

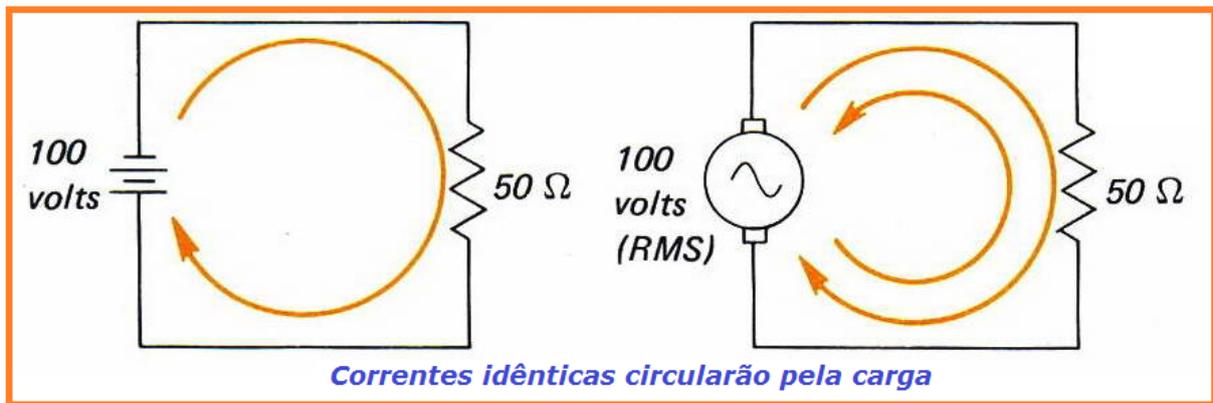
Circuitos AC não resistivos

EFEITOS DO ELETROMAGNETISMO - INDUTÂNCIA

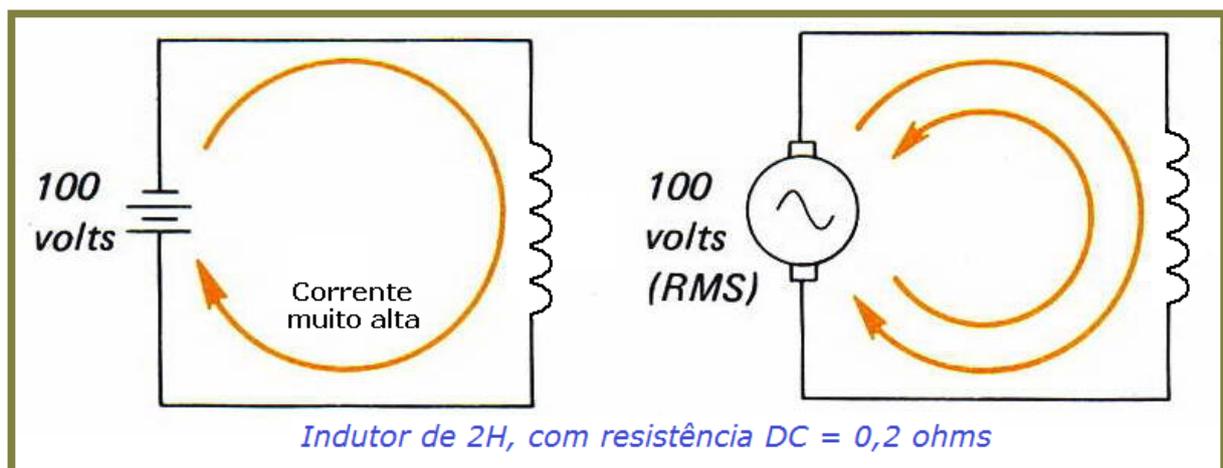
Num circuito DC a resistência é o único elemento que se opõe ao fluxo da corrente. Assim num circuito DC que possui uma resistência muito baixa, a tendência da corrente é aumentar muito, podendo assumir valores de *curto-circuito*.

Por outro lado, em um circuito AC não é apenas a resistência que se opõe ao fluxo da corrente: existem outras grandezas conhecidas como: *capacitância* e *indutância*.

Se uma carga puramente resistiva for alimentada por uma fonte de tensão AC ou DC, certamente pela mesma circularão correntes idênticas.



No caso da carga ser indutiva, podemos ter uma corrente tendendo a curto-circuito se alimentada por DC ou uma corrente aceitável se alimentada por AC.



Resistência DC é a resistência ôhmica do fio que é usado para enrolar o indutor ou a bobina. É óbvio que se tentarmos ligar esse indutor a uma fonte de DC, a corrente tenderá a um valor denominado de *curto-circuito*.

Veremos mais adiante que tal não ocorre se esse indutor for ligado em uma fonte de tensão AC, com o mesmo valor.

A resistência que o indutor oferece à passagem da corrente AC é conhecida como *reatância indutiva*.

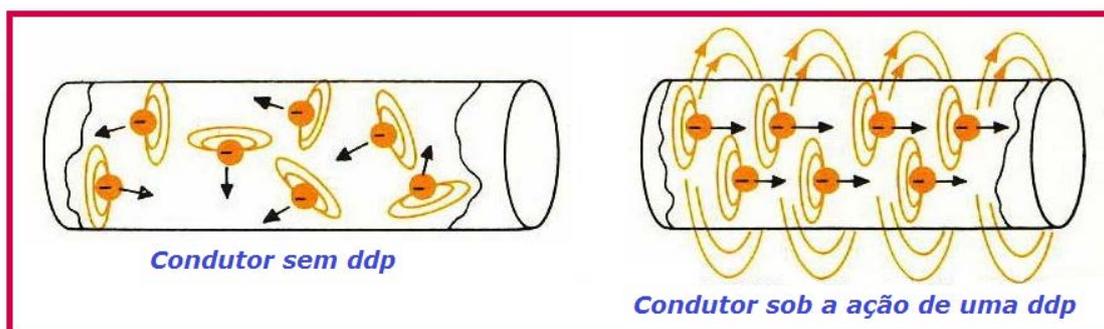
Efeitos do eletromagnetismo:

A corrente elétrica é formada por elétrons livres que se movimentam em um mesmo sentido, ao longo de um fio.

