

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**
Campus Chapecó
Coordenação Geral de Cursos Técnicos
Curso Técnico em Eletroeletrônica



Módulo II: **Circuitos Elétricos I**

Fevereiro
2009

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
Campus Chapecó
Coordenação Geral de Cursos Técnicos
Curso Técnico em Eletroeletrônica**

Circuitos Elétricos I

Material instrucional compilado pelos Profs. Rafael
Silva Pippi, Dr. e Joni Coser, Dr. para uso do
CEFET/SC, Unidade de Chapecó.

Revisão: 01

Fevereiro
2009

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – Conceitos Fundamentais	5
1.1 Introdução	5
1.2 Tensão elétrica	5
1.3 Corrente elétrica	5
1.3 Corrente contínua x Corrente alternada	6
1.3.1 Corrente contínua	6
1.3.2 Corrente alternada	6
1.4 Resistência	9
1.4.1 Determinação da resistência de um elemento	10
1.4.2 Variação da resistência com a temperatura	11
1.5 Condutores ôhmicos e não-ôhmicos	12
1.6 Indutores	12
1.7 Capacitores	13
CAPÍTULO 2 – Técnicas de Redução e Análise de Circuitos em Corrente Contínua	16
2.1 Introdução	16
2.2 Associação de Resistores	16
2.2.1 Associação Série	16
2.2.2 Associação Paralela	17
2.2.3 Associação Mista	18
2.3 Transformação de Fontes	18
2.4 Linearidade e Superposição	20
2.4.1 Linearidade	20
2.4.2 Superposição	21
2.5 Divisão de Tensão e Divisão de Corrente	21
2.5.1 Divisão de Tensão	21
2.5.2 Divisão de Corrente	22
2.6 Leis de Kirchhoff	24
2.6.1 Primeira Lei – Lei dos Nós	24
2.6.2 Segunda Lei – Lei das Malhas	25
CAPÍTULO 3 – Análise de Circuitos em Corrente Alternada	26
3.1 Introdução	26
3.2 Fasor	26
3.3 Impedância complexa (Z)	27
3.3.1 Resistência	28
3.3.2 Indutância	28
3.3.3 Capacitância	28
3.4 Tensão alternada alimentando uma resistência pura	29
3.5 Tensão alternada alimentando uma indutância pura	30
3.6 Tensão alternada alimentando uma capacitância pura	31
3.7 Tensão alternada alimentando um circuito RL série	32
3.8 Tensão alternada alimentando um circuito RC série	33
3.9 Tensão alternada alimentando um circuito RLC série	35
3.10 Associação de impedâncias	36
3.10.1 Associação em série	36
3.10.2 Associação em paralelo	37

3.10.3 Associação mista.....	38
3.11 Admitância.....	38
3.12 Divisor de corrente com Impedâncias e Admitâncias.....	40
3.13 Divisor de tensão com Impedâncias e Admitâncias.....	41
 CAPÍTULO 4 – Fundamentos Relacionados à Potência e Correção de Fator de Potência	
Considerando Corrente Alternada Monofásica.....	42
4.1 Introdução	42
4.2 Potência Elétrica em Circuitos de Corrente Alternada	42
4.3 Fator de Potência e Triângulo de Potência [2].....	43
4.4 Correção de Fator de Potência [2].....	46
4.5 Medição de Potência, Fator de Potência e Energia.....	46

CAPÍTULO 1 – Conceitos Fundamentais

1.1 Introdução

O objetivo deste capítulo introdutório é relembrar alguns conceitos já estudados anteriormente para dar suporte ao prosseguimento dos estudos desta unidade curricular.

Primeiramente alguns conceitos fundamentais tais como: tensão e corrente elétrica, corrente alternada e contínua, resistência, potência, valor médio e eficaz serão estudados. Ao final será introduzido o conceito e princípios físicos de capacitores e indutores para que o estudo de regime permanente e potência em corrente alternada seja amplamente absorvido.

1.2 Tensão elétrica

O escoamento de cargas em um condutor é causado por uma “pressão externa” ligada à energia que as cargas possuem em virtude de suas posições. A esta pressão dá-se o nome de energia potencial elétrica, ou tensão elétrica. No interior de uma bateria, reações químicas fazem com que cargas negativas (elétrons) se acumulem em um dos terminais, enquanto as cargas positivas (íons) se acumulam no outro, ficando estabelecido desta maneira uma diferença de potencial elétrico entre os terminais.

Cargas podem ser levadas a um nível de potencial mais alto através de uma fonte externa que realize trabalho sobre elas, ou podem perder energia potencial quando se deslocam em um circuito elétrico. A tensão elétrica (força eletromotriz ou diferença de potencial) entre dois pontos ‘a’ e ‘b’ de um circuito pode ser definida então como a energia necessária para mover uma unidade de carga deste ponto ‘a’ para o ponto ‘b’. Sua unidade de medida é o volt (V).

Existem dois tipos de tensão que são tipicamente empregados em circuitos elétricos e que são definidos como:

(a) Tensão contínua, onde o valor da tensão não varia ao longo do tempo. Como exemplo pode ser citado as pilhas e baterias;

(b) Tensão alternada onde seu valor varia ao longo do tempo seguindo uma frequência bem definida. Como exemplo pode ser citado a tensão da rede elétrica de distribuição que chega às residências.

1.3 Corrente elétrica

A proposição básica de um circuito elétrico é a de mover ou transferir cargas através de um percurso especificado. A este movimento de cargas dá-se o nome de corrente elétrica. Então a corrente elétrica pode ser definida como a taxa de variação de cargas elétricas em relação ao tempo e é medida em Ampères (A), ou seja, é a quantidade de cargas elétricas que atravessam uma superfície de referência por unidade de tempo:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad [A]$$

Na teoria de circuitos a corrente é geralmente imaginada como movimento de cargas positivas. Esta convenção foi estabelecida por Benjamin Franklin que imaginou que a corrente

trafegava do positivo para o negativo. Sabe-se atualmente que a corrente num condutor metálico representa o movimento de elétrons que se desprendem das órbitas dos átomos do metal. Desta forma deve-se distinguir a corrente convencional usada na teoria de redes elétricas, dada pelo movimento de cargas positivas, da corrente eletrônica dada pelo movimento de elétrons.

Existem dois tipos de corrente que são tipicamente empregados em circuitos elétricos e que são definidos como:

(a) Corrente contínua (CC) é aquela que não varia com o tempo e é produzida por uma fonte de tensão contínua.

(b) Corrente alternada (CA) é a corrente que varia senoidalmente com o tempo e é produzida por uma fonte de tensão alternada.

1.3 Corrente contínua x Corrente alternada

1.3.1 Corrente contínua

Corrente contínua (CC ou, em inglês, DC - direct current), também chamada de corrente galvânica é o fluxo constante e ordenado de elétrons sempre em uma direção. Esse tipo de corrente é gerado por baterias de automóveis ou de motos (6, 12 ou 24V), pequenas baterias (geralmente 9V), pilhas (1,2V e 1,5V), dínamos, células solares e fontes de alimentação de várias tecnologias, que retificam a corrente alternada para produzir corrente contínua. Normalmente é utilizada para alimentar aparelhos eletrônicos (entre 1,2V e 24V) e os circuitos digitais de equipamento de informática.

Este tipo de circuito possui um pólo negativo e outro positivo (é polarizado), cuja intensidade é mantida (Figura 1.1). Mais corretamente, a intensidade cresce no início até um ponto máximo e aí se mantém contínua sem alterar. Quando desligada, diminui até zero e se extingue.

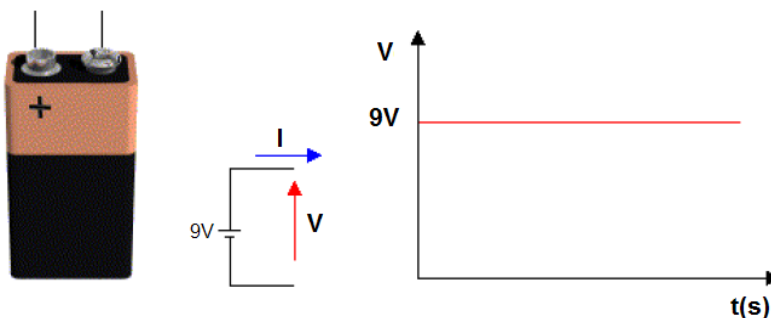


Figura 1.1: Aspecto físico, símbolo e curva da tensão em função do tempo de uma fonte de tensão contínua.

As primeiras experiências de eletrodinâmica foram feitas com corrente contínua. As primeiras linhas de transmissão também usavam CC. Posteriormente passou-se a usar corrente alternada devido às dificuldades de conversão (elevação/diminuição) da tensão em CC. No entanto com o desenvolvimento da tecnologia (inversores), voltou-se a usar CC nas linhas de transmissão. Atualmente é usada corrente contínua em alta tensão na linha de transmissão de Itaipu: 600 kV (Itaipu – Tijucu Preto (SP)).

1.3.2 Corrente alternada

A corrente alternada, ou CA (em inglês AC - alternating current) é uma corrente elétrica cuja magnitude e direção variam ciclicamente, ao contrário da corrente contínua cuja direção permanece constante e que possui pólos positivo e negativo definidos.

Seja o circuito da Figura 1.2(a), no qual há duas baterias e uma chave que ora conecta a bateria B1 ao resistor, ora conecta a bateria B2. O resultado da tensão e corrente resultantes no resistor é apresentado na Figura 1.2(b) e é chamado de onda quadrada. O valor negativo da tensão indica que a polaridade da tensão do resistor está sendo imposta pela bateria B1 e o valor positivo indica que a polaridade está sendo imposta pela bateria B2.

O tempo que a onda leva para repetir uma mesma situação é 2s, sendo chamado de período T. O valor máximo $V_{\text{máx}}$ da tensão é 12V. O valor mínimo V_{min} da tensão também é 12V. O valor compreendido entre os dois máximos (negativo e positivo) é chamado de valor pico a pico V_{pp} e para este caso é 24V.

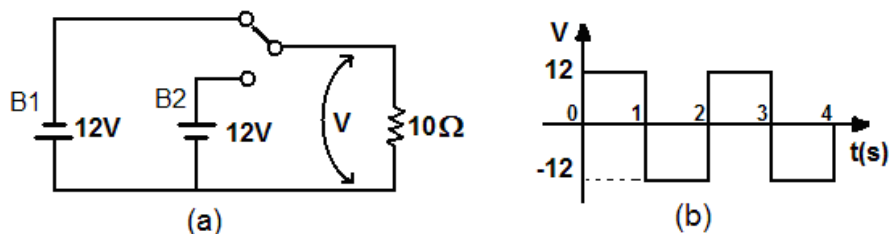


Figura 1.2: Exemplo de um circuito de geração de tensão alternada (a) e forma de onda característica desta fonte.

Assim como no exemplo mostrado com a onda quadrada, outras formas de onda também são utilizadas, principalmente em eletrônica tais como: triangular, dente de serra etc... Entretanto, a forma de onda mais usual em um circuito de potência CA é senoidal por ser a forma de transmissão de energia mais eficiente (Figura 1.3).

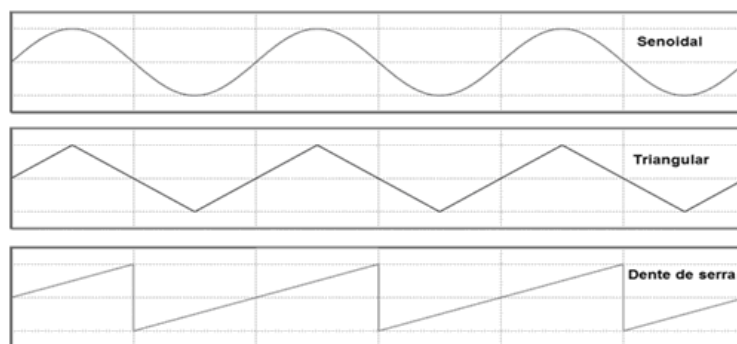


Figura 1.3: Exemplo de uma forma de onda senoidal, triangular e dente de serra.

