



Universidade Federal do ABC

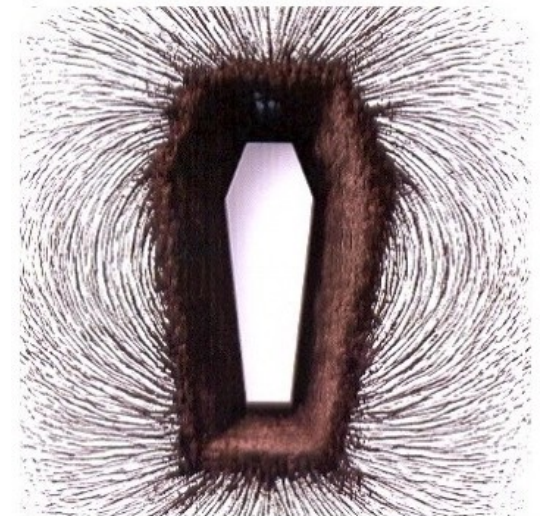
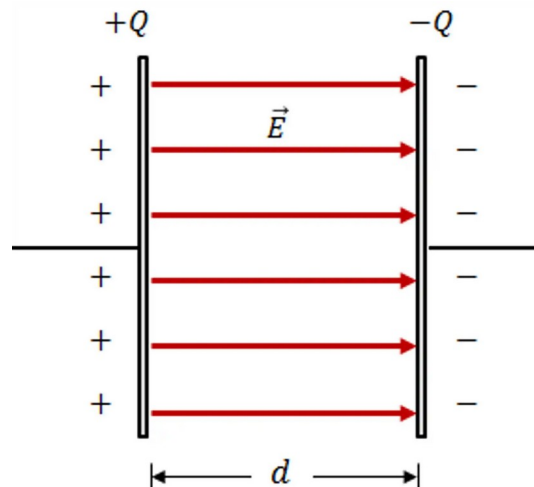
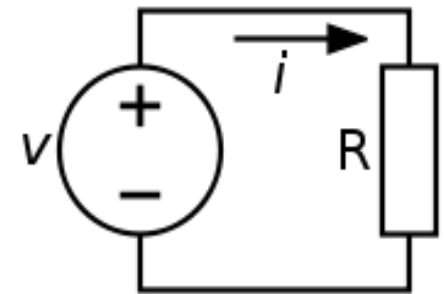
# Fenômenos Eletromagnéticos

## 16. Lei de Lenz, Forças Eletromotrizes Induzidas e Campos Elétricos Induzidos

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/EM.html>



# Lei de Lenz

A **polaridade** da **fem induzida** em uma **espira** é tal que produz uma **corrente** cujo **campo magnético** se **opõe** à **variação** do **fluxo magnético** através da espira. Isto é, a **corrente induzida** está em uma **direção** tal que o **campo magnético induzido** tenta **manter** o **fluxo original** através da espira.

”O efeito se opõe à causa.”

Basicamente: A **Lei de Lenz** fornece o **sinal negativo** pra **Lei de Faraday**, que às vezes é chamada de **Lei de Faraday-Lenz**.

A Lei de Lenz é melhor entendido fazendo exemplos.



Heinrich Lenz  
(1804-1865)

# Lei de Lenz

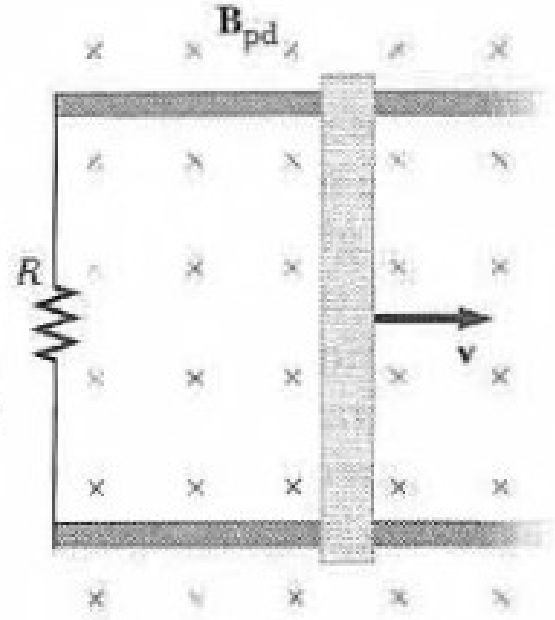
Mais uma vez a **barra** se **movimentando** sobre **trilhas** por um **campo magnético**.

