Cap 9: Indução magnética

9.1 – Lei de Faraday da indução

9.2 – Lei de Lenz

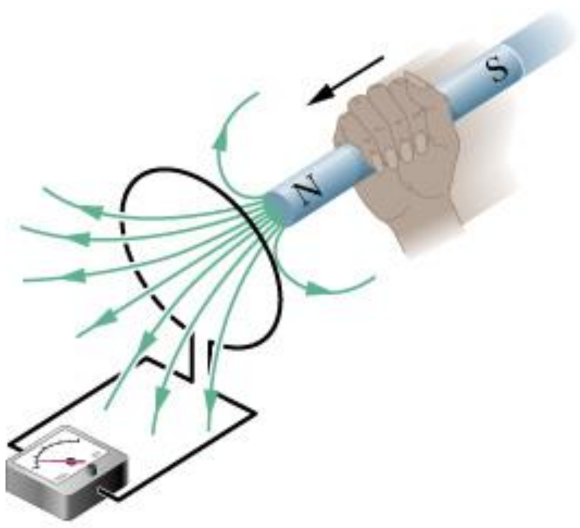
9.3 - A f.e.m de indução num conductor em movimento

9.4- Exemplos

9.1 – Lei de Faraday da indução

As experiências de Faraday

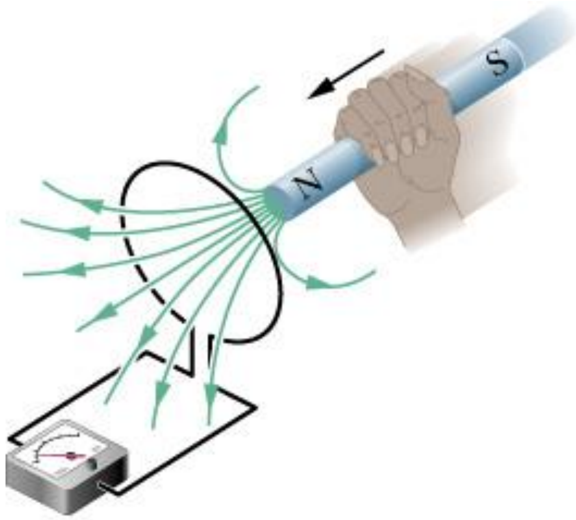
A- Michael Faraday (Inglaterra) e Joseph Henri (USA) conseguiram gerar correntes elétricas **<u>sem o uso de baterias</u>**.



Material:
Um íman **(campo magnético**)
Uma espira ligada a um galvanómetro (lê correntes)

Experiência:
Movimento relativo entre o íman e a espira

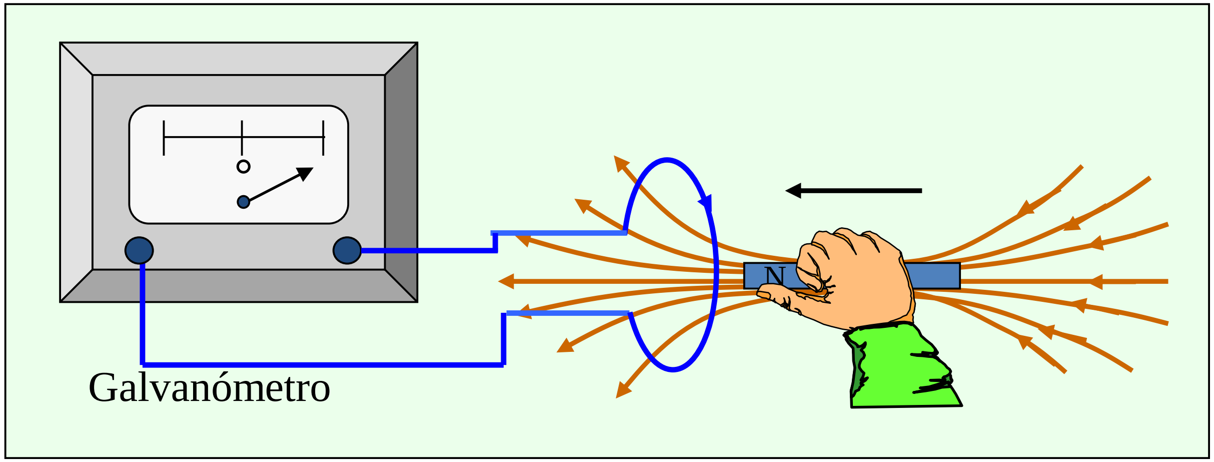
Experiência:
Movimento relativo entre o íman e a espira



Observação:
i) Aparecimento de uma corrente enquanto existe movimento relativo do íman e espira.
ii) Inversão no sentido do movimento inverte sentido da corrente
iii) Movimentos mais rápidos originam maiores correntes

Esta corrente denomina-se **CORRENTE INDUZIDA** e a **força eletromotriz (f.e.m)** que aparece denomina-se **f.e.m INDUZIDA.**

Este efeito denomina-se INDUÇÃO



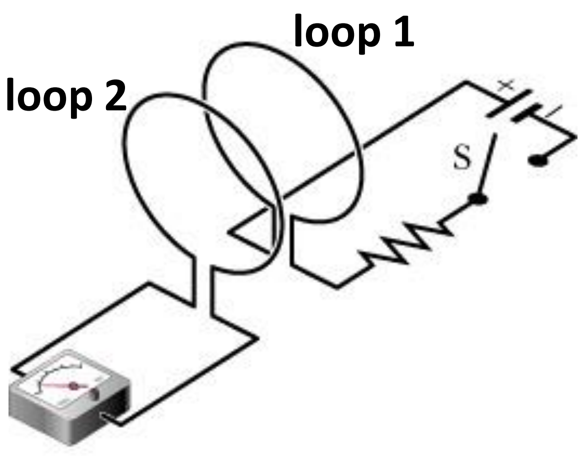
As observações desta experiencia:

- Se o imã for afastado (B diminui em intensidade) ou aproximado (B aumenta em intensidade) da espira, a agulha do galvanómetro desvia-se
- Se o imã ficar estacionário em relação à espira, não há deflexão da agulha (ou seja não há corrente).

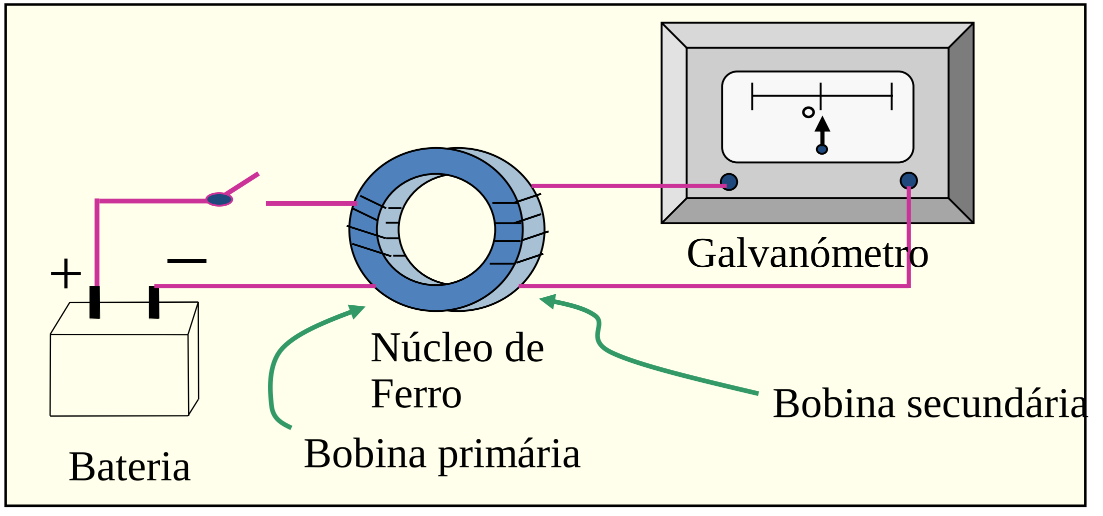
uma corrente pode ser gerada por um campo magnético variável.

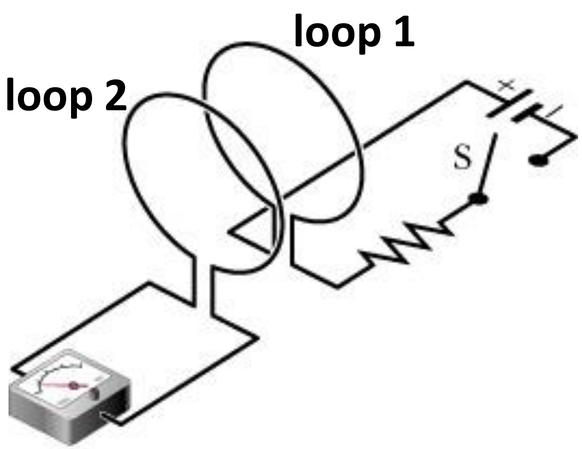
B- Dois circuitos, um na vizinhança do outro

Se a corrente na espira 1 for constante (S sempre fechado), não aparece corrente (induzida) na espira 2



Só existe corrente induzida na espira 2 **quando se liga ou desliga o interruptor** (quando S é aberto ou fechado).





Com esta 2da experiência conclui-se que o campo magnético numa experiência de indução pode ser gerado por

- um íman (experiência A)

ou

- uma corrente (experiência B)

Experiência 1: uma corrente pode ser gerada por um campo magnético variável.

Exp A+ Exp B

Lei de Faraday da indução

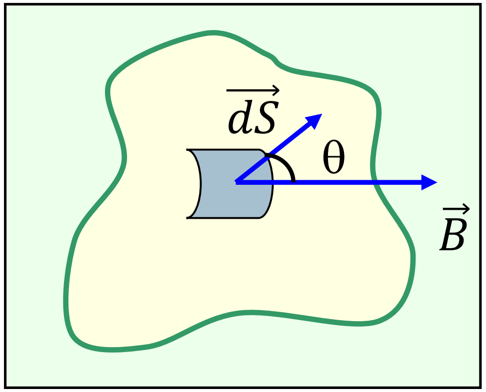
Uma **f.e.m é induzida** num circuito quando o **número de linhas de campo** magnético que passam nesse circuito varia (no tempo).

Há uma **f.e.m. induzida** num circuito quando o **fluxo magnético** (ϕ_m) através de um circuito variar no tempo.

A **f.e.m. induzida** num circuito é diretamente proporcional à taxa temporal de variação do **fluxo magnético** (ϕ_m) através do circuito.

$$|\varepsilon| = \frac{d\emptyset_m}{dt}$$ Lei de Faraday da indução

Fluxo Magnético



- Consideremos um elemento de área dS (ou dA) de uma superfície arbitrária
- Seja $\vec{B}$ o vetor campo magnético nesse elemento de área.
- O fluxo é através desse elemento é: dado por $\vec{B} \,.\, \overrightarrow{dS}$ onde $\overrightarrow{dS}$ é $\hat{n}$ dS

Assim, de forma equivalente ao fluxo do vetor campo elétrico, o fluxo magnético através de toda a superfície é dado por:

$$\phi_m = \int \overrightarrow{B}.\overrightarrow{ds} = \int \left|\vec{B}\right|\left|\overrightarrow{ds}\right| \cos(\widehat{\vec{B}, \overrightarrow{ds}})$$

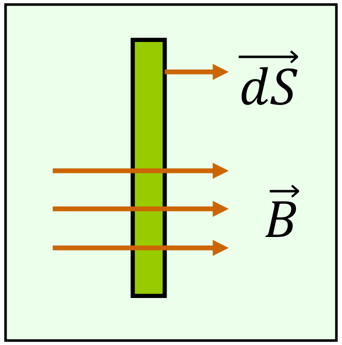
onde o integral é sobre toda a área do circuito.

Ângulo que o vetor campo magnético faz com a normal à superfície

Ângulo que o vetor campo magnético faz com a normal à superfície: θ

- $\theta = 90°$, $\phi_m = 0$

- $\theta = 0°$, $\phi_m = BA$ (valor máximo)



SI $\rightarrow$ [B] : Wb/m^2 ou T

$\Rightarrow$ [ϕ]: weber (Wb)

$1\ Wb = 1\ T.\ m^2$

Lei de Faraday da indução

A **f.e.m. induzida** (módulo) num circuito é:

$$|\varepsilon| = \frac{d\emptyset_m}{dt}$$

Se o circuito for uma bobina, constituída por N espiras com a mesma área, e se o fluxo atravessa igualmente todas as espiras:

$$|\varepsilon| = N\,\frac{d\emptyset_m}{dt}$$

Se circuito fechado então existirá uma **corrente induzida** **(Lei de Ohm)**:

$$I_{\text{induzida}} = \frac{|\varepsilon|}{R}$$

Quais as condições??? / Quando é que existe indução??????:

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt}$$

$|\varepsilon| \neq 0$ sse ϕ_m variar no tempo

$$\phi_m = \underbrace{\int \vec{B}.\overrightarrow{ds} = \int |\vec{B}|\left|\overrightarrow{ds}\right| \cos(\widehat{\vec{B},\overrightarrow{ds}})}$$

- $|\vec{B}|$ *variar no tempo*
- $|\overrightarrow{ds}|$ *variar no tempo*
- $\cos(\vec{B},\overrightarrow{ds})$ *variar no tempo*
- qualquer combinação destas situações

Lei de Faraday da indução

Se ϕ_m(t)
- $|\vec{B}|$ $variar\ no\ tempo$
- $|\overrightarrow{ds}|$ $variar\ no\ tempo$
- $\cos(\vec{B}, \overrightarrow{ds})$ $variar\ no\ tempo$
- qualquer combinação destas situações

$\Downarrow$

Existe **f.e.m. induzida** $|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt} \neq 0$

$\Downarrow$

Se o circuito for fechado existirá uma **corrente induzida** $I_{induzida} = \frac{|\varepsilon|}{R}$

$\Downarrow$

QUALQUER CORRENTE CRIA NA SUA VIZINHANÇA UM CAMPO MAGNÉTICO, logo existirá um $\overrightarrow{B_{indz.}}$

Lei de Faraday da indução

$\boldsymbol{Se\ |\vec{B}|, \text{área}, ou \ldots\ variar\ no\ tempo}$

$\boldsymbol{ou\ seja, se\ o\ \text{n}\text{ú}mero\ liquido\ de\ linhas\ de\ campo\ magn\text{é}tico}$
$\boldsymbol{que\ passam\ uma\ determinada\ superficie\ variar\ no\ tempo,}$

$ou\ seja\ se\ \phi_m(\mathrm{t})$

$$|\varepsilon| = \frac{d\emptyset_m}{dt} \neq 0$$

$$I_{\text{induzida}} = \frac{|\varepsilon|}{R}$$

$$\overrightarrow{\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{indz.}}}$$

9.2 Lei de Lenz

$$|\varepsilon| = \frac{d\emptyset_m}{dt}$$

Lei de Lenz ⟹

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

A Lei de Lenz traduz-se no sinal "– "na equação da f.e.m induzida, ou seja, na Lei de Faraday

⇓

Significa que a corrente (f.e.m., campo) induzida deve ter um **sentido** tal que o fluxo que ela gera se oponha ao que lhe deu origem (ou seja se oponha à variação do fluxo externo)

⇐

A *I* induzida tende a manter o fluxo original através do circuito.