A corrente alternada foi adotada para transmissão de energia elétrica a longas distâncias devido à facilidade relativa que esta apresenta para ter o valor de sua tensão alterada por intermédio de transformadores.

Uma tensão CA senoidal $V(t)$ pode ser descrita matematicamente em função do tempo, pela seguinte equação:

$$V(t) = V_{\text{max}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta)$$

Onde:

V_{\max} é a amplitude em volts (também chamada de tensão de pico V_p),
 ω é a frequência angular em radianos por segundo, e
 t é o tempo em segundos
 θ é ângulo de fase inicial.

A frequência angular pode ser expressa por:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Onde f é a frequência em hertz (Hz)

A expressão da tensão descrita anteriormente pode então também ser denotada em termos da frequência f e não da frequência angular ω , como segue abaixo.

$$V(t) = V_{\max} \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \theta)$$

Semelhante ao caso mostrado na onda quadrada, o valor pico a pico de uma tensão alternada simétrica é definida como a diferença entre seu pico positivo e seu pico negativo. Desde o valor máximo de seno (x) que é +1 e o valor mínimo que é -1. Como a tensão senoidal apresentada pela expressão acima oscila entre $+V_{\max}$ e $-V_{\max}$, a tensão de pico-a-pico (V_{pp}), é, portanto $(+V_{\max}) - (-V_{\max}) = 2V_{\max}$.

Valor eficaz

Geralmente a tensão CA é dada quase sempre em seu valor eficaz, que é o valor quadrático médio desse sinal elétrico (em inglês é chamado de root mean square, ou rms), sendo escrita como V_{ef} (ou V_{rms}). Para uma tensão senoidal:

$$V_{ef} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

V_{ef} é útil no cálculo da potência consumida por uma carga. Se a tensão CC de V_{CC} transfere certa potência P para a carga dada, então uma tensão CA de V_{ef} irá entregar a mesma potência média P para a mesma carga se $V_{ef} = V_{CC}$. Por este motivo, geralmente os modos de medição de tensão em sistemas de potência são em rms.

Para ilustrar estes conceitos, será tomado como exemplo a tensão de 220 V_{AC} usada em alguns estados brasileiros como tensão de distribuição secundária. Ela é assim chamada porque seu valor eficaz (rms) é, em condições normais, de 220V. Isto significa que ela tem o mesmo efeito joule, para uma carga resistiva, que uma tensão de 220V_{CC}. Para encontrar a tensão de pico, pode-se modificar a equação acima para:

$$V_{\max} = V_{rms} \cdot \sqrt{2}$$

Para 220 V_{CA}, a tensão de pico V_p ou V_{\max} é portanto, $220V \times \sqrt{2} \cong 311V$. O valor pico a pico V_{pp} de 220V_{CA} é ainda mais alta: $2 \times 220V \times \sqrt{2} \cong 622V$.

Valor médio

O valor médio de um sinal é dado pela soma das áreas dos semiciclos positivos e negativos, dividido pelo período do sinal, ou seja:

$$V_{med} = \frac{\sum \text{Áreas}}{T}$$

Esta medida permite a determinação do nível CC contido no sinal. No caso de um sinal alternado simétrico com relação à zero de amplitude (simetria horizontal e vertical), o valor médio é nulo.

A Figura 1.4(a) mostra uma onda senoidal simétrica, cujo valor médio da tensão é zero. Nela também são mostrados os valores de pico, pico a pico e rms. Já a Figura 1.4(b) mostra o caso de uma onda senoidal com uma componente CC, onde é possível observar que o valor médio não é nulo.

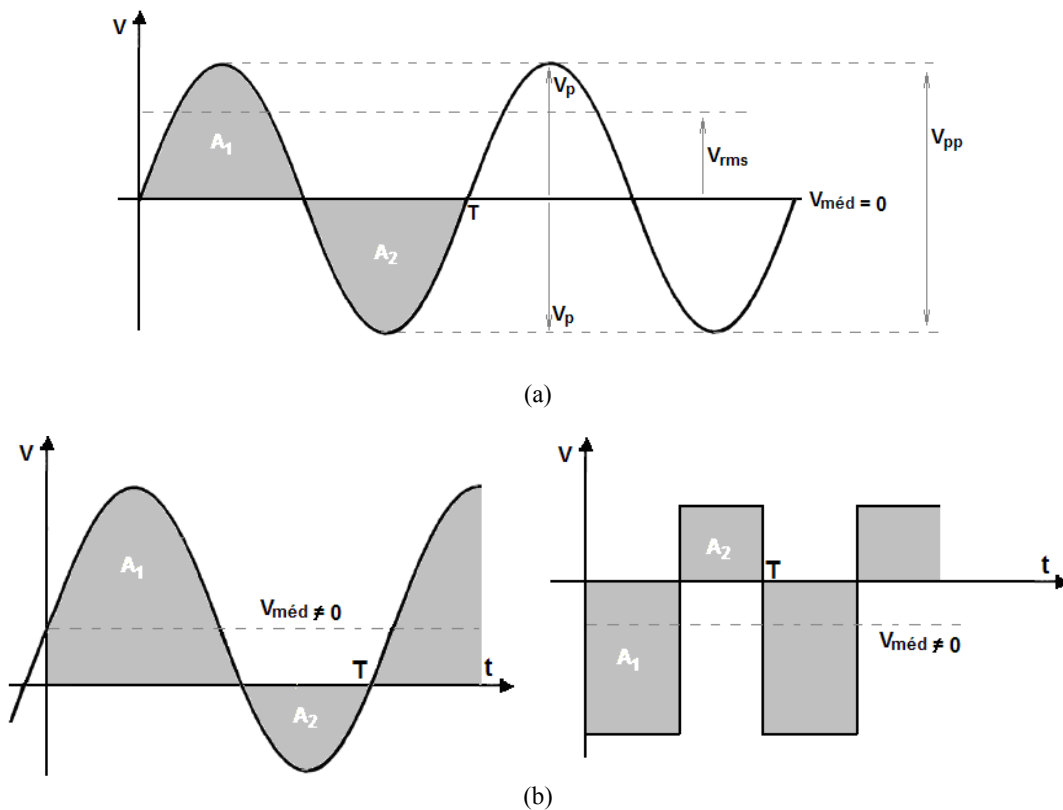
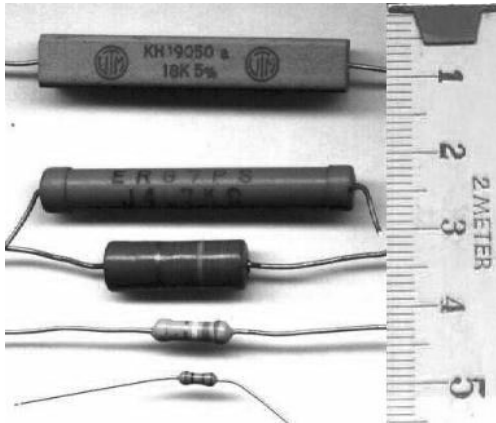


Figura 1.4: Exemplo de onda senoidal com valor médio nulo (a); senoidal e onda quadrada com valor médio não nulo em (b).

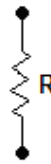
1.4 Resistência

Quando há movimentação de cargas através de qualquer material, existe uma força de oposição em muitos aspectos semelhante ao atrito mecânico. Esta oposição, resultado das colisões

entre elétrons e entre elétrons e átomos do material, converte energia elétrica em calor e é chamada “resistência” do material. Ou seja, a resistência é a propriedade dos materiais de se opor ou resistir ao movimento dos elétrons. Assim, para que elétrons possam passar através de um material é necessária a aplicação de uma tensão para fazer passar a corrente. A unidade de medida da resistência é o ohm (Ω). Na teoria de circuitos, o elemento que traduz o conceito de resistência apresentado acima é denominado “resistor”. O símbolo utilizado para a representação do resistor pode ser visto na Figura 1.5.



(a) Exemplos de dispositivos físicos



(b) Símbolo

Figura 1.5: Resistor (a) e seu símbolo característico.

O inverso da resistência é denominado “condutância” (G) e a unidade utilizada no SI é denominada “Siemens”. Matematicamente tem-se que:

$$G = \frac{I}{R} \quad [S]$$

1.4.1 Determinação da resistência de um elemento

Em um condutor elétrico ou em qualquer outro elemento, o valor de resistência pode ser encontrado com a área da seção transversal (S), com o comprimento do condutor (l) e com o valor da resistividade do material através da expressão abaixo.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega]$$

ρ = resistividade do material ($\Omega \cdot m$).

l: comprimento (m)

S: seção reta (m^2)

Bons condutores possuem uma resistividade próxima a $10^{-8} \Omega \cdot m$. Materiais denominados isolantes possuem resistividade maior que $10^{10} \Omega \cdot m$. Os materiais com resistividade entre 10^{-4} e $10^{-7} \Omega \cdot m$ são denominados semicondutores. A tabela a seguir apresenta a resistividade de alguns materiais a $20^\circ C$.

Material	Resistividade
Alumínio	$2,83 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Cobre	$1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Prata	$1,64 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Ferro	$12,3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

1.4.2 Variação da resistência com a temperatura

A resistência de um condutor varia com a temperatura. No caso dos metais a resistência aumenta quando a temperatura aumenta. Mas, há certas substâncias cuja resistência diminui à medida que a temperatura aumenta. Pode ser citado como exemplo o carbono e o telúrio ou semicondutores (silício e germânio). Existem também ligas metálicas cuja resistência não varia com a temperatura. Como exemplo pode ser citado o constantan (composta de níquel, cobre e zinco), a manganina (composta de cobre e manganês) e a niquelina (composta de cobre, manganês e níquel).

Um gráfico de resistência em função da temperatura tem o aspecto indicado na Figura 1.6. São curvas de pequenas curvaturas, tanto que em trechos relativamente grandes podem confundir-se com retas. Esse estudo é feito experimentalmente: varia-se a temperatura do condutor e mede-se a resistência. Assim se chega a uma relação algébrica entre a resistência e a temperatura, que é a seguinte:

$$R = R_o \cdot [1 + \alpha(t - t_o)] \quad [\Omega]$$

Onde R_o é a resistência do condutor na temperatura t_o e R é a resistência do condutor na temperatura t .

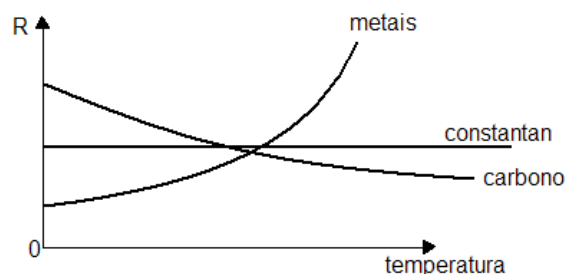


Figura 1.6: Variação da resistência elétrica com a temperatura.
(OBS.: As curvaturas são mostradas de forma exagerada para melhor visualização.)

O coeficiente de temperatura α depende do material e para um mesmo material ele *não* é constante. Varia com a faixa de temperatura t_o considerada. Porém, como a variação em análise sempre é pequena, considera-se constante dentro de um intervalo de temperatura de algumas dezenas de graus. Por exemplo, é considerado com um valor constante entre 0° e 50°C , entre 50° e 100°C , etc..

A unidade do coeficiente de temperatura é o inverso de uma unidade de temperatura. É mais comum avaliar-se a temperatura em graus Celsius ($^\circ\text{C}$), logo α é definido como $1/^\circ\text{C}$, ou, $(^\circ\text{C})^{-1}$.