Cada elétron tem seu próprio campo quando em movimento, e como eles se movem no mesmo sentido os campos magnéticos de cada um deles se combinam produzindo assim um campo magnético total.

“Portanto, ao redor do condutor é criado um campo magnético, quando este é percorrido por uma corrente.”

Porém, quando nenhuma tensão é aplicada ao condutor, os campos magnéticos criados pelos elétrons são aleatórios e se anulam.



Quando o condutor é percorrido por uma corrente elétrica pela aplicação de uma *ddp* ao mesmo, os campos magnéticos individuais se combinam produzindo um campo magnético total com um movimento circular ao condutor.

Maior tensão produz mais corrente, que aumenta a intensidade do campo magnético.

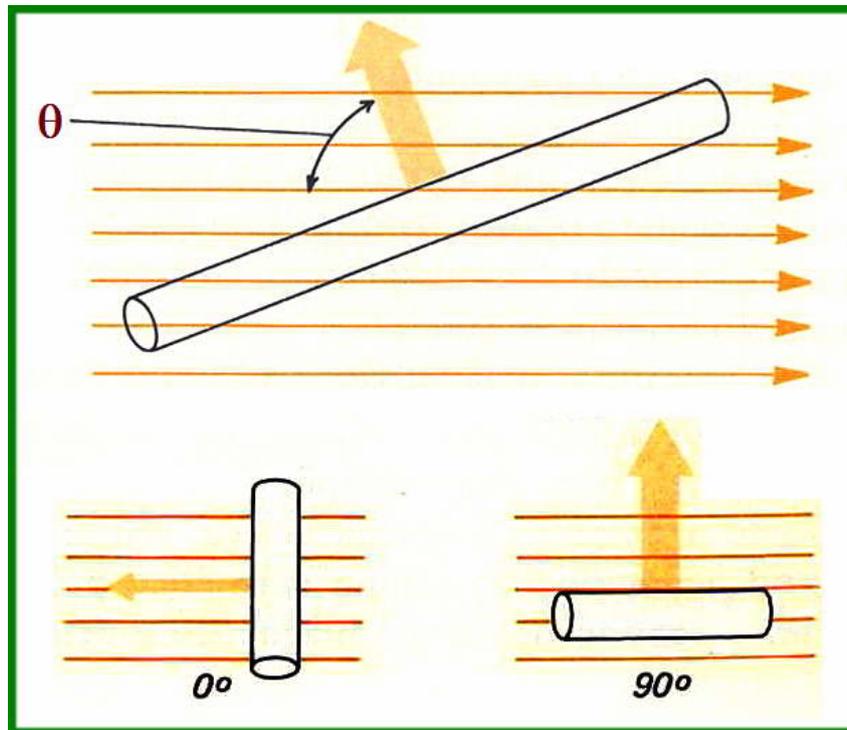
Pela regra da mão esquerda, por exemplo, pode-se determinar o sentido do campo magnético que envolve o condutor.

“Envolvendo o condutor com a mão esquerda e com o polegar apontando o sentido da corrente, os demais dedos indicarão o sentido do campo que circunda o condutor.”

FEM induzida:

A fem induzida (*força eletromotriz induzida*) ocorre quando um condutor corta um campo magnético, sendo que esse campo magnético promove a movimentação dos elétrons livres do condutor.

Alguns fatores são preponderantes para determinar a fem induzida e um dos mais importantes é sem dúvida a posição do condutor em relação ao campo magnético.



A figura acima mostra que a posição do condutor em relação ao campo magnético é proporcional ao ângulo θ . Isto significa que ângulo igual a zero não produz fem.

Portanto, a polaridade da fem induzida depende do sentido de movimento do condutor em um campo magnético, podendo ser determinado pela regra da mão direita, conforme visto em capítulo anterior.

“A regra da mão direita estabelece que se o polegar, o indicador e o dedo médio formarem ângulos retos entre si, apontarão, respectivamente, o sentido do movimento do condutor, o sentido do campo magnético e o sentido da fem induzida.”

Outros fatores que determinam a fem, são:

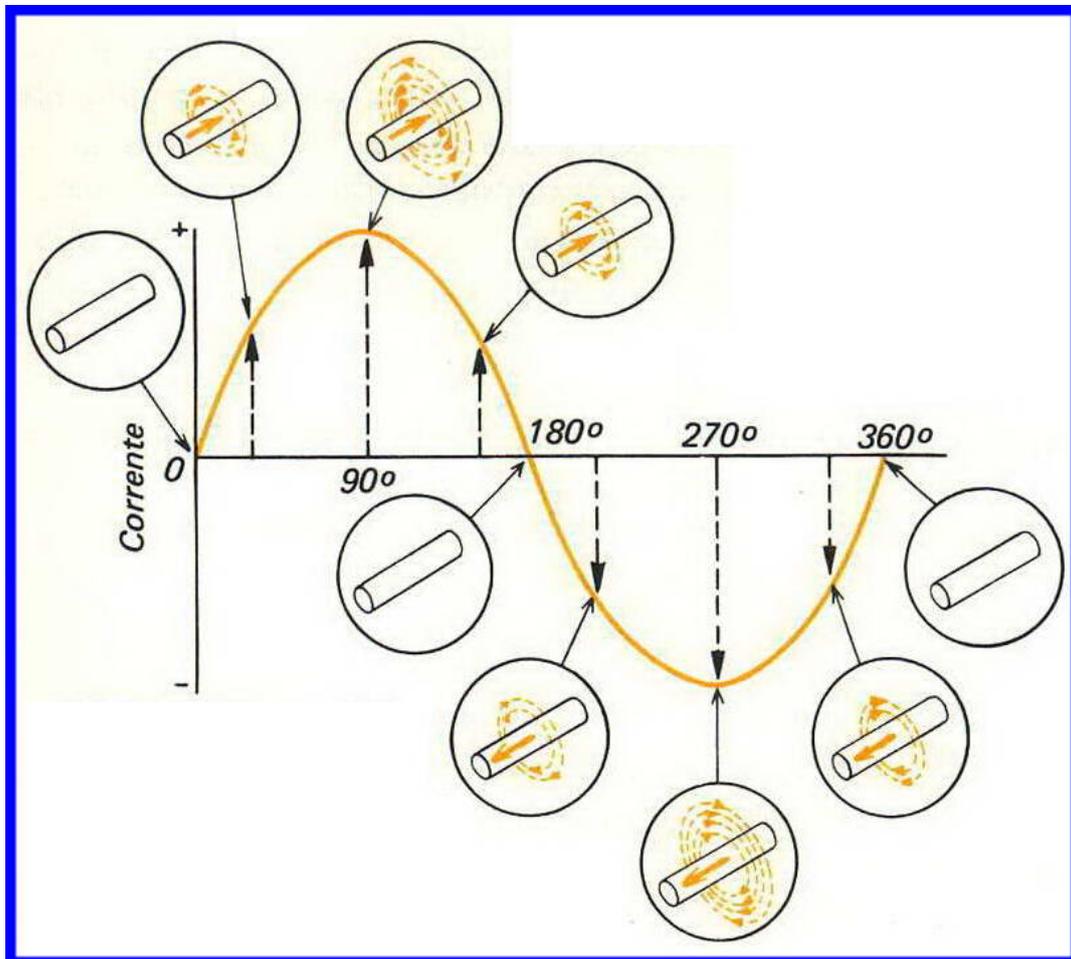
1. intensidade do campo magnético
2. comprimento do condutor
3. velocidade de movimento do condutor no campo magnético