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

A direção tanto da **fem induzida** como da **corrente induzida**, podem ser determinadas pela Lei de Lenz: **a polaridade da fem induzida é tal que ela tende a provocar uma corrente que irá gerar um fluxo magnético que se opõe à variação do fluxo magnético através do circuito fechado** $\rightarrow$ é uma consequência da Lei de conservação da energia.

$I_{\text{induzida}} \neq 0$ sse $|\varepsilon| \neq 0$

$|\varepsilon| \neq 0$ sse $\phi_m(t)$

$$\phi_m(t) \begin{cases} \bullet\ \left|\vec{B}\right| \textit{ variar no tempo} \\ \bullet\ \left|\overrightarrow{ds}\right| \textit{ variar no tempo} \\ \bullet\ \cos(\vec{B}, \overrightarrow{ds}) \textit{ variar no tempo} \\ \bullet\ \text{qualquer combinação destas situações} \end{cases}$$

$$\boldsymbol{\phi_m(t)} \begin{cases} \bullet\ \textbf{Aumenta} \text{ no tempo} \\ \\ \bullet\ \textbf{Diminui} \text{ no tempo} \end{cases}$$

Lei de Lenz

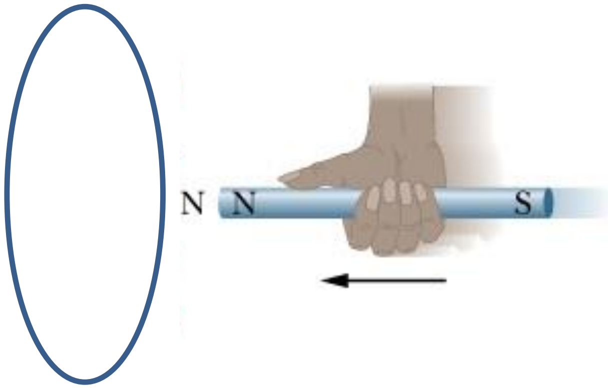
$\phi_m(\text{t})$

- Aumenta no tempo → O sentido da I_{induz} vai ser tal que contrarie este aumento
- Diminui no tempo → O sentido da I_{induz} vai ser tal que contrarie esta diminuição

↓

Exemplos

Exemplo 1

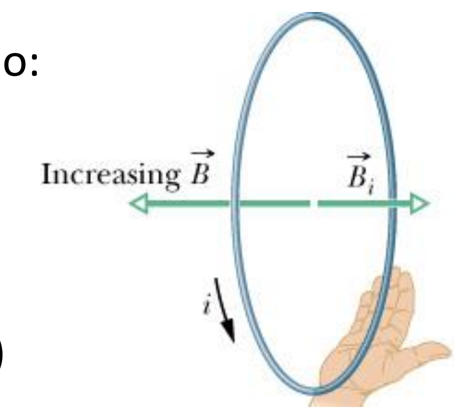


Neste exemplo, o íman aproxima-se da espira, ou seja:
o fluxo aumenta com o tempo;
ou seja, o número de linhas de B que atravessa
a espira (da direita para a esquerda) aumenta.

Logo, de acordo com a **lei de Lenz** o sentido de I_{induz} *(f.e.m.)* é tal que contrarie este aumento.

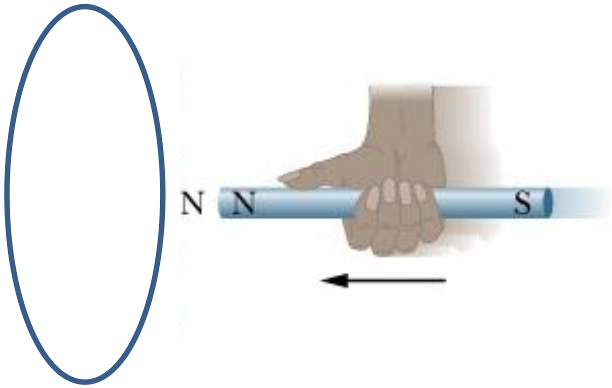
OU seja*,* I_{induz} tem que originar um campo $B_{induzido}$ com sentido da esquerda para a direita.

O sentido da corrente é então:



Lei de Biot-Savart(RMD)

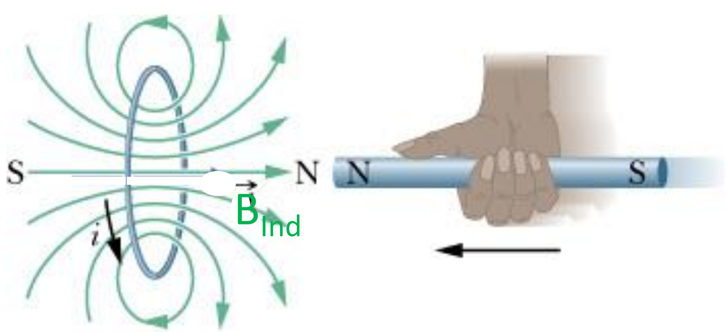
Exemplo 1 (campo B a variar no tempo)



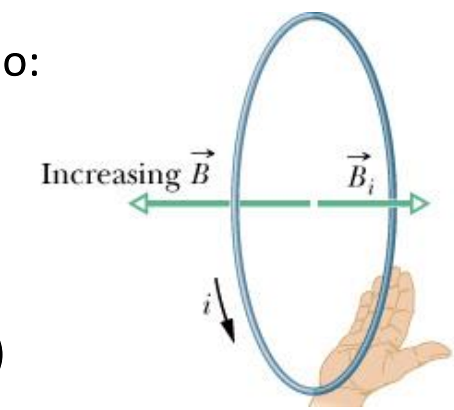
Neste exemplo, o íman aproxima-se da espira, ou seja:
o fluxo aumenta com o tempo;
ou seja, o número de linhas de B que atravessa
a espira (da direita para a esquerda aumenta).

Logo, de acordo com a lei de Lenz o sentido de I_{induz} *(f.e.m.)* é tal que contrarie este aumento.

OU seja, I_{induz} tem que originar um campo B_{induzido} com sentido da esquerda para a direita.

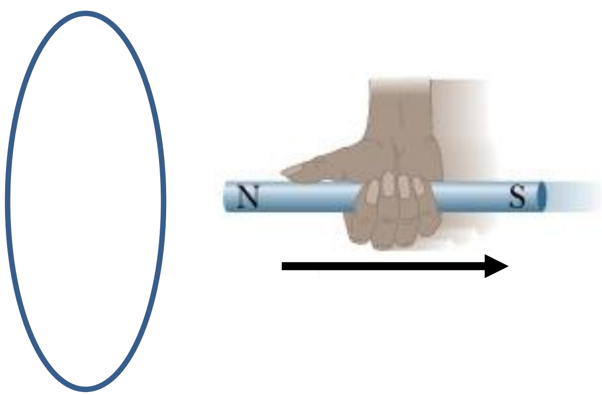


O sentido da corrente é então:



Lei de Biot-Savart(RMD)

Exemplo 2 (campo B a variar no tempo)



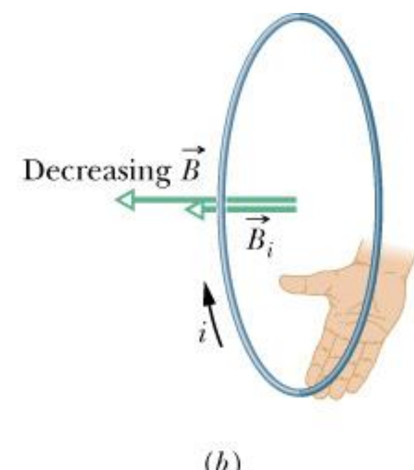
Neste exemplo, o íman afasta-se da espira, ou seja: o fluxo diminui com o tempo;
ou seja, o número de linhas de B que atravessa a espira (da direita para a esquerda) diminui.

Logo, de acordo com a lei de Lenz o sentido de I_{induz} *(f.e.m.)* é tal que contrarie esta diminuição.

OU seja, I_{induz} tem que originar um campo $B_{induzido}$ com sentido da direita para a esquerda.

O sentido da corrente é então:

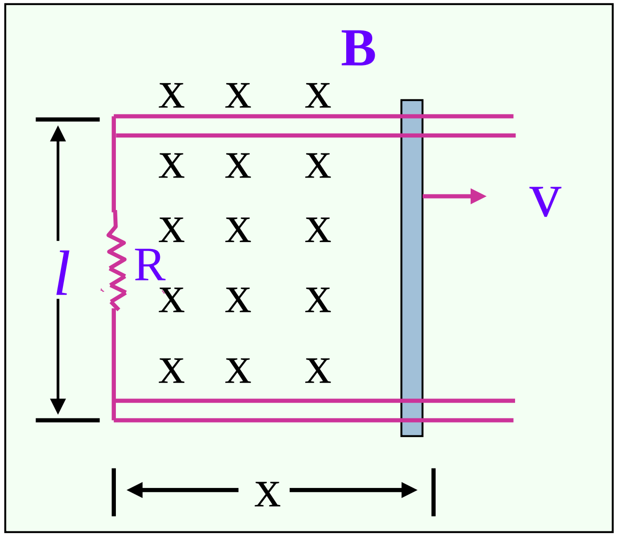
Lei de Biot-Savart (RMD)



9.3 A f.e.m. de indução num condutor em movimento

Consideremos o circuito: trilhos condutores paralelos fixos, a resistência R e a barra móvel de comprimento l;

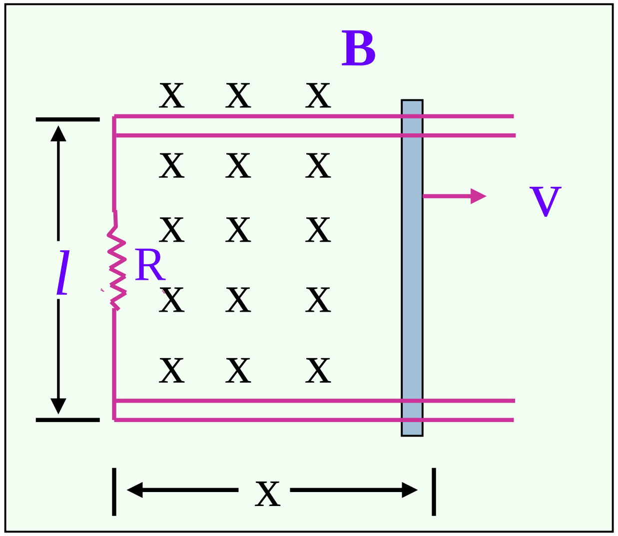
Consideremos que a barra móvel escorrega sobre os dois trilhos numa região de campo uniforme, $\vec{B}$, com velocidade constante, $\vec{v}$.



$$\varepsilon = - \frac{d\emptyset_m}{dt} \neq 0 \text{ sse } \begin{cases} B(t) \\ A(t) \\ \text{ângulo}(\vec{B}, \overrightarrow{ds})\ (t) \\ \text{qq combinação} \end{cases}$$

Quando a barra se desloca para a direita...

A área do circuito aumenta, logo $\emptyset_m(t)$



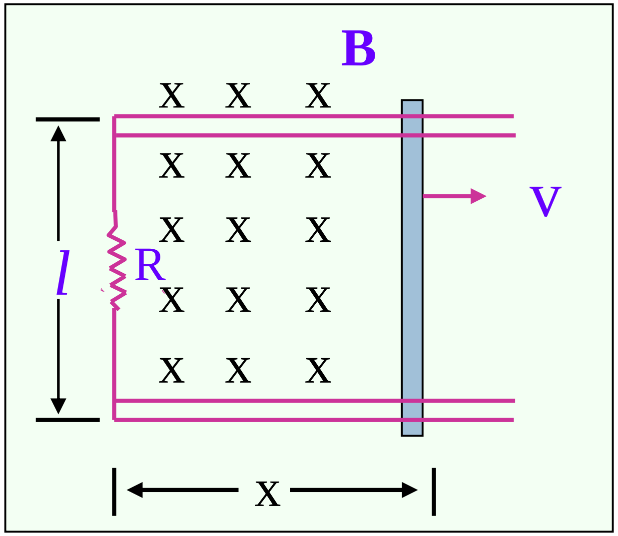
$$\varepsilon = -\frac{d\emptyset_m}{dt}$$

$$\phi_m = \int \vec{B}.\vec{ds} = \int \left|\vec{B}\right|\left|\vec{ds}\right| \cos(\widehat{\vec{B},\vec{ds}}) = \int \left|\vec{B}\right|\left|\vec{ds}\right| \cos(0^o) = \int \left|\vec{B}\right|\left|\vec{ds}\right| = B\ A$$

(180^O)

$$|\varepsilon| = \frac{d\emptyset_m}{dt} = \frac{d\ (BA)}{dt} = B\frac{d\ (A)}{dt} = B\frac{d(l\ x)}{dt}$$

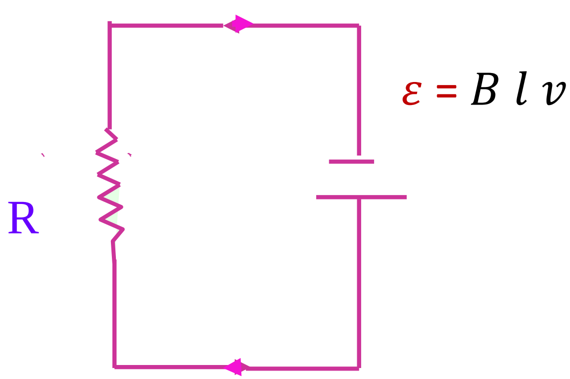
$$= Bl\frac{dx}{dt} = B\ l\ v$$

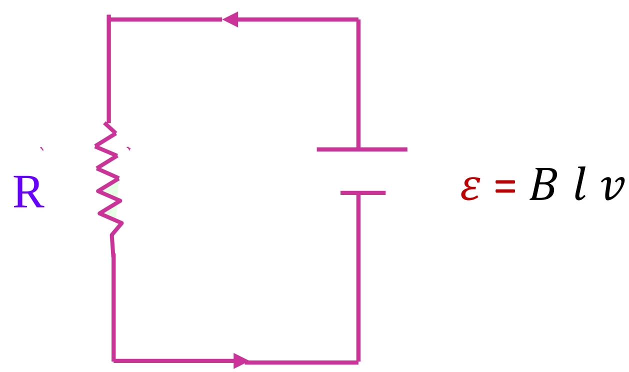


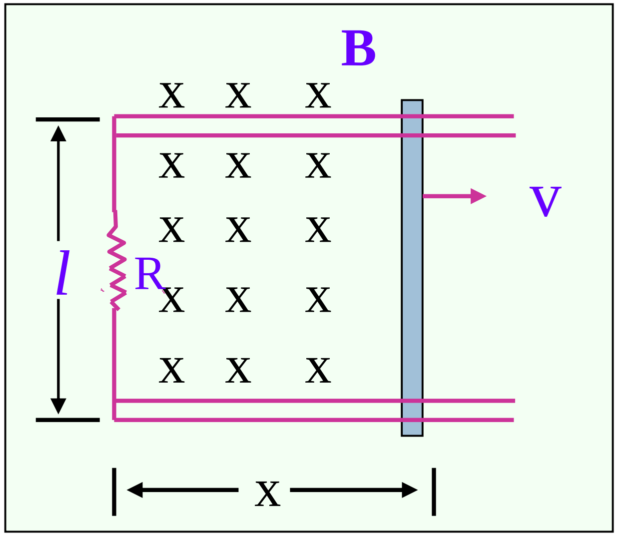
$$|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt} = \underbrace{B\ l\ v}$$

