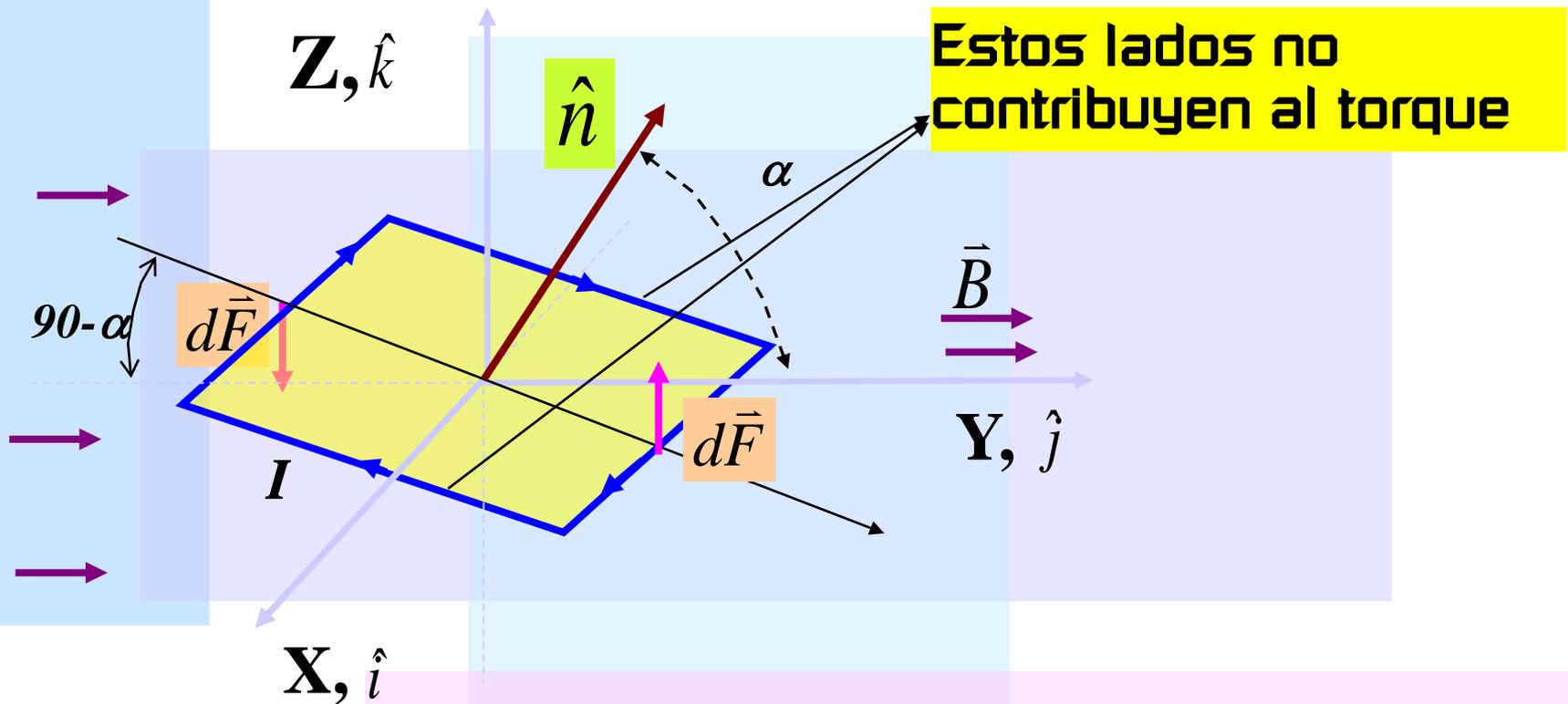
$$\vec{T} = I \int_2^3 \vec{r} \times dx \hat{i} \times \vec{B} + I \int_4^1 \vec{r} \times dx \hat{i} \times \vec{B}$$

$$\vec{T} = \frac{Blwl}{2} \cos \alpha \hat{i} + \frac{Blwl}{2} \cos \alpha \hat{i}$$

