

Sumário

Introdução	5
Indução	6
Auto-indução	7
Indutores em corrente alternada	14
Fator de qualidade (Q)	16
Determinação experimental da indutância de um indutor	16
Associação de indutores	18
Relação de fase entre corrente e tensão nos indutores	19
Apêndice	21
Questionário	21
Bibliografia	21



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

No *SENAI* a Formação Profissional está voltada para a Educação permanente e a cidadania.

Introdução

O campo de aplicação dos indutores se estende desde circuitos de lazer como os filtros para caixas de som até os circuitos industriais, passando pelo campo da transmissão e recepção de sinais de rádio e televisão.

O fascículo tratará dos indutores em si, dos fenômenos ligados ao magnetismo que ocorrem no indutor, e do seu comportamento em corrente alternada.

O objetivo deste fascículo é fornecer todas as informações sobre indutores necessárias para que o leitor possa utilizá-los corretamente.



Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículos, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Magnetismo e eletromagnetismo.

Indução

O princípio da geração de energia elétrica baseia-se no fato de que toda vez que um condutor se movimenta no interior de um campo magnético aparece neste condutor uma diferença de potencial.

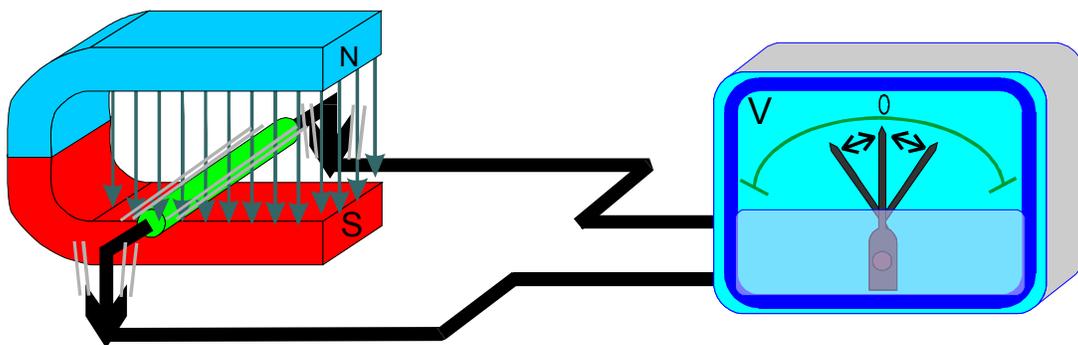


Fig.1 Geração de uma tensão num condutor movendo-se numa região de campo magnético.

Esta tensão gerada pelo movimento do condutor no interior de um campo magnético é denominada de **tensão induzida**.

Foi o cientista inglês **Michael Faraday**, ao realizar estudos com o eletromagnetismo, que determinou as condições necessárias para que uma tensão seja induzida em um condutor.

As observações de **Faraday** podem ser resumidas em duas conclusões:

- Quando um condutor elétrico é sujeito a um campo magnético variável, tem origem nesse condutor uma tensão induzida.

É importante notar que, para existir um campo magnético variável no condutor, um ou outro procedimento a seguir é indicado :

- Manter o campo magnético estacionário e movimentar o condutor perpendicularmente ao campo, como ilustrado na **Fig.2a**.
- Manter o condutor estacionário e movimentar o campo magnético, conforme ilustrado na **Fig.2b**.

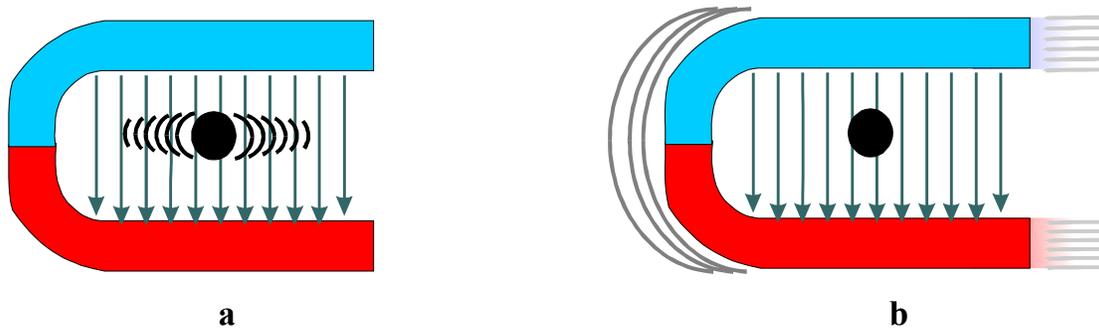


Fig.2 Campo magnético variável : (a) movimento do condutor e (b) movimento do campo magnético.