Como mencionado anteriormente, baixando-se a temperatura dos metais a sua resistividade diminui. Porém, em temperaturas muito baixas, próximas do zero absoluto, os metais não se comportam todos do mesmo modo. Desta forma, eles podem ser divididos em dois grupos:

Em um primeiro grupo estão os metais cuja resistividade vai diminuindo com a temperatura, mas não se anula por mais que se baixe a temperatura, mesmo próximo do zero absoluto.

Em um segundo grupo estão os metais cuja resistividade vai diminuindo com a temperatura e após atingida uma certa temperatura ela cai bruscamente a zero. Chama-se supercondutividade a esse fenômeno pelo qual a resistividade de certos metais se anula a temperaturas muito baixas. Chama-se supercondutor ao condutor que está com resistividade nula.

1.5 Condutores ôhmicos e não-ôhmicos

O físico e professor universitário alemão Georges Simon Ohm (1787-1854) verificou experimentalmente que para alguns condutores o quociente entre a tensão V e a intensidade de corrente elétrica I era, e a esta constante chamou de resistência elétrica R .

$$\frac{V}{I} = R = \text{constante} \quad \Rightarrow V = R \cdot I$$

Nos metais e alguns tipos de condutores, a corrente é proporcional à tensão aplicada. Um aumento da tensão provoca um aumento proporcional da corrente, onde R é a constante de proporcionalidade.

Esta relação é denominada lei de Ohm e quanto menor a resistência maior é a corrente elétrica para uma mesma tensão aplicada.

Graficamente, um condutor que obedece à lei de Ohm, denominado ôhmico, é representado como na Figura 1.7(a). A Figura 1.7(b) mostra o comportamento de um condutor que não respeita a lei de Ohm, denominado não ôhmico. Neste caso a o parâmetro de proporcionalidade R não é constante.



Figura 1.7: Curva características dos condutores.

Para o caso de condutores ôhmicos, a Figura 1.7(a) apresenta duas retas onde cada uma representa a variação da corrente elétrica em relação à tensão para os condutores ôhmicos chamados de 1 e 2. A reta relativa ao condutor 1 possui inclinação maior que a reta relativa ao condutor 2, indicando que o primeiro possui resistência elétrica maior que o segundo, pois R nada mais é do que o coeficiente angular destas retas.

1.6 Indutores

Um indutor é um dispositivo elétrico passivo que armazena energia na forma de campo magnético normalmente combinando o efeito da corrente elétrica quando passa em várias espiras. O indutor pode ser utilizado em circuitos como um filtro passa-baixa, rejeitando as altas frequências em dispositivos eletro ou eletrônicos.

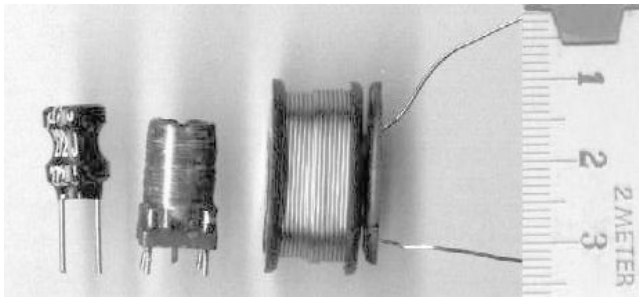
Um indutor é geralmente construído como uma bobina de material condutor, por exemplo, fio de cobre (Figura 1.8(a)). Um núcleo de material ferromagnético aumenta a indutância concentrando as linhas de força de campo magnético que fluem pelo interior das espiras. Pequenos indutores usados para frequências muito altas são algumas vezes feitos com um fio passando através de um cilindro de ferrite.

A grandeza física associada aos indutores é a Indutância L , é simbolizada pela letra L , medida em henry (H). Em outras palavras é um parâmetro de circuito que relaciona a tensão induzida por um campo magnético variável à corrente responsável pelo campo.

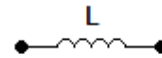
A tensão entre os terminais de um indutor é proporcional à variação da corrente elétrica que o atravessa, ou seja:

$$V(t) = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Um indutor, cujo símbolo é mostrado na Figura 1.8(b), resiste somente à mudanças de corrente. Um dispositivo ideal não oferece resistência para corrente direta (cc), exceto quando a corrente é ligada e desligada, caso em que faz a mudança de modo mais gradual. Porém, todos os indutores do mundo real são construídos a partir de materiais com resistência elétrica finita, apresentando também uma resistência ôhmica.



(a) Exemplos de dispositivos físicos



(b) Símbolo

Figura 1.8: Indutor (a) e seu símbolo característico.

Por sua habilidade de alterar sinais CA, os indutores são usados extensivamente em circuitos analógicos e processamento de sinais, incluindo recepções e transmissões de rádio. Como a reatância indutiva (trabalhada mais adiante neste material didático) muda com a frequência, um filtro eletrônico pode usar indutores em conjunto com capacitores e outros componentes para filtrar partes específicas da frequência do espectro.

Dois (ou mais) indutores acoplados formam um transformador, que é um componente fundamental na transmissão e distribuição de qualquer rede elétrica.

1.7 Capacitores

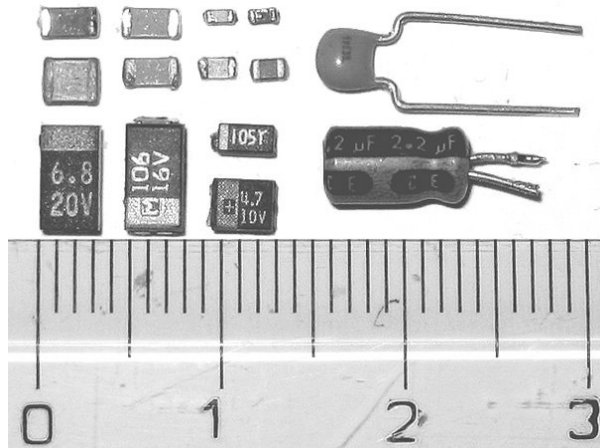
Um capacitor é um componente que armazena energia em um campo elétrico, acumulando um desequilíbrio interno de cargas elétricas (Figura 1.9).

Os formatos típicos consistem em dois eletrodos ou placas que armazenam cargas opostas. Estas duas placas são condutoras e são separadas por um isolante ou por um material dielétrico. A

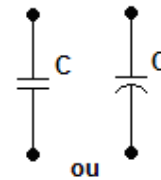
carga é armazenada na superfície das placas, no limite com o dielétrico. Devido ao fato de cada placa armazenar cargas iguais, porém opostas, a carga total no dispositivo é sempre zero.

A propriedade que estes dispositivos têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático é chamada de capacitância (C) e é medida pelo quociente da quantidade de carga (Q) armazenada pela diferença de potencial ou tensão (V) que existe entre as placas, ou seja:

$$C = \frac{Q}{V}$$



(a) Exemplo de dispositivo físicos



(b) Símbolo

Figura 1.9: Capacitor (a) e seu símbolo característico.

Pelo Sistema Internacional (SI), um capacitor tem a capacitância de um farad (F) quando um C de carga causa uma diferença de potencial de um volt (V) entre as placas. O farad é uma unidade de medida considerada muito grande para circuitos práticos, por isso, são utilizados valores de capacitâncias expressos em microfarads (μF), nanofarads (nF) ou picofarads (pF).

A equação abaixo é exata somente para valores de Q muito maiores que a carga do elétron ($e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$). A capacitância de um capacitor de placas paralelas constituído de dois eletrodos planos idênticos de área A separados à distância constante d é aproximadamente igual a:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Onde:

- C é a capacitância em farads;
- ϵ_0 é a permissividade eletrostática do vácuo ou espaço livre;
- ϵ_r é a constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante utilizado.

Os elétrons não podem passar diretamente através do dielétrico de uma placa do capacitor para a outra. Quando uma tensão é aplicada a um capacitor através de um circuito externo, a corrente flui para uma das placas, carregando-a, enquanto flui da outra placa, carregando-a, inversamente. Em outras palavras, quando a tensão que flui por um capacitor muda, o capacitor será carregado ou descarregado. O comportamento da corrente que flui em um capacitor é diretamente proporcional a sua capacitância e à variação temporal da tensão em seus terminais.

$$I(t) = C \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

No caso de uma tensão contínua, um equilíbrio é logo encontrado, onde a carga das placas correspondem à tensão aplicada pela relação $Q=C \cdot V$, e nenhuma corrente mais poderá fluir pelo circuito. Logo, a corrente contínua (DC) não pode passar. Entretanto, correntes alternadas (AC) podem. Cada mudança de tensão ocasiona carga ou descarga do capacitor, permitindo desta forma que a corrente flua.

Capacitores são comumente usados em fontes de energia para a suavização da forma de onda da saída (filtragem).

Por permitir a passagem de sinais de corrente alternada e bloquear corrente contínua, os capacitores são freqüentemente usados para separar componentes de AC e DC de um sinal. Este método é conhecido como acoplamento AC.

Capacitores também são usados na correção de fator de potência (será estudado mais adiante nesta unidade curricular). Tais capacitores freqüentemente vêm como três capacitores conectados como uma carga de três fases. Geralmente, os valores desses capacitores não são dados pela sua capacitância, mas pela sua potência reativa em Volt-Ampère reativos (VAR).

REFERÊNCIAS

[1] EDMINISTER, J. Circuitos Elétricos – Coleção Schaum, 2ª ed, Porto Alegre, Bookman, 2005.

[2] UNESP/FEG/DEE material didático

[3] <http://pt.wikipedia.org/> (último acesso em 07/08/2007)

CAPÍTULO 2 – Técnicas de Redução e Análise de Circuitos em Corrente Contínua

2.1 Introdução

Na grande maioria dos cursos de circuitos elétricos, a análise de circuitos resistivos em corrente contínua é utilizada para a explanação de conceitos fundamentais de redução e análise. Muitas das noções apresentadas dessa forma podem ser posteriormente estendidas à análise de circuitos em corrente alternada, porém o seu entendimento fica facilitado à medida que sua aplicação em corrente contínua foi previamente discutida.

Dessa forma, o objetivo deste capítulo é abordar didaticamente, no contexto dos circuitos resistivos em corrente contínua, os seguintes pontos:

- Associação de resistores (em série, paralelo e mista);
- Transformação estrela-triângulo;
- Transformação de fontes;
- Equivalentes de Thevenin e Norton;
- Superposição e linearidade;
- Divisão de corrente e tensão;
- Leis de Kirchhoff.

Todos os tópicos acima são de constante utilização e requisitos fundamentais à habilidade de um Técnico em Eletroeletrônica de analisar e compor sistemas baseados em circuitos elétricos.

2.2 Associação de Resistores

Nesta seção, discutem-se três tipos de associação de resistores e a forma de obtenção da resistência equivalente. Os três tipos de associação são:

- Série;
- Paralela;
- Mista.
-

2.2.1 Associação Série

A Figura 2.1 mostra uma associação de resistores em série.



Figura 2.1: Associação de Resistores em Série.

As principais características de uma associação de resistores em série são as seguintes:

- A corrente que passa por todos os resistores é a mesma;
- A resistência equivalente do conjunto é a soma das resistências associadas;
- A queda de tensão em cada resistência é proporcional ao valor da resistência analisada.

Dessa forma, a equação para cálculo da resistência equivalente na Figura 2.1 é dada abaixo:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_n$$

Vários exemplos práticos onde cabem analogias utilizando resistências associadas em série podem ser citados. Por exemplo, em uma instalação predial, a resistência dos condutores que supre as cargas está em série com a resistência equivalente das próprias cargas. Dessa forma, quanto maior a resistência dos condutores, maior será a parcela da tensão da fonte que aparecerá sobre os condutores.

2.2.2 Associação Paralela

A Figura 2.2 mostra uma associação de resistores em paralelo.

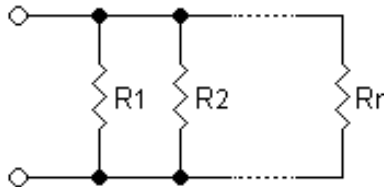


Figura 2.2: Associação de Resistores em Paralelo.