Campo magnético criado por uma senóide:

Quando se aplica uma tensão DC sobre um condutor, a corrente atinge um valor máximo quase que instantaneamente, o mesmo acontecendo com o campo magnético criado ao seu redor, que atinge um valor máximo de forma instantânea, que permanece constante até que seja eliminada a fonte de tensão DC.

A figura abaixo ilustra o campo magnético criado por uma corrente senoidal, em um ciclo completo.

Observa-se que esse campo magnético é dependente da intensidade e do sentido da corrente, ou seja, *o campo magnético é variável*.



O campo magnético criado quando a senóide atinge seu valor máximo, em 90 graus e 270 graus é máximo, porém com sentidos contrários.

Autoindução:

Para entender o que é autoindução, é preciso esclarecer dois aspectos importantes:

1. A *fem* é provocada quando um condutor se movimenta dentro de um campo magnético fixo.
2. A *fem* também é gerada quando o condutor é fixo, mas, o campo magnético é que se movimenta.

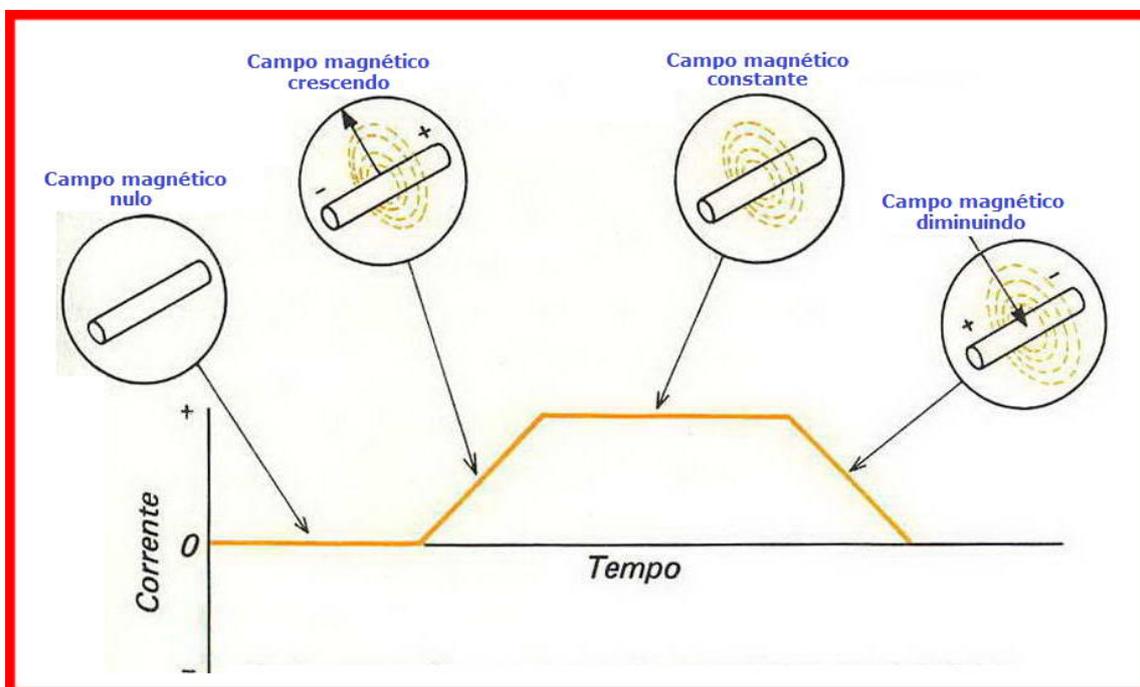
Pois bem, vimos que quando o condutor é percorrido por uma corrente alternada o campo magnético gerado varia de intensidade e sentido. Conforme ilustra a figura acima, varia de zero até um valor máximo em ambos os sentidos.

Então, ocorre o seguinte:

1. Quando o campo começa a crescer as linhas de fluxo ou linhas de força se expandem do centro do condutor para fora.
2. Essa expansão pode ser interpretada como se as linhas de força estivessem cortando o condutor.
3. Neste caso, temos como resultado uma *fem de autoindução* em que a campo se movimenta ao invés do condutor.

A figura abaixo ilustra uma forma de onda de corrente que varia se intensidade em função do tempo.

Observe o efeito da corrente na criação do campo magnético (nulo, constante, crescendo e diminuindo).