- A magnitude da tensão induzida é diretamente proporcional à intensidade do fluxo magnético e à razão de sua variação.

Isto significa que, quanto mais intenso o campo, maior é a tensão induzida. Por outro lado, quanto maior for a variação do campo, maior será essa tensão induzida.

Os geradores elétricos de energia elétrica se baseiam nos princípios estabelecidos por Faraday.

AUTO-INDUÇÃO

O fenômeno de indução faz com que o comportamento das bobinas em um circuito de corrente contínua seja diferente do comportamento dos resistores.

Em um circuito formado por uma fonte de corrente contínua, um resistor e uma chave, a corrente atinge o seu valor máximo instantaneamente no momento em que o interruptor é ligado. Se, nesse mesmo circuito, o resistor for substituído por uma bobina o comportamento será diferente. A corrente atinge o valor máximo algum tempo após a ligação do interruptor. A **Fig.3** ilustra esse comportamento.

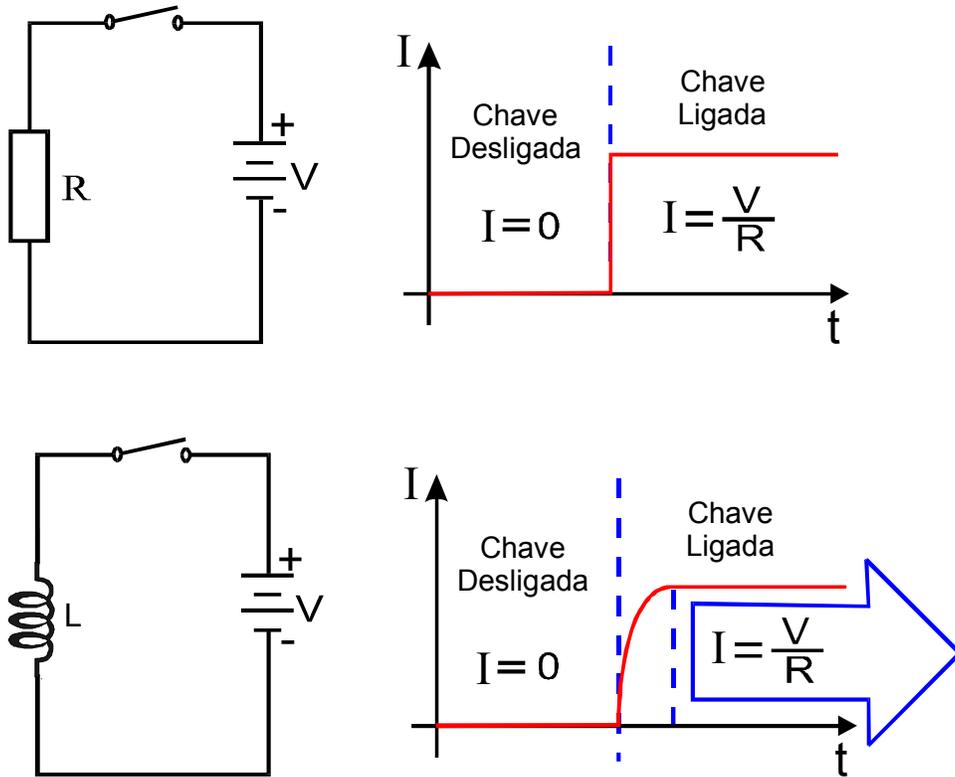


Fig.3 Comportamento da corrente que percorre um resistor e da que percorre um indutor.

Esse atraso para atingir a corrente máxima se deve à indução e pode ser mais bem compreendido imaginando o comportamento do circuito passo a passo.

Suponha o circuito composto por uma bobina, uma fonte de CC e uma chave, como ilustrado na **Fig.4**.