Módulo de B e da velocidade da barra

Circuito equivalente



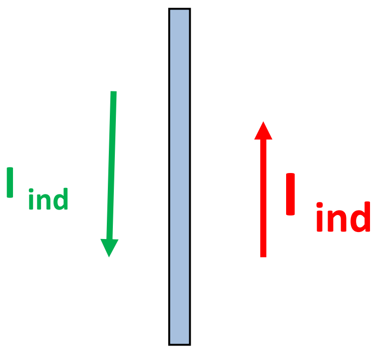




$$|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt} = B\,l\,v$$

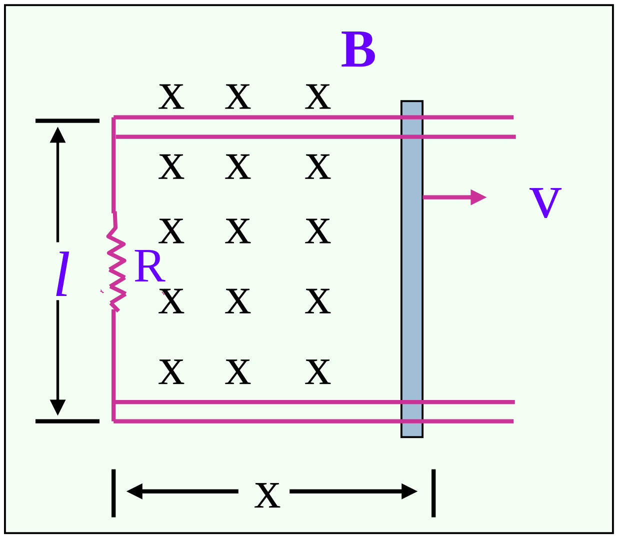
$$I_{induzida} = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\,l\,v}{R}$$

???? Qual o sentido de $I_{induzida}$????



Lei de Lenz

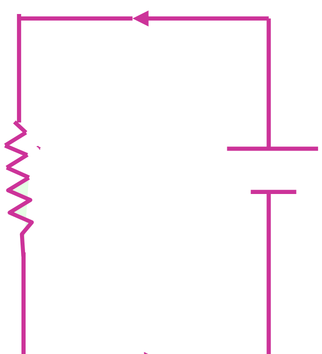
$I_{induzida}$ ⟹ $\overrightarrow{B_{indz.}}$ O sentido de B_{ind} tem que contrariar o que lhe deu origem



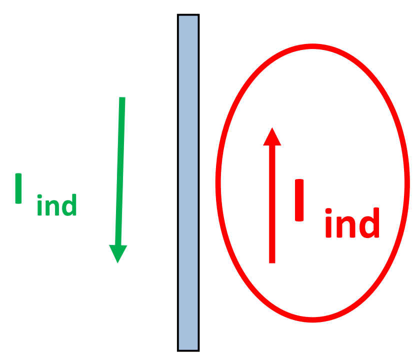
Quando a barra se desloca para a direita…

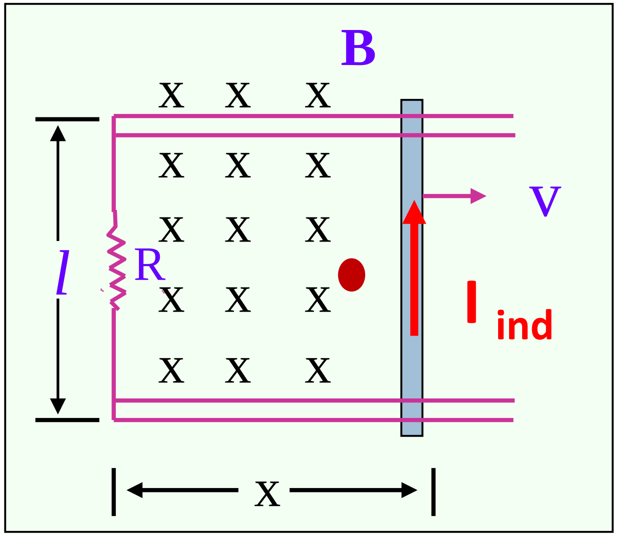
A área do circuito aumenta, logo o $\emptyset_m$ ***aumenta***

$\overrightarrow{B_{indz.}}$ ● dentro do circuito

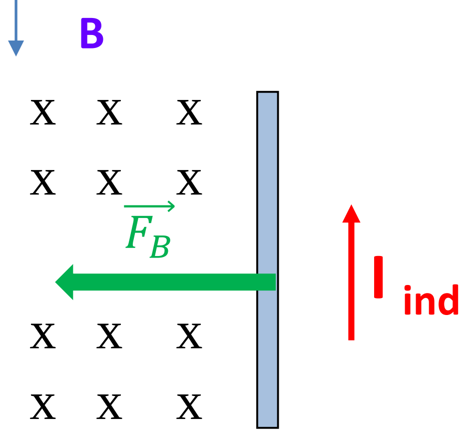


$\varepsilon = B\ l\ v$





$\overrightarrow{B_{indz.}}$

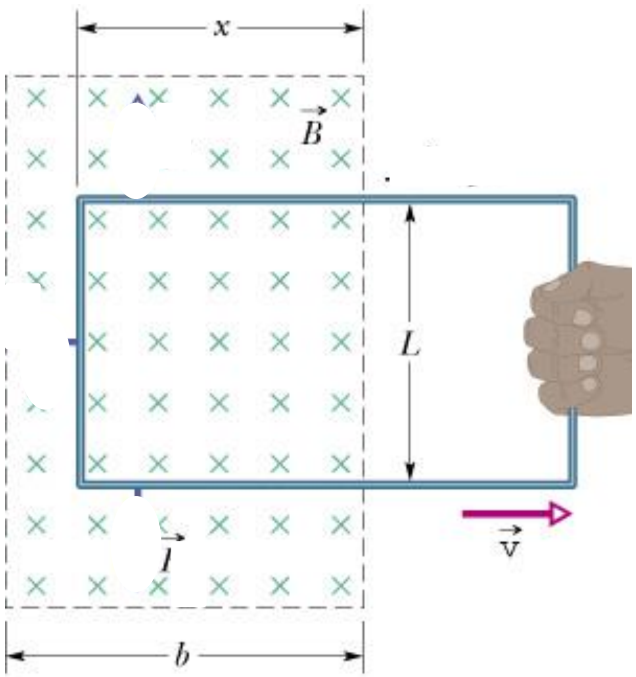


Existe então uma corrente I_{ind} no circuito. O circuito está numa região onde existe um campo magnético **B** (que originou esta I_{ind})……

$$\overrightarrow{F_B} = I_{ind}\vec{l}X\vec{B}$$

….exemplo de Indução por variar a àrea

O que acontecerá na situação da figura??????



Circuito está fechado, logo haverá I $_{induzida}$

$$I_{induzida} = \frac{|\varepsilon|}{R}$$

sse $|\varepsilon| \neq 0$

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt}$$

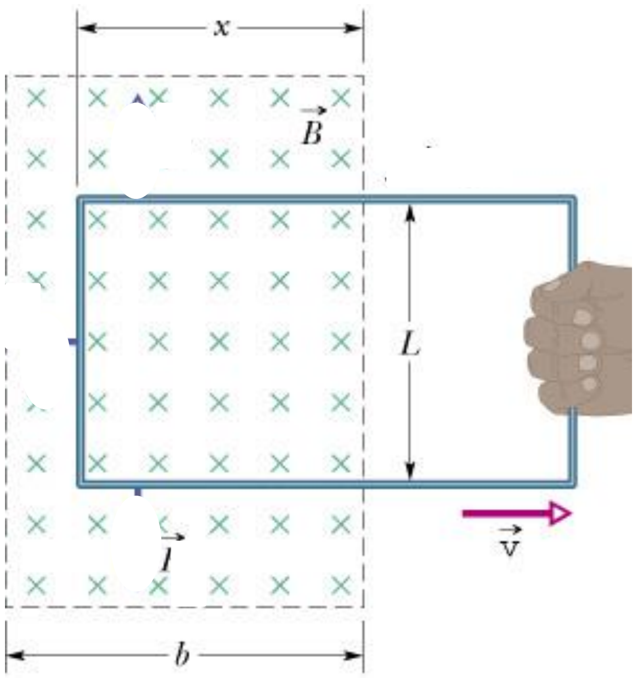
sse $\phi_m(t)$

$$\phi_m = \int \vec{B} \cdot \vec{ds} = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B}, \vec{ds})$$

$\phi_m(t)$

- $|\vec{B}|$ *variar no tempo*
- $|\vec{ds}|$ *variar no tempo*
- $\cos(\vec{B}, \vec{ds})$ *variar no tempo*
- qualquer combinação destas situações

O que acontecerá na situação da figura??????



Circuito está fechado, logo haverá I $_{induzida}$

$$I_{induzida} = \frac{|\varepsilon|}{R}$$

sse $|\varepsilon| \neq 0$

$$|\boldsymbol{\varepsilon}| = \frac{d\emptyset_m}{dt}$$

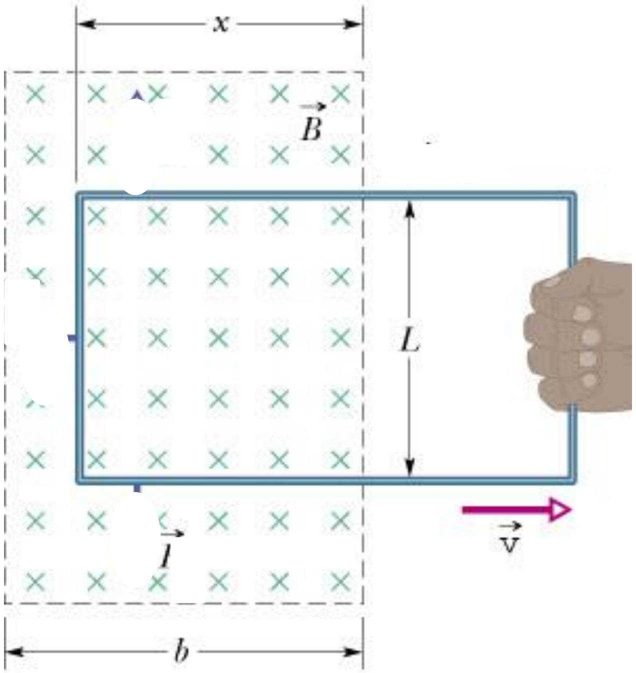
sse ϕ_m(t)

$$\phi_m = \int \vec{B}.\vec{ds} = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B},\vec{ds})$$

ϕ_m(t)

- $|\vec{B}|$ *variar no tempo*
- $|\vec{ds}|$ *variar no tempo*
- $\cos(\vec{B},\vec{ds})$ *variar no tempo*
- qualquer combinação destas situações

O que acontecerá na situação da figura??????



Circuito está fechado, logo haverá I $_{induzida}$

$$I_{induzida} = \frac{|\varepsilon|}{R}$$

sse $|\varepsilon| \neq 0$

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt}$$

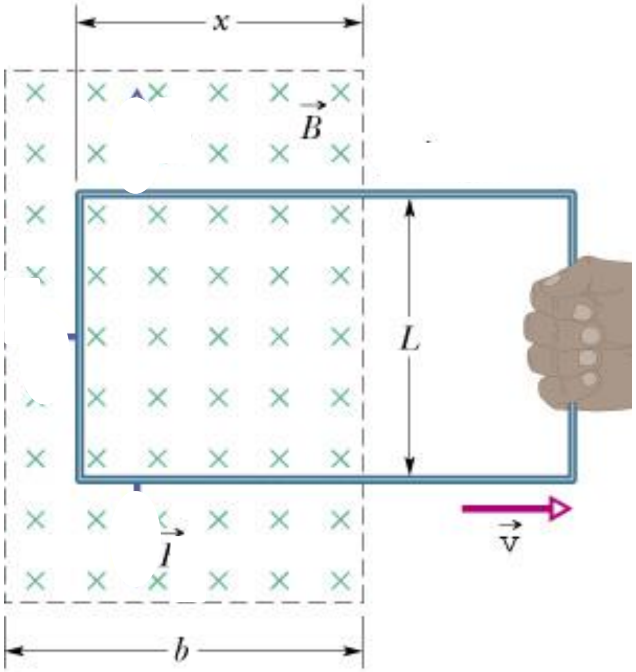
sse ϕ_m(t)

$$\phi_m = \int \vec{B}.\vec{ds} = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B}, \vec{ds})$$

ϕ_m(t)

- $|\vec{B}|$ *variar no tempo*
- $|\vec{ds}|$ (área) *variar no tempo*
- $\cos(\vec{B}, \vec{ds})$ *variar no tempo*
- qualquer combinação destas situações

Área varia no tempo



$$\phi_m = \int \vec{B}.\vec{ds} = \int |\vec{B}||\vec{ds}|\cos(\vec{B},\vec{ds}) =$$