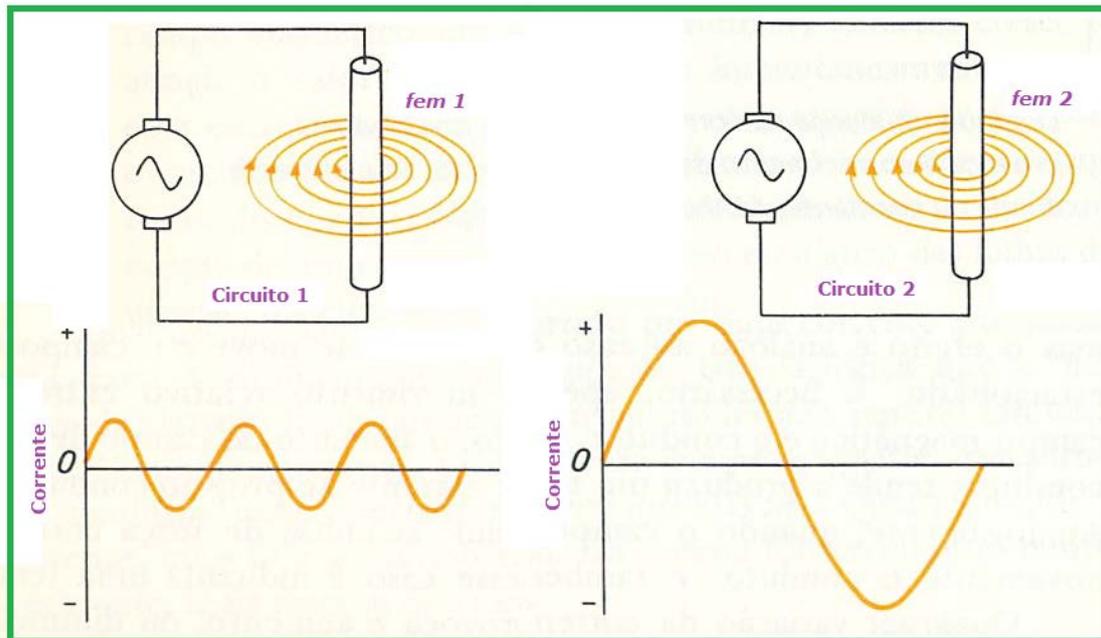
Neste caso, temos o mesmo efeito em que o fio se move ao longo do campo magnético, só que neste caso, o fio é estacionário.

Intensidade da *fem* autoinduzida:

Dois fatores são fundamentais para se determinar a intensidade da *fem*:

- a) frequência: velocidade de variação do campo magnético. Quando maior for a frequência, maior será a intensidade da *fem* autoinduzida.
- b) amplitude da corrente ou da tensão: quando maior for a amplitude, maior será a intensidade do campo magnético.

A figura a seguir ilustra essas condições.



Podemos deduzir nos circuitos 1 e 2 que o campo magnético em ambos gerou uma fem igual e isso pode ser explicado assim:

a) circuito 1: frequência maior, ou seja, com baixas amplitudes consegue-se uma *fem* autoinduzida desde que a frequência seja alta.

b) circuito 2: consegue-se uma *fem* autoinduzida com frequência menor, mas é preciso aumentar a amplitude.

Polaridade de *fem* autoinduzida (a *f_{cem}* – força contraeletromotriz):

A princípio imaginamos que uma *fem* tem uma polaridade e uma *fem* autoinduzida não é exceção à regra.

Se considerarmos um condutor percorrido por DC, veremos que isso não é bem verdade.

a) Quando uma DC cresce de um valor zero até ao seu valor máximo, o campo magnético criado ao redor do condutor induz uma *fem* no próprio condutor.

b) Se a polaridade fosse a mesma da corrente, causaria um aumento da corrente e com o aumento da corrente, mais *fem* seria induzida.

c) Com isso valores extremamente altos de corrente seriam atingidos a ponto de danificar componentes do circuito.

d) Sabemos então que isso não ocorre, pois as polaridades da *fem* induzida nem sempre coincide com a polaridade da corrente que a provoca.

O sentido da *fem* autoinduzida foi explicado inicialmente pelo físico estoniano Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), que tem o seguinte enunciado, conhecido como Lei de Lenz:

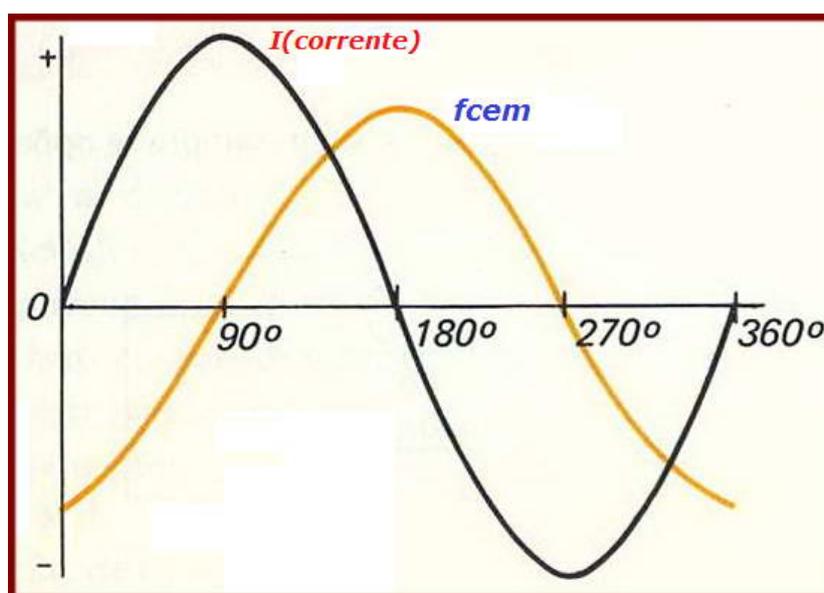
“Uma variação da corrente produz uma fem cuja polaridade é tal que tende a se opor à variação da corrente”.

Definição encontrada na Wikipédia: Segundo a **lei de Lenz**, o sentido da corrente é o oposto da variação do campo magnético que lhe deu origem. *Havendo diminuição do fluxo magnético, a corrente criada gerará um campo magnético de mesmo sentido do fluxo magnético da fonte. Havendo aumento, a corrente criada gerará um campo magnético oposto ao sentido do fluxo magnético da fonte.*

Resumindo:

- a) Quando a corrente estiver decrescendo, a *fem induzida* terá o mesmo sentido da corrente e tenderá a aumentá-la.
- b) Quando a corrente estiver crescendo, a polaridade da *fem induzida* será oposta ao sentido da corrente e tenderá impedir que esta aumente.

A figura abaixo ajuda a entender melhor a relação entre a corrente e a *fem induzida*.



Analisando as formas de onda de corrente e f_{cem} , temos:

- a) A intensidade da f_{cem} induzida em qualquer ponto depende da taxa de variação das linhas de fluxo. Assim, para 90 e 270 graus, onde a corrente torna-se momentaneamente estável no seu valor de pico, a taxa de variação é zero, assim como a f_{cem} .
- b) Para 0, 180 e 360 graus, quando a corrente passa por zero e muda de sentido, a taxa de variação é maior, e temos assim nesses pontos maior f_{cem} . Desta forma, fica fácil de visualizar no gráfico acima que a corrente e a f_{cem} estão defasadas entre si em 90 graus.

Resumindo:

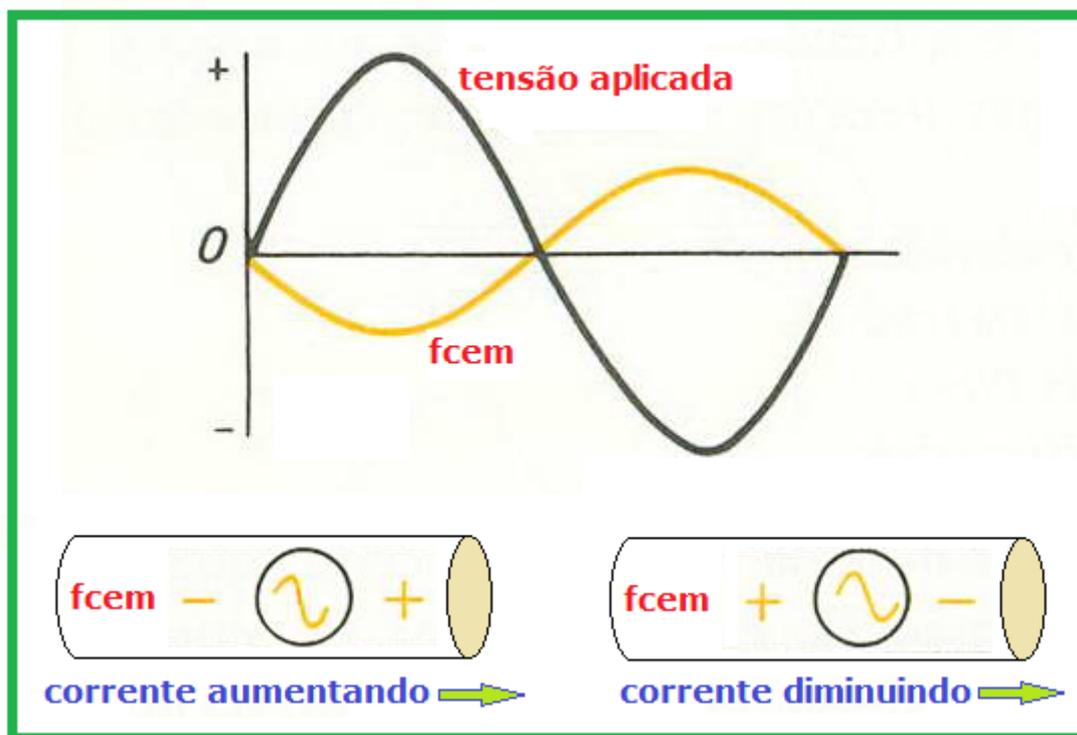
a) Quando a tensão aplicada é máxima num sentido, a *fem induzida* é máxima no sentido oposto.

b) A ação da *fem induzida* consiste em se opor à tensão aplicada e por isso muitas vezes é denominada *força contraeletromotriz (fcem)*.

A princípio pode gerar um pouco de confusão o fato da *fcem* sempre se opor à tensão aplicada, mas, às vezes ajudar o fluxo de corrente.

No entanto, esta aparente contradição é causada pela relação de fase entre a tensão aplicada e a corrente, assunto que será visto posteriormente no estudo de circuitos indutivos e capacitivos.

Por enquanto, devemos ter em mente que a *fcem* se opõe a qualquer variação de corrente.



Sob o ponto de vista da alimentação de um circuito, a *autoindução* pode ser explicada como se fosse uma energia trocada pelo circuito.

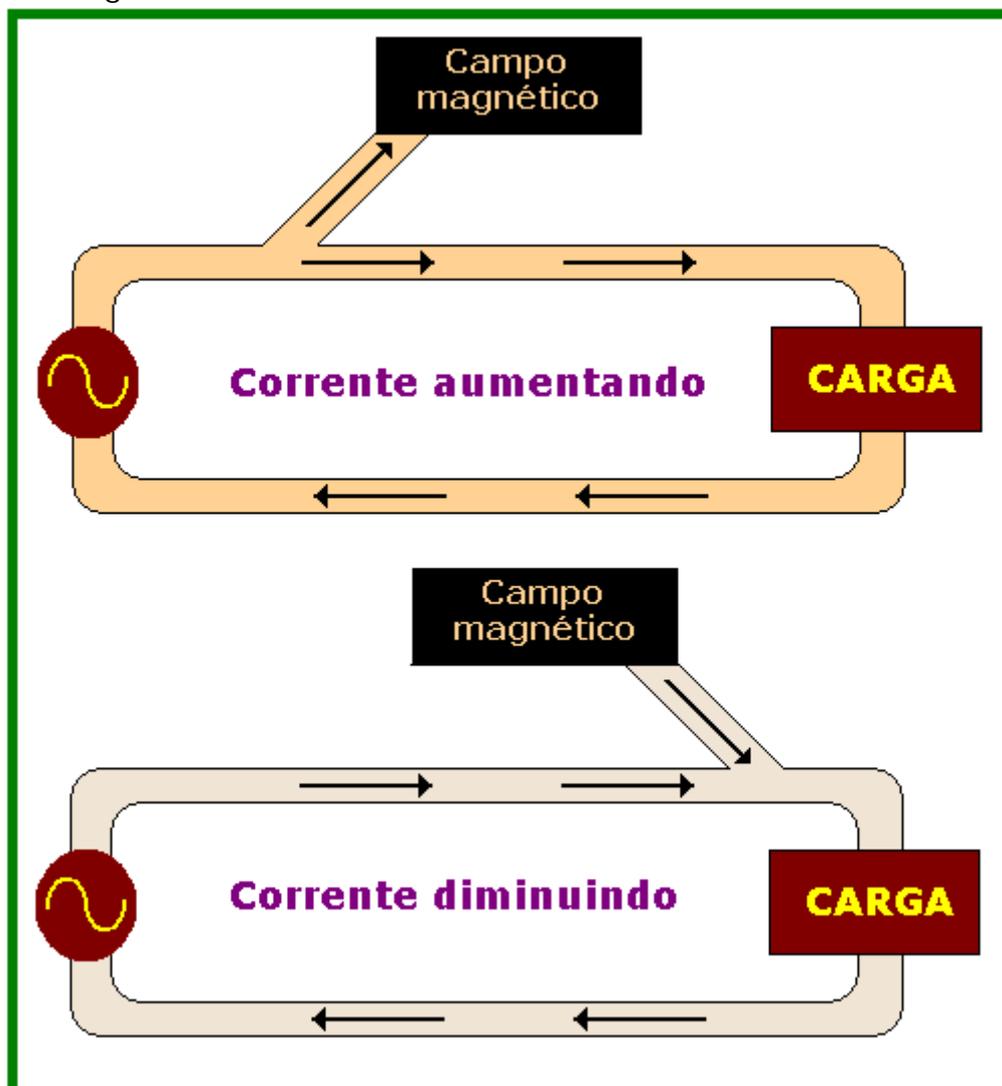
Quando a corrente no circuito cresce a energia é removida do circuito em forma de "campo magnético", apresentando assim um decréscimo do trabalho útil, que na realidade corresponde à *força contraeletromotriz*.

Quando a corrente no circuito para de crescer, ou seja, estaciona mesmo que por alguns instantes, a energia não é mais retirada do circuito, sendo totalmente utilizada.

Assim, toda a energia que foi removida fica retida no campo magnético, até que a corrente começa a decrescer.

Nestas condições a energia retorna ao circuito. Essa relação que nós denominamos de troca de energia é mensurada através do *fator de potência* ou *rendimento* cujo assunto será visto posteriormente.

Veja o diagrama abaixo:



Quando a corrente começa a diminuir, a energia armazenada no campo magnético tende a retornar ao circuito.

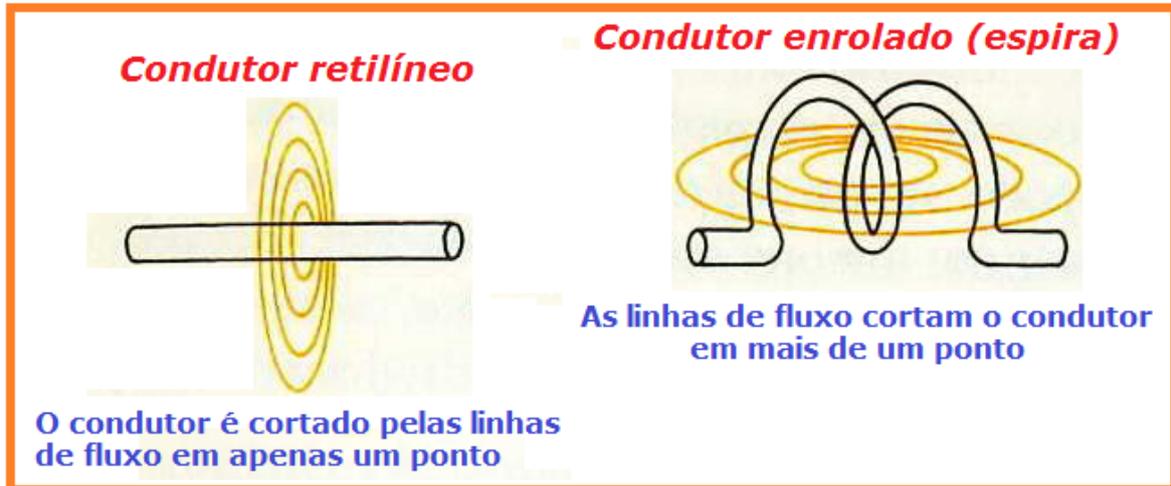
“RESUMINDO: Do ponto de vista da energia, a autoindução representa uma remoção da energia de um circuito quando a corrente cresce, e uma devolução dessa energia ao circuito quando a corrente decresce.”

A autoindução e o formato do condutor:

Como já sabemos, a *autoindução* se opõe a qualquer variação da corrente e a intensidade da *autoindução* é determinada pela amplitude e pela frequência da corrente.

Existe outro fator que deve ser analisado em relação a autoindução, pois o comportamento é diferente:

1. condutores retilíneos
2. condutores enrolados em forma de espiras adjacentes



Quando o condutor é enrolado em forma de espiras adjacentes (bobina) as condições são diferentes, pois não envolve apenas o comprimento do fio, que deve ser maior, como produz uma *f_{cem}* maior, visto que as linhas de fluxo cortarão o condutor em vários pontos.

No caso do condutor ser enrolado em várias espiras, a *f_{cem}* de cada espira produz um efeito de soma, produzindo uma *f_{cem}* total muito maior.

Portanto, chega-se à conclusão que, para uma dada corrente, a *f_{cem}* produzida num condutor depende não só do comprimento do mesmo e da intensidade da corrente, mas também, do seu **formato**.

INDUTÂNCIA

A relação exata entre as variáveis:

Amplitude
Intensidade da corrente
Frequência

Pode ser expressa matematicamente, pela equação:

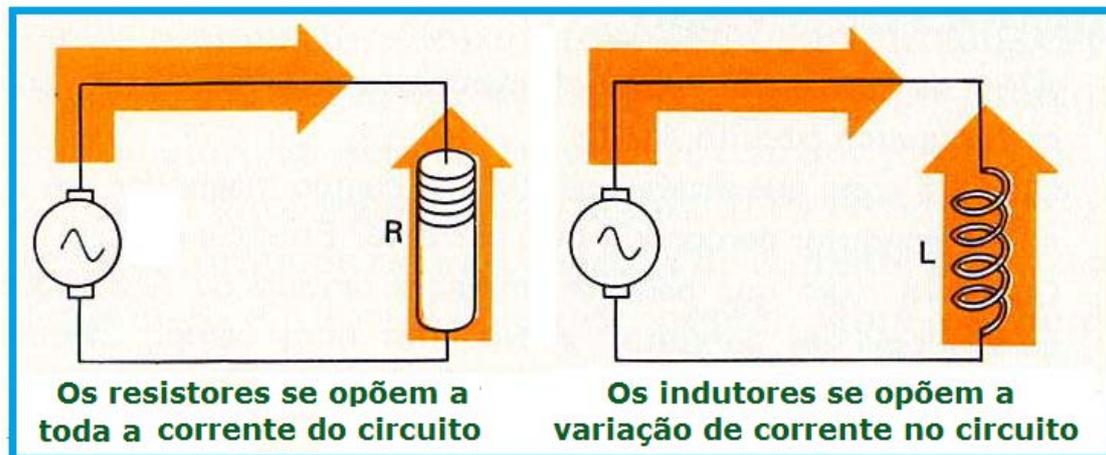
$$E_{fcm} = L \times \text{número de linhas de fluxo}$$

E_{fcm} = a força contraeletromotriz produzida

L = indutância do condutor (forma do condutor, enrolado em espiras em núcleo isolante ou não).

Portanto, a f_{cem} produzida é o produto do número das linhas de fluxo pela forma (formato) do condutor.

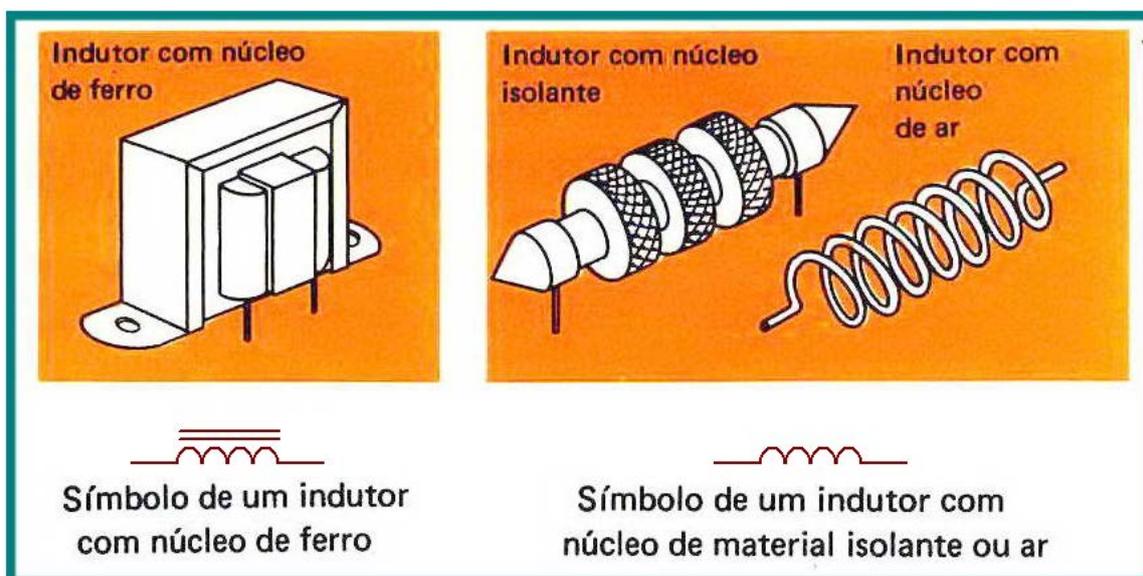
Para efeitos de cálculo, a indutância de um condutor retilíneo é nula enquanto que, a indutância de um condutor enrolado na forma de uma bobina (quantidade de espiras) pode assumir valores elevados, constituindo assim um elemento fundamental para a análise de circuitos AC.



*“Podemos então definir a **indutância** como sendo a propriedade apresentada por um circuito elétrico que tende e se opor a qualquer variação de corrente através desse circuito”.*

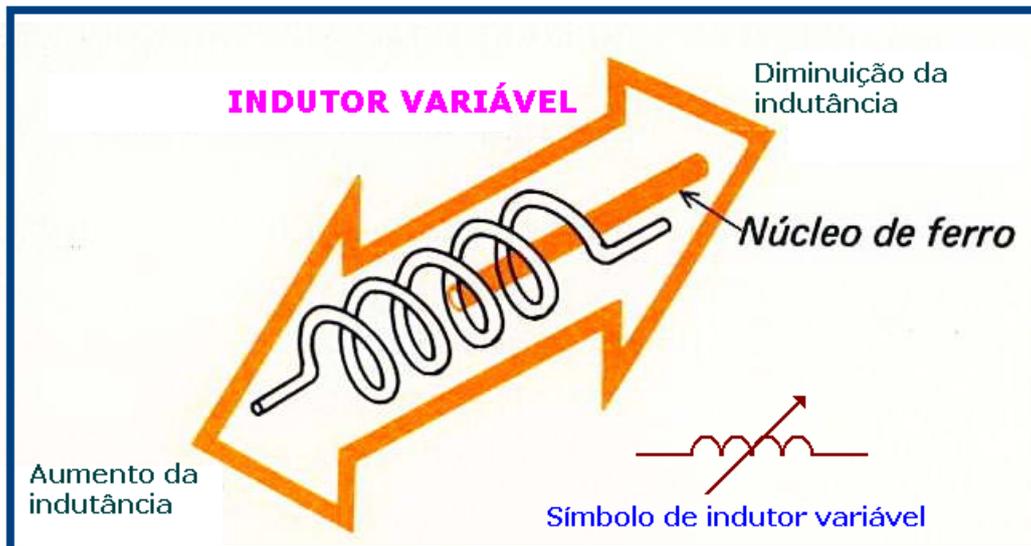
Logo, concluímos que a definição de “indutância” cabe somente sobre variações de corrente ou tensão não cabendo, portanto, a circuitos DC.

Deliberadamente condutores enrolados em forma de espiras em um núcleo, seja ele isolante ou não, constituem-se em indutores, justamente com a finalidade de opor uma resistência às variações de corrente ou tensão.

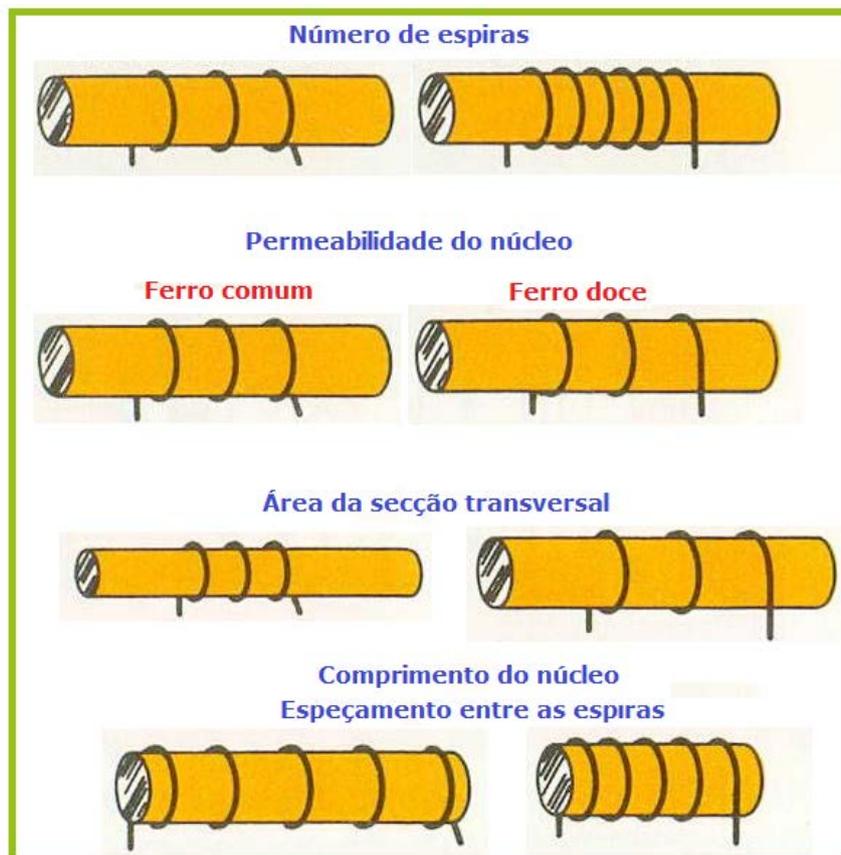


Normalmente os fios utilizados para enrolar os indutores ou bobinas são de cobre, coberto com um esmalte isolante. Quando se deseja concentrar o campo magnético ao redor da bobina, utiliza-se um núcleo de ferro ou similar, posicionado estrategicamente de forma a modificar a sua indutância.

Existem indutores que permitem que o núcleo seja ajustado para dentro ou para fora do enrolamento, que são conhecidos como *indutores variáveis*.



Fatores que determinam a indutância:



1. Número de voltas ou quantidade de espiras: implica no comprimento do fio, pois maior quantidade de espiras representa maior comprimento do fio.
2. Permeabilidade do núcleo: indutores ou bobinas com núcleos magnéticos possuem indutâncias maiores se comparados com indutores com núcleo a ar; o tipo de núcleo magnético tem influência direta na indutância, uma vez que o núcleo de ferro doce é mais eficiente do que núcleo de ferro comum (ou ferro duro).
3. Área da secção transversal: quanto maior a área da secção transversal (diâmetro do núcleo), mais linhas de força serão produzidas.

É bom lembrar que a indutância é diretamente proporcional à área de sua seção transversal do seu núcleo e inversamente proporcional ao seu comprimento.

4. O espaçamento entre as espiras: quanto mais espiras, mais indutância e quanto menor o espaçamento entre as mesmas, maior indutância também.

Podemos então concluir que existe uma relação entre a indutância e fatores físicos, que pode ser expressa pela equação:

$$L = \frac{0,4\pi N^2 \mu A}{\ell}$$

L = indutância em henry (H)
N = número de espiras
 μ = permeabilidade do núcleo
A = área transversal do núcleo
 ℓ = comprimento do núcleo

A permeabilidade do núcleo é alta para materiais magnéticos e baixa para outros materiais.

A unidade de medida de indutância é o *henry* no SI (H) em homenagem a Joseph Henry, cientista norte-americano (1797-1878).

Joseph Henry divide a honra da descoberta da indução com o físico inglês Michael Faraday (1791-1867)

Relação entre a indutância e a fcm:

A indutância é uma medida de quanta *força contraeletromotriz* é gerada num circuito ou componente, para uma certa variação de corrente, ou melhor dizendo, é a quantidade de *força contraeletromotriz* produzida para uma variação unitária da corrente.

O henry é assim definido:

“Um condutor ou bobina, tem uma indutância igual a 1 henry, se a sua corrente variar na razão de 1 ampère por segundo e gerar uma força contraeletromotriz de 1 volt”.

Como o henry é uma unidade muito grande, são usados com frequência os seus submúltiplos:

milihenry = mH (1/1000 de um henry)
microhenry = μ H (1/1000.000 de um henry)

Calculando a *f_{cem}*:

Conhecendo os valores da indutância, da amplitude e da frequência da corrente podemos calcular a *f_{cem}* produzida:

$$f_{cem} = - L (\Delta I / \Delta t)$$

O sinal negativo indica a oposição da *f_{cem}* à polaridade da tensão aplicada.

L = indutância em henrys
 ΔI = variação da corrente
 Δt = variação do tempo

Exemplo:

Supondo um indutor de 10 henrys, cuja corrente varia de 5 a 3 ampères em 1 segundo, podemos calcular a *f_{cem}* produzida.

$$F_{cem} = 10 [(5 - 3)] / 1 = 10 \times 2 = - 20 \text{ volts}$$

OBS: a taxa de variação da corrente ($\Delta I/\Delta t$) representa a frequência.

Veja na tabela abaixo alguns valores da *f_{cem}* em função da frequência ou taxa de variação da corrente:

(L) henry	(I) ampère	t (segundos)	f _{cem} (volts)
1	1	1	1
1	1	1/2	2
1	1	1/4	4
1	1	1/10	10
1	1	1/20	20
1	1	1/50	50
1	1	1/100	100
1	1	1/500	500
1	1	1/1.000	1.000