O **campo** é **para dentro** da tela, o **movimento** da **barra** pra **direita**  
Como é a **variação** do **fluxo** do **campo magnético**?

A **área** aumenta.

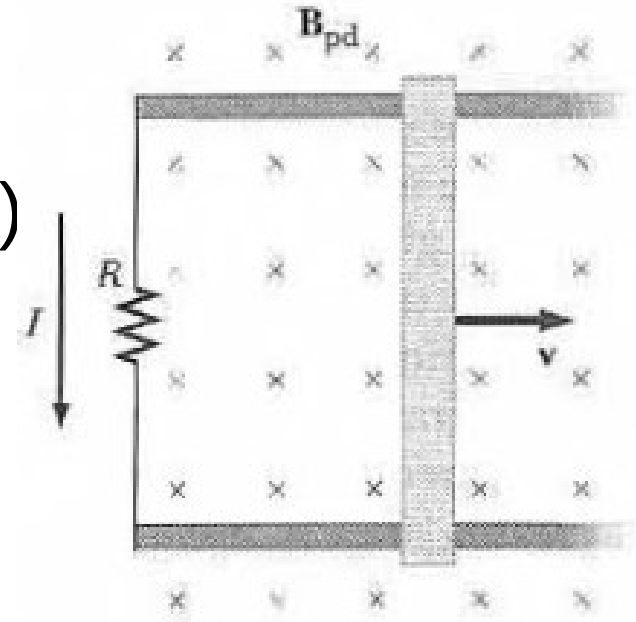
=> o **fluxo** para dentro da tela também **aumenta**.

=> a **variação** do **fluxo** é **para dentro** da tela.



# Lei de Lenz

Olhando pra **corrente induzida**:  
Na **barra** ela é pra **cima**, no **circuito** inteiro no sentido **positivo** (anti-horário)  
Esta **corrente** pelo circuito **gera**, na área limitada por ela, um **campo magnético para fora** da tela.



=> O **campo devido à corrente induzida** se **opõe à variação de fluxo** que **causou** ela.

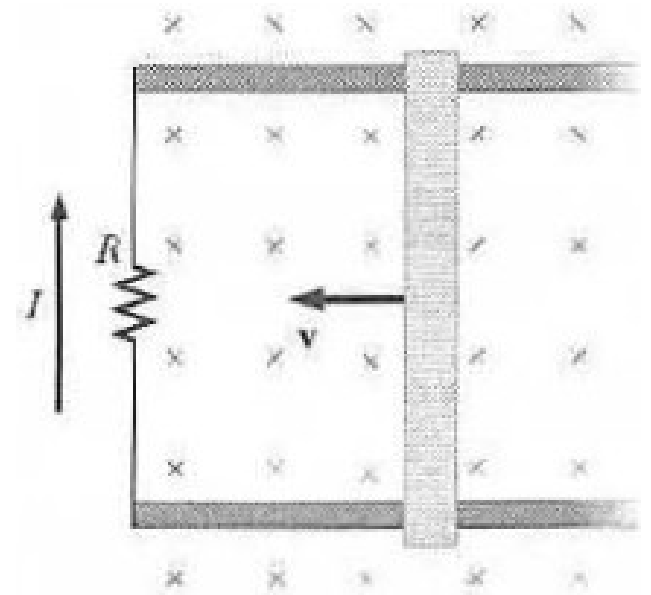
Isto é um exemplo do **significado do sinal negativo** na **Lei de Faraday**.