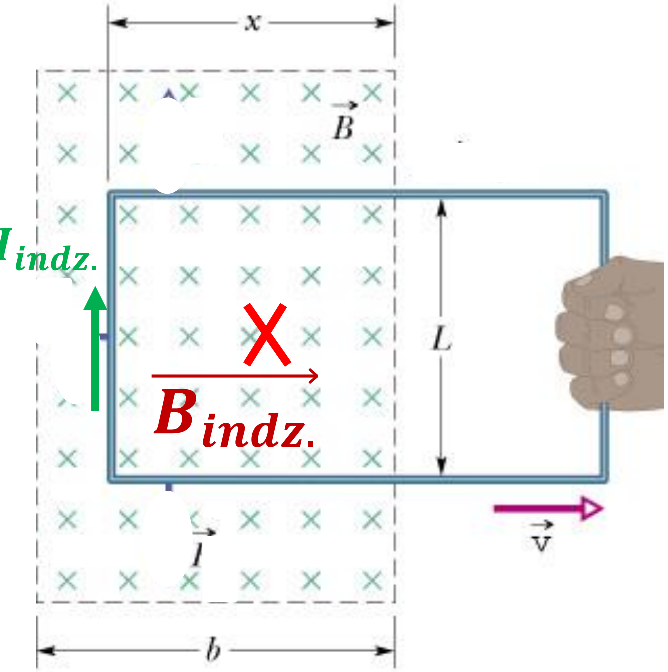
$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}|\cos(0\ ou\ 180)$$

$$\phi_m = B\int |\vec{ds}| = BA$$

Lei de Lenz

Área varia no tempo

Área varia no tempo



$$\phi_m = \int \overrightarrow{B}.\overrightarrow{ds} = \int |\overrightarrow{B}||\overrightarrow{ds}|\, cos(\overrightarrow{B}, \overrightarrow{ds}) =$$

$$\phi_m = \int |\overrightarrow{B}||\overrightarrow{ds}|\, cos(0\ ou\ 180)$$

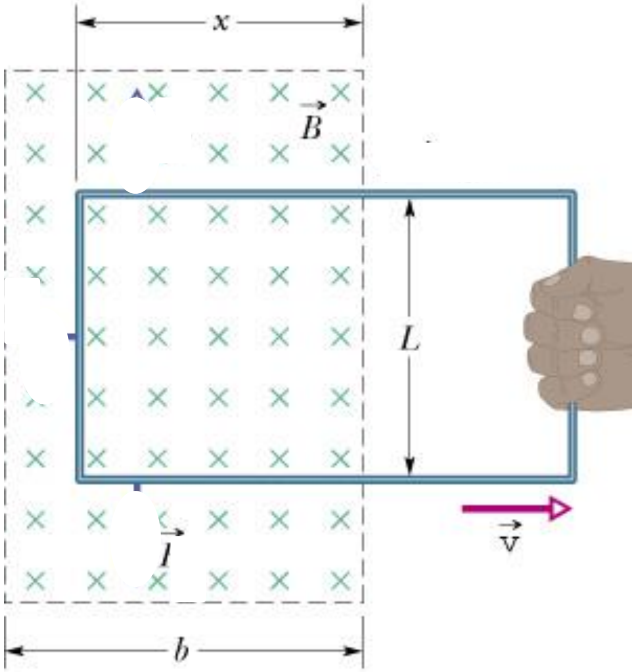
$$\phi_m = \text{B} \int |\overrightarrow{ds}| = BA$$

ϕ_m(t)

- **Aumenta** no tempo
- **Diminui no tempo**

Sentido de $\overrightarrow{B_{indz.}}$ reforça o B

sentido de $I_{indz.}$



$$\phi_m = \int \vec{B} \cdot \vec{ds} = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B}, \vec{ds}) =$$

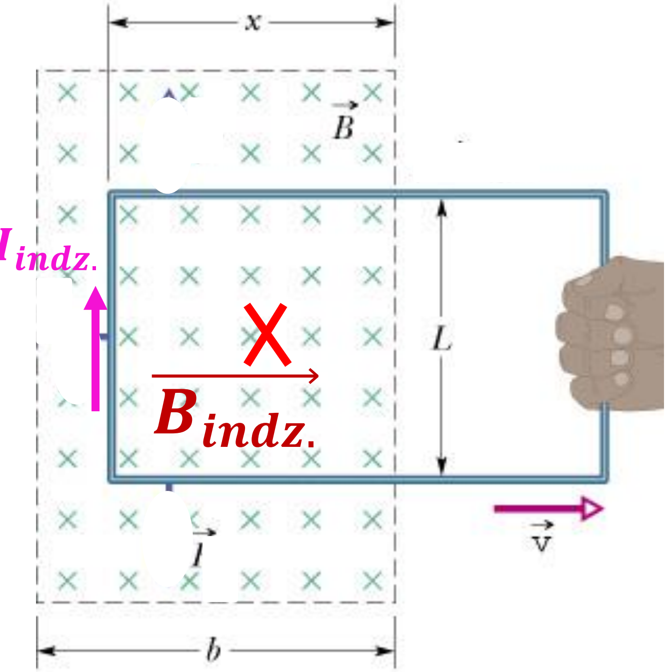
$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(0 \text{ ou } 180)$$

$$\phi_m = \mathrm{B} \int |\vec{ds}| = BA$$

$$|\varepsilon| = \frac{d\emptyset_m}{dt} = \frac{d(BA)}{dt} = B\frac{d(A)}{dt} = B\frac{d(L\,x)}{dt} = B\,L\,v$$

$$I_{\text{induzida}} = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\,L\,v}{R}$$

Qual o sentido? Como é o $\overrightarrow{B_{indz.}}$



$$\phi_m = \int \vec{B}.\vec{ds} = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B},\vec{ds}) =$$

$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(0 \text{ ou } 180)$$

$$\phi_m = \mathrm{B} \int |\vec{ds}| = BA$$

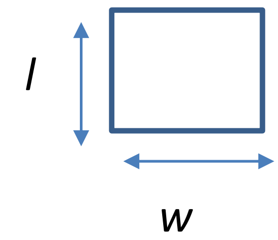
$$|\varepsilon| = \frac{d\emptyset_m}{dt} = \frac{d(BA)}{dt} = B\,\frac{d(A)}{dt} = B\,\frac{d(L\,x)}{dt} = B\,L\,v$$

$$I_{\text{induzida}} = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\,L\,v}{R}$$

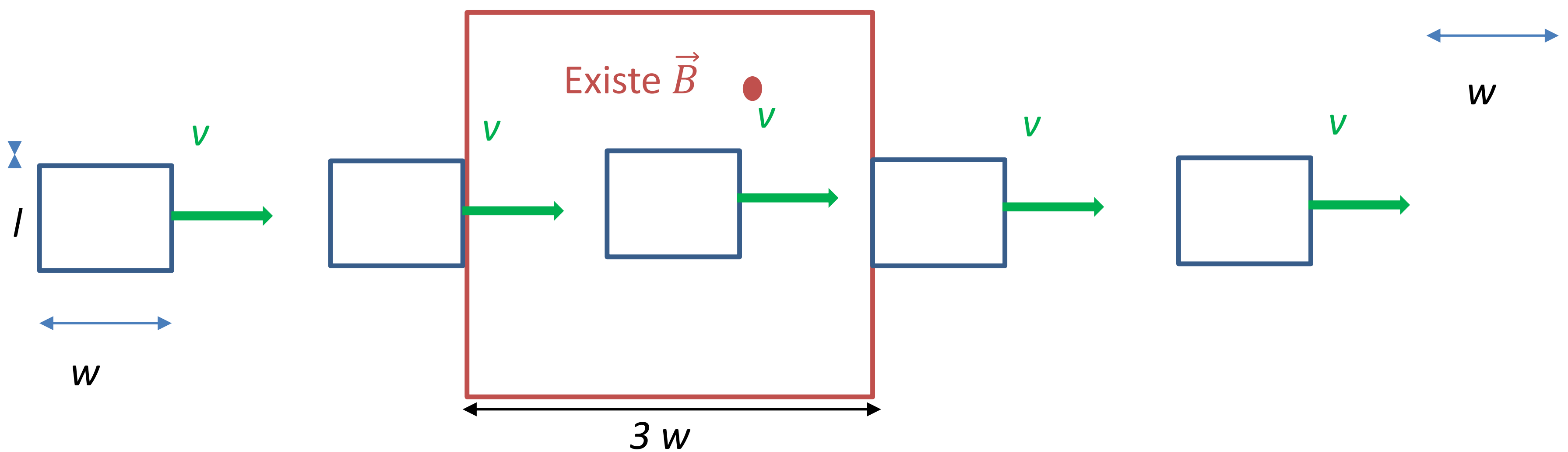
$$\overrightarrow{B_{indz.}}$$

9.4 - Exemplos

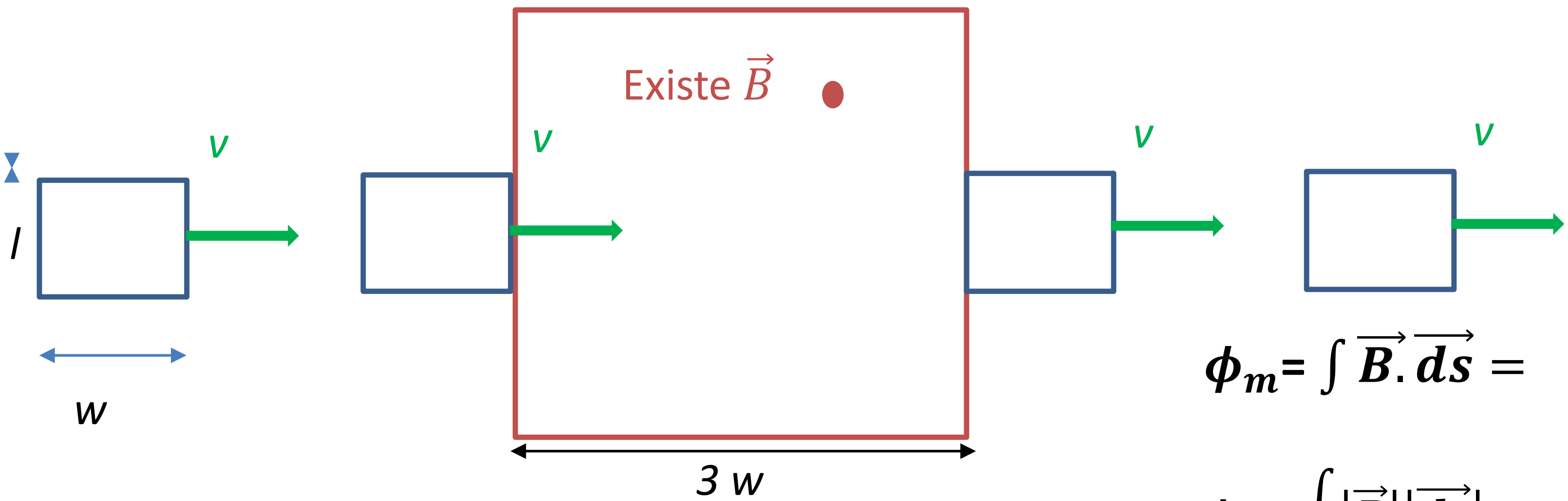
v - constante



Espira de dimensões l e *w* a mover-se com velocidade contante.
Na região identificada existe um campo magnético uniforme e com o sentido para fora do papel.



Análise do fluxo na espira quando ele se move fora da região de campo

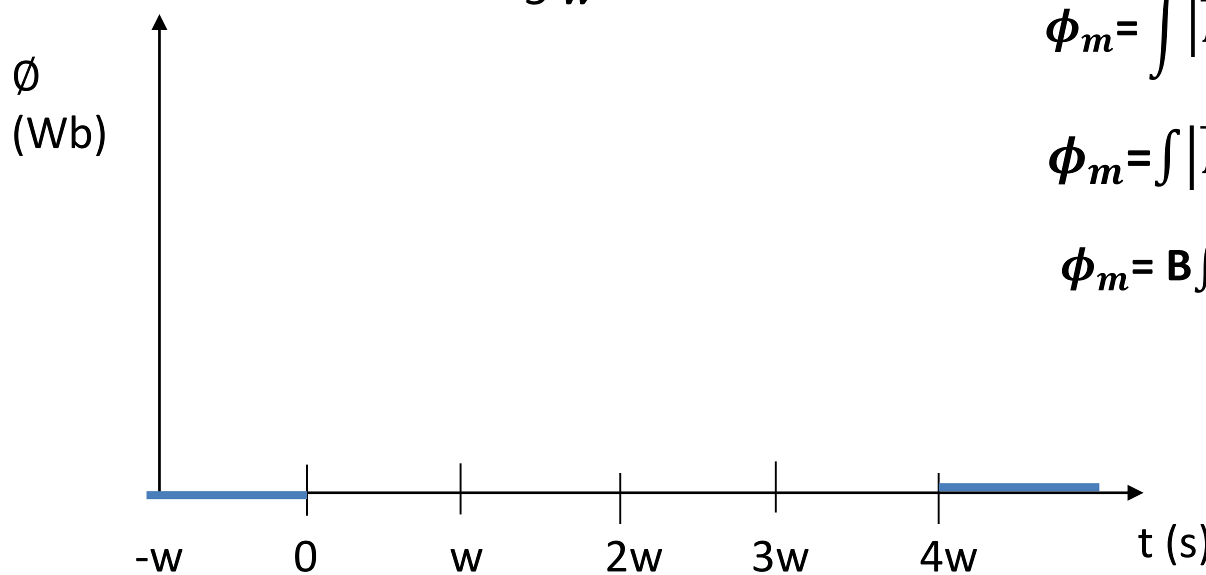


$$\phi_m = \int \vec{B}\cdot\vec{ds} =$$

$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B},\vec{ds}) =$$

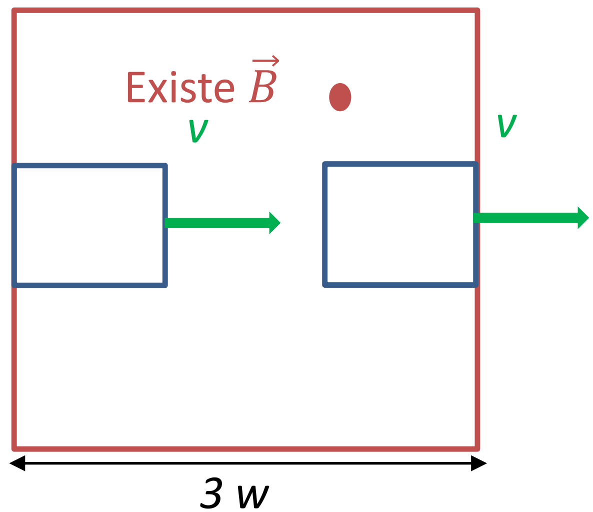
$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(0\ )$$

$$\phi_m = \mathrm{B}\int |\vec{ds}| = 0A = 0$$



x=vt

Análise do fluxo através da espira quando ela está totalmente dentro da região de campo

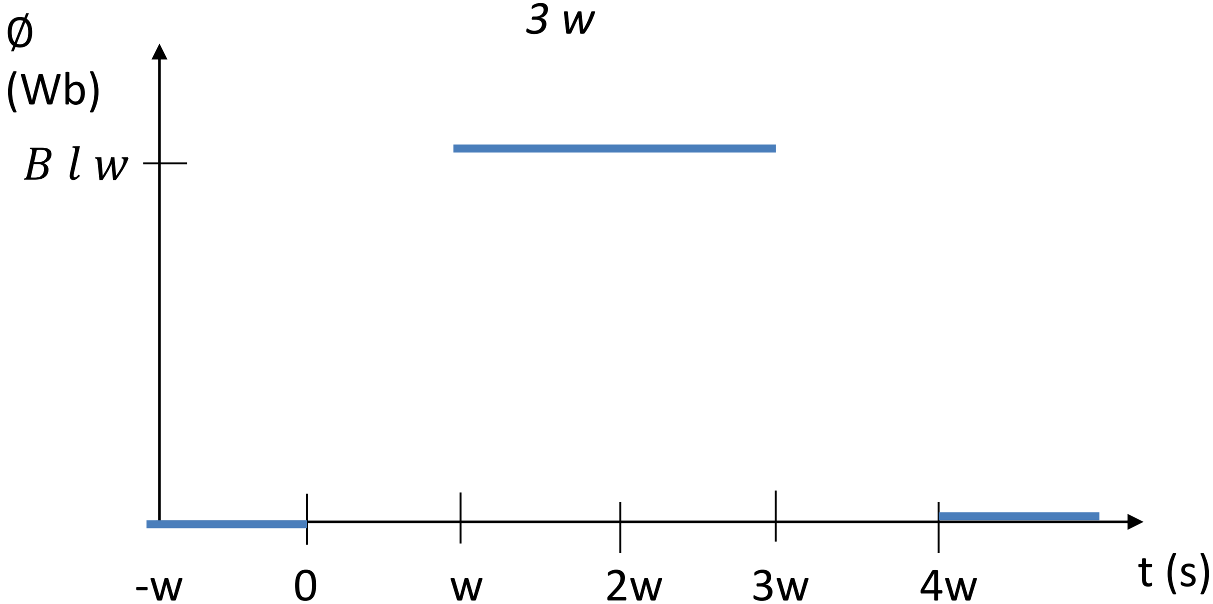


$$\phi_m = \int \vec{B}.\vec{ds} =$$

$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B},\vec{ds}) =$$

$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(0\ )$$

$$\phi_m = B\int |\vec{ds}| = BA = B\ l\ w$$



Análise do fluxo através da espira quando ela está a entrar na região de campo

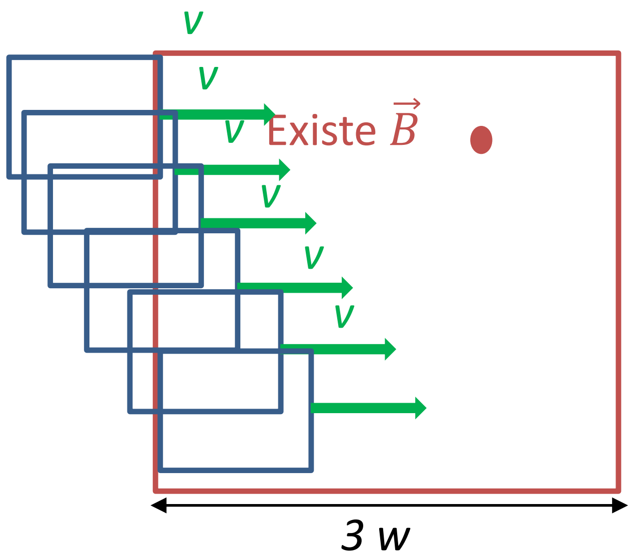
$$\phi_m = \int \vec{B}.\vec{ds} =$$

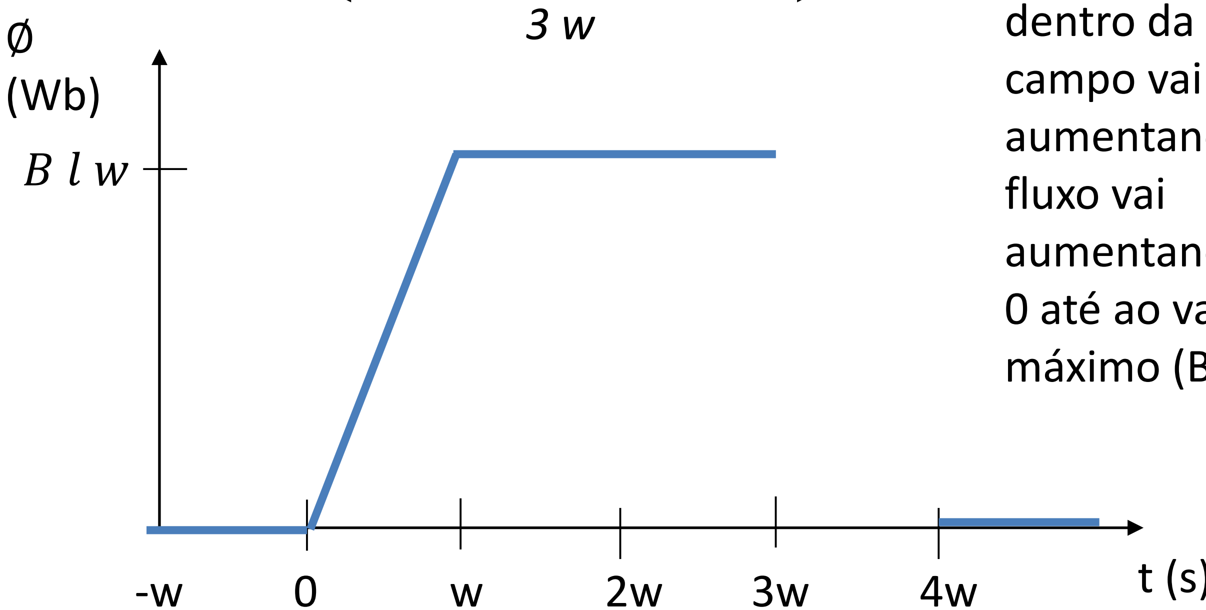
$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(\vec{B},\vec{ds}) =$$

$$\phi_m = \int |\vec{B}||\vec{ds}| \cos(0\ )$$

$$\phi_m = B\int_a^w l dx = B\, l \int_a^w dx =$$

$$\phi_m = B\, l\, (x)_{0w} = B\, l\, (w-0) = Blw$$

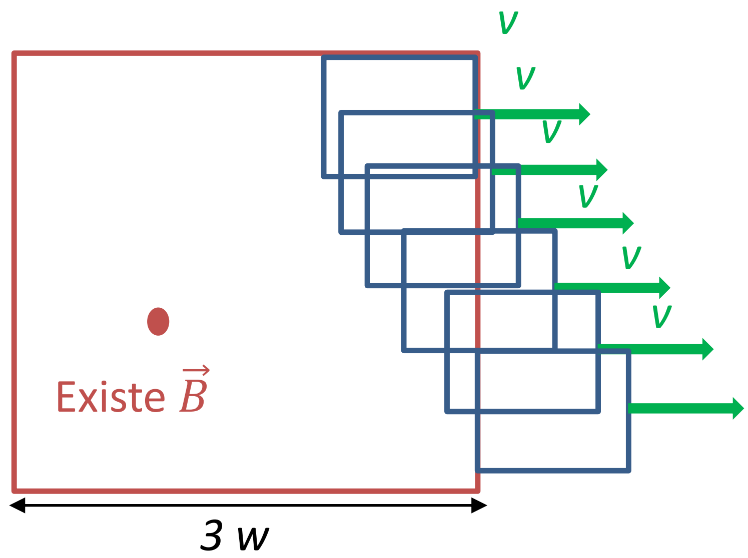


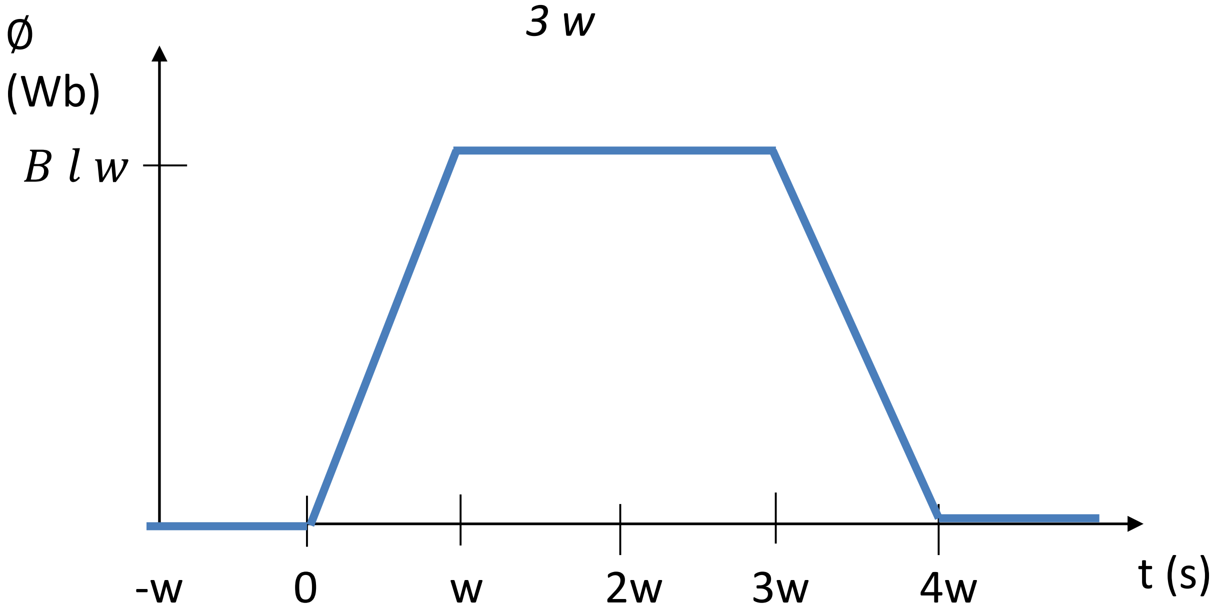


A área da espira dentro da região de campo vai aumentando: LOGO o fluxo vai aumentando: desde 0 até ao valor máximo (BLw)

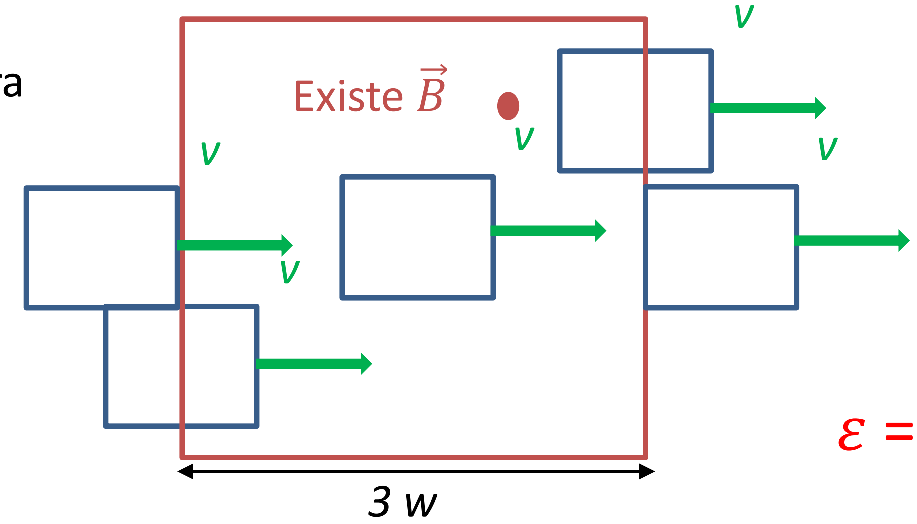
Análise do fluxo através da espira quando ela está a sair na região de campo

A área da espira dentro da região de campo vai diminuindo: LOGO o fluxo vai diminuindo: desde o valor máximo (BLw) até 0

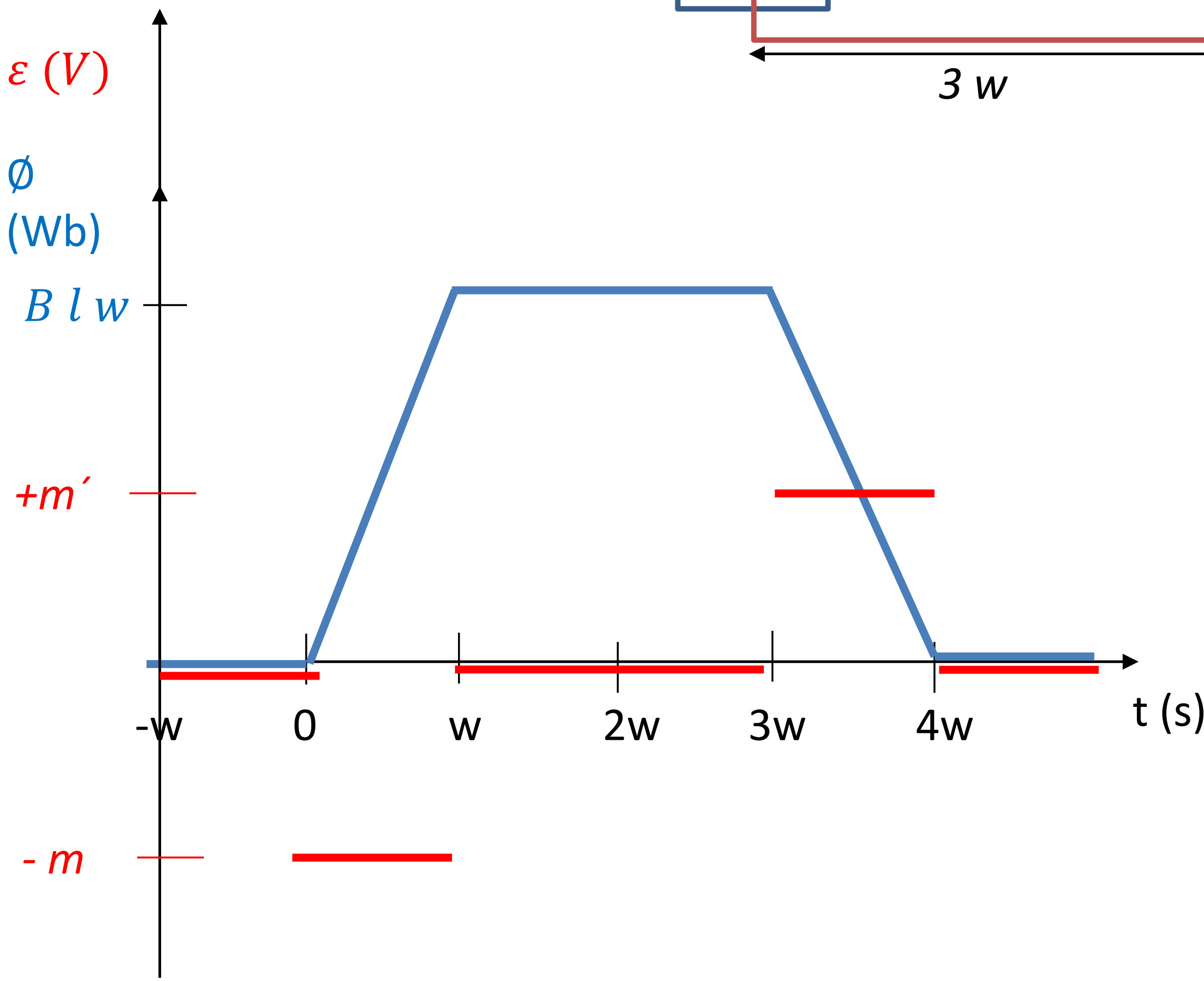




Análise da f.e.m. induzida na espira



$$\varepsilon = \frac{d\emptyset_m}{dt}$$



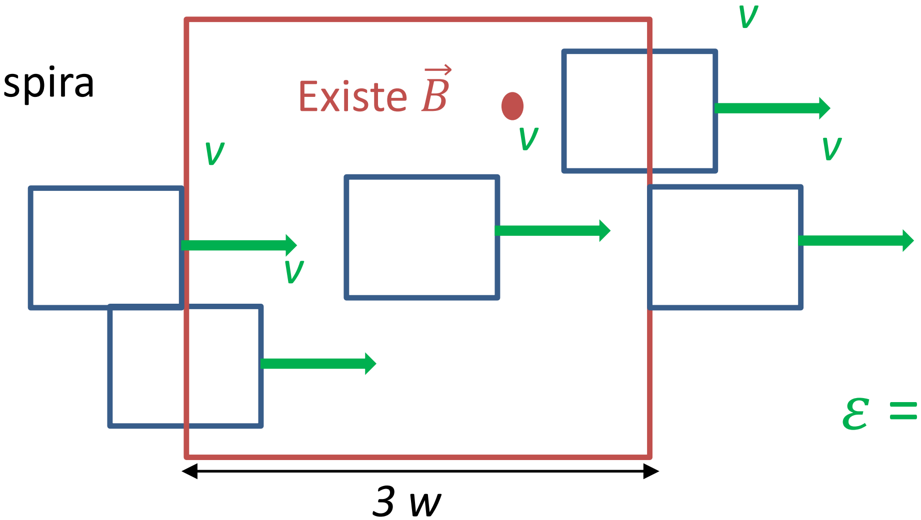
Enquanto entra na região de B o fluxo aumenta (y = m x), logo:

$$\varepsilon = -\frac{d\emptyset_m}{dt} = -\text{m}$$

Enquanto sai da região de B o fluxo diminui (y = -m´ x), logo:

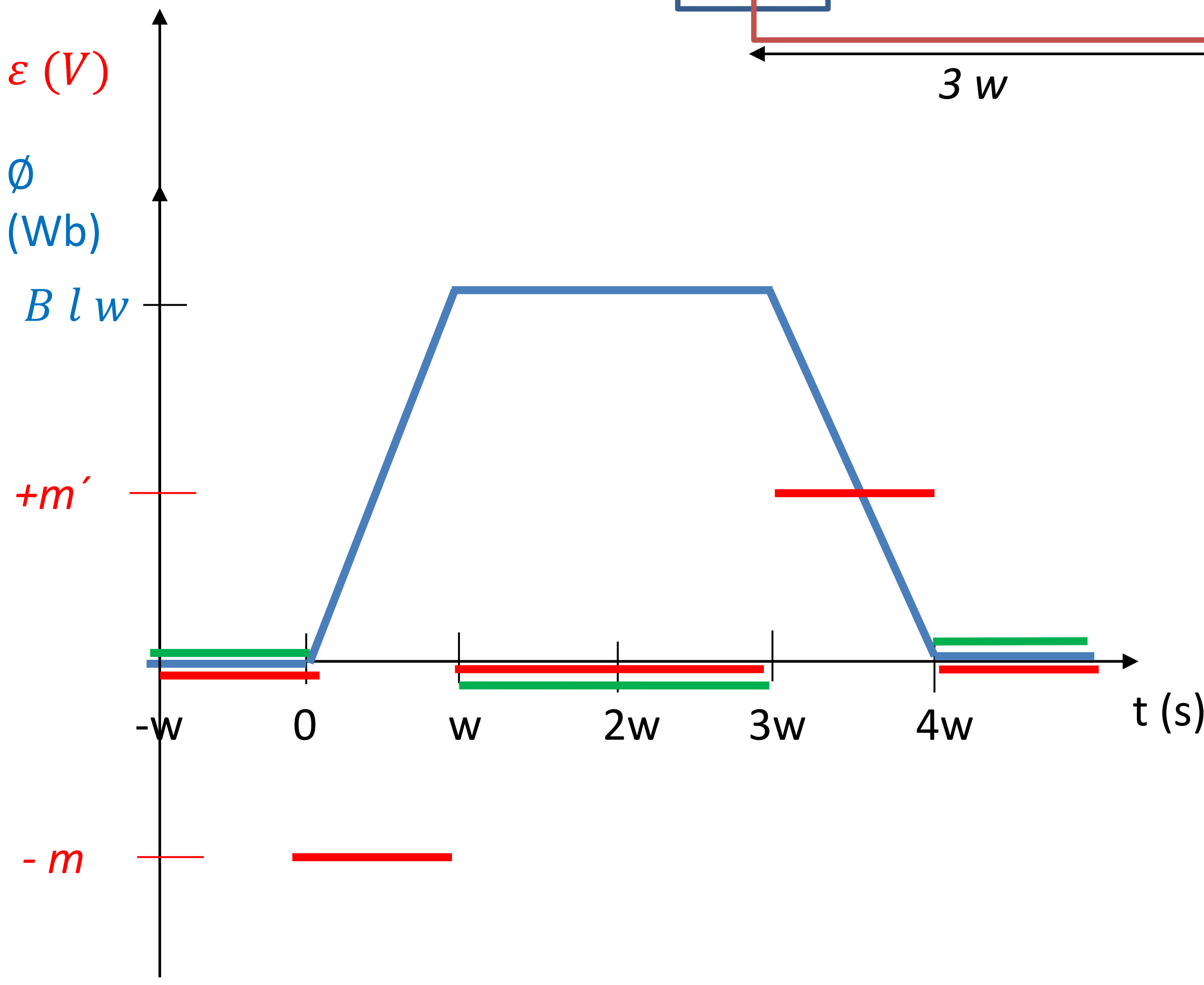
$$\varepsilon = -\frac{d\emptyset_m}{dt} = \text{m´}$$

Análise da corrente induzida na espira



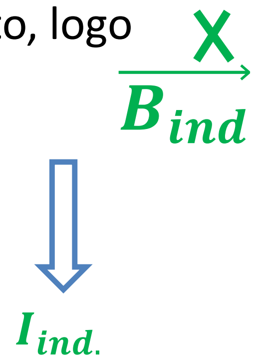
$$\varepsilon = R\ Iind$$

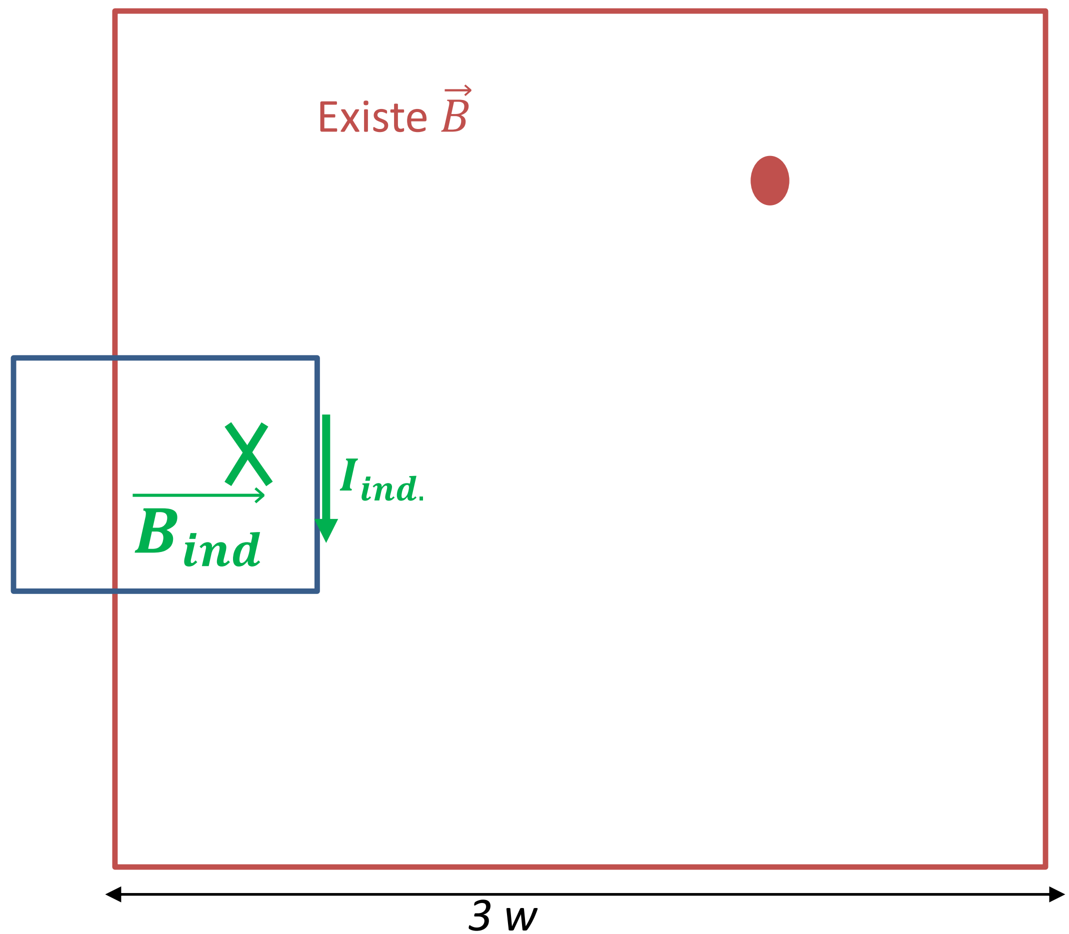
Positiva se no sentido
do movimento
dos ponteiros do
relógio e negativa
sentido contrário



Análise $I_{ind.}$ quando ela está a entrar na região de campo

Fluxo aumenta;
Lei de Lenz o $B_{ind.}$ tem que contrariar este aumento, logo





Análise $I_{ind.}$ quando ela está a sair na região de campo

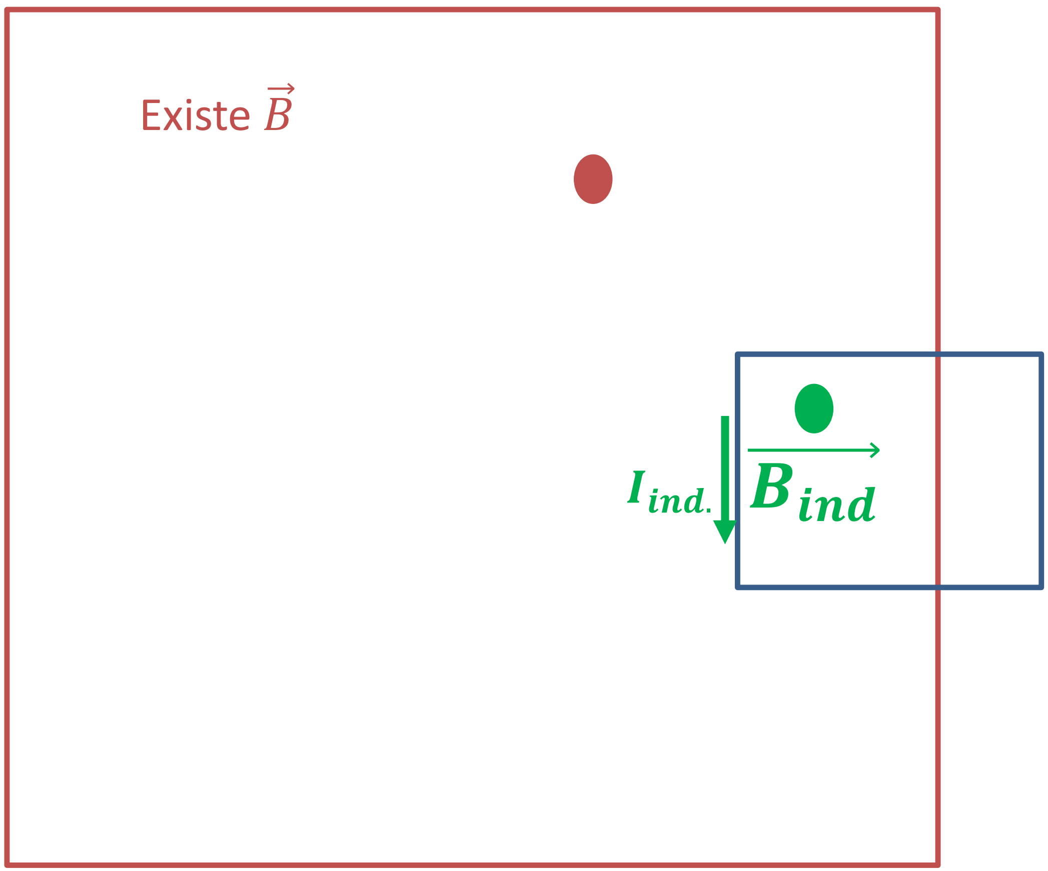
Fluxo diminui;