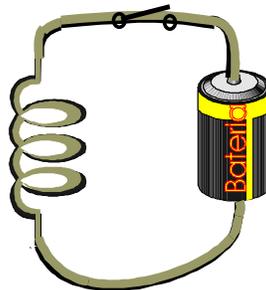


Fig.4 Circuito formado por uma bateria, uma bobina e uma chave.

Enquanto a chave está desligada, não há campo magnético ao redor das espiras porque não há corrente circulante.

A **Fig.5** mostra apenas a bobina em destaque, com algumas espiras representadas em corte.

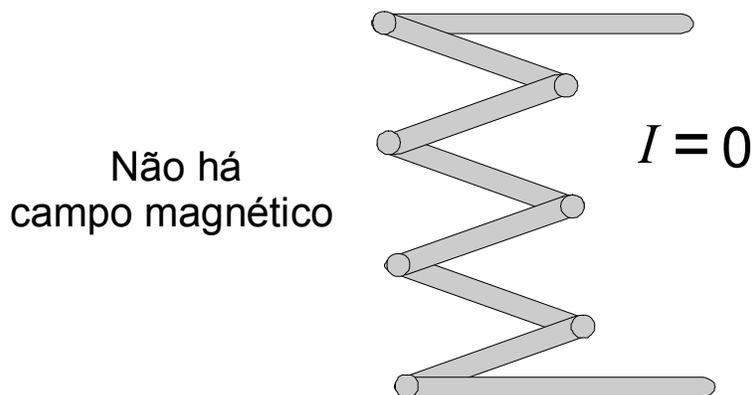


Fig.5 Bobina em corte.

No momento em que a chave é fechada, inicia-se a circulação de corrente na bobina.

Com a circulação da corrente, surge o campo magnético ao redor de suas espiras, como ilustrado na **Fig.6**.

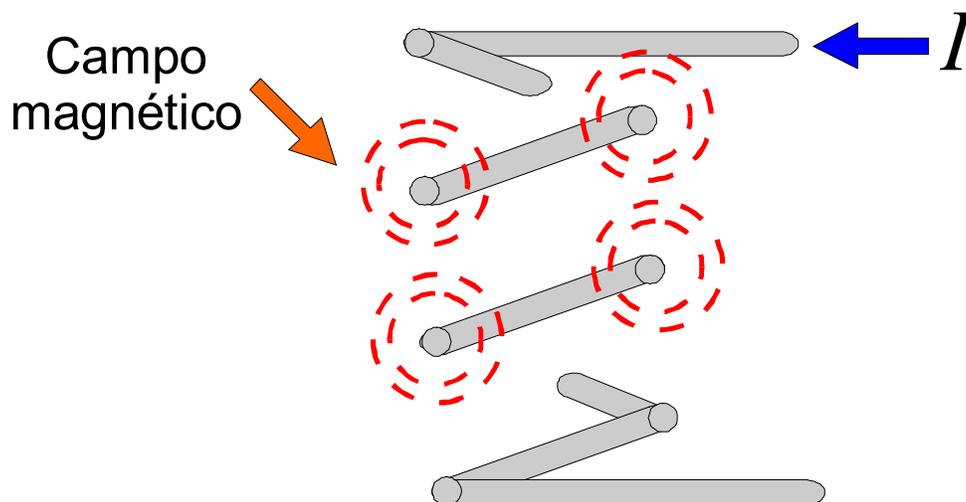


Fig.6 Campo magnético ao redor das espiras.

Na medida em que a corrente cresce em direção ao valor máximo o campo magnético nas espiras se expande, como pode ser visto na **Fig.7**.

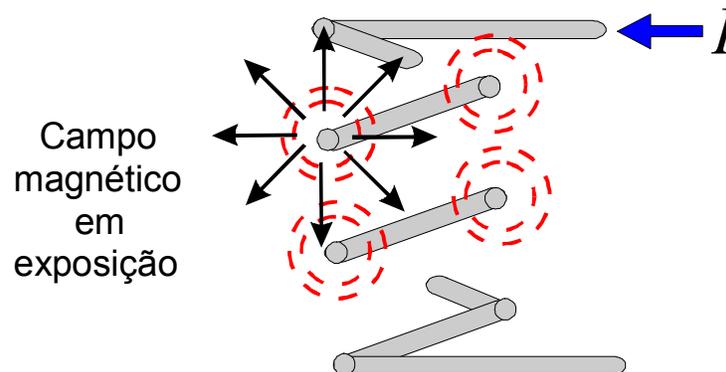


Fig.7 Expansão do campo magnético com o crescimento da corrente.