=> **Lei de Lenz**

# Lei de Lenz

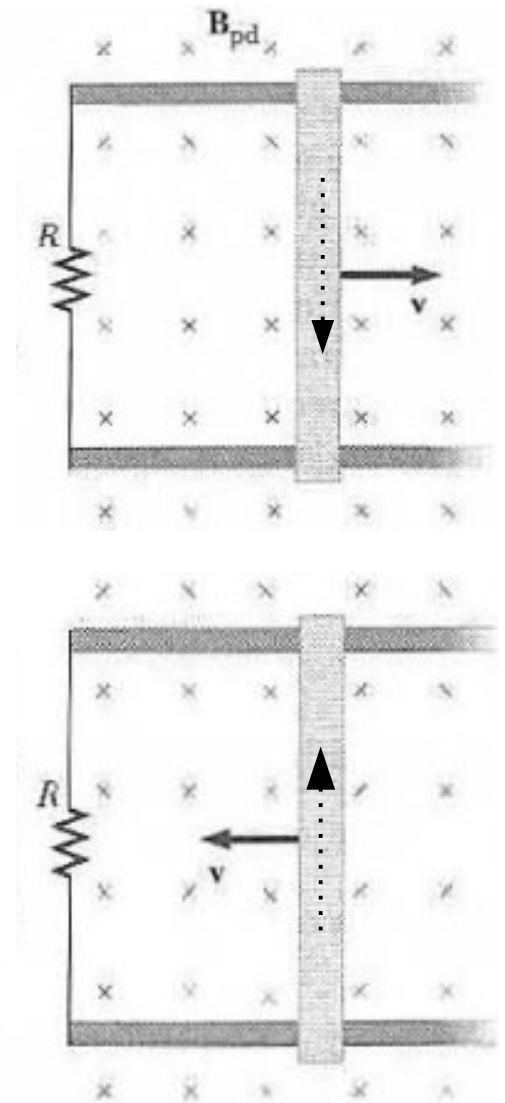
Se a **barra** se **movimenta** pra **esquerda**, todas as **grandezas** terão o **sinal/direção/sentido oposto**, e o **campo** devido à **corrente induzida** também se **opõe** à **variação do fluxo** que **causou** tudo.

Se pode dizer que nos dois casos, a **corrente induzida** tenta **manter** o **fluxo original** através do circuito.



# Lei de Lenz

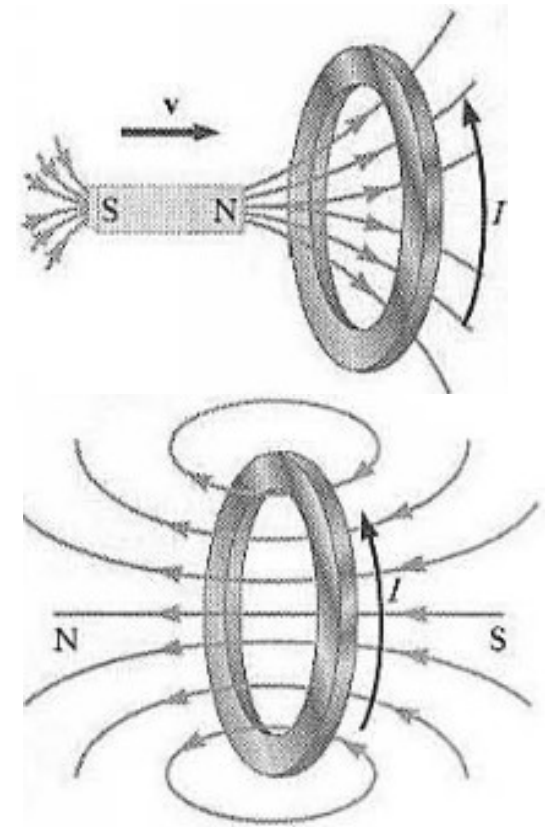
Se o **sinal** na **lei** de **Faraday-Lenz** fosse **positivo**, nos dois casos, uma **velocidade** inicialmente dada à **barra** ia **causar** uma **variação** de **fluxo** que **induziria** uma **corrente** na **direção** da **corrente** já **existente**, i.e. um **aumento** da **corrente**, um **ciclo vicioso** que **aceleraria** a **barra** cada vez mais, um **perpetuum mobile**.