Analisando de forma semelhante o que foi feito para a associação em série, as principais características de uma associação de resistores em paralelo são as seguintes:

- A tensão em todos os resistores é a mesma;
- O inverso da resistência equivalente do conjunto é a soma dos inversos das resistências associadas;
- A corrente em cada resistência é proporcional ao inverso do valor da resistência em cada ramo da Figura 2.2.

Dessa forma, a equação para cálculo da resistência equivalente na Figura 2.2 é dada abaixo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n}$$

No caso particular de dois resistores em paralelo, vale a seguinte equação.

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

A conexão em paralelo pode ser utilizada para uma analogia de um circuito residencial, onde os componentes são ligados aos fios fase e neutro, ou seja, estão todos no mesmo potencial caracterizando esse tipo de ligação (nesse caso a analogia desconsidera a resistência dos condutores).

2.2.3 Associação Mista

A Figura 2.3 mostra uma associação mista de resistores.

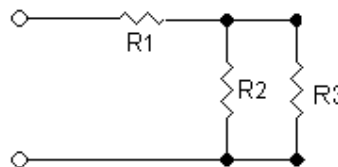


Figura 2.3: Associação Mista de Resistores.

Na associação mista, a obtenção da resistência equivalente prescreve a habilidade do analisador do circuito em reduzir as conexões para as formas padrão série e paralelo e aplicar as equações vistas anteriormente para chegar ao valor final da resistência equivalente do circuito.

Em casos reais, normalmente o modelo de associação mista caracteriza a maior parte das redes elétricas, pois elementos de passagem de corrente para a terra (referência de tensão do circuito) e elementos em série (como resistência de condutores) fazem parte dos circuitos que alimentam as cargas desde uma fonte de tensão.

2.3 Transformação de Fontes

O texto abaixo foi obtido da referência [2].

O teorema da transformação de fontes permite que uma fonte de tensão, que possui uma determinada resistência interna seja transformada em uma fonte de corrente com a correspondente resistência interna.

Para ilustrar o teorema da transformação de fontes, considere a Figura 2.4.

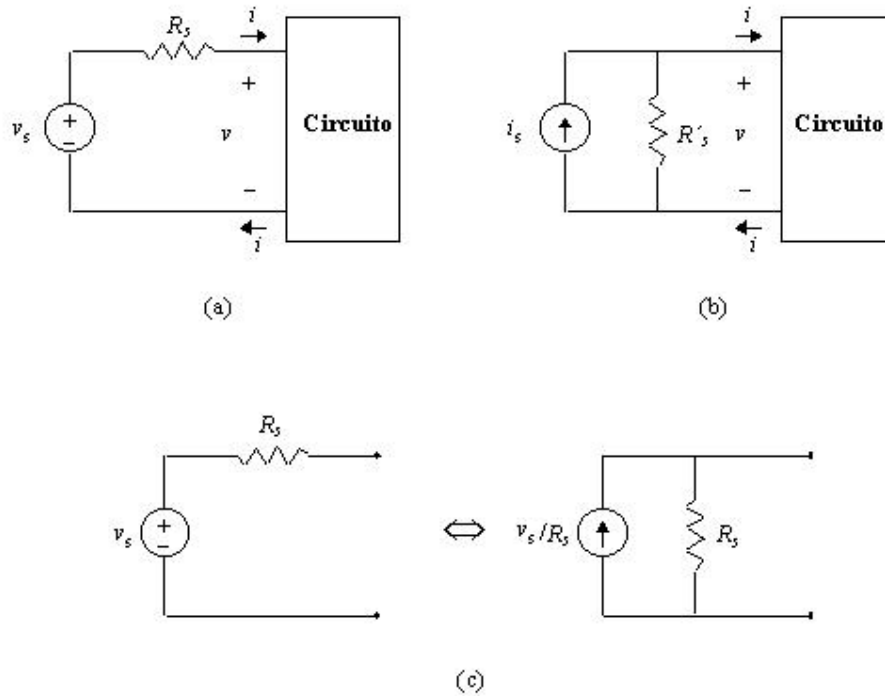


Figura 2.4: Transformação de Fontes.

No circuito da Figura 2.4 (a) pode-se escrever:

$$v_s = R_s \cdot i + v$$

Por sua vez, na Figura 2.4 (b) tem-se:

$$i_s = i + \frac{v}{R'_s}$$

Ou então,

$$R'_s i_s = R'_s i + v$$

Dessa forma, se obtém a regra de conversão entre fontes de tensão e corrente, colocadas abaixo, arbitrando-se a igualdade entre a tensão e a corrente obtida nos terminais das duas fontes:

$$v_s = R'_s i_s$$

E para a resistência da fonte equivalente:

$$R_s = R'_s$$

2.4 Linearidade e Superposição

Esta seção trata das propriedades de linearidade e superposição em circuitos elétricos. O texto sobre essas propriedades, mostrado abaixo, foi retirado da Referência [3].

Estas duas propriedades permitem que, em certos casos, a solução de circuitos complexos possa ser obtida de forma simplificada, considerando-se o efeito das fontes independentes de forma isolada e somando-se as soluções correspondentes.

2.4.1 Linearidade

Em sistemas ditos lineares, variações ou composições nos sinais de saída (efeitos) refletem as variações ou composições impostas aos sinais de entrada (causas). Matematicamente, a linearidade é uma combinação da propriedade de homogeneidade (também conhecida como escalonamento ou proporcionalidade) e da propriedade aditiva.

A homogeneidade expressa o fato de que se a entrada de um sistema (excitação) for multiplicada por uma constante, a saída (resposta) também será multiplicada pela mesma constante. Tomando-se como exemplo um resistor linear, a relação tensão-corrente será dada pela Lei de Ohm. Considerando a corrente como entrada e tensão como saída, existe a seguinte relação entre entrada e saída (já vista, exhaustivamente, em seções anteriores no curso):

$$v = R.i$$

Se a corrente (sinal de entrada) for multiplicada por um fator k , a tensão (sinal de saída) irá apresentar o mesmo comportamento, conforme abaixo:

$$R.(k.i) = k.(R.i) = k.v$$

A propriedade de adição (propriedade aditiva) expressa o fato de que resposta de um sistema à uma entrada constituída pela soma de várias será a soma das respostas individuais consideradas separadamente. Por exemplo, considerando a resposta de um resistor a uma entrada constituída de duas correntes, obtém-se a seguinte relação para as respostas individuais a cada uma das correntes:

$$\begin{aligned}v_1 &= R.i_1 \\v_2 &= R.i_2\end{aligned}$$

Nesse caso, a resposta total para a soma das correntes seria:

$$v = R.(i_1 + i_2) = R.i_1 + R.i_2$$

Desta forma, pode-se afirmar que o resistor linear possui uma relação tensão corrente que satisfaz tanto a propriedade de homogeneidade como a propriedade aditiva.

Podem-se estender os conceitos aplicados para o resistor para os demais componentes do circuito. Assim, um circuito será considerado linear se todos os seus componentes possuírem a propriedade de homogeneidade e a propriedade aditiva. Circuitos que possuem fontes independentes, fontes dependentes, capacitores lineares, indutores lineares e resistores lineares é um

circuito linear. Para circuitos lineares, a resposta estará linearmente relacionada com a entrada. Como entrada, pode-se considerar as fontes independentes e como saída podem-se considerar as tensões e correntes em todos os seus componentes.

Deve-se observar que a propriedade de linearidade não se aplica à potência, mas apenas a correntes e tensões.

2.4.2 Superposição

O princípio de superposição é uma consequência da propriedade de linearidade, e portanto, se aplica a circuitos lineares, os quais contêm fontes independentes, fontes dependentes, capacitores lineares, indutores lineares e resistores lineares.

Em um circuito com mais de uma fonte, sejam essas de tensão ou corrente, o princípio de superposição estabelece que a resposta “total” do circuito com todas as fontes operando pode ser obtida a partir da resposta individual do circuito a cada uma das fontes operando de forma isolada.

Desta forma, podem-se determinar respostas do circuito considerando-se as fontes uma a uma e somar algebricamente as respostas individuais ao final, obtendo-se a resposta das fontes operando simultaneamente. A utilização do princípio de superposição pode, em muitos, casos reduzir a complexidade do circuito e facilitar a solução.

Para utilizar o princípio de superposição, recomendam-se os seguintes passos:

Passo 1: Desligar todas as fontes independentes do circuito, exceto uma. Desligar, nesse caso, significa que fontes de tensão são substituídas por curtos-circuitos e fontes de corrente por circuitos abertos. Fontes dependentes (controladas) não devem ser alteradas.

Passo 2: repetir o passo 1 até que todas as fontes independentes foram consideradas.

Passo 3: determinar a resposta total somando-se as respostas individuais de cada fonte.

As tensões e correntes de cada ramo serão a soma das tensões e correntes individuais obtidas. Deve-se atentar para o sentido das correntes e polaridade das tensões nas respostas individuais. Deve-se também observar que o princípio da superposição é baseado no princípio da linearidade e não se aplica, portanto, à potência, uma vez que esta envolve uma relação não linear, conforme demonstrado anteriormente.

Portanto, a potência total de cada componente devido à atuação de todas as fontes não será a soma das potências individuais quando cada fonte atua de forma isolada.

2.5 Divisão de Tensão e Divisão de Corrente

Nesta seção serão colocados os conceitos de divisão de tensão e corrente, que permitem calcular essas grandezas por fórmulas diretas, o que permite facilitar a análise de circuitos com determinadas topologias.

O texto abaixo foi obtido a partir da Referência [1].

2.5.1 Divisão de Tensão

A regra do divisor de tensão se aplica a componentes (resistores) conectados em série, como no caso do circuito mostrado na Fig 2.5(a), e se destina a determinar a tensão sobre cada componente individual. A resistência equivalente para os terminais x-y é mostrada na Fig 2.5(b), sendo dada pela relação:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n$$

A corrente em todos os componentes é a mesma, sendo dada pela equação:

$$I = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{V}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n}$$

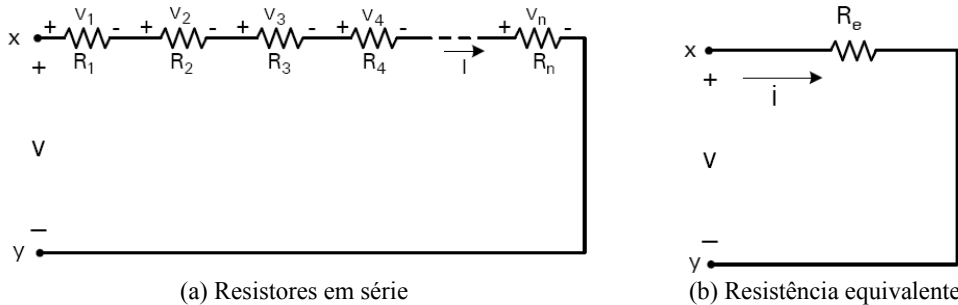


Figura 2.5: Princípio do divisor de tensão.

Desta forma, a tensão sobre cada resistor será dada pelo seguinte conjunto de equações:

$$V_1 = R_1 \cdot I = \frac{R_1 \cdot V}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n}$$

$$V_2 = R_2 \cdot I = \frac{R_2 \cdot V}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n}$$

$$\vdots$$

$$V_n = R_n \cdot I = \frac{R_n \cdot V}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n}$$

As equações anteriores permitem determinar diretamente a tensão sobre cada resistor a partir da tensão aplicada aos terminais x-y. A regra geral é: a tensão sobre cada componente é a tensão aplicada aos terminais de entrada multiplicada pela resistência e dividida pela soma das resistências dos componentes.

Ao se aplicar a regra, é fundamental observar se as polaridades das tensões e sentidos das correntes sobre os componentes são conforme mostra a Fig 2.5.

2.5.2 Divisão de Corrente

Analogamente ao caso de resistências em série, a regra do divisor de corrente se aplica a componentes (resistores) conectados em paralelo, como no caso do circuito mostrado na

Figura 2.6 (a), e se destina a determinar a corrente circulando cada componente individual. A condutância equivalente para os terminais x-y é mostrada na

Figura 2.6 (a), sendo dada pela relação:

$$G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + \dots + G_n$$

A tensão em todos os componentes é a mesma, sendo dada pela equação:

$$V = \frac{I}{G_{eq}} = \frac{I}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + \dots + G_n}$$

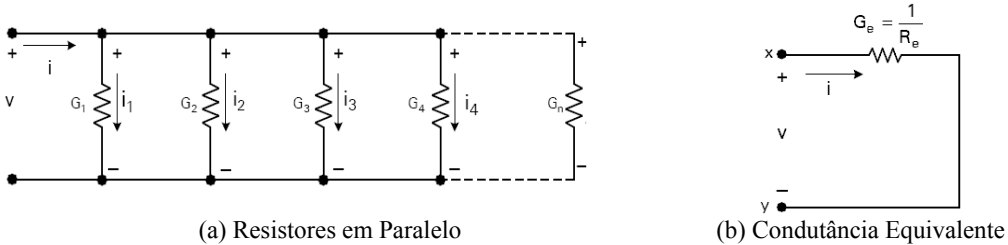


Figura 2.6: Princípio do divisor de corrente.

Desta forma, a corrente em cada um dos resistores será dada pelo seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned} I_1 &= G_1 \cdot V = \frac{G_1 \cdot I}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + \dots + G_n} \\ I_2 &= G_2 \cdot V = \frac{G_2 \cdot I}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + \dots + G_n} \\ &\vdots \\ I_n &= G_n \cdot V = \frac{G_n \cdot I}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + \dots + G_n} \end{aligned}$$

As equações anteriores permitem, assim, determinar diretamente a corrente em cada resistor seguinte forma: a corrente em cada componente é a corrente de entrada multiplicada pela condutância e dividido pela soma das condutâncias dos componentes.

Ao se aplicar a regra, é fundamental observar se as polaridades das tensões e sentidos das correntes sobre os componentes.

Geralmente, as resistências são expressas em ohms, sendo portanto, útil expressar as últimas equações em termos das resistências, ao invés de condutâncias. Utilizando-se a relação entre condutâncias e resistências, obtém-se para o divisor de corrente a seguinte expressão:

$$I_n = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \dots + \frac{1}{R_n}} \cdot \frac{1}{R_n} \cdot I = R_{eq} \cdot \frac{1}{R_n} \cdot I$$

Expressões bastante úteis também podem ainda ser obtidas para o caso de apenas dois resistores em paralelo, como os mostrados na Figura 2.7:

$$I_1 = G_1 \cdot V = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot \frac{1}{R_1} \cdot I$$

$$I_2 = G_2 \cdot V = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot \frac{1}{R_2} \cdot I$$

A partir das equações acima, obtém-se, finalmente, para o caso de dois resistores:

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$$

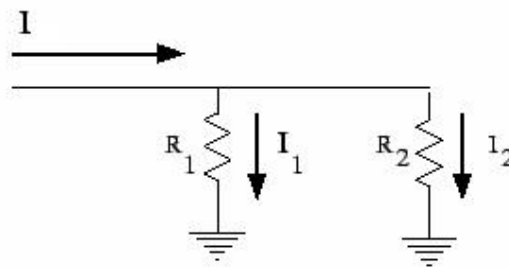


Figura 2.7: Divisor de Corrente com Dois Resistores em Paralelo Apenas.

2.6 Leis de Kirchhoff

As duas leis experimentais de Kirchhoff estão entre os teoremas mais utilizados para analisar circuitos e, em sua extensão, redes elétricas.

2.6.1 Primeira Lei – Lei dos Nós

A primeira lei de Kirchhoff é chamada de Lei dos Nós pode ser enunciada como:

“A soma das correntes que entra em um nó é igual à soma das correntes que saem do mesmo nó”.

Esta primeira lei está ilustrada na Figura 2.8, onde os elementos de circuito 1, 2, 3, 4, n, que são percorridos por correntes que somadas, consideradas as devidas polaridades, totalizam zero.

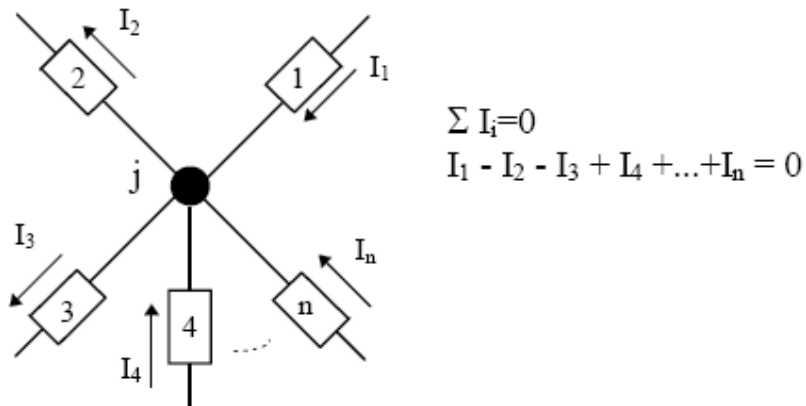


Figura 2.8: Lei dos Nós de Kirchoff [4].

2.6.2 Segunda Lei – Lei das Malhas

A segunda lei de Kirchhoff é chamada de Lei das malhas e pode ser enunciada como:

“A soma algébrica das tensões em uma malha é igual a zero”.

A segunda lei está ilustrada na Figura 2.9.

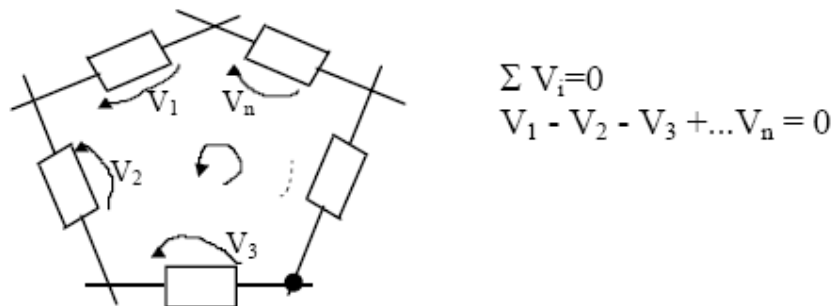


Figura 2.9: Lei das Malhas de Kirchoff [4].

REFERÊNCIAS

- [1] TOFOLI, F. L.; “Apostila-Eletricidade”, Cefetsc, 2007.
- [2] VERÍSSIMO, L.; “Transformação de Fontes”, Disponível em: http://lodi.est.ips.pt/lveriss/Sebenta_Online/cap_04/transfon.htm (Último acesso em Agosto de 2007).
- [3] PEREIRA, L. A., “Linearidade e Superposição”. Disponível em: http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/CKT_I/LinearidadeSuperposicao.pdf, último acesso em Julho de 2007
- [4] Escola Politécnica da USP; “Corrente Contínua – Apostila”. Disponível em www.pea.usp.br/apostilas (Último acesso em Agosto de 2007).

CAPÍTULO 3 – Análise de Circuitos em Corrente Alternada

3.1 Introdução

Este capítulo tratará da análise de circuitos elétricos em corrente alternada. Um circuito sob este tipo de excitação difere do caso em corrente contínua, pois outros elementos, que passavam despercebidos no último caso, passam a ter influência preponderante no comportamento do mesmo. Estes dispositivos são armazenadores de energia, como os capacitores e os indutores.

Todas as análises que são feitas neste capítulo com circuitos alimentados por tensão alternada são em **regime permanente**, ou seja, é considerado que o circuito já esteja ligado a um certo tempo. O intervalo de tempo compreendido entre o instante em que o circuito é ligado até entrar em regime permanente é chamado de **regime transitório**, e não será foco de análise nesta unidade curricular.

3.2 Fasor

Uma onda senoidal ou cossenoidal pode ser representada através de um vetor girando em torno de um ponto. A figura 3.1 mostra como uma senóide pode ser representada por meio de um vetor girante - fasor.

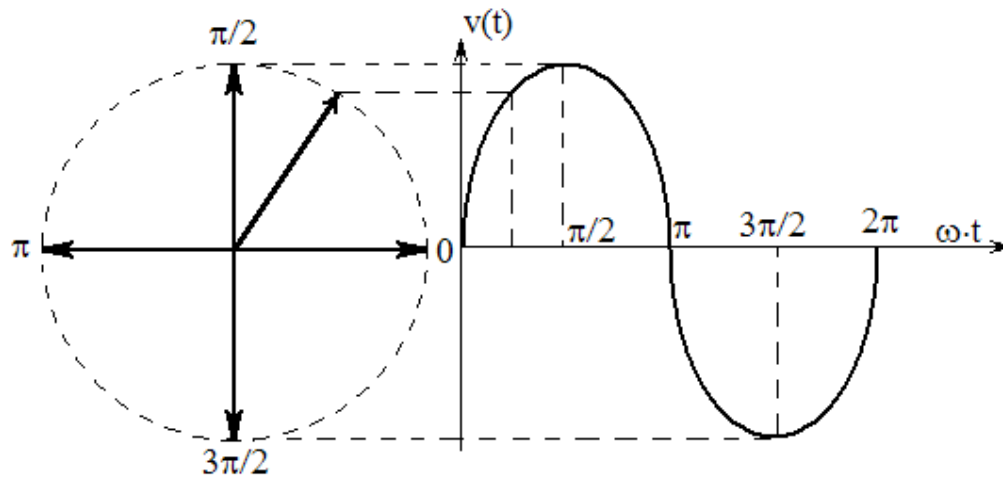


Figura 3.1: Deslocamento de um vetor girante (fasor).

O fasor é uma representação que facilita a resolução e o entendimento de circuitos elétricos quando a análise é feita em corrente alternada. Todo fasor é representado por uma letra maiúscula com um pequeno ponto em sua parte superior e indica o módulo e o ângulo de alguma grandeza variável no tempo, ou seja, somente tensões e correntes alternadas são representadas através de fasores.

Se for tomada a forma de onda da tensão:

$$v(t) = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t \pm \theta_v)$$

Esta pode ser representada na forma fasorial por:

$$\dot{V} = V_{m\acute{a}x} \angle \pm \theta_v$$

A definição de fasor indica que o módulo deve ser representado pelo valor máximo ($V_{m\acute{a}x}$) ou valor de pico (V_p) da senóide. Porém, alguns autores preferem utilizar a representação fasorial expressando o módulo através do valor eficaz ou valor rms. O uso do fasor utilizando o valor eficaz gera algumas vantagens na determinação da potência nos circuitos alimentados por tensão

alternada. O valor eficaz de uma onda senoidal é: $V_{ef} = V_{m\acute{a}x} / \sqrt{2}$.

O ângulo que deve ser utilizado para indicação do fasor é aquele que a equação da forma de onda indica quando é substituída na mesma a variável (t) por zero. Logo, a tensão instantânea $v(t) = V_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t \pm \theta_v)$ pode ser representada fasorialmente como: $\dot{V} = V_{ef} \angle \pm \theta_v$.

Se a forma de onda da tensão instantânea tiver sua origem coincidindo com a origem do sistema cartesiano é possível representá-la no tempo como $v(t) = V_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$ e fasorialmente como $\dot{V} = V_{ef} \angle 0^\circ$.