Lei de Lenz o $B_{ind.}$ tem que contrariar esta diminuição, logo

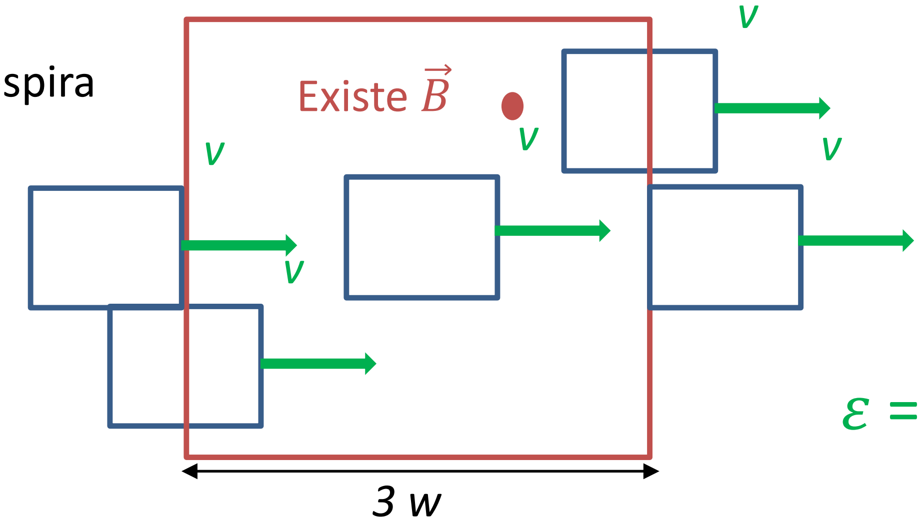
$\overrightarrow{B_{ind}}$

$\Downarrow$

$I_{ind.}$

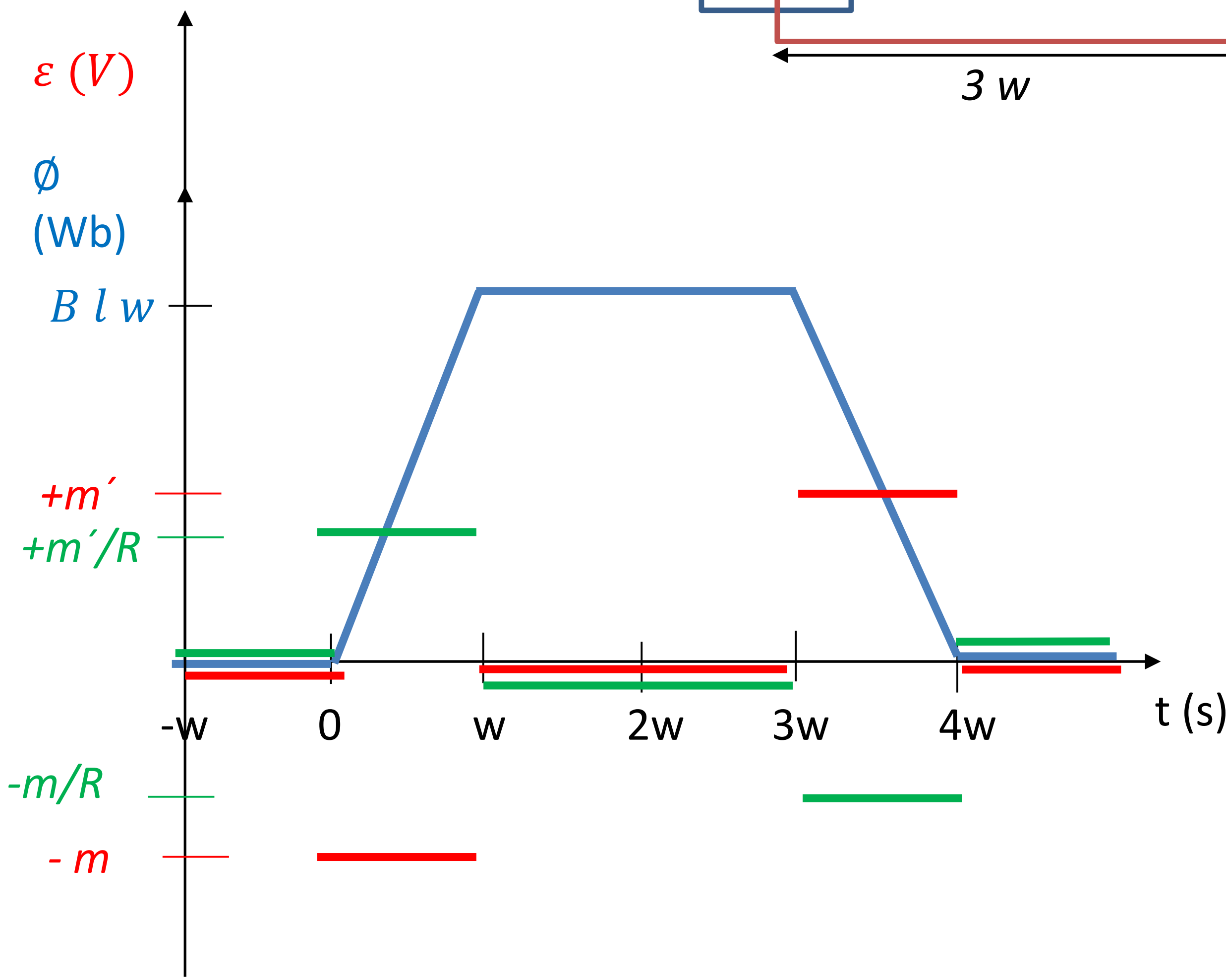


Análise da corrente induzida na espira

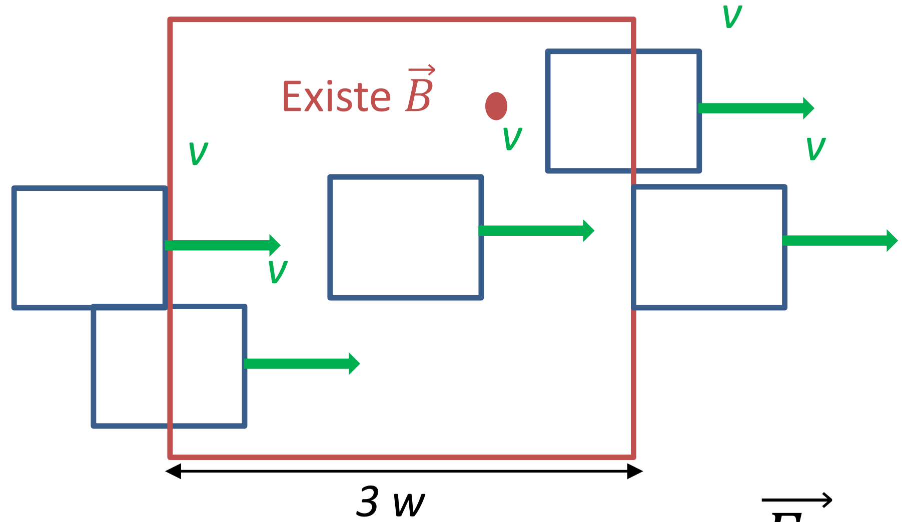


$$\varepsilon = R\ Iind$$

Positiva se no sentido do movimento dos ponteiros do relógio e negativa sentido contrário



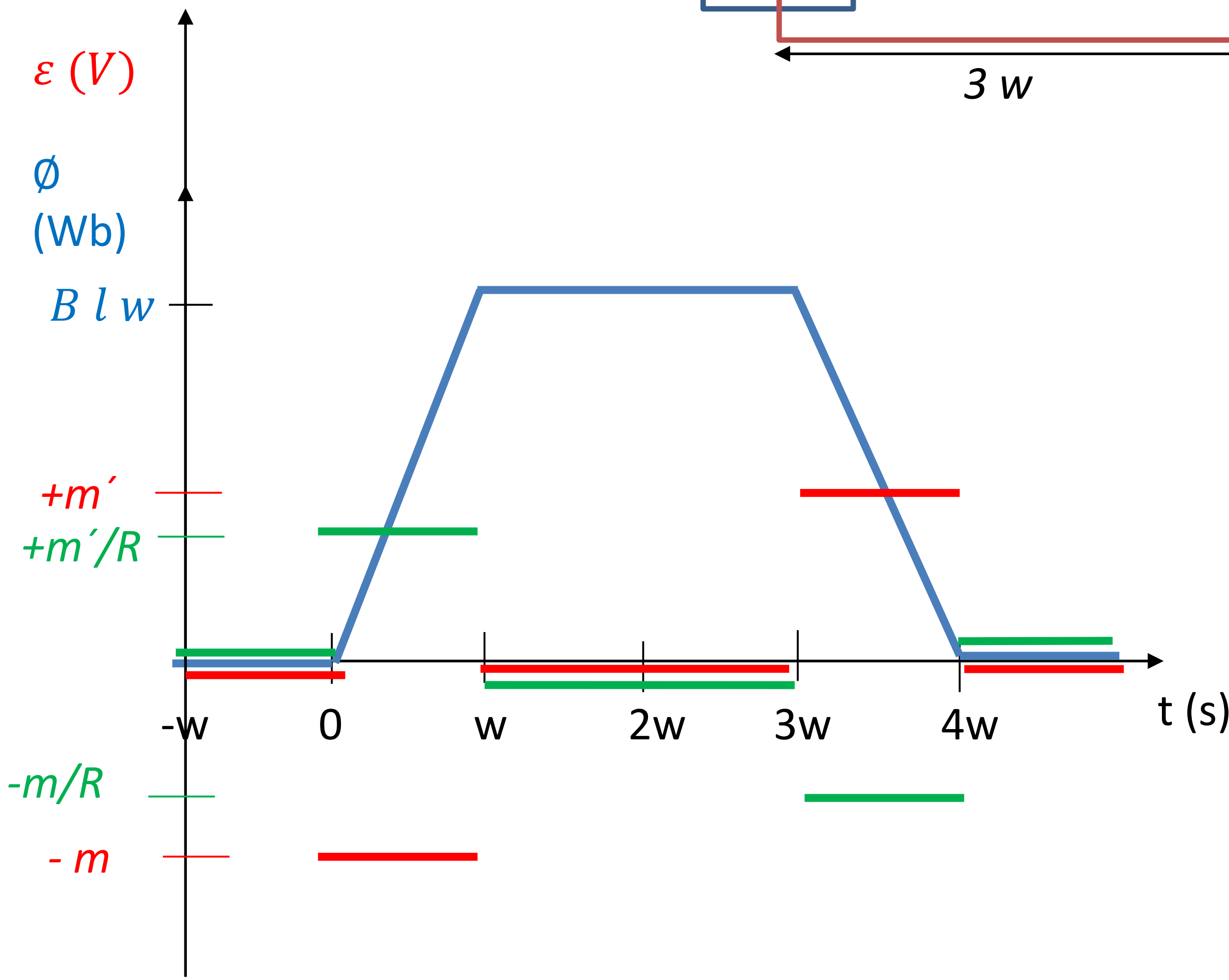
Análise da Força magnética



$$\overrightarrow{F_B} = Iind\vec{L}\ X\ \vec{B}$$

Só existe se I e B ≠ 0

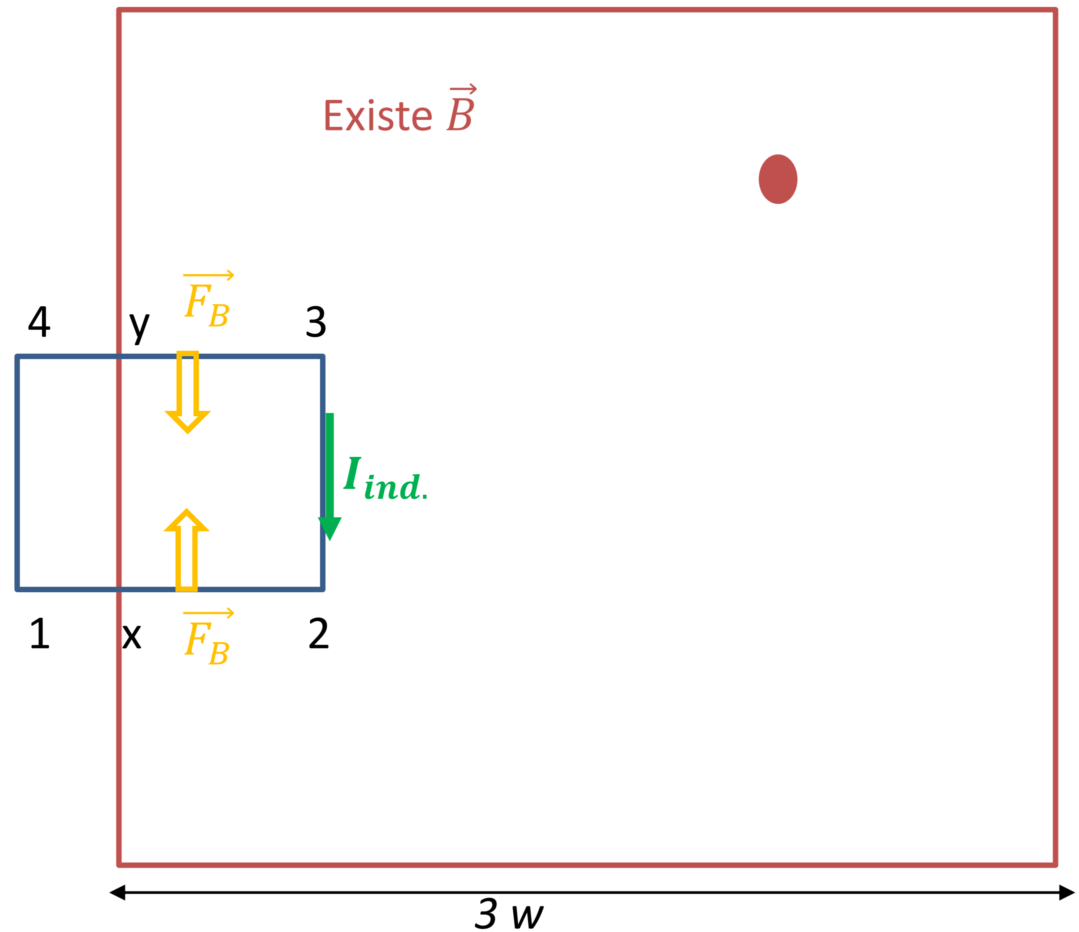
Na entrada e saída da região de campo



Análise $\overrightarrow{F_B}$ quando ela está a entrar na região de campo

$$\overrightarrow{F_B} = Iind\vec{L}\ X\ \vec{B}$$

$$\left|\overrightarrow{F_B}\right| = I\left|\vec{L}\right|\left|\vec{B}\right| sen\ (\vec{L}, \vec{B})$$



Região

1-4: $I_{ind.}$≠0 mas B=0 LOGO $\overrightarrow{F_B}$ = 0
x-1: $I_{ind.}$≠0 mas B=0 LOGO $\overrightarrow{F_B}$ = 0
4-y: $I_{ind.}$≠0 mas B=0 LOGO $\overrightarrow{F_B}$ = 0
2-x: $I_{ind.}$e $\vec{B}$ ≠0 LOGO $\overrightarrow{F_B}$ ≠ 0:

$$\left|\overrightarrow{F_B}\right| = Iind\left|\vec{L}\right|\left|\vec{B}\right| sen\ (90)$$

$\left|\overrightarrow{F_B}\right| = Iind\ w\ B$ + RMD

y-3: $I_{ind.}$ e $\vec{B}$ ≠0 LOGO $\overrightarrow{F_B}$ ≠ 0

$$\left|\overrightarrow{F_B}\right| = Iind\left|\vec{L}\right|\left|\vec{B}\right| sen\ (90)$$