# Lei de Lenz

Outro caso: Um ímã de barra aproximando e afastando-se de uma espira

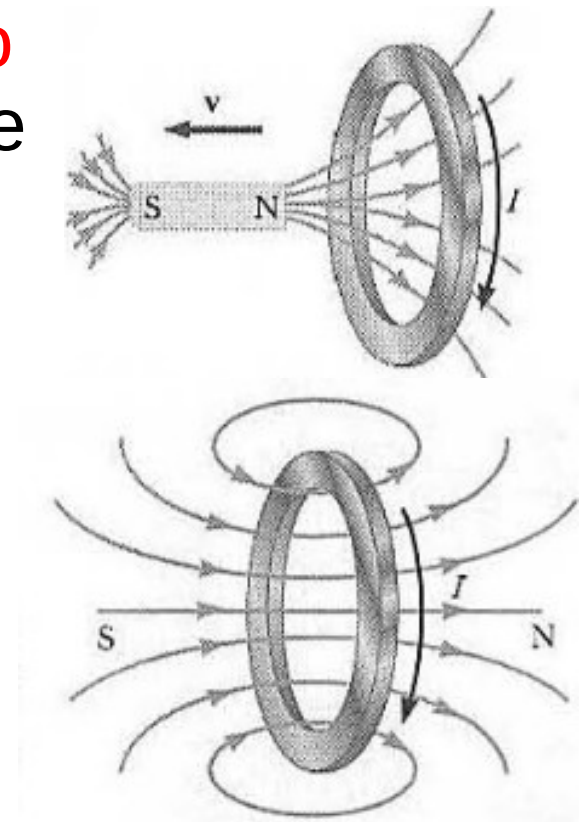
- **Aproximando-se, aumenta o fluxo do campo pra direita** através da espira, o que **induz uma corrente que gera um campo magnético pra esquerda**, i.e., que tenta **diminuir o fluxo total**, ou seja, se **opõe à causa inicial**.



# Lei de Lenz

Outro caso: Um ímã de barra aproximando e afastando-se de uma espira

- **Afastando-se**, diminui o **fluxo** do **campo** pra **direita**, o que **induz** uma **corrente** que **gera** um **campo magnético** pra **direita**, i.e., que tenta **aumentar** o **fluxo total**, também se **opondo** à **causa inicial**.





# Lei de Lenz

## Enigma Rápido 23.5

Em **balanças** de **braços iguais** do início do século XX (vide figura), observa-se às vezes que uma **folha** de **alumínio** fica **pendurada** por um dos **braços** e passa **entre** os **polos** de um **ímã** - por quê?



# Lei de Lenz

## Enigma Rápido 23.5

Resposta:

Ao se deslocar para dentro ou fora do campo magnético, correntes circulares são induzidas na folha, chamadas correntes de Foucault.



# Lei de Lenz

## Enigma Rápido 23.5

Resposta:

As **correntes de Foucault** são **orientadas** tal, que a **força** que o **campo causa** nelas se **opõe** ao **movimento da folha** (Lei de Lenz: O efeito se opõe à causa).

=> **Freio magnético**

Assim, a **balança não** fica **balaçando** e atinge o **equilíbrio** mais **rapidamente**.



# Lei de Lenz

## Exemplo 23.5 Aplicação da Lei de Lenz

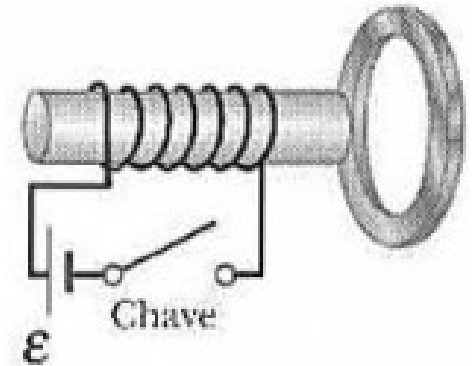
Uma **bobina** de fio é colocada perto de um **eletroímã** como nesta figura.

Encontre a **direção** da **corrente induzida** na **bobina**

(a) no instante em que a **chave** é **fechada**,

(b) **depois** que a **chave** foi **fechada** por **vários segundos**  
e

(c) quando a **chave** é **aberta**.



# Lei de Lenz

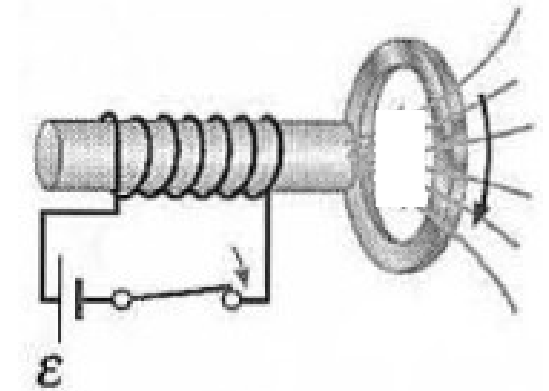
## Exemplo 23.5 Aplicação da Lei de Lenz

Resposta:

(a) **surgimento** de um **campo** da **direita** pra **esquerda**

=> uma **corrente** é **induzida**, que **gera** um **campo** da **esquerda** pra **direita**, isto é, na imagem no sentido **horário**.

Ou mais facilmente: no **sentido oposto** à **corrente** que **começa** a **fluir** no **eletroímã**.



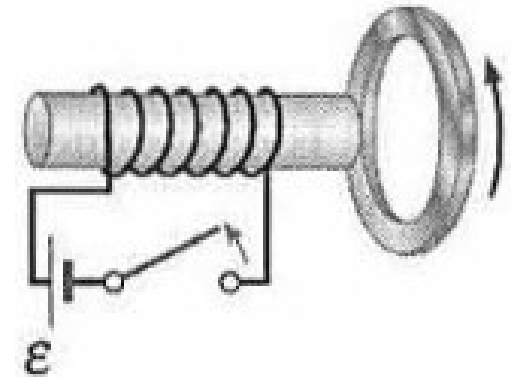
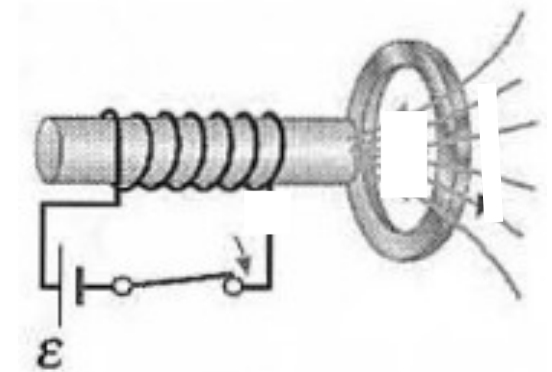
# Lei de Lenz

## Exemplo 23.5 Aplicação da Lei de Lenz

Resposta:

(b) **campo** do **eletroímã** **constante**  
=> **nenhuma corrente induzida**

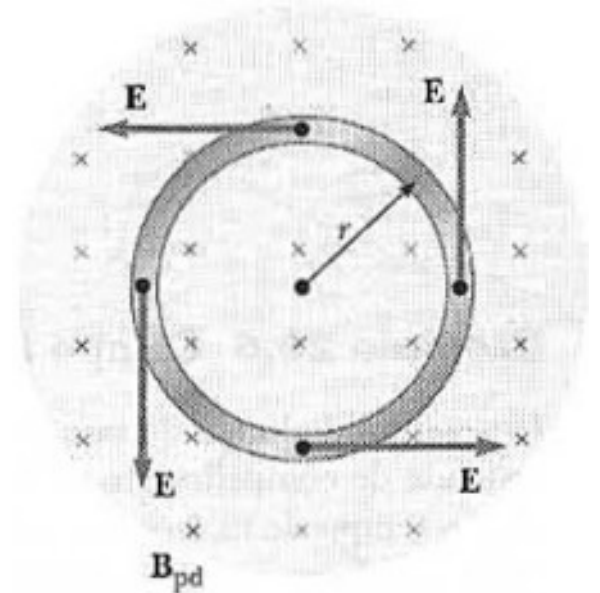
(c) **diminuição** do **campo** do **eletroímã**  
=> **corrente** no sentido **anti-horário**.



# Fems Induzidas e Campos Elétricos

Um **campo magnético variável** induz uma **fem** ao longo de um **circuito**, mas uma **fem** também é um **campo elétrico integrado** ao longo de um **circuito**.

Será que podemos ver esta **fem induzida** como o resultado de um **campo elétrico induzido**?



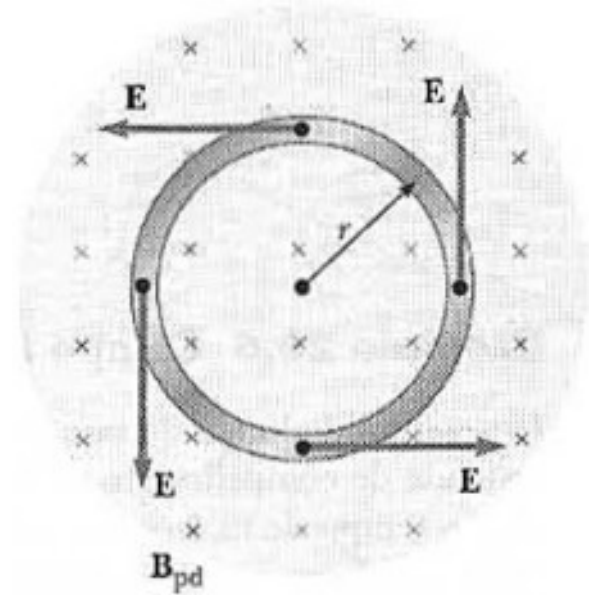
**Sim!**

Um **campo magnético variável** induz um **campo elétrico** até na ausência de condutores ou cargas.

# Fems Induzidas e Campos Elétricos

Assim, podemos formular a **Lei de Faraday-Lenz** também em termos do **campo elétrico induzido**:

A **variação** de um **campo magnético** induz um **campo elétrico**, cuja **integral de linha** sobre um **caminho fechado** equivale à (negativa) **variação** do **fluxo** do **campo magnético** através da **área limitada** pelo **caminho**.



$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -d\Phi_B/dt$$



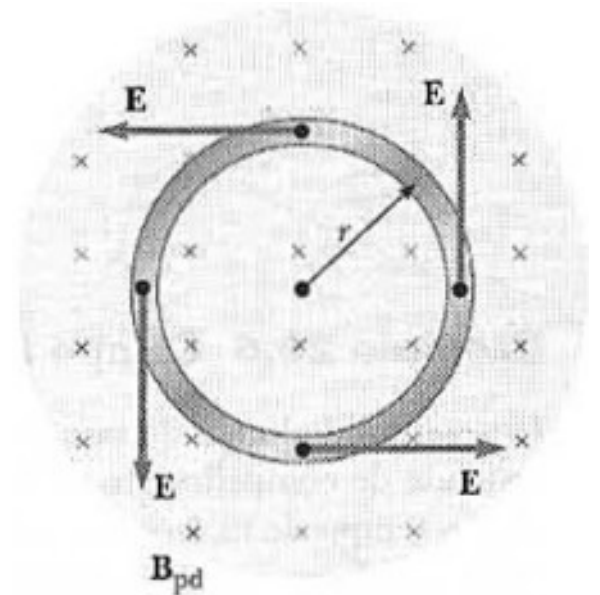
# Fems Induzidas e Campos Elétricos

Este **campo elétrico** é **diferente** do **campo eletrostático**, i.e. do campo devido a **cargas estacionárias**:

A **integral de linha** sobre um **caminho fechado** não é nulo.

=> **Não** é um **campo conservativo** e **não** pode ser associado a um **potencial**.

As **linhas** deste **campo** não **iniciam** em **cargas positivas** e **nem terminam** em **cargas negativas**.



# Fems Induzidas e Campos Elétricos

## Pensando a Física 23.4

Ao estudar **campos elétricos**, observamos que as **linhas do campo elétrico** começam em **cargas positivas** e **terminam** em **cargas negativas**.

**Todas as linhas do campo elétrico** começam e terminam em **cargas**?

# Fems Induzidas e Campos Elétricos

## Pensando a Física 23.4

Ao estudar **campos elétricos**, observamos que as **linhas do campo elétrico** começam em **cargas positivas** e **terminam** em **cargas negativas**.

**Todas as linhas do campo elétrico** começam e terminam em **cargas**?

**Resposta:**

**Não**, apenas as de **campos eletrostáticos**.  
As de **campos induzidos** não.

# Fems Induzidas e Campos Elétricos

## Exemplo 23.6 Campo Elétrico Induzido por um Campo Magnético Variável em um Solenóide

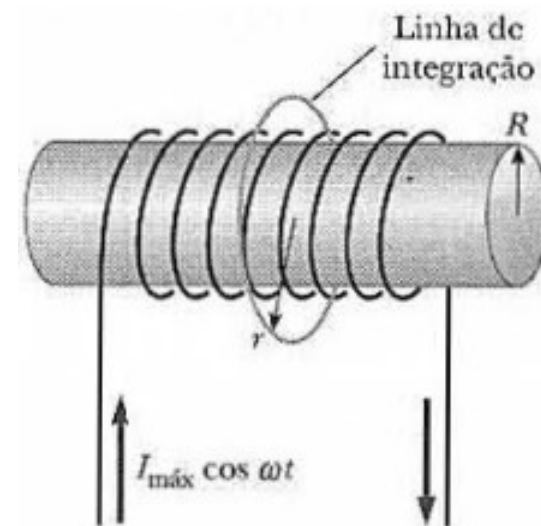
Um **solenóide** longo de **raio**  $R$  tem  $n$  **espiras** de fio **por unidade** de **comprimento** e **conduz** uma **corrente** que **varia** com o tempo de maneira **senoidal** com  $I = I_{\max} \cos \omega t$ ,

onde  $I_{\max}$  é a **corrente máxima** e

$\omega$  é a **frequência angular** da **fonte de corrente alternada**.

(a) Determine a **magnitude** do **campo elétrico induzido** **fora** do **solenóide**, a uma **distância**  $r > R$  de seu **eixo** longo **central**.

(b) Qual é a **magnitude** do **campo elétrico induzido** **dentro** do **solenóide**, a uma **distância**  $r$  do seu **eixo**?



# Fems Induzidas e Campos Elétricos

## Exemplo 23.6 Campo Elétrico Induzido por um Campo Magnético Variável em um Solenóide

Solução:

$B = \mu_0 n I = \mu_0 n I_{\max} \cos \omega t$  || eixo do solenóide no **interior** deste, 0 **fora**.

**Dentro e fora:** Pela **simetria**, **E circular** em torno do eixo

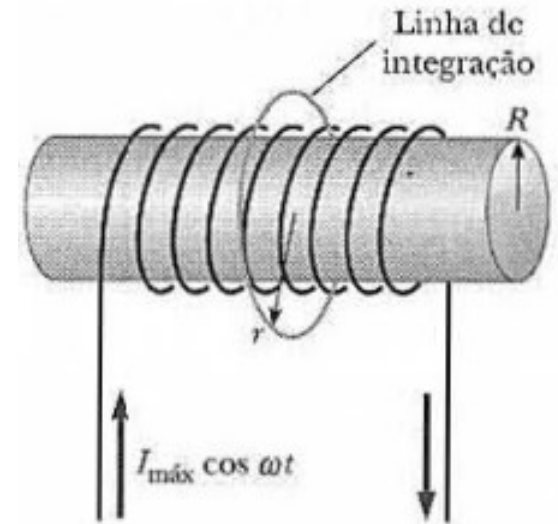
=> em **espiras circulares**,  $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \oint E ds = E \oint ds = 2\pi r E$

(a) "Espira" circular com  $r > R$  centrada no eixo (como na figura):

$$E = -1/2\pi r d\Phi_B/dt = -1/2\pi r d(B\pi R^2)/dt$$

$$= -\pi R^2/2\pi r d(\mu_0 n I_{\max} \cos \omega t)/dt$$

$$= -R^2 \mu_0 n I_{\max} / 2r d(\cos \omega t)/dt = \mu_0 n I_{\max} \omega R^2 / 2r \sin \omega t$$



# Fems Induzidas e Campos Elétricos

## Exemplo 23.6 Campo Elétrico Induzido por um Campo Magnético Variável em um Solenóide

Solução:

$B = \mu_0 n I = \mu_0 n I_{\max} \cos \omega t$  || eixo do solenóide no **interior** deste, 0 **fora**.

**Dentro e fora:** Pela **simetria**, **E circular** em torno do eixo

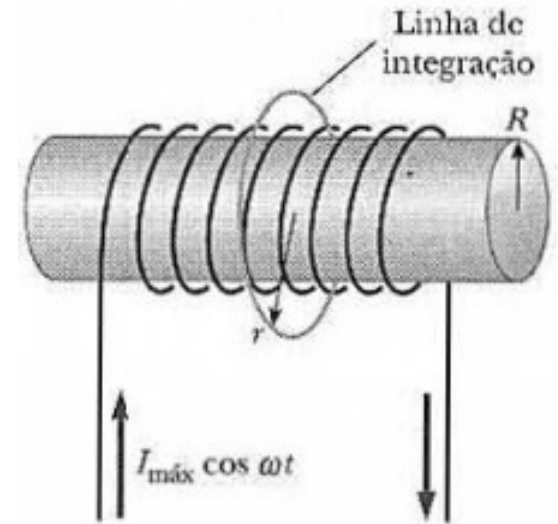
=> em **espiras circulares**,  $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \oint E ds = E \oint ds = 2\pi r E$

(b) "Espira" circular com  $r < R$  centrada no eixo:

$$E = -1/2\pi r d\Phi_B/dt = -1/2\pi r d(B\pi r^2)/dt$$

$$= -\pi r^2/2\pi r d(\mu_0 n I_{\max} \cos \omega t)/dt = -1/2 r \mu_0 n I_{\max} d(\cos \omega t)/dt$$

$$= 1/2 \mu_0 n I_{\max} \omega r \sin \omega t$$





Universidade Federal do ABC

# Fenômenos Eletromagnéticos

## FIM PRA HOJE