3.3 Impedância complexa (Z)

Quando um circuito é alimentado por tensão alternada, a oposição à passagem da corrente não ocorre somente devido à resistência do mesmo pois elementos como indutores (bobinas) e capacitores, também provocam oposição à circulação de corrente. A oposição à passagem da corrente alternada criada por esses elementos é chamada de Reatância Z. As reatâncias se manifestam em circuitos de corrente alternada de formas diferenciadas para os dois elementos. Ou seja, o indutor através de sua reatância indutiva X_L e o capacitor através de sua reatância capacitiva X_C . A impedância total de um circuito é a soma complexa das impedâncias individuais dos elementos que compõem o mesmo, sendo que a parte real do número complexo é a resistência e as reatâncias é a parte imaginária. A impedância tem como unidade o Ohm (Ω) e pode ser representada das seguintes formas.

Retangular:

$Z = R + jX_L \rightarrow$ Impedância de um circuito que contém resistor e indutor;

$Z = R - jX_C \rightarrow$ Impedância de um circuito que contém resistor e capacitor.

Polar:

$\dot{Z} = |Z| \angle \phi \text{ } (\Omega) \rightarrow$ Impedância de um circuito que contém resistor e indutor;

$\dot{Z} = |Z| \angle -\phi \text{ } (\Omega) \rightarrow$ Impedância de um circuito que contém resistor e capacitor.

3.3.1 Resistência

Resistência é a propriedade que o elemento físico resistor tem de se opor à passagem de corrente elétrica. Sua unidade é o Ohm (Ω). Esse elemento pode ser representado pela sua impedância complexa $Z = R(\Omega)$, na forma retangular e na forma polar por $\dot{Z} = |R| \angle 0^\circ \text{ } (\Omega)$.

3.3.2 Indutância

A indutância expressa a capacidade do elemento físico indutor de se opor às variações bruscas da corrente elétrica através da armazenagem da energia no seu campo magnético. A unidade de indutância é o Henry (H).

Quando um indutor é alimentado por uma corrente alternada surge a reatância indutiva X_L que depende diretamente da frequência a qual o indutor está submetido. A reatância indutiva, cuja unidade também é o Ohm (Ω) é definida matematicamente como:

$$X_L = \omega \cdot L$$

A reatância indutiva é a parte imaginária da impedância complexa; logo, é representada na forma retangular por $Z = jX_L \text{ } (\Omega)$ e na forma polar por $\dot{Z} = |X_L| \angle 90^\circ \text{ } (\Omega)$.

3.3.3 Capacitância

A capacitância expressa a capacidade do elemento físico capacitor de armazenar carga. Sua unidade é o Farad (F). Quando um capacitor é submetido a uma tensão alternada, surge a reatância capacitiva (X_C), que depende inversamente da frequência a que o mesmo está submetido. A unidade da reatância indutiva também é o Ohm (Ω) e pode ser definida como:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

A reatância capacitiva é a parte imaginária da impedância complexa, logo, é representada na forma retangular por $Z = -jX_C \text{ } (\Omega)$ e na forma polar por $\dot{Z} = |X_C| \angle -90^\circ \text{ } (\Omega)$.

3.4 Tensão alternada alimentando uma resistência pura

Quando uma tensão alternada senoidal é aplicada em um circuito contendo apenas resistores (figura 3.2), haverá apenas uma limitação no valor de corrente, mas não haverá defasagem entre tensão e corrente, pois o resistor não provoca esse efeito. A tensão e a corrente ficam em fase, isto é, as ondas de tensão e corrente atingem valores máximos e mínimos no mesmo instante de tempo fazendo com que a defasagem entre a tensão e a corrente seja nula. Esse efeito está representado graficamente através das ondas de tensão e corrente da figura 3.3(a) na forma temporal e (b) na forma fasorial.

Se a tensão aplicada ao circuito for considerada como $v(t) = V_{máx} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$, a corrente resultante será $i(t) = I_{máx} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$, ou seja, o ângulo de ambas é o mesmo.

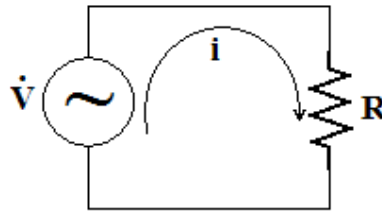


Figura 3.2: Circuito contendo apenas resistor.

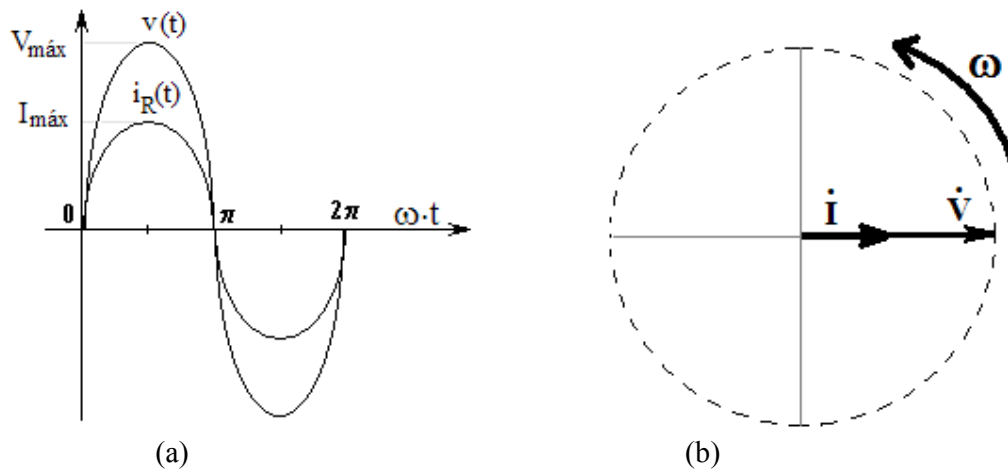


Figura 3.3: Defasagem entre tensão e corrente em um resistor com representação temporal (a) e fasorial (b).

A corrente de qualquer circuito pode ser calculada utilizando a Lei de Ohm, pois esta lei determina a intensidade de corrente em um circuito através da razão entre a tensão aplicada ao mesmo e a dificuldade vista pela fonte. No caso dos circuitos alimentados por corrente alternada essa “dificuldade” se chama impedância, logo, a Lei de Ohm em corrente alternada será dada em termos da impedância e não mais só pela resistência. Assim:

$$I = \frac{V}{Z}$$

Para o circuito resistivo puro, a corrente fasorial é calculada da seguinte forma:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{|\dot{V}| \angle \theta_v}{R \angle 0^\circ} \quad \dot{I} = |\dot{I}| \angle (\theta_v - 0^\circ)$$

Como $\theta_v = 0$, a expressão acima resulta em: $\dot{I} = |\dot{I}| \angle \theta_i$, onde $\theta_v = \theta_i$

3.5 Tensão alternada alimentando uma indutância pura

Quando uma tensão alternada senoidal é aplicada em um circuito contendo apenas indutores puros (circuito ideal) como o da figura 3.4, ocorrerá um atraso de 90° da corrente em relação à tensão aplicada, provocada pelo efeito de acumulação de energia no campo magnético do indutor. A figura 3.5(a) ilustra essa defasagem utilizando as ondas de tensão e corrente instantâneas, mostrando que a onda de corrente atinge valores máximos e mínimos 90° depois da onda de tensão. Considerando a tensão instantânea aplicada ao circuito como $v(t) = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$, a corrente instantânea resultante será expressa pela equação $i(t) = I_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - 90^\circ)$. A representação fasorial destas formas de onda é mostrada na Figura 3.5(b).

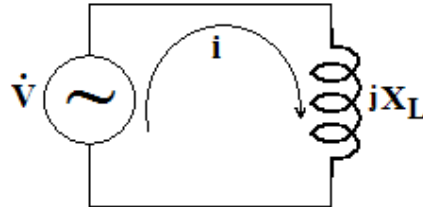


Figura 3.4: Circuito contendo apenas um indutor.

É possível calcular a corrente fasorial no circuito indutivo puro da seguinte forma:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{|\dot{V}| \angle \theta_v}{X_L \angle 90^\circ}$$

A expressão acima resulta em:

$$\dot{I} = |\dot{I}| \angle (\theta_v - 90^\circ)$$

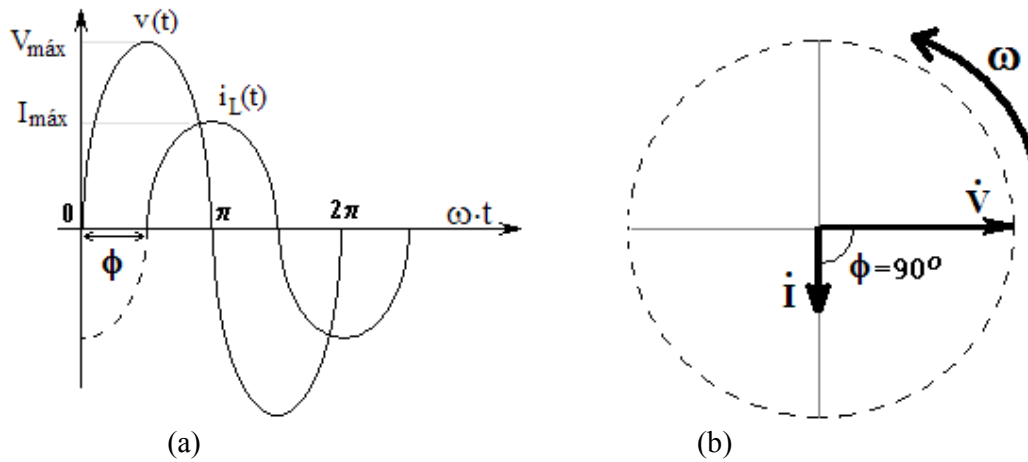


Figura 3.5: Defasagem entre tensão e corrente em um indutor com representação temporal (a) e fasorial (b)

3.6 Tensão alternada alimentando uma capacitância pura

Quando uma tensão alternada senoidal é aplicada em um circuito contendo apenas capacitores puros (circuito ideal) como o caso da figura 3.6, ocorrerá um adiantamento de 90° da corrente em relação à tensão aplicada, provocada pelo efeito de acumulação de energia no campo elétrico do capacitor. A figura 3.7(a) mostra a defasagem utilizando as ondas de tensão e corrente instantâneas, mostrando que a onda de corrente atinge valores máximos a mínimos 90° antes da onda de tensão. Considerando a tensão instantânea aplicada ao circuito como $v(t) = V_{máx} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$, a corrente instantânea resultante será expressa pela fórmula: $i(t) = I_{máx} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + 90^\circ)$.

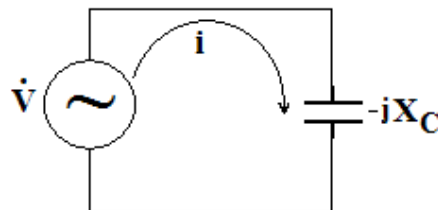


Figura 3.6: Circuito contendo apenas um capacitor.

A representação fasorial destas formas de onda é mostrada na Figura 3.7(b).