$\left|\overrightarrow{F_B}\right| = Iind\ w\ B$ + RMD

Cancelam-se

Análise $\overrightarrow{F_B}$ quando ela está a entrar na região de campo

$$\overrightarrow{F_B} = Iind\vec{L}\ X\ \vec{B}$$

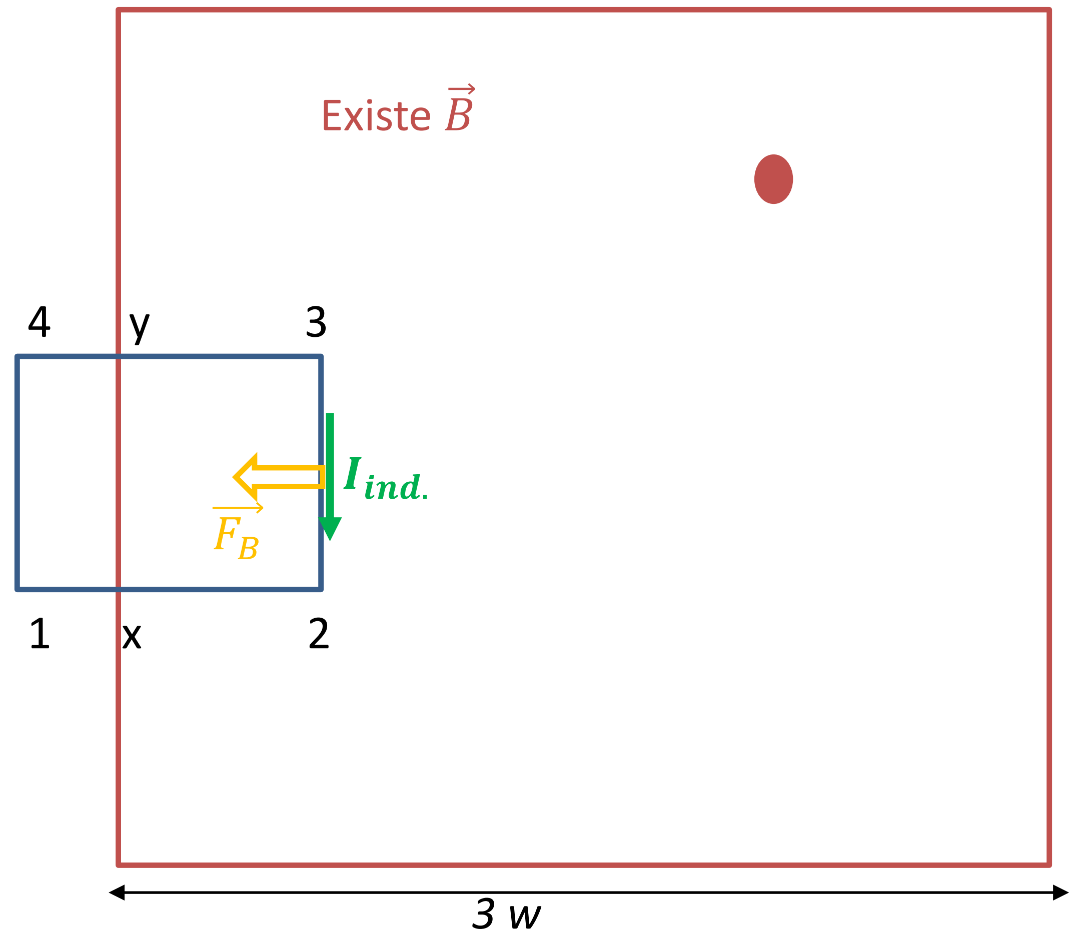
$$|\overrightarrow{F_B}| = I|\vec{L}||\vec{B}|\ sen\ (\vec{L},\vec{B})$$

Região

2-3: $I_{ind.}$ e $\vec{B}$ ≠0 LOGO $\overrightarrow{F_B}$ ≠ 0

$$|\overrightarrow{F_B}| = Iind|\vec{l}||\vec{B}|\ sen\ (90)$$

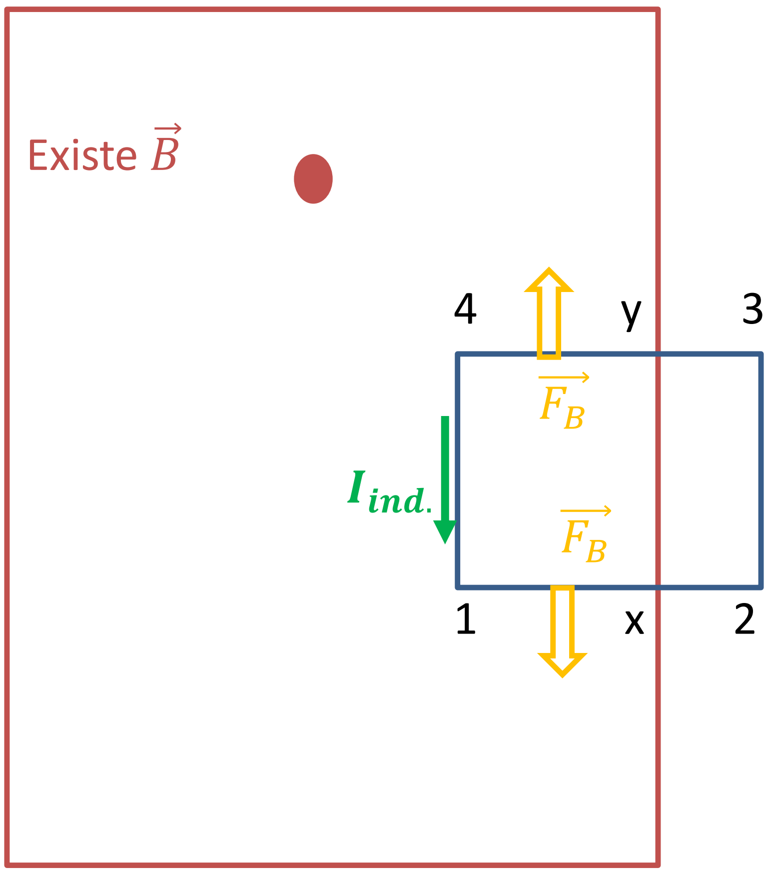
$|\overrightarrow{F_B}| = Iind\ l\ B$ + RMD



Análise $I_{ind.}$ quando ela está a sair na região de campo

$$\overrightarrow{F_B} = Iind\vec{L}\ X\ \vec{B}$$

$$\overrightarrow{|F_B|} = I\overrightarrow{|L|}\overrightarrow{|B|}\ sen\ (\vec{L}, \overrightarrow{B})$$



Região

<u>2-3:</u> $I_{ind.}$ ≠0 mas B=0 LOGO $\overrightarrow{F_B} = 0$
<u>3-y:</u> $I_{ind.}$ ≠0 mas B=0 LOGO $\overrightarrow{F_B} = 0$
<u>x-2:</u> $I_{ind.}$ ≠0 mas B=0 LOGO $\overrightarrow{F_B} = 0$
<u>1-x:</u> $I_{ind.}$ e $\vec{B}$ ≠0 LOGO $\overrightarrow{F_B} \neq 0$:

$$\overrightarrow{|F_B|} = Iind\overrightarrow{|L|}\overrightarrow{|B|}\ sen\ (90)$$

$$\overrightarrow{|F_B|} = Iind\, w\, B$$ + RMD

<u>3-y:</u> $I_{ind.}$ e $\vec{B}$ ≠0 LOGO $\overrightarrow{F_B} \neq 0$

$$\overrightarrow{|F_B|} = Iind\overrightarrow{|L|}\overrightarrow{|B|}\ sen\ (90)$$

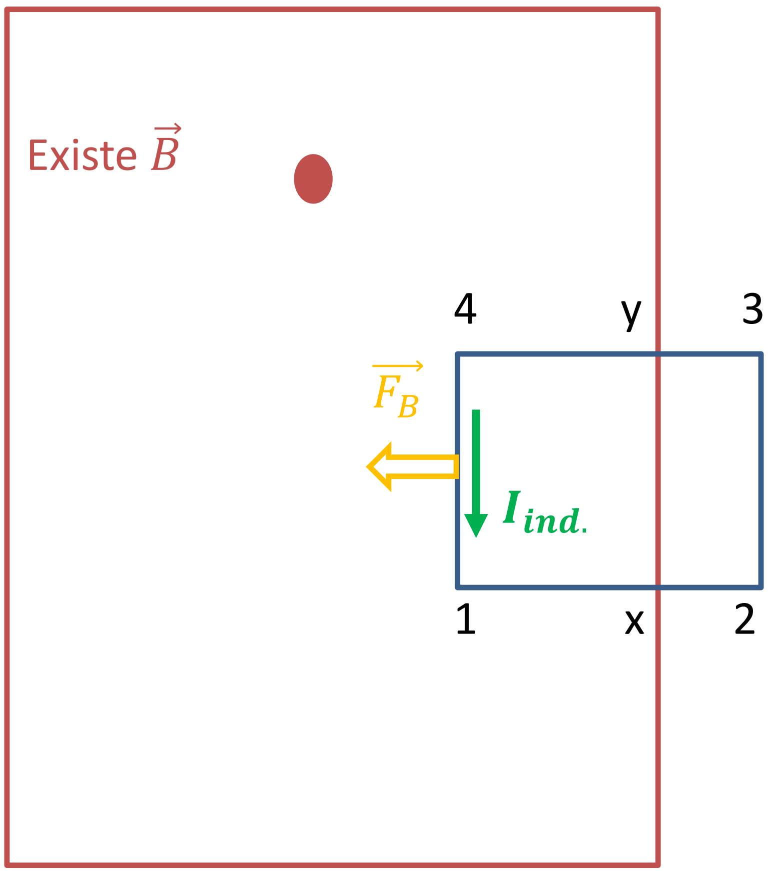
$$\overrightarrow{|F_B|} = Iind\, w\, B$$ + RMD

Cancelam-se

Análise $I_{ind.}$ quando ela está a sair na região de campo

$$\overrightarrow{F_B} = Iind\vec{L}\ X\ \vec{B}$$

$$|\overrightarrow{F_B}| = I|\vec{L}||\vec{B}|\ sen\ (\vec{L}, \vec{B})$$



Região

4-1: $I_{ind.}$ e $\vec{B}$ ≠0 LOGO $\overrightarrow{F_B}$ ≠ 0

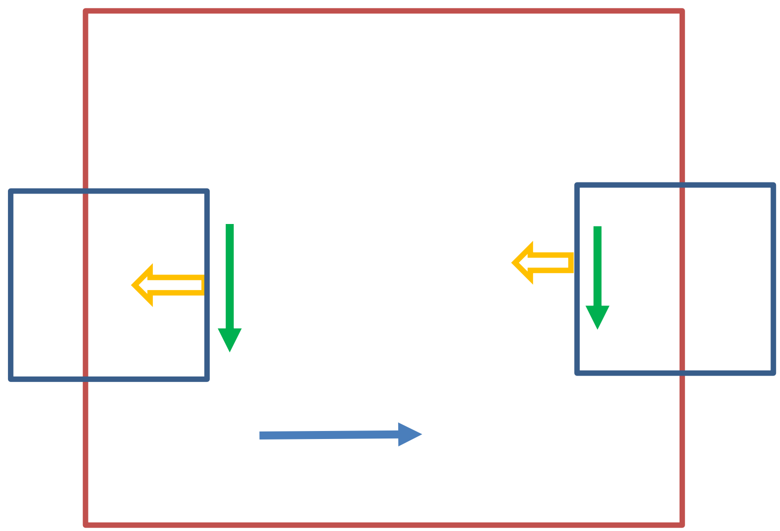
$$|\overrightarrow{F_B}| = Iind|\vec{L}||\vec{B}|\ sen\ (90)$$

$$|\overrightarrow{F_B}| = Iind\ l\ B$$ + RMD

Cancelam-se

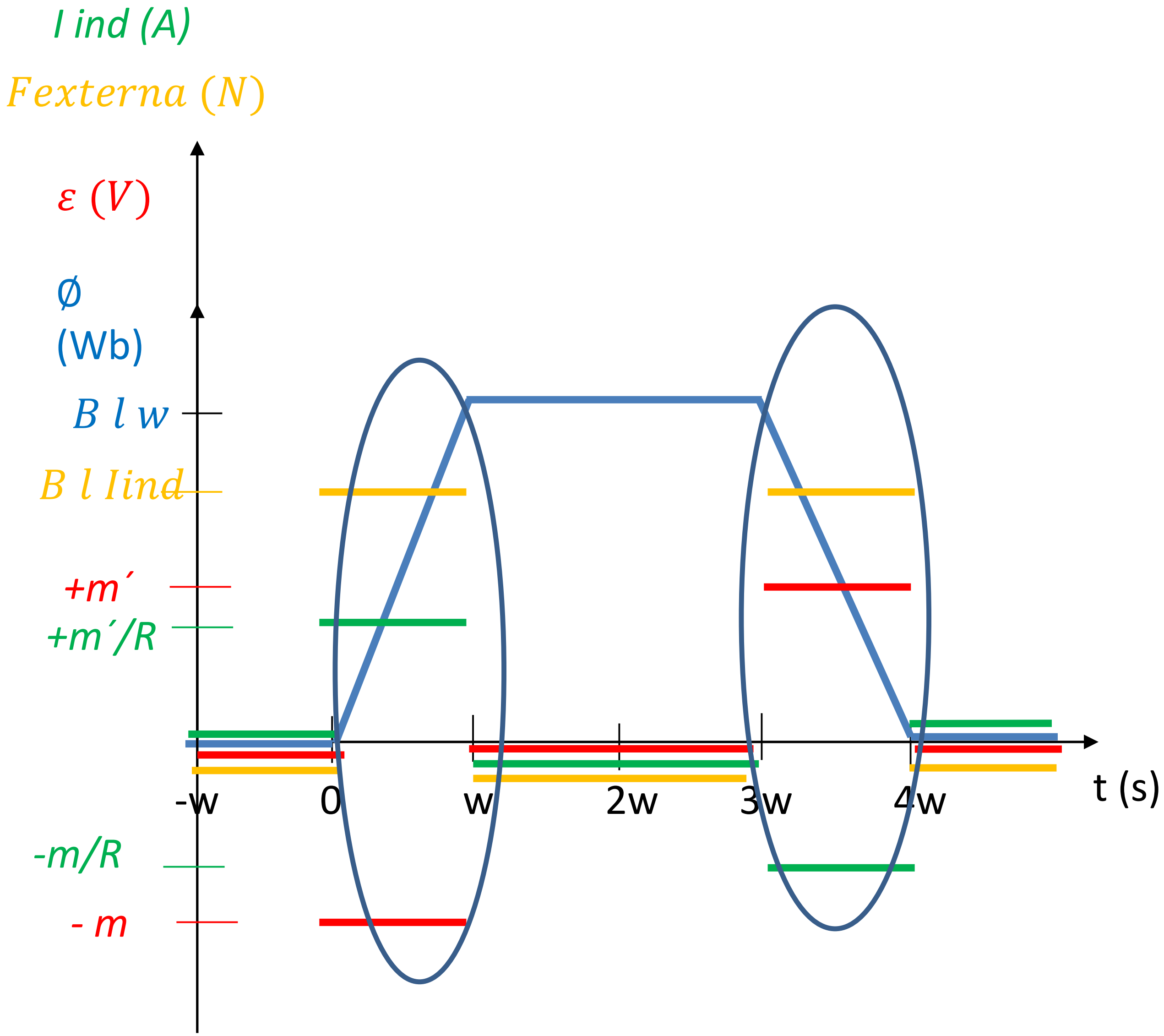
$I_{ind.}$

$\overrightarrow{F_B}$



Para que a velocidade seja constante durante a entrada e saída da espira na região de campo, é Necessário aplicar uma força externa de módulo igual a $\overrightarrow{F_B}$ e de sentido oposto.

Positiva se no sentido do movimento



I ind (A)
Fexterna (N)
ε (V)
Ø
(Wb)
B l w
B l Iind
+m´
+m´/R
-m/R
- m
-w
0
w
2w
3w
4w
t (s)