Ao se expandir, o campo magnético em movimento gerado em uma espira corta a espira colocada ao lado, como mostrado na **Fig.8**.

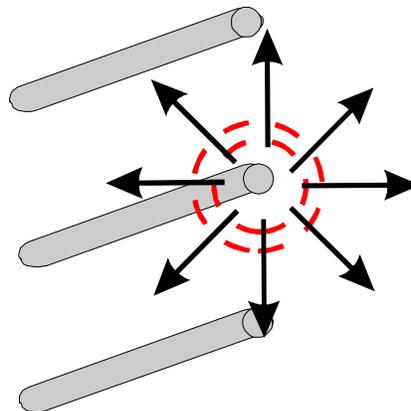


Fig.8 Campo magnético atingindo mais espiras.

Conforme Faraday enunciou, induz-se nessa espira cortada pelo campo em movimento uma determinada tensão. Cada espira da bobina induz nas espiras vizinhas uma tensão elétrica.

Isso significa que a aplicação de tensão em uma bobina provoca o aparecimento de um campo magnético em expansão que gera na própria bobina uma tensão induzida.

Esse fenômeno que consiste em uma bobina induzir sobre si mesma uma tensão é denominado de **auto-indução**.

A tensão gerada na bobina por auto-indução tem uma característica importante: tem **polaridade oposta** àquela tensão que é aplicada aos seus terminais, razão pela qual é denominada de **força contra eletromotriz (*f_{cem}*)**.

Ao ligar a chave, aplica-se tensão à bobina com uma determinada polaridade. A auto-indução gera na bobina uma tensão induzida (*f_{cem}*) de polaridade oposta à da tensão aplicada, como ilustrado na **Fig.9**.

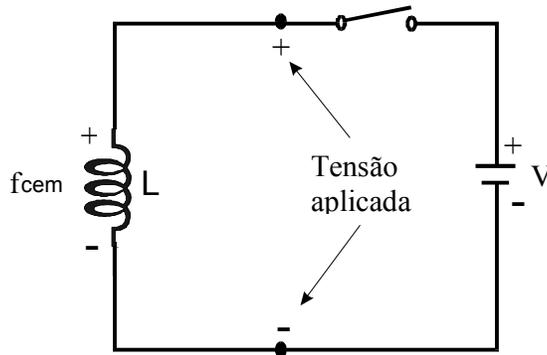


Fig.9 Geração da tensão induzida de polaridade oposta.

Representando a *f_{cem}* como uma **bateria** existente no interior da própria bobina, o circuito se apresenta conforme mostrado na **Fig.10**.

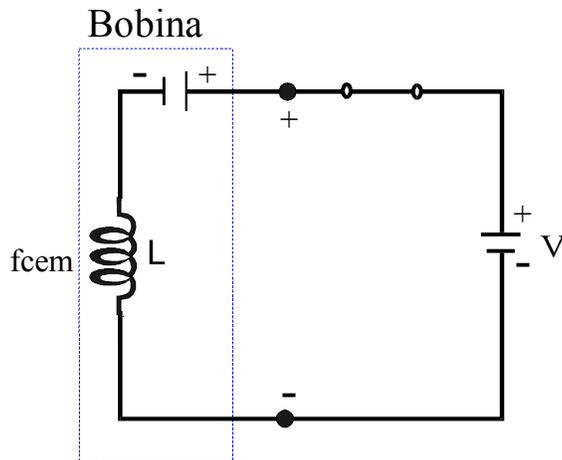


Fig.10 Representação da *f_{cem}*.

Como *f_{cem}* atua contra a tensão da fonte, a tensão aplicada à bobina é na realidade:

$$V_{\text{resultante}} = V_{\text{fonte}} - f_{\text{cem}} \quad (1)$$

A corrente no circuito é causada por essa tensão resultante.

$$I = \frac{(V - f_{cem})}{R} \quad (2)$$

Como a f_{cem} existe apenas durante a variação do campo magnético gerado na bobina, quando o campo magnético atinge o valor máximo a f_{cem} deixa de existir e a corrente atinge o seu valor máximo.

O gráfico da **Fig.11** mostra detalhadamente esta situação.

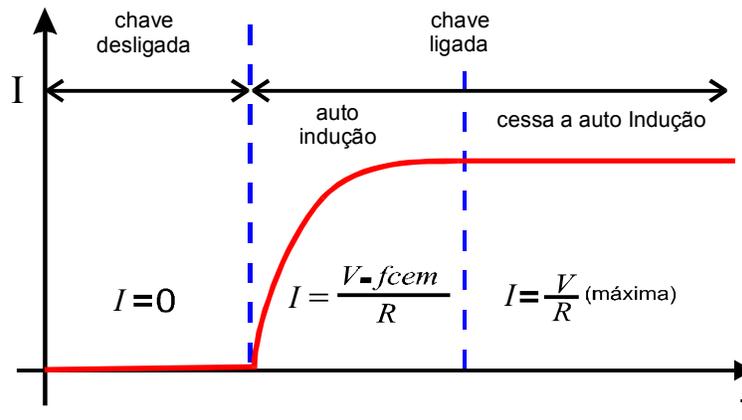


Fig.11 Evolução da corrente no circuito constituído por uma bobina e uma fonte quando a chave é ligada.

O mesmo fenômeno ocorre quando a chave é desligada. A contração do campo induz uma f_{cem} na bobina retardando o decréscimo da corrente, como ilustrado na **Fig.12**.

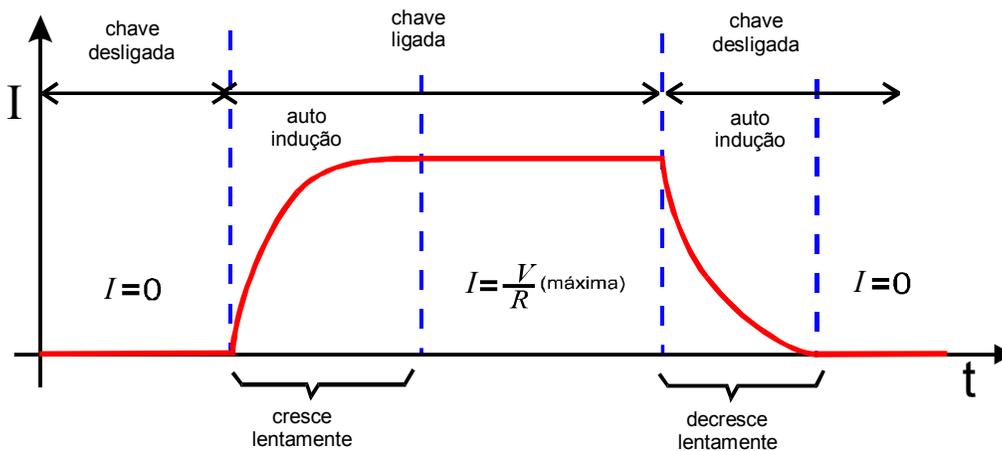


Fig.12 Evolução da corrente no circuito constituído por uma bobina e uma fonte quando a chave é desligada.

Em resumo, pode-se dizer que a auto-indução faz com que as bobinas tenham uma característica singular: **uma bobina se opõe a variações bruscas de corrente.**

Esta capacidade de se opor as variações de corrente é denominada de **indutância** e é representada pela letra L.

A unidade de medição da indutância é o henry, representado pela letra H.

A unidade de medição de indutância henry tem submúltiplos muito utilizados em Eletrônica. A **Tabela 1** mostra a relação entre os submúltiplos e a unidade.

Tabela 1 Submúltiplos do henry.

Submúltiplos	Valor com relação ao henry
Milihenry (mH)	10^{-3} H ou 0,001H
Microhenry (μ H)	10^{-6} H ou 0,000001H

A indutância de uma bobina depende de diversos fatores:

- Do núcleo (material, seção e formato).
- Do número de espiras.
- Do espaçamento entre as espiras.
- Do condutor (tipo e seção).

Por apresentarem uma indutância, as bobinas são também denominadas de indutores.

Os indutores podem ter as mais diversas formas, podendo inclusive ser parecidos com um transformador, como pode ser visto na **Fig.13**.

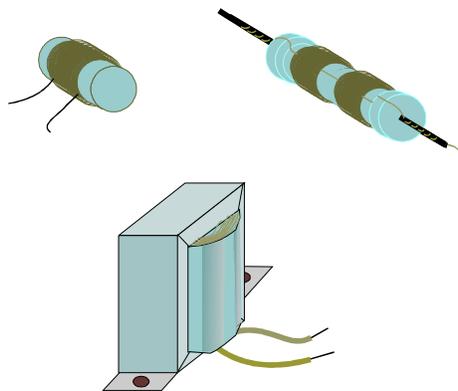


Fig.13 Algumas formas de indutores.

Indutores em corrente alternada

Quando se usa um indutor em um circuito de corrente contínua, a sua indutância se manifesta apenas nos momentos em que existe variação de corrente.

Já em corrente alternada, como os valores de tensão e corrente estão em constante modificação, o efeito da indutância se manifesta permanentemente.

Essa manifestação permanente da **oposição a circulação de uma corrente variável** é denominada de **reatância indutiva**, representada pela notação X_L .



Reatância indutiva é a oposição que um indutor apresenta à circulação de corrente alternada.

Em outras palavras, reatância é a resistência de um indutor em corrente alternada.

A reatância indutiva é expressa em ohms e pode ser determinada através da equação:

$$X_L = 2\pi \times f \times L \quad (3)$$

onde X_L é a reatância indutiva em Ω , 2π é uma constante, f é a frequência da corrente alternada e L a indutância do indutor em henry.

Exemplo 1:

Determinar a reatância de um indutor de 600mH usado em uma rede de *ca* de 60Hz.

Solução:

$$X_L = 2\pi \times f \times L = 6,28 \times 60 \times 0,6$$

$$X_L = 226,08 \Omega$$

É importante observar que a reatância indutiva de um indutor não depende da tensão aplicada aos seus terminais.

A corrente I_L que circula em um indutor em CA pode ser calculada com base na Lei de Ohm, substituindo-se R por X_L .

$$I_L = \frac{V}{X_L} \quad (4)$$

onde I_L é a corrente eficaz no indutor em ampère, V a tensão eficaz em volts e X_L a reatância indutiva em ohms.

Exemplo 2:

O indutor de 60mH usado em uma rede de 60Hz e 110V permite a circulação de uma corrente de que intensidade ?

Solução:

$$X_L = 2\pi \times f \times L = 6,28 \times 60 \times 0,6$$

$$X_L = 226,08 \Omega$$

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{110}{226,08}$$

$$I_L = 486\text{mA}$$

FATOR DE QUALIDADE (Q)

Todo o indutor apresenta, além da reatância indutiva, uma resistência ôhmica que se deve ao condutor com o qual é construído.

O fator de qualidade Q é uma relação entre a reatância indutiva e a resistência ôhmica de um indutor.

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (5)$$

onde Q é o fator de qualidade, X_L a reatância indutiva e R a resistência ôhmica da bobina.

Um indutor ideal deveria apresentar resistência ôhmica nula. Isto determinaria um fator de qualidade infinitamente grande. No entanto, na prática, esse indutor não existe, visto que sempre existe a resistência ôhmica do condutor.

Exemplo 3:

Determinar o fator de qualidade de um indutor com reatância indutiva de 3.768Ω (indutor de 10H em 60Hz) e com resistência ôhmica de 80Ω .

Solução:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{3.768}{80}$$

$$Q = 47,1$$

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA INDUTÂNCIA DE UM INDUTOR

Quando se deseja utilizar um indutor e sua indutância, é possível determiná-la aproximadamente por um processo experimental. O valor encontrado não será exato porque é necessário considerar que o indutor é ideal ($R = 0$).

Aplica-se ao indutor uma corrente alternada com frequência e tensão conhecidas. Em seguida, determina-se a corrente do circuito com um amperímetro de corrente alternada, como pode ser visto na **Fig.14**.

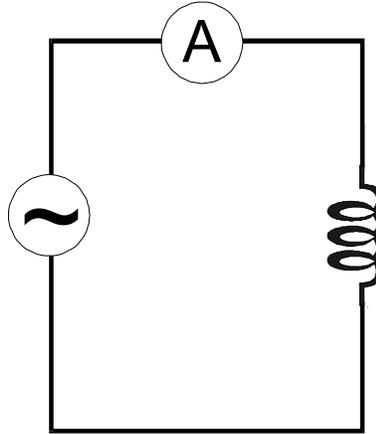


Fig.14 Determinação experimental de uma indutância.

Conhecidos os valores de tensão e corrente do circuito, determina-se a reatância indutiva do indutor de acordo com a **Eq.(4)** :

$$X_L = \frac{V}{I_L}$$

onde V é a tensão do indutor e I_L a corrente.

Aplica-se o valor encontrado na **Eq.(3)** da reatância indutiva e determina-se a indutância:

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi \times f}$$

A imprecisão do valor encontrado não é significativa na prática porque os valores de resistência ôhmica da bobina são pequenos, comparados com a sua reatância indutiva (alto Q).

Associação de indutores

Os indutores podem ser associados em série, em paralelo e até mesmo de forma mista, embora esta última não seja muito utilizada.

A associação série é utilizada como forma de obter-se uma maior indutância. A indutância de uma associação série é dada pela equação:

$$L_T = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad (6)$$

onde L_T é a indutância total e $L_1, L_2 \dots L_n$ as indutâncias associadas.

A **Fig.15** mostra uma associação série de indutores e sua representação esquemática.

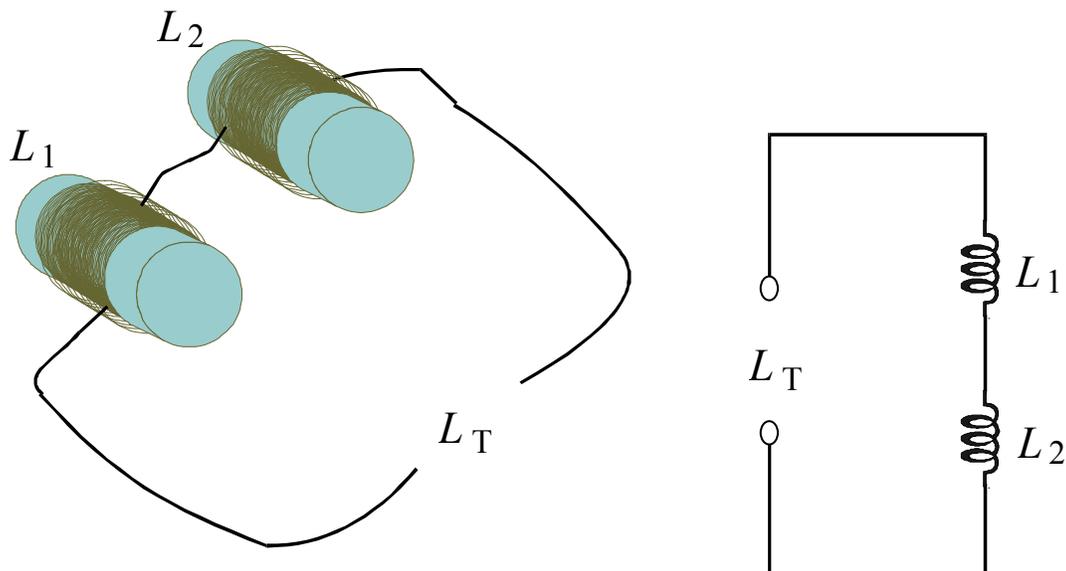


Fig.15 Associação série de indutores e sua representação.

A associação paralela pode ser utilizada como forma de se obterem indutâncias menores ou como forma de dividir uma corrente entre diversos indutores.

A indutância total de uma associação paralela de indutores é dada pela equação:

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}} \quad (7)$$

onde L_T é a indutância total e L_1, L_2, \dots, L_n as indutâncias associadas.

Observa-se que as equações para cálculo da indutância se assemelham às equações para o cálculo de associações de resistores.

RELAÇÃO DE FASE ENTRE CORRENTE E TENSÃO NOS INDUTORES

Devido ao fenômeno de auto-indução, ocorre uma defasagem entre corrente e tensão nos indutores ligados em CA.

A auto-indução provoca um atraso na corrente em relação à tensão. Esse atraso é de 90° (um quarto de ciclo).



Nos indutores, a corrente está 90° atrasada em relação à tensão.

A representação senoidal desse fenômeno é ilustrada na **Fig.16**. Observa-se que a tensão atinge o máximo antes da corrente.

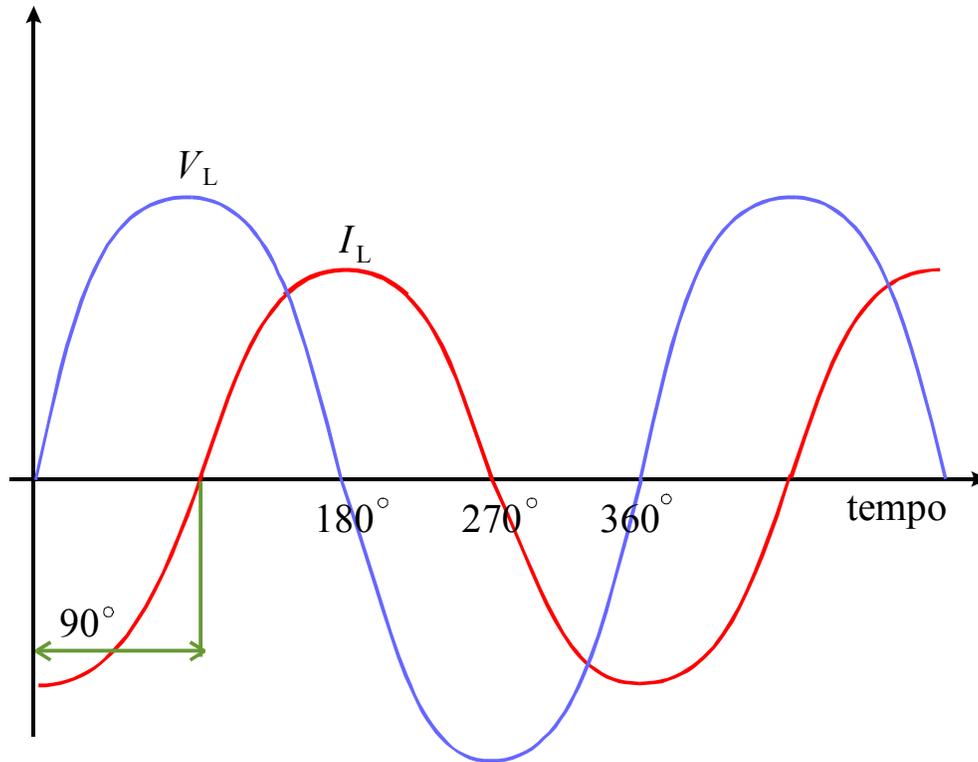


Fig.16 Defasagem entre corrente e tensão nos indutores.

Pode-se representar essa defasagem por meio de um diagrama fasorial. O ângulo entre os segmentos de reta representa a defasagem e o comprimento representa os valores de V_L e I_L , como ilustrado na **Fig.17**.

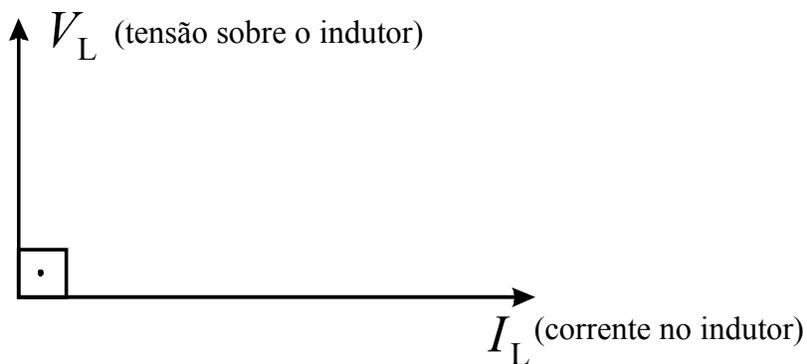


Fig.17 Diagrama fasorial da defasagem entre corrente e tensão nos indutores.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais as condições necessárias para que uma tensão seja induzida em condutor ?
2. O que se entende por indutância e qual a sua unidade de medição?
3. O que é reatância indutiva?

BIBLIOGRAFIA

- DAWES, CHESTER L. Curso de Eletrotécnica, Corrente Alternada. A course in electrical engineering. Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18.^a ed., Porto Alegre, Globo, 1979, vol.4
- SENAI/DN. Impedância. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980 (Módulo Instrucional - Eletricidade ; eletrotécnica, 18).
- VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. Eletricidade Básica. 11.^a ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1977, vol.3