Torque neto sobre el circuito $\therefore \vec{T} = IBwl \cos \alpha \hat{i}$



Torque de campo sobre circuito rectangular



Estos lados no contribuyen al torque

Torque

$$\vec{T} = IBwl \cos \alpha \hat{i}$$

$$\vec{T} = I\phi \cos \alpha \hat{i}$$

Flujo

$$\phi = B \cdot A$$

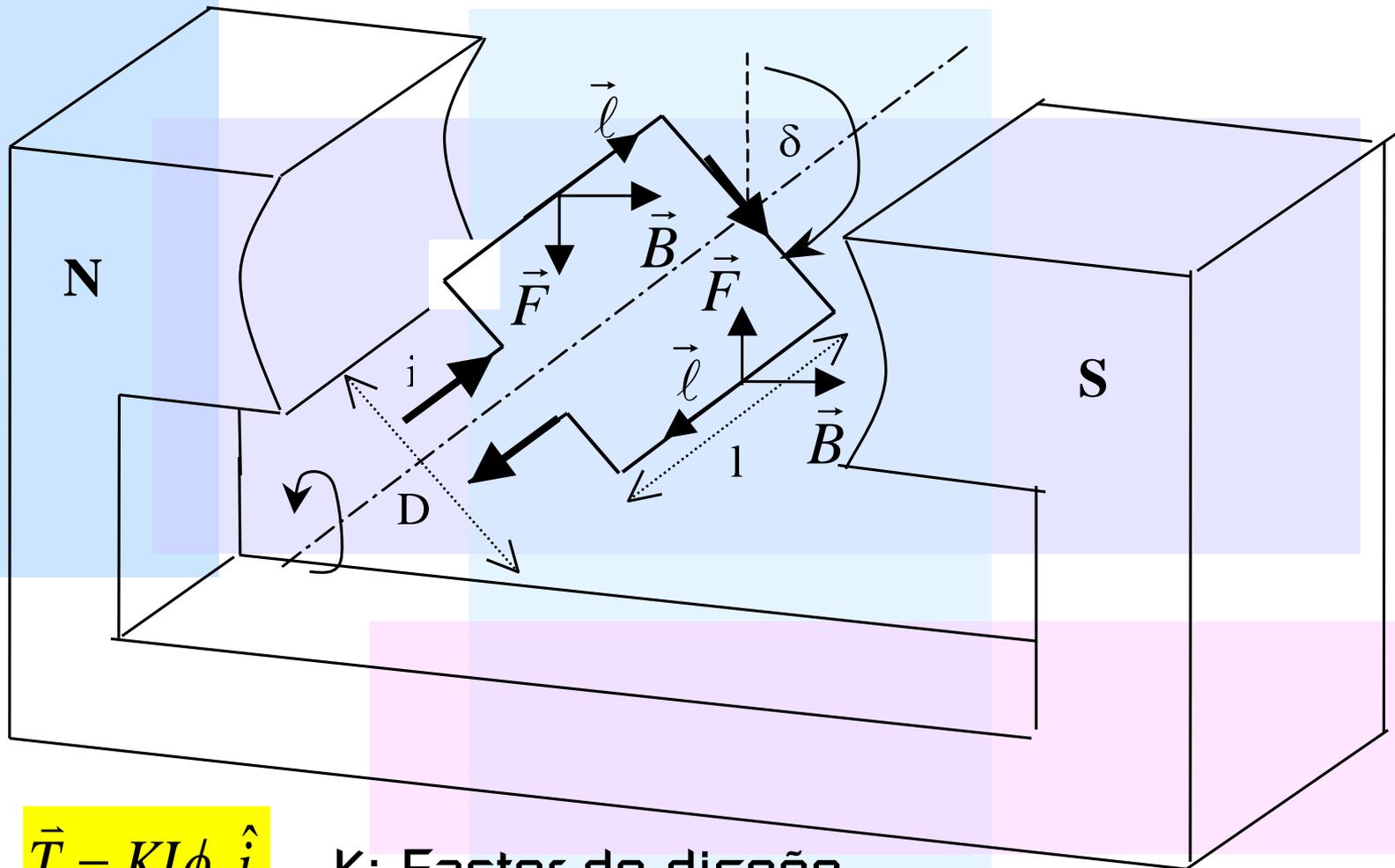


UNIDADES

	ϕ	\vec{B}
Sistema CGS	[líneas]	[líneas/cm ²]
Sistema mks	[Wb] (Weber)	[Wb/m ²] = [Tesla]
Equivalencias	1 [Wb] = 10 ⁸ [líneas]	1 [Tesla] = 10 ⁴ [Gauss] = 10 [kGauss]



Motor elemental

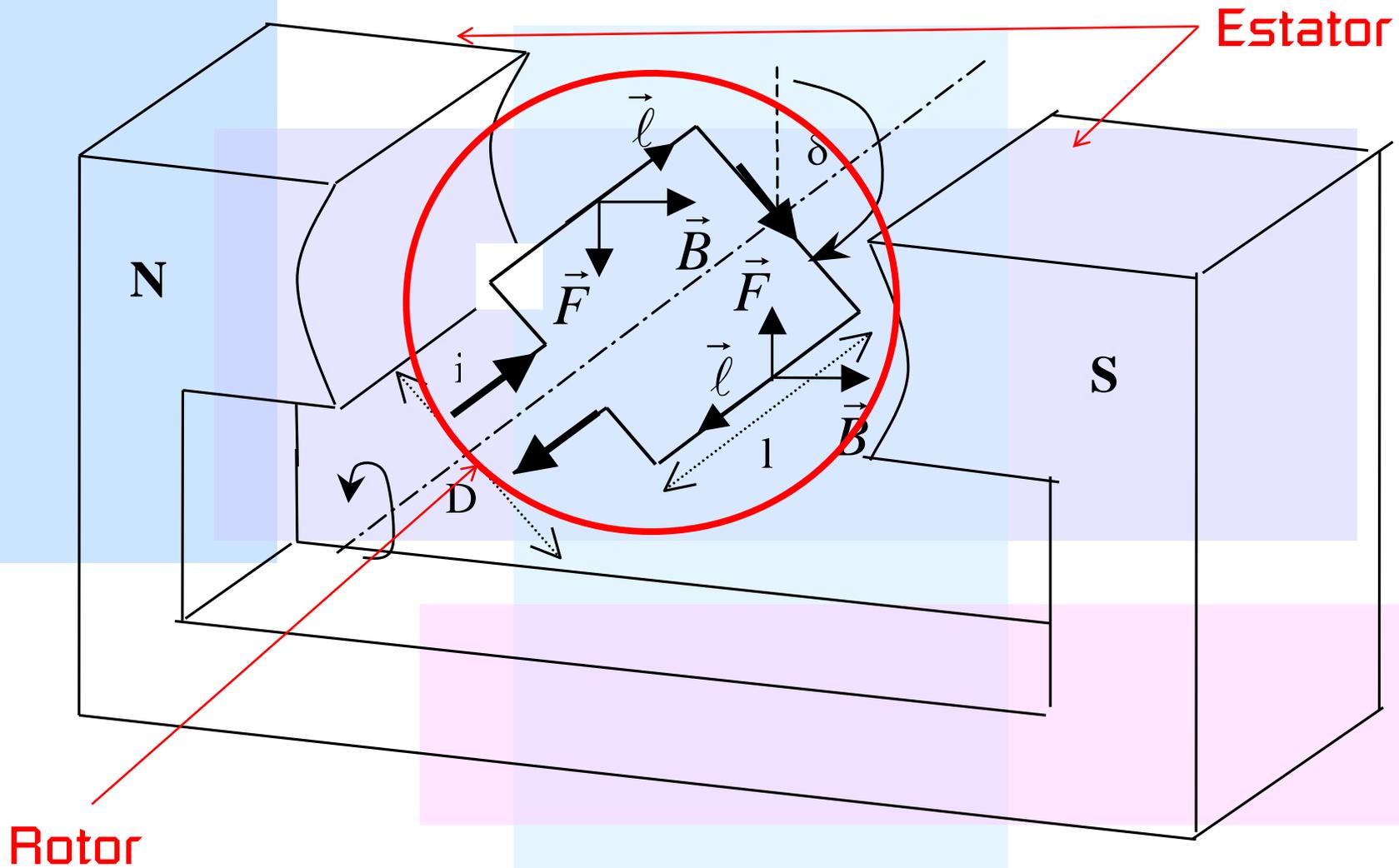


$$\vec{T} = KI\phi \hat{i}$$

K: Factor de diseño

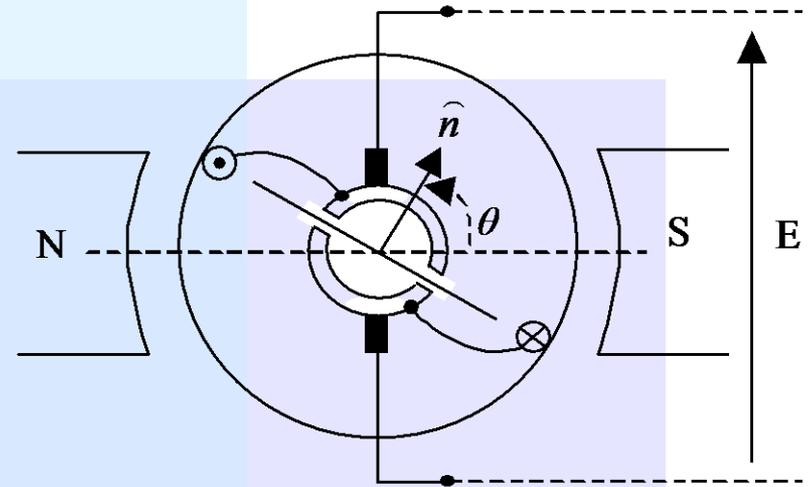
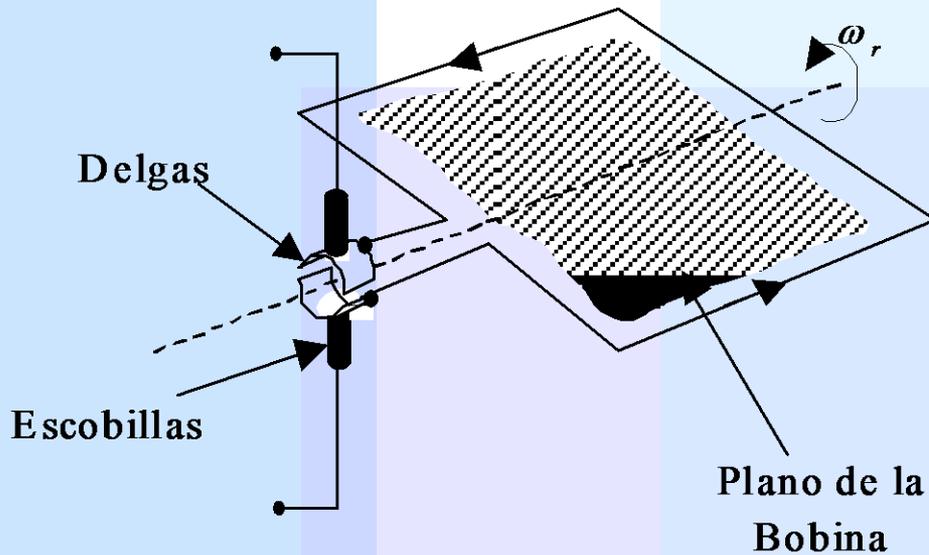


Motor elemental





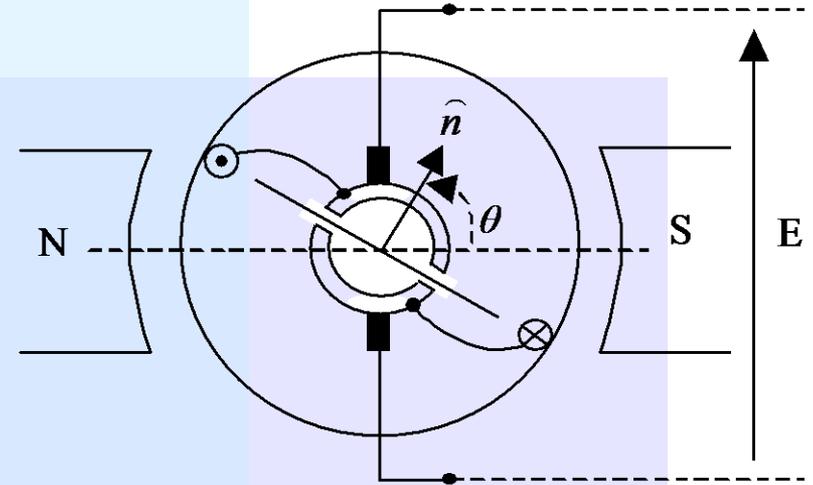
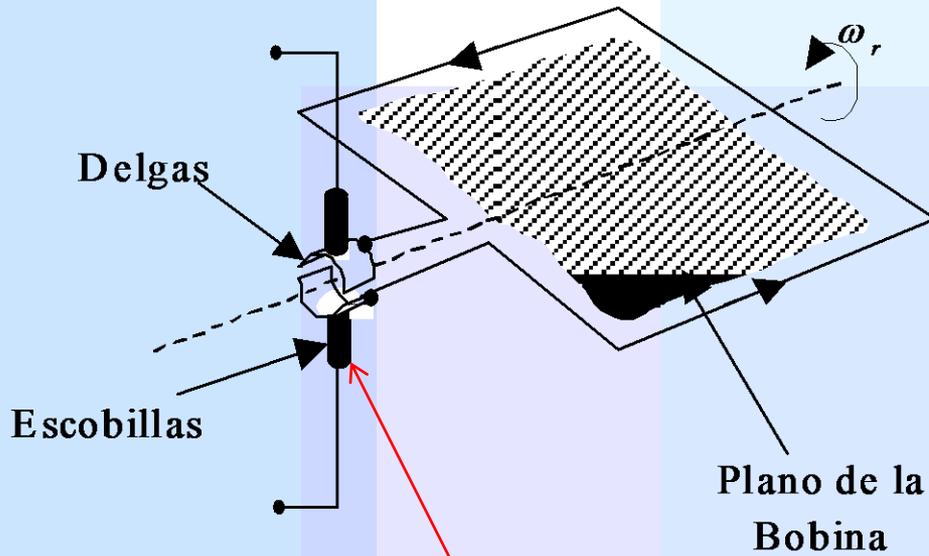
Motor elemental



$$\vec{T} = KI\phi \hat{i}$$



Motor elemental

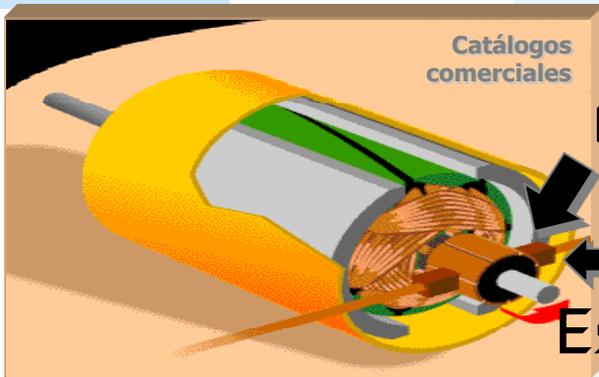




Motores



Motor de CC de 6000 kW fabricado por ABB



Colector

Escobillas

Colector real