É possível calcular a corrente fasorial no circuito capacitivo puro da seguinte forma:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{|\dot{V}| \angle \theta_v}{X_c \angle -90^\circ}$$

A expressão acima resulta em:

$$\dot{i} = |\dot{i}| \angle (\theta_v + 90^\circ)$$

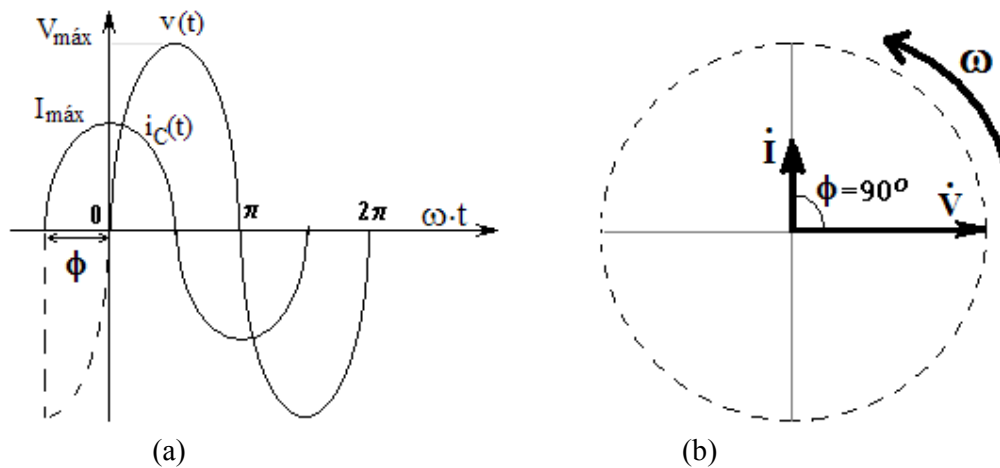


Figura 3.7: Defasagem entre tensão e corrente em um capacitor com representação temporal (a) e fasorial (b)

3.7 Tensão alternada alimentando um circuito RL série

Quando uma tensão alternada senoidal é aplicada em um circuito resistivo-indutivo como o da figura 3.8 ocorrerá um atraso (defasagem) da corrente em relação à tensão aplicada. Essa defasagem (atraso temporal) será de um ângulo que varia entre 0° e 90° , que dependerá da influência dos elementos resistor e indutor, pois como o resistor sozinho tende a deixar a corrente e a tensão em fase (ângulo de 0° entre elas), o indutor tende a atrasá-la de 90° . Portanto, como ambos estão atuando em conjunto, a defasagem ficará entre 0° e 90° . Quanto maior for a influência da reatância indutiva mais perto de 90° estará o ângulo de defasagem. Caso a influência da resistência seja maior, mais próximo de 0° estará esse ângulo. O ângulo de defasagem é chamado de, ϕ , sendo o ângulo da impedância do circuito.

Se a tensão instantânea aplicada ao circuito for $v(t) = V_{máx} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$ a corrente instantânea resultante será expressa pela equação $i(t) = I_{máx} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \phi)$. A figura 3.9(a) ilustra a defasagem utilizando as ondas de tensão e corrente instantâneas, mostrando que a onda de corrente está em atraso em relação à de tensão de um ângulo ϕ .

A representação fasorial destas formas de onda é mostrada na Figura 3.9(b).

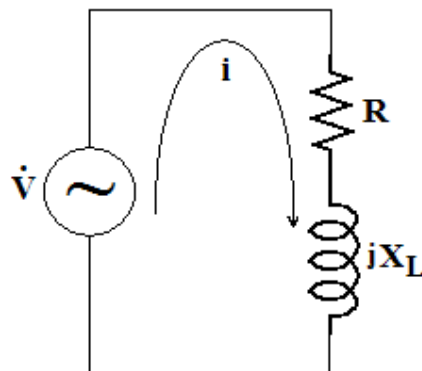


Figura 3.8: Circuito contendo resistor e indutor - RL.

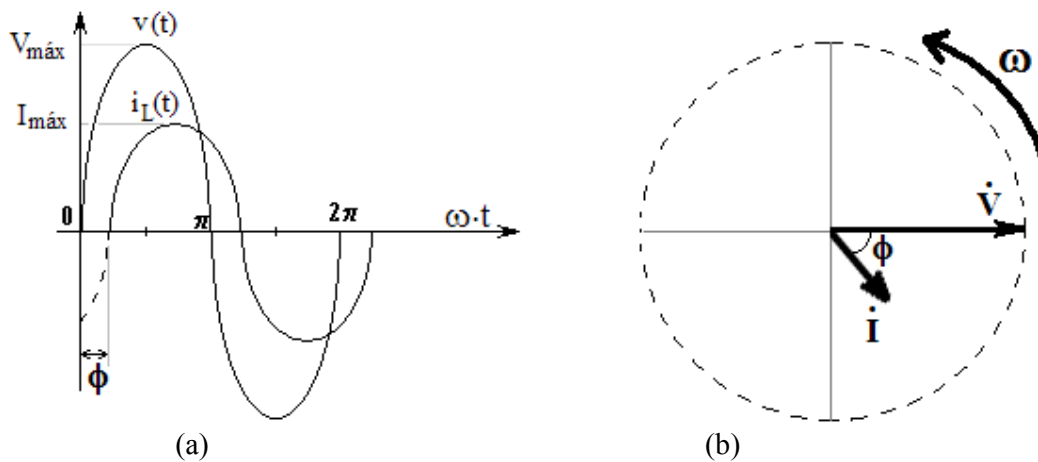


Figura 3.9: Defasagem entre tensão e corrente em um circuito RL com representação temporal (a) e fasorial (b)

É possível calcular a corrente fasorial no circuito RL da seguinte forma:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{|\dot{V}| \angle \theta_V}{R + jX_L} \quad \dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{|\dot{V}| \angle \theta_V}{\dot{Z} \angle \phi}$$

A expressão acima resulta em:

$$\dot{I} = |\dot{I}| \angle (\theta_V - \phi)$$

A dificuldade total que o circuito impõe à passagem de corrente é determinada pelo número complexo da impedância Z , como já foi mencionado anteriormente. Esse número pode ser representado pelo triângulo de impedâncias mostrado na figura 3.10.

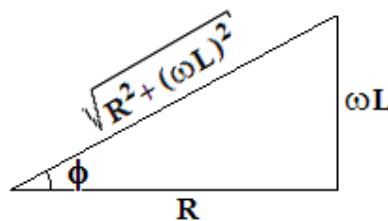


Figura 3.10: Triângulo de impedância de uma carga RL.

3.8 Tensão alternada alimentando um circuito RC série

Quando uma tensão alternada senoidal for aplicada em um circuito resistivo-capacitivo como o da figura 3.11, ocorrerá um adiantamento da corrente em relação à tensão aplicada. Essa defasagem será de um ângulo que varia entre 0° e 90° , que dependerá da influência dos elementos

resistor e capacitor, pois como o resistor sozinho tende a deixar corrente e a tensão em fase (ângulo de 0° entre elas), o capacitor tende a adiantá-las de 90° da tensão. Portanto, como ambos atuarão em conjunto, a defasagem ficará entre 0° e 90° . Quanto maior for a influência da reatância capacitiva, mais perto de 90° estará o ângulo de defasagem. Caso a influência da resistência seja maior, mais próximo de 0° estará esse ângulo. O ângulo de defasagem é também chamado de ϕ , sendo o mesmo ângulo da impedância do circuito.

Se a tensão instantânea aplicada ao circuito é $v(t) = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$, a corrente instantânea resultante será expressa pela equação $i(t) = I_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi)$. A figura 3.12(a) ilustra a defasagem utilizando as ondas de tensão e corrente instantâneas, mostrando que a onda de corrente está adiantada em relação à de tensão de um ângulo ϕ .

A representação fasorial destas formas de onda é mostrada na Figura 3.12(b).

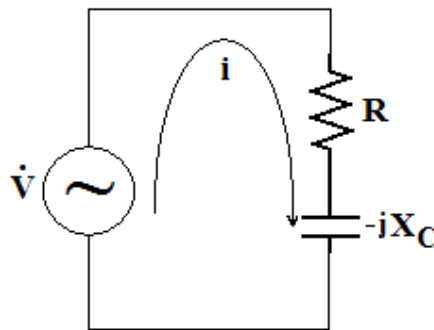


Figura 3.11: Circuito contendo resistor e capacitor - RC.

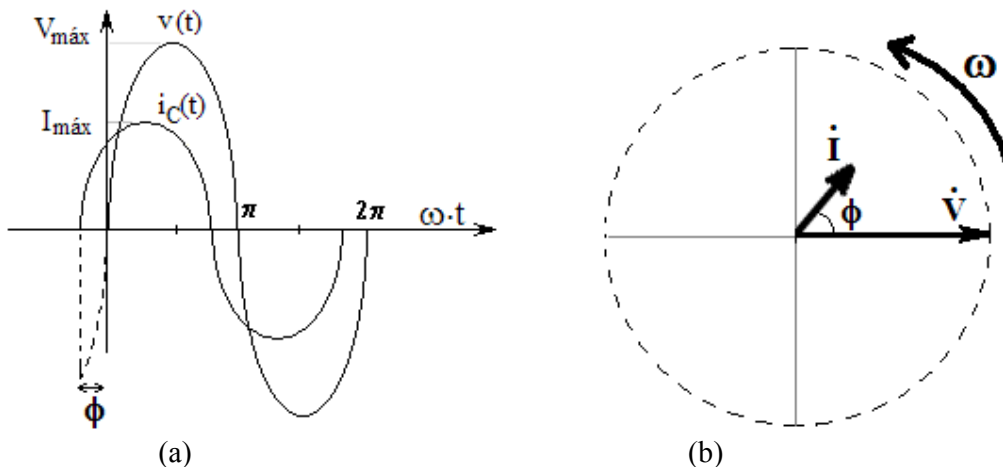


Figura 3.12: Defasagem entre tensão e corrente em um circuito RC com representação temporal (a) e fasorial (b)

É possível calcular a corrente fasorial no circuito RC puro da seguinte forma:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{|\dot{V}| \angle \theta_v}{R - jX_c} \quad \dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{|\dot{V}| \angle \theta_v}{\dot{Z} \angle -\phi}$$

A expressão acima resulta em:

$$\dot{I} = |\dot{I}| \angle (\theta_v + \phi)$$

De forma semelhante ao caso do circuito RL, a impedância de um circuito RC série pode ser representada pelo triângulo de impedância da figura 3.13.

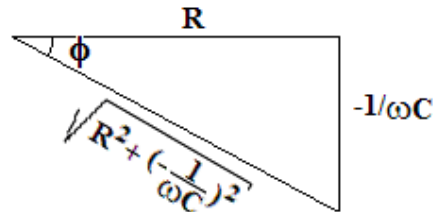


Figura 3.13: Triângulo de impedância de uma carga RC.

3.9 Tensão alternada alimentando um circuito RLC série

Quando uma tensão alternada senoidal é aplicada em um circuito resistivo-indutivo-capacitivo (RLC) como o da figura 3.14, também ocorrerá uma defasagem da corrente em relação à tensão aplicada.

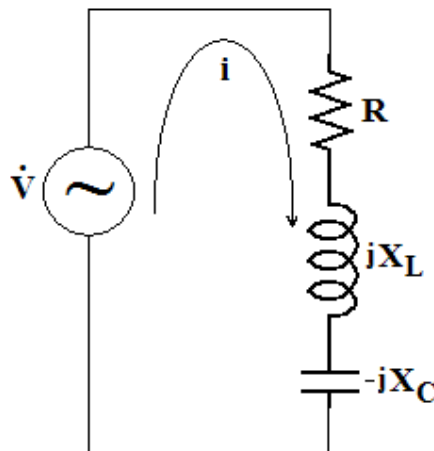


Figura 3.14: Circuito contendo resistor, indutor e capacitor - RLC.

Essa defasagem dependerá da ação dos elementos do circuito e será de um ângulo que varia entre 0° e 90° . Nesse tipo de circuito podemos ter três comportamentos:

1) Corrente atrasada em relação à tensão aplicada:

Isso ocorrerá quando a reatância indutiva for maior do que a reatância capacitiva. O comportamento resultante do circuito será análogo ao circuito RL, que já foi analisado na seção 3.7.

2) Corrente adiantada da tensão aplicada:

Isso ocorrerá quando a reatância capacitiva for maior do que a reatância indutiva. O comportamento resultante do circuito será análogo ao circuito RC, que já foi analisado na seção 3.8.

3) Corrente em fase com a tensão aplicada:

Essa é uma situação particular desse tipo de circuito, em que as reatâncias indutiva e capacitiva se igualam em módulo e se anulam devido à diferença de sinais. Como ambas compõem a parte imaginária da impedância do circuito, sendo a reatância indutiva positiva e a reatância capacitiva negativa, ocorre o cancelamento da parte imaginária da impedância. Logo, a impedância do circuito vista pela fonte passa a ser apenas a resistência. Como o resistor mantém a corrente em fase com a tensão, o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente resultante será nulo.

Este fenômeno é chamado de ressonância e a frequência específica em que ocorre é chamada de frequência de ressonância ω_o , que é expressa pela equação abaixo:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

O fenômeno da ressonância será estudado em maiores detalhes em outras unidades curriculares, portanto o enfoque de análise aqui será direcionado aos casos 1 e 2 apenas.

A impedância de um circuito RLC série é obtida na forma retangular por $Z = R + j(X_L - X_C)$, onde $X_L - X_C = X$ representa a reatância equivalente do circuito.

3.10 Associação de impedâncias

Nas subseções seguintes será trabalhado com associações de impedâncias em série, paralelo e com arranjo misto

3.10.1 Associação em série

A figura 3.15(a) apresenta um circuito série de três impedâncias. Aplicando-se a 2ª Lei de Kirchhoff ($\sum V = 0$) no circuito, a tensão da fonte pode ser expressa como:

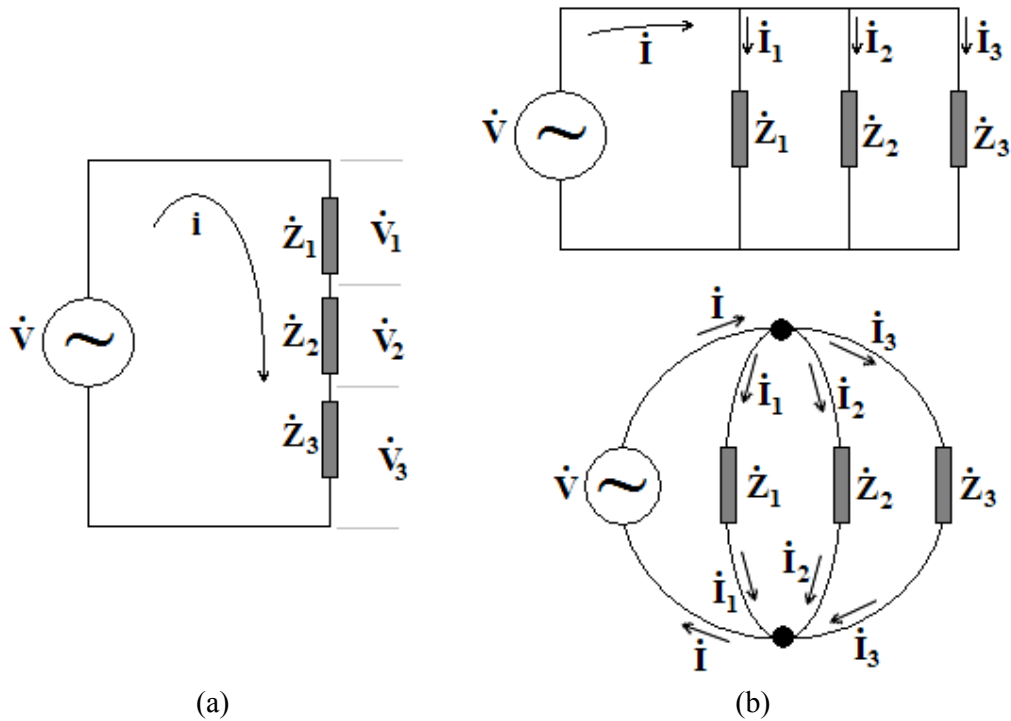
$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3$$

Como $\dot{V} = \dot{Z} \cdot \dot{I}$, e como neste circuito a corrente que percorre cada elemento é a mesma (\dot{I}) tem-se então: $\dot{V} = (\dot{V}_1 \cdot \dot{I}) + (\dot{V}_2 \cdot \dot{I}) + (\dot{V}_3 \cdot \dot{I})$. É possível escrever a equação acima colocando \dot{I} em evidência, logo:

$$\dot{V} = (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3) \cdot \dot{I}$$

Conclui-se então que $(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3)$ é a impedância equivalente deste tipo de associação, ou seja:

$$\dot{Z}_{eq} = (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3)$$



(a) (b)
Figura 3.15: Associação de impedâncias em série (a) e em paralelo (b).

3.10.2 Associação em paralelo

A figura 3.15(b) apresenta um circuito paralelo puro contendo três impedância. Aplicando ao mesmo a 1ª Lei de Kirchhoff ($\sum I = 0$) tem-se:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

Como,

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}}$$

Tem-se então:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_1} + \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_2} + \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_3}$$

A expressão acima pode ser modificada colocando-se a tensão \dot{V} em evidência, ficando da seguinte forma:

$$\dot{I} = \dot{V} \cdot \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3} \right)$$

Logo, é possível verificar que a expressão entre parênteses é a impedância equivalente deste tipo de circuito, ficando como mostrado abaixo.

$$\frac{1}{\dot{Z}_{eq}} = \frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3}$$

Também é possível reduzir duas impedâncias em paralelo utilizando a expressão análoga para o caso de associação de dois resistores em paralelo. Desta forma:

$$\dot{Z}_{eq} = \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

3.10.3 Associação mista

Neste tipo de associação apresentada na figura 3.16 há características dos dois tipos de associações apresentadas acima.

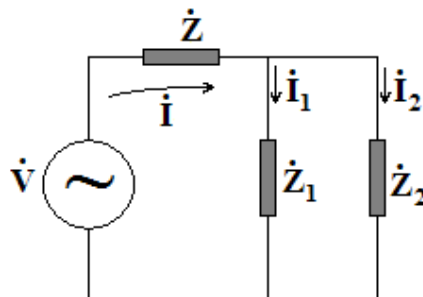


Figura 3.16: Associação mista de impedâncias.

3.11 Admitância

A grandeza admitância representa a facilidade à passagem de corrente. Não existe fisicamente, é apenas um conceito matemático. É representada pela letra Y e possui como unidade o mho (\mathcal{O}) ou o Siemens (S), sendo este último o mais utilizado.

Por definição $\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}}$ ou seja,

$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{V}} \text{ (Lei de Ohm para admitância)}$$

Na forma retangular a admitância é escrita como:

$$\dot{Y} = G + j(B_C + B_L)$$

Onde:

Y= Admitância;

G = Condutância;

B_L= Susceptância indutiva;

B_C = Susceptância capacitiva.

A Condutância é o inverso da e é determinada por:

$$G = \frac{I}{R}$$

A susceptância é o inverso da reatância indutiva, obtida por:

$$B_L = \frac{I}{\omega \cdot L}$$

A susceptância capacitiva é o inverso da reatância capacitiva, determinada por:

$$B_C = \omega \cdot C$$

Pode-se ainda obter a condutância G e a susceptância B matematicamente através das expressões abaixo:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad B = \frac{-X}{R^2 + X^2}$$

O conceito de admitância é muito útil no tratamento de circuitos paralelos. Em circuitos paralelos,

$$\frac{I}{\dot{Z}_{eq}} = \frac{I}{\dot{Z}_1} + \frac{I}{\dot{Z}_2} + \frac{I}{\dot{Z}_3}$$

Como,

$$\dot{Y} = \frac{I}{\dot{Z}}$$

A admitância equivalente pode ser escrita como:

$$\dot{Y}_{eq} = (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3)$$

Ou seja, a admitância passa a ser uma soma de números complexos.

3.12 Divisor de corrente com Impedâncias e Admitâncias

Os circuitos apresentados na figura 3.17 representam divisores de corrente, pois a corrente que sai da fonte divide-se por cada um dos elementos de acordo com a impedância de cada um dos caminhos. Semelhante com o que já foi estudado no capítulo anterior para resistores, nestes tipos de circuitos é possível determinar a corrente de cada um dos ramos em função da corrente que entra no nó em que está ocorrendo a divisão dos elementos (impedâncias e /ou admitâncias) dos ramos.

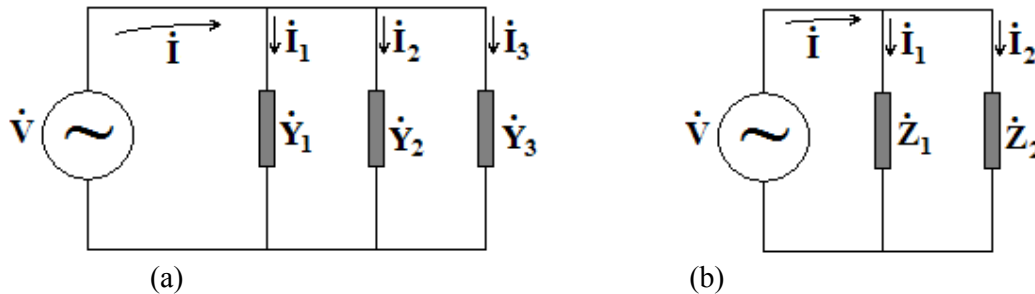


Figura 3.17: Circuito divisor de corrente utilizando admintâncias (a) e impedâncias (b).

Se a Lei de Ohm for aplicada nos circuitos acima, tem-se $\dot{I} = \dot{V} / \dot{Z}$ para impedâncias e $\dot{I} = \dot{V} \cdot \dot{Y}$ para admitâncias.

Considerando o caso das admintâncias, cada ramo do circuito será percorrido pelas respectivas correntes:

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \cdot \dot{V} \quad \dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \cdot \dot{V} \quad \dot{I}_3 = \dot{Y}_3 \cdot \dot{V}$$

Pode-se determinar a tensão total aplicada ao circuito fazendo $\dot{V} = \frac{\dot{I}}{\dot{Y}_{eq}}$

Como $\dot{Y}_{eq} = (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3)$, então a corrente para cada um dos ramos pode ser obtida por:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{Y}_1 \cdot \dot{I}}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3} \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{Y}_2 \cdot \dot{I}}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3} \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{Y}_3 \cdot \dot{I}}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3}$$

Pode-se ainda utilizar um circuito com impedâncias como o da figura 3.17(b). Para este caso a determinação das correntes será realizada de acordo com as equações abaixo.

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{I}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{I}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

É importante salientar que no caso do circuito divisor de corrente ser constituído por impedâncias, não é possível utilizar as equações apresentadas acima para mais de dois ramos.

3.13 Divisor de tensão com Impedâncias e Admitâncias

O circuito apresentado na figura 3.18 representa um divisor de tensão, pois a tensão da fonte fica dividida em forma de queda de tensão de modo proporcional a cada uma das impedâncias. Semelhante ao que foi estudado no capítulo anterior para o caso de resistores, neste tipo de circuito a tensão de cada um dos elementos (impedâncias) pode ser determinada em função da tensão total aplicada e das impedâncias ligadas em série (Z_{eq})

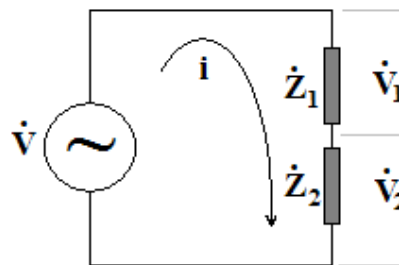


Figura 3.18: Circuito divisor de tensão utilizando.

Cada uma das quedas de tensão podem ser determinadas partindo-se do princípio que $\dot{V}_1 = \dot{Z}_1 \cdot \dot{I}$ e $\dot{V}_2 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{I}$.

Como neste circuito a corrente total é determinada por:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{eq}}, \text{ ou seja, } \dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

Logo, para cada uma das impedâncias é possível obter as quedas de tensão utilizando:

$$\dot{V}_1 = \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{V}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad \dot{V}_2 = \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{V}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

REFERÊNCIAS

- [1] EDMINISTER, J. Circuitos Elétricos – Coleção Schaum, 2ª ed, Porto Alegre, Bookman, 2005.
- [2] SILVA, G. V., RODRIGUES, R. J., LOUREIRO, S. M. Apostila - Qualificação Profissional em Eletrotécnica – Circuitos Elétricos, CEFET/SC-ELETROSUL.

CAPÍTULO 4