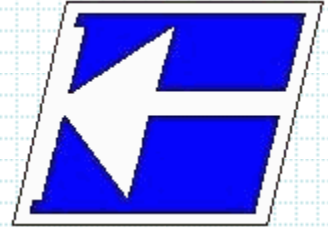


**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina**  
**Departamento Acadêmico de Eletrônica**  
**Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica**



# **Revisão de Eletromagnetismo**

**Prof. Joabel Moia.**

**Florianópolis, agosto de 2018.**

# Bibliografia para esta aula

## Introdução comparativa

1. Conceitos iniciais;
2. Grandezas eletromagnéticas;
3. Perdas magnéticas;
4. Tipos de núcleos;
5. Lei de Lenz e Lei de Faraday;
6. Indutores e transformadores.



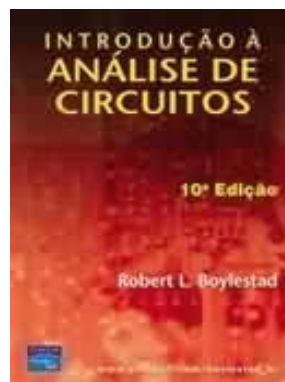
**TEXAS  
INSTRUMENTS**

<http://www.ti.com>

2001 Magnetics Design Handbook - MAG100A

Duration	1 Day
Price	Free
Course Documents/ Reference Material	Ref. Design Sect. R5-1: Coupled Filter Inductors Yield Improved Performance Introduction and Basic Magnetics (Magnetics Design for Sw. Power Supplies) Magnetic Core Characteristics Windings Power Transformer Design Inductor and Flyback Transformer Design Ref. Design Sect. R1-1: Magnetic Core Properties Ref. Design Sect. R2-1: Eddy Current Losses in X-former Windings Ref. Design Sect. R3-1: Deriving the Equivalent Electrical Circuit Ref. Design Sect. R4-1: The Effect of Leakage Inductance on Performance Ref. Design Sect. R6-1: How to Design a Transformer with Fractional Turns Ref. Design Sect. R7-1: Winding Data All 2001 Magnetics Design Handbook Sections in a single compressed zip file

Cap. 11, 12 e 21.



## Eletricidade (eletrostática)

Fenômeno já conhecido na Grécia antiga. Ao serem atritados, determinados materiais (**âmbar**, em particular), adquiriam a propriedade de atrair pequenos objetos (ação de uma **força elétrica**).

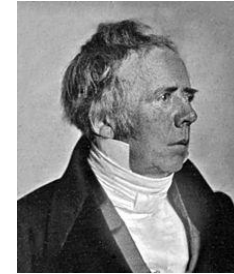
## Magnetismo (magnetostática)

Os gregos também sabiam que determinadas pedras (chamadas de **magnetita**) atraíam limalhas de ferro (ação de uma **força magnética**).

## Eletromagnetismo

No século XIX, após os trabalhos de Oersted e Faraday, Maxwell escreveu as equações que unificaram a eletricidade e o magnetismo, mostrando assim que ambos eram manifestações de um mesmo fenômeno, o **eletromagnetismo**.

1820 – **Hans Christian Ørsted**: descobriu que uma corrente elétrica gera um campo magnético.



\*1777 - †1851

1826 – **André-Marie Ampère**: quantificou a relação entre corrente e campo magnético.



\*1775 - †1836

1831 – **Michael Faraday**: descobriu que variando um campo magnético gera uma corrente em caminho fechado.



\*1791 - †1867

1831 – **Heinrich Lenz**: mostrou que a corrente gera um campo que se opõe ao campo gerado.



\*1804 - †1865

1865 – **James Clerk Maxwell**: unificou as relações elétricas e magnéticas.



\*1831 - †1879

## Campo elétrico ( $E$ )

- Devido a cargas elétricas\*
- Carga isolada
- Linhas de campos da carga + para carga -

## Campo magnético ( $B$ )

- Devido correntes\*
- Pares de polos (norte e sul)
- Linhas de campos norte até o sul (fechadas)

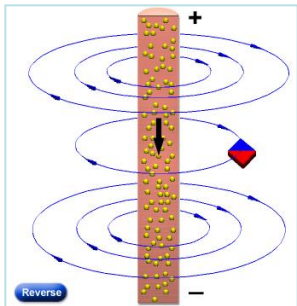
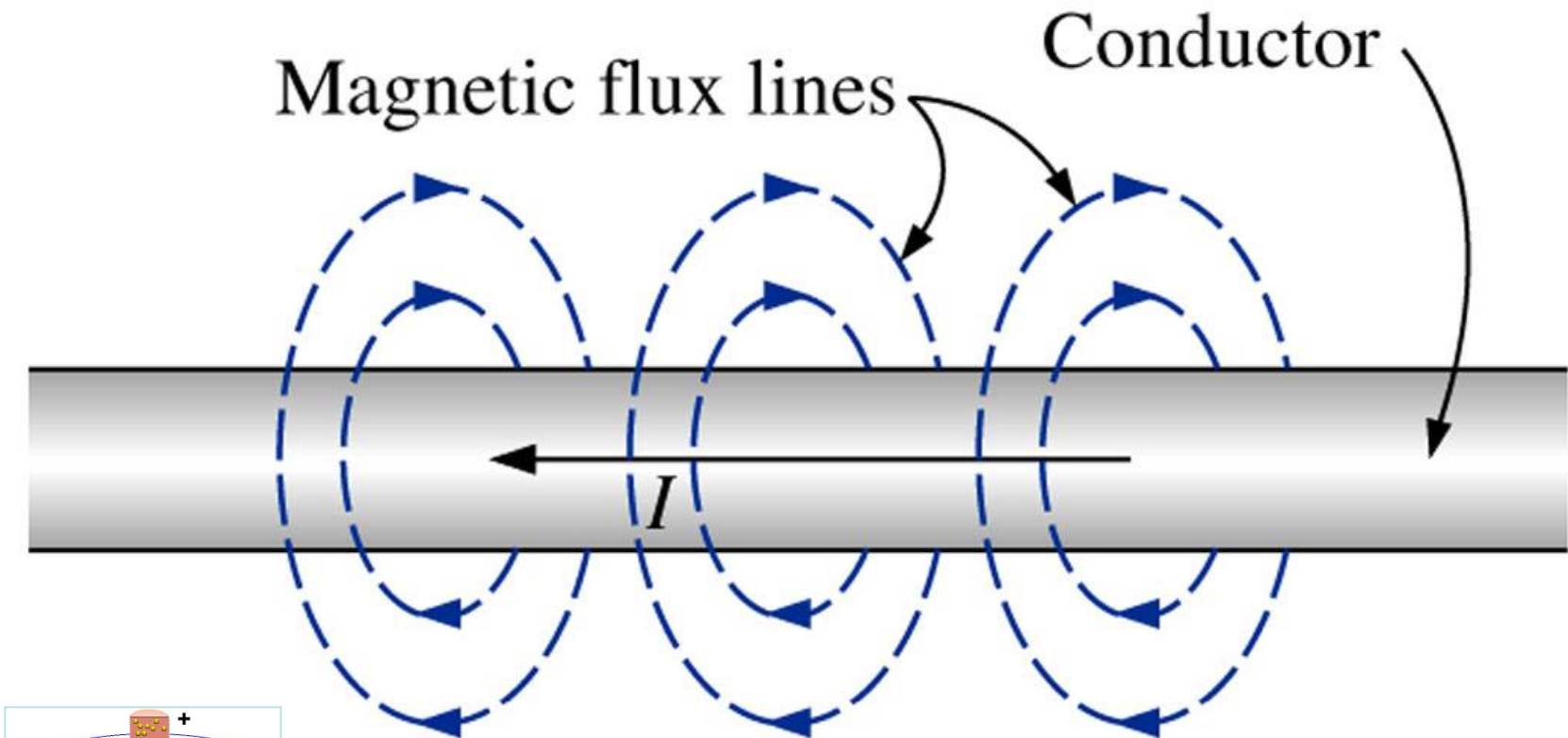
\* Obs: campos elétricos (magnéticos) também podem ser produzidos por campos magnéticos (elétricos) variáveis no tempo.

Nunca foram observados  
monopolos magnéticos

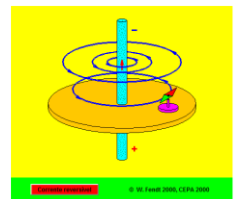


Quando se quebra um ímã,  
sempre se obtêm dois novos  
polos

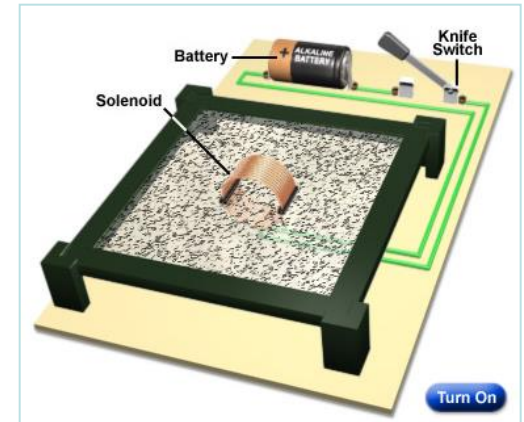
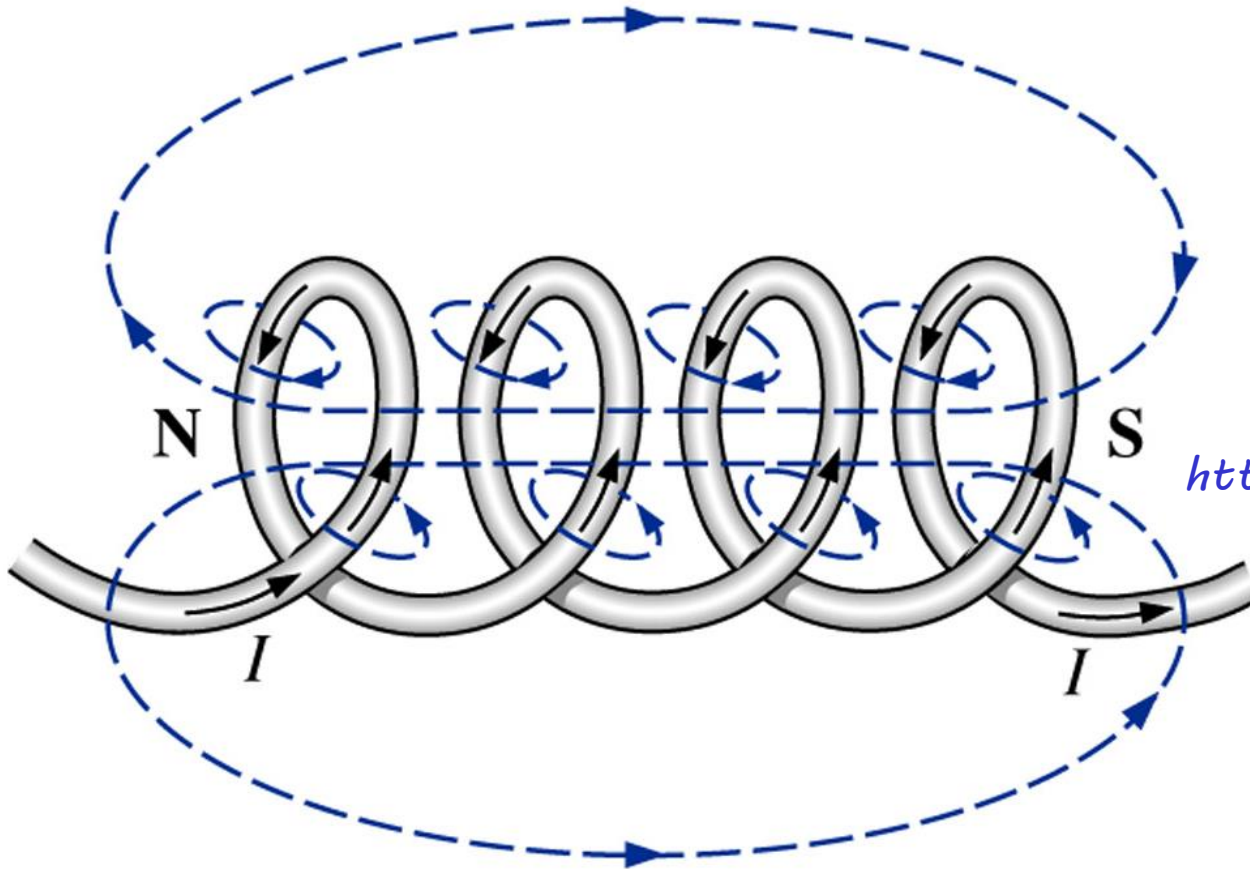
## Linhas de campo em um condutor retilíneo percorrido por corrente:



<http://www.walter-fendt.de/ph11br/>



## Linhas de campo em uma bobina percorrida por corrente:



<http://www.magnet.fsu.edu>



## Fluxo magnético:

- Fluxo ( $\phi$ ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área.
- Unidade é weber [Wb];
- Um Weber corresponde a  $1 \times 10^8$  linhas de campo.

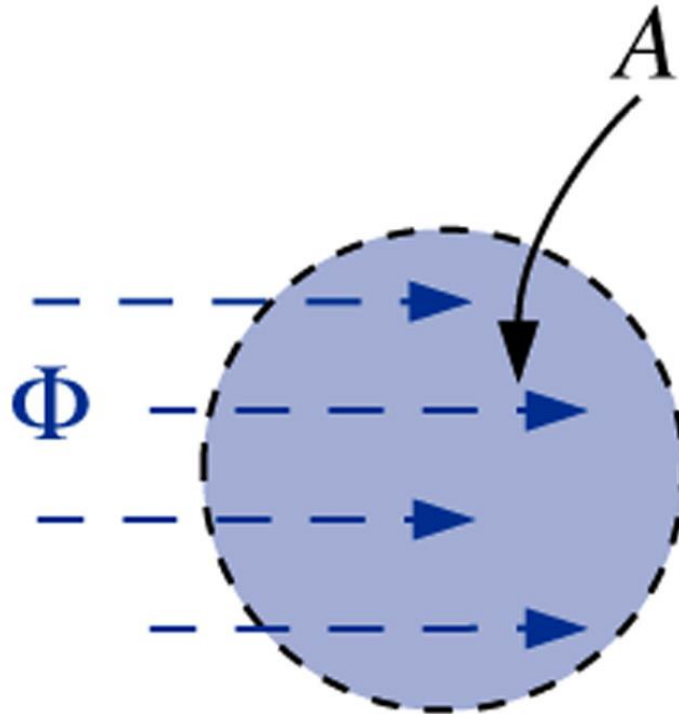
## Densidade de fluxo magnético:

- Densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área.
- Unidade é Tesla [T];
- Um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.



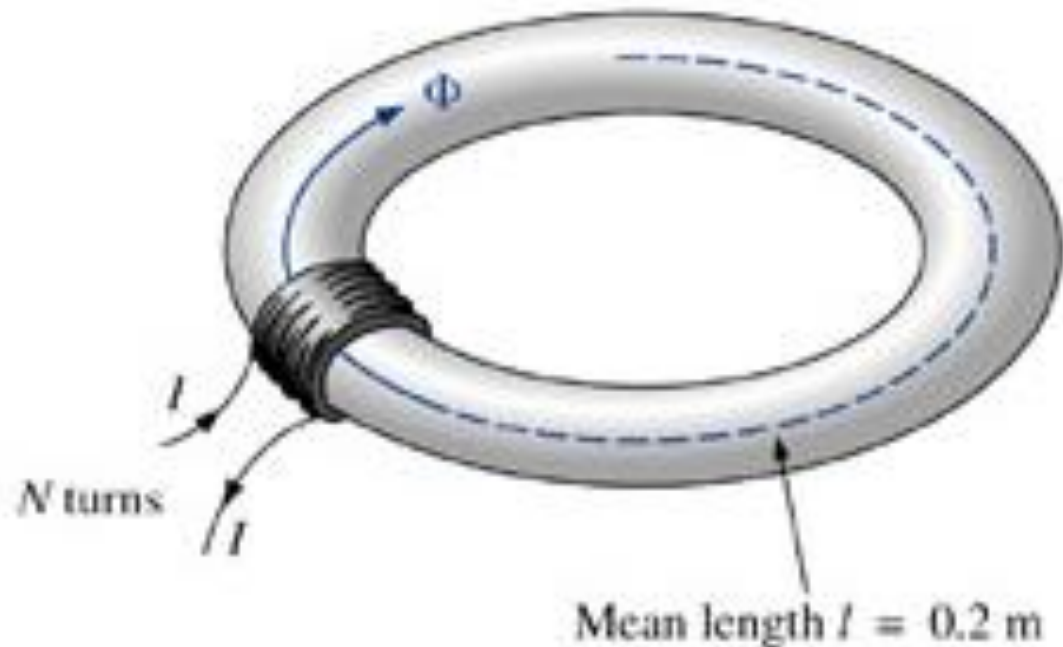
$$B = \frac{\Phi}{A}$$

- B = teslas (T)
- $\Phi$  = webers (Wb)
- A = metros quadrados (m<sup>2</sup>)



## O campo eletromagnético depende basicamente de:

- Da intensidade da corrente;
- Da forma do condutor (reto, espira ou solenóide);
- Do meio (permeabilidade magnética);
- Das dimensões;
- Do número de espiras.



## Correntes parasitas:

- Induzidas no núcleo, devido ao mesmo ser, normalmente, de material ferromagnético.

## Perdas por histerese:

- Trabalho realizado pelo campo (H) para obter o fluxo (B);

- Expressa a dificuldade que o campo (H) terá para orientar os domínios de um material ferromagnético.

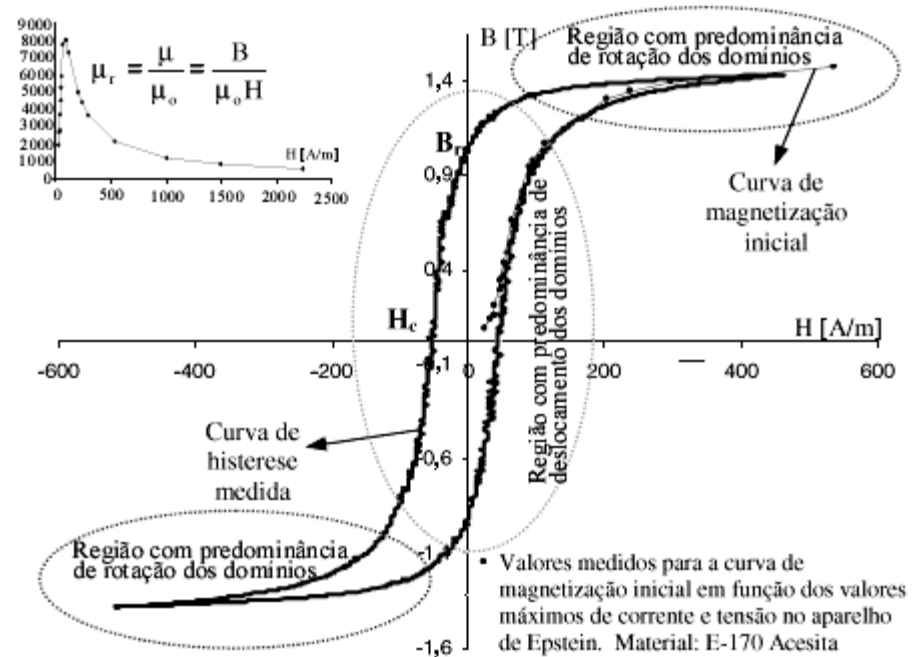


Figura 1: Curva representativa da histerese medida à 1Hz.

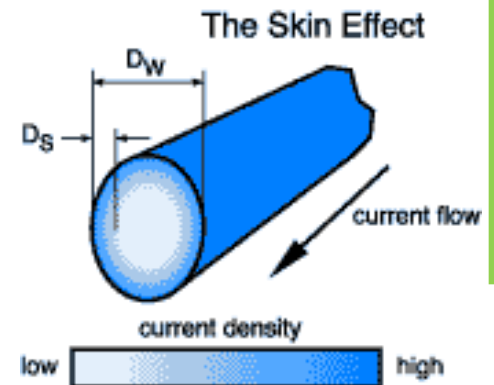
## Efeito de proximidade:

-Relaciona um aumento na resistência em função dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

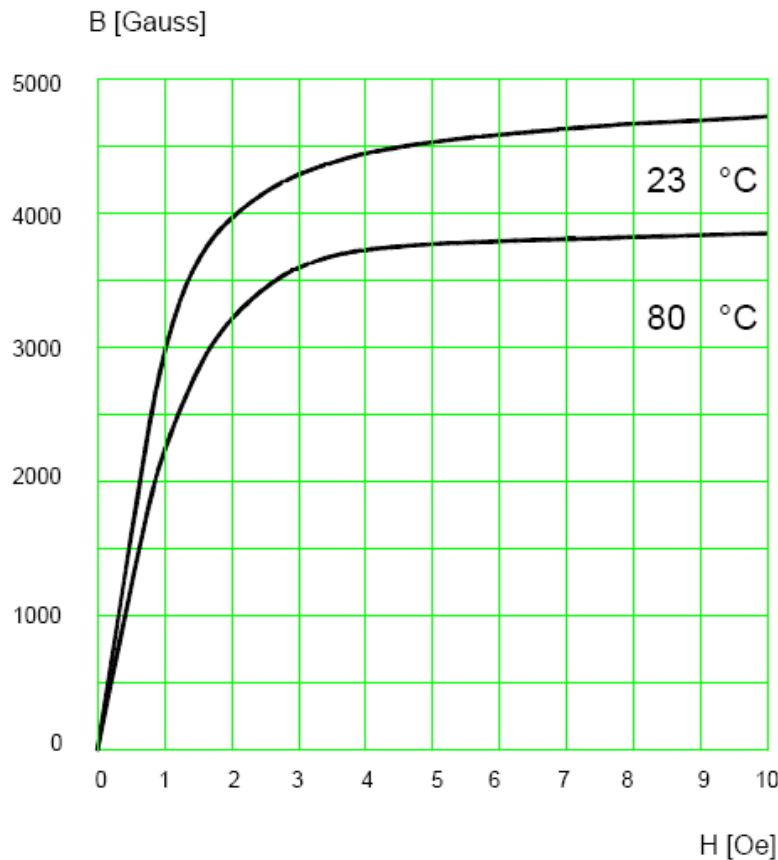
## Efeito pelicular (efeito skin):

-Restringe a secção do condutor para frequências elevadas.  
-Em altas frequências, a tensão oposta induzida se concentra no centro do condutor, resultando em uma corrente maior próxima à superfície do condutor e uma rápida redução próxima do centro.

Profundidade de penetração  $\longrightarrow \Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} [cm]$



# Permeabilidade versus temperatura



Típico  $B \times H$



$\mu \times$  Temperatura

Onde  $B$  é a indução magnética e  $H$  é a intensidade de campo magnético

$$B = \mu_l \times H$$

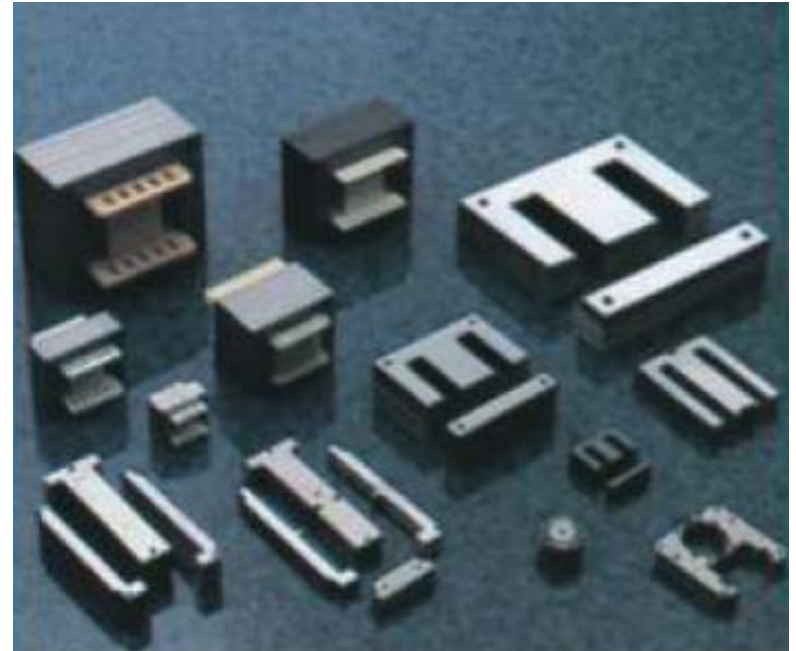
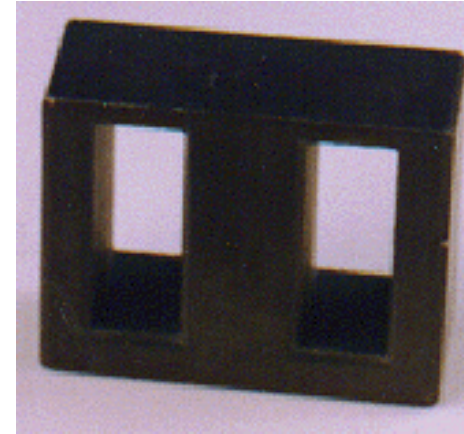
$\mu_l \Rightarrow$  permeabilidade magnética a grandeza que exprime a diferença magnética entre os diversos materiais. Materiais ferromagnéticos apresentam valores grandes.

## Perdas magnéticas:

- Por correntes de Foucault;
- Perda por histerese.

## Perdas dependem de:

- Metalurgia do material;
- Porcentagem de silício;
- Frequência;
- Espessura do material;
- Indução magnética máxima.



## Perdas nos componentes magnéticos

Equação de Steinmetz: é normalmente utilizada para calcular a perda total no núcleo magnético para uma alimentação senoidal.

$$P_{fe} = K_c f^\alpha B_{\max}^\beta$$

$P_{fe}$  = perda no núcleo por unidade de volume

$B_{\max}$  = valor máximo da densidade de fluxo magnético para uma excitação senoidal

$K_c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  = constantes do núcleo fornecidas pelos fabricantes



# Núcleos magnéticos

## Núcleos:

- Laminados
  - Ferro – silício de grão não orientado;
  - Ferro – silício de grão orientado.
- Compactados
  - Ferrites;
  - Pós metálicos.



## Tipo de materiais magnéticos

- Ferrites
- Nanocristalinos
- Amorfos
- Ferro silício (Si-Fe)
- Níquel ferro (Ni-Fe)
- Pó de ferro

# Núcleos magnéticos

Materials	Ferrites	Nanocrystalline	Amorphous
Model	Epcos N87	Viroperm 500 F	Metglas 2605
Permeability, $\mu_i$	2200	15 000	10 000–150 000
$B_{\text{peak}}$ , T	0.49	1.2	1.56
$\rho$ , $\mu\Omega\text{m}$	$10 \times 10^6$	1.15	1.3
Curie temp. $T_c$ , °C	210	600	399
$P_{\text{fe}}$ mW/cm <sup>3</sup>	288 at 0.2 T 50 kHz	312 at 0.2 T 100 kHz	294 at 0.2 T 25 kHz
$K_c$	16.9	2.3	0.053
$\alpha$	1.25	1.32	1.81
$\beta$	2.35	2.1	1.74

Materials	Si iron	Ni-Fe (permalloy)	Powdered iron
Model	Unisil 23M3	Magnetics Permalloy 80	Micro-metals 75 $\mu$
Permeability, $\mu_i$	5000–10 000	20 000–50 000	75
$B_{\text{peak}}$ , T	2.0	0.82	0.6–1.3
$\rho$ , $\mu\Omega\text{m}$	0.48	0.57	$10^6$
Curie temp. $T_c$ , °C	745	460	665
$P_{\text{fe}}$ mW/cm <sup>3</sup>	5.66 at 1.5 T 50 Hz	12.6 at 0.2 T 5 kHz	1032 at 0.2 T 10 kHz
$K_c$	3.388	0.448	1798
$\alpha$	1.70	1.56	1.02
$\beta$	1.90	1.89	1.89

# Núcleos magnéticos compactos



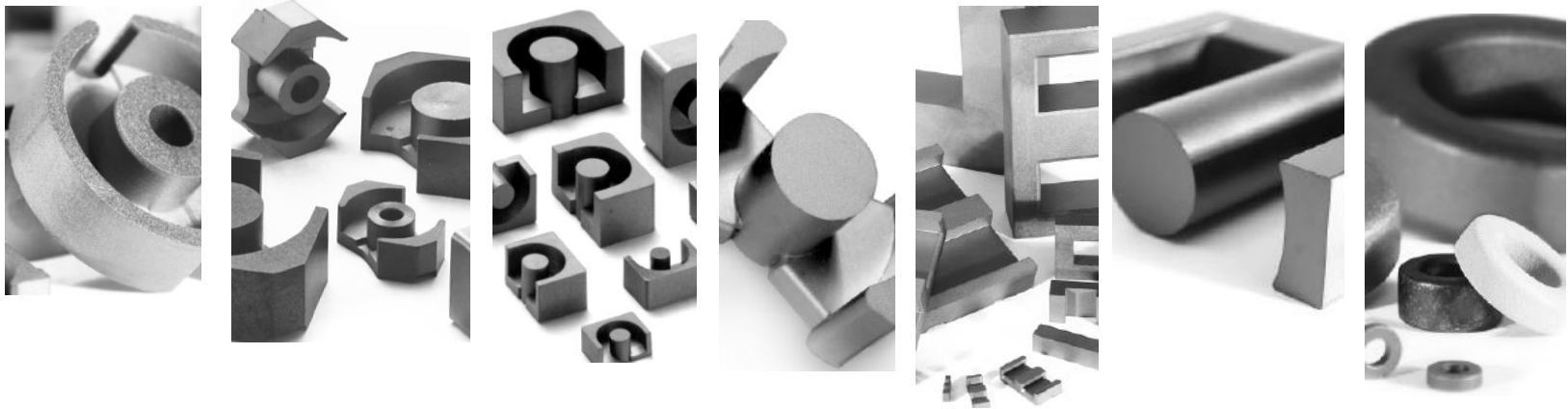
<http://www.magnetec.com.br>

# Núcleos magnéticos compactos

TABLE 1: FERRITE CORE COMPARATIVE GEOMETRY CONSIDERATIONS



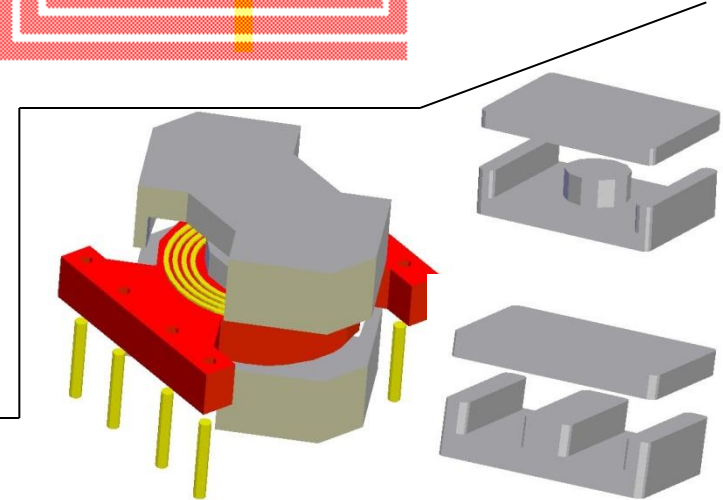
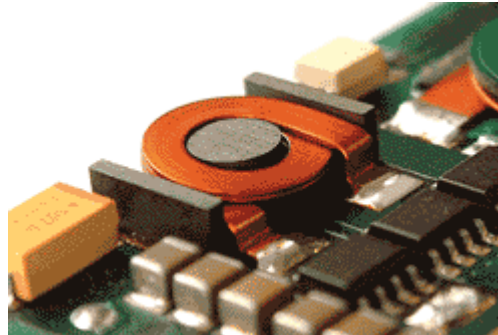
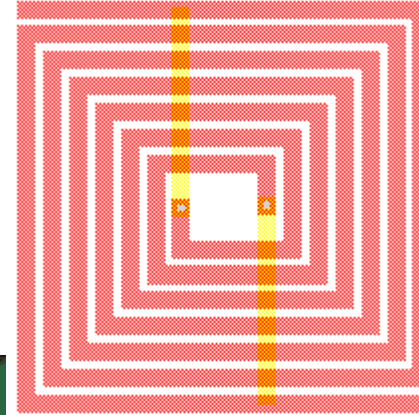
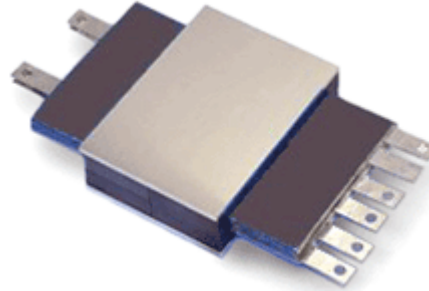
	POT CORES	DOUBLE SLAB, RM CORES	EP CORES	PQ CORES	E CORES	EC, ETD, EER, ER CORES	TOROIDS
See Catalog Section	6	7-8	9	10	11	12	13
Core Cost	High	High	Medium	High	Low	Medium	Very Low
Bobbin Cost	Low	Low	High	High	Low	Medium	None
Winding Cost	Low	Low	Low	Low	Low	Low	High
Winding Flexibility	Good	Good	Good	Good	Excellent	Excellent	Fair
Assembly	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Medium	None
Mounting Flexibility**	Good	Good	Good	Fair	Good	Fair	Poor
Heat Dissipation	Poor	Good	Poor	Good	Excellent	Good	Good
Shielding	Excellent	Good	Excellent	Fair	Poor	Poor	Good



<http://www.mag-inc.com>

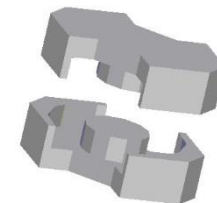
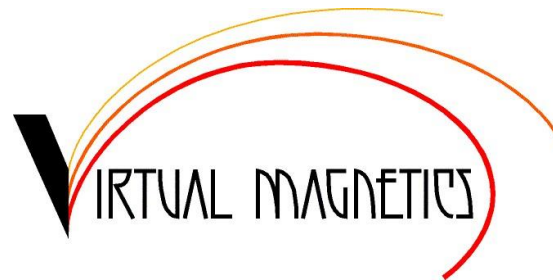


# Núcleos magnéticos compactos

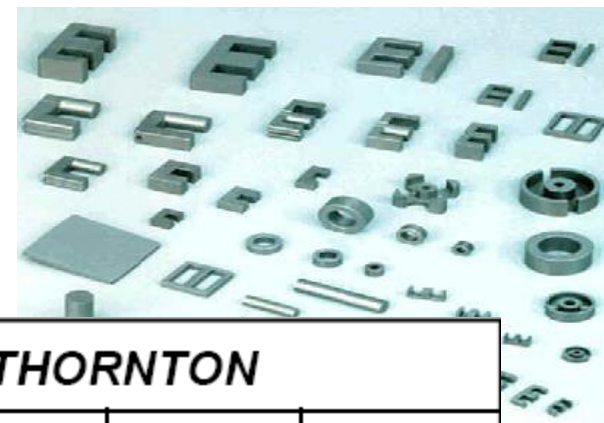
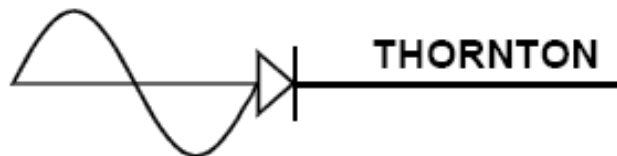


Núcleos planares

<http://virtual-magnetics.de>



# Núcleos magnéticos compactos



## ***CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS THORNTON***

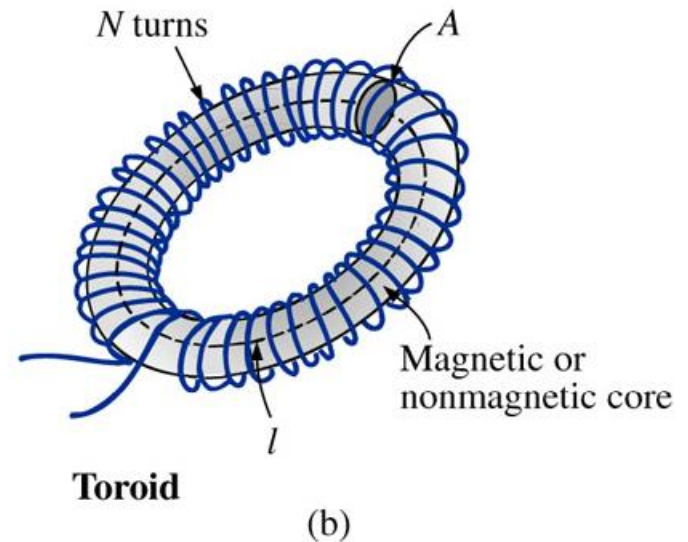
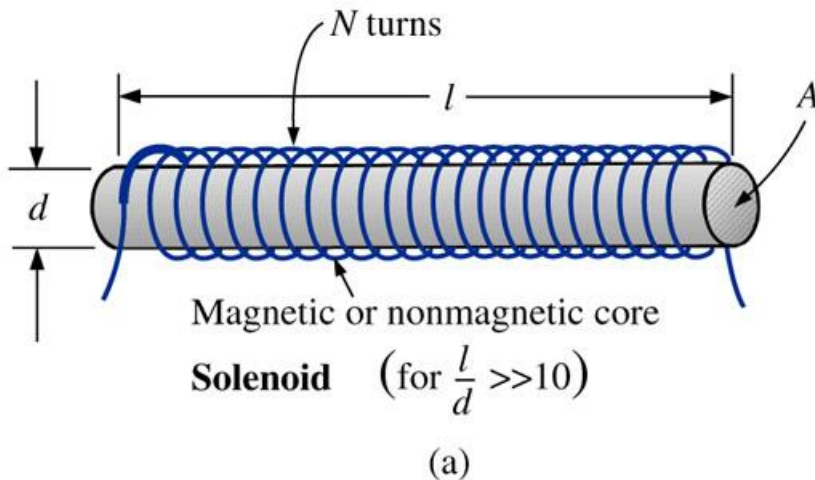
Material	IP 6	IP 12R	IP12E
Permeabilidade Inicial $\mu_i$	2000 $\pm$ 25%	2100 $\pm$ 25%	2300 $\pm$ 25%
Fator de Dissipação (Rel.) $f = 10$ [ Khz ]	-----	-----	-----
$\tan \delta / \mu_i \cdot 10^{-6}$ $f = 100$ [ Khz ]	-----	-----	-----
Temperatura de Curie [ °C ]	$\geq 165$	$\geq 210$	$\geq 210$
Coercividade [ A/m ]	18.0	18.0	18.0
Densidade de Fluxo (B ) a 15 Oe, 23 °C [ $10^{-3}$ T ]	480	510	510
Constante de Histerese ( $\eta_B$ ) [ $10^{-3}$ / T ]	$\leq 8.0$	-----	-----
Fator de desacomodação ( $D_F$ ) [ ppm ]	10.0	-----	-----
Densidade ( $\rho$ ) [ Kg/m <sup>3</sup> ]	4800	4800	4800



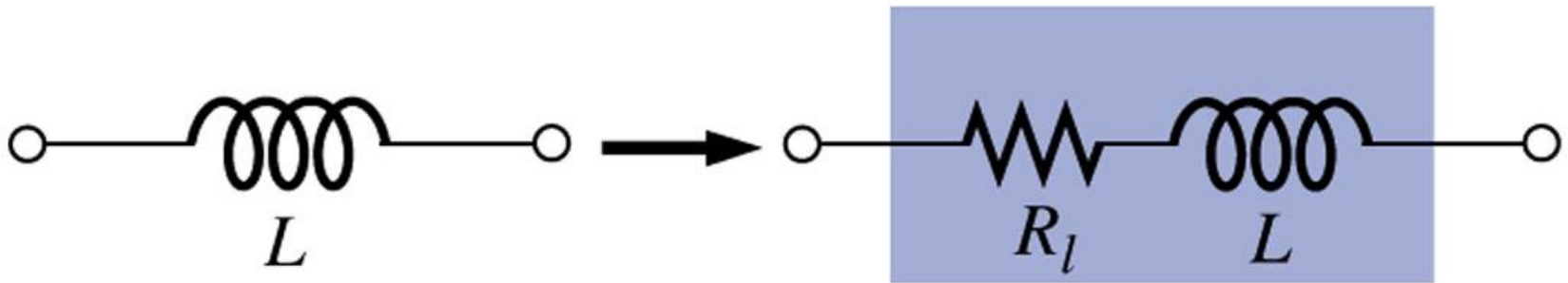
# Auto-Indutância

A propriedade de uma bobina de se opor a qualquer variação de corrente é medida pela sua auto-indutância ( $L$ ). A unidade de medida é o Henry (H).

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$



# Circuito equivalente de um indutor



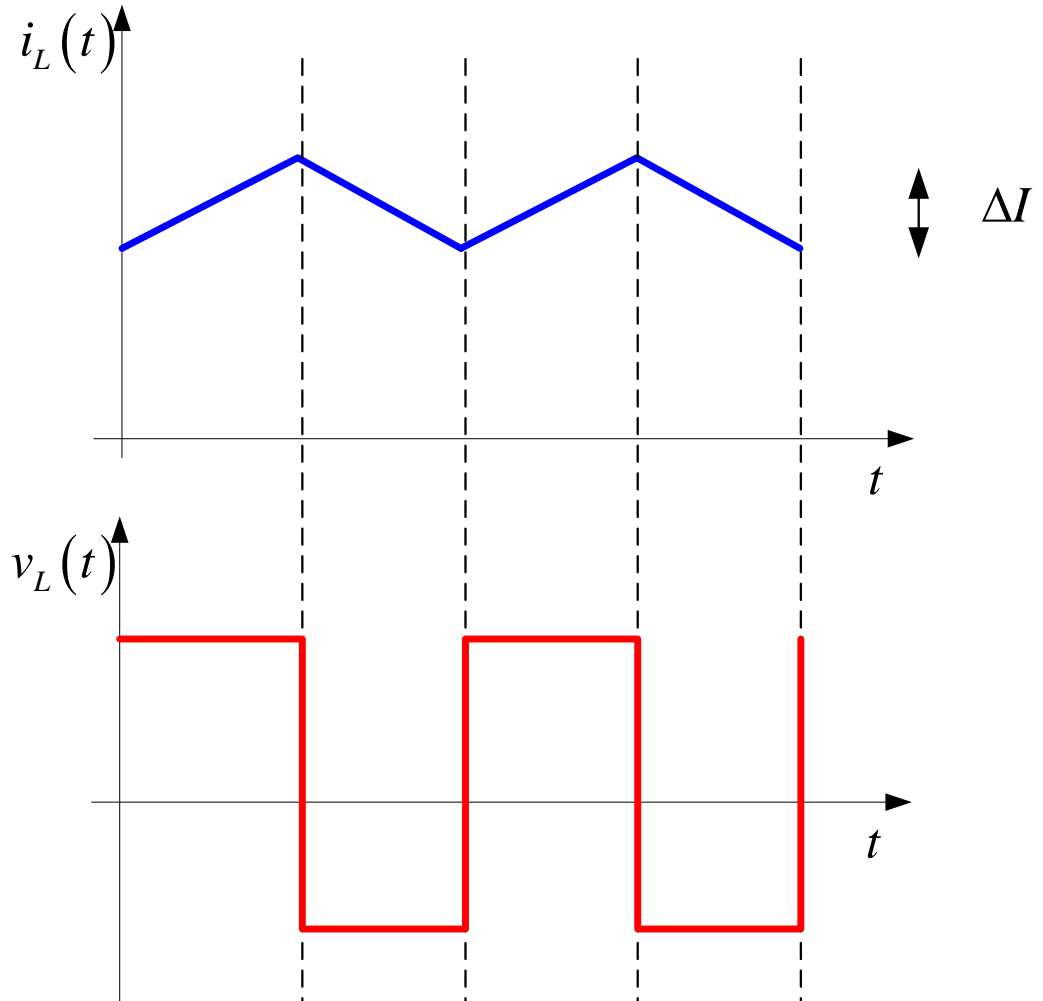
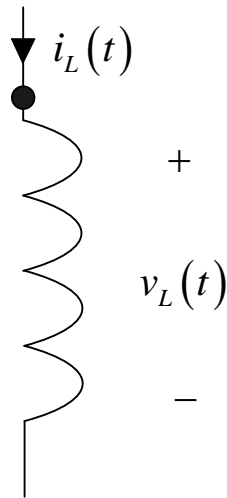
Circuito equivalente prático de um indutor

# Indutores na prática

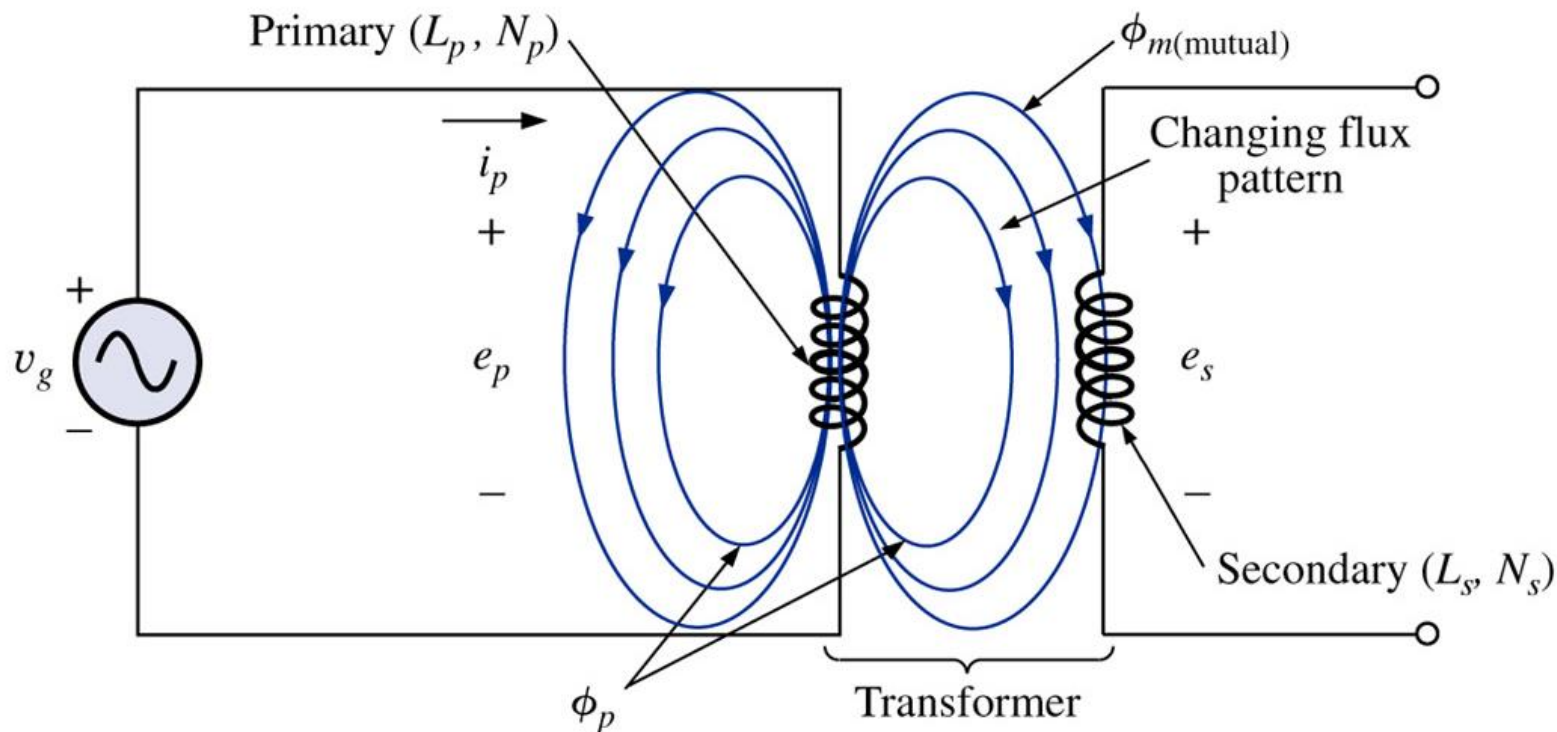


Considerando variações lineares:

$$v_{Lmed} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

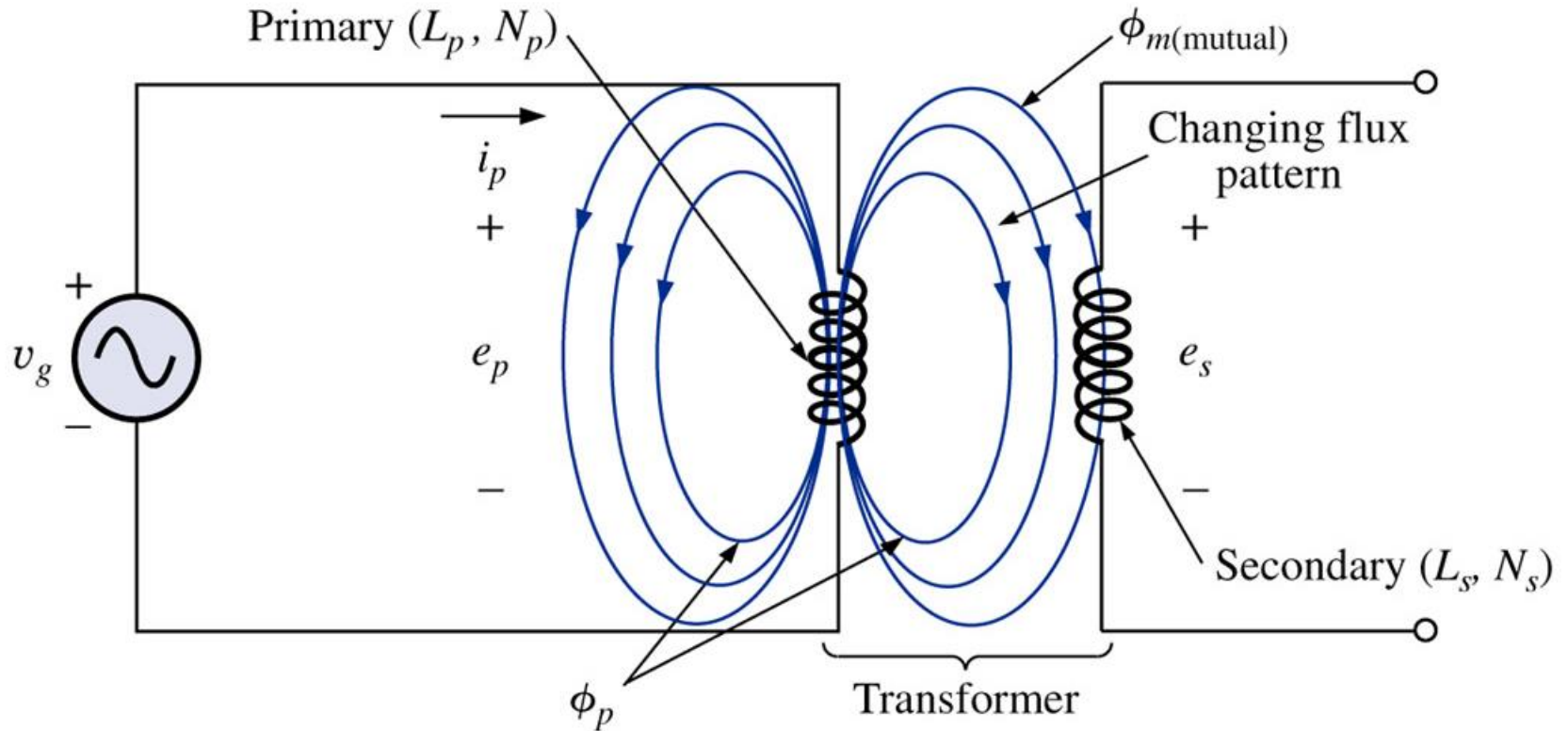


# Indutância mútua – fluxo mútuo



O enrolamento no qual a fonte é aplicada é denominado primário, e o enrolamento no qual a carga é conectada é chamado de secundário.

# Acoplamento magnético



$$k = \frac{\phi_m}{\phi_p}$$

O maior valor possível para  $k$  (coeficiente de acoplamento) é 1.

# Circuito equivalente de transformadores

Circuito equivalente completo de um transformador de núcleo de ferro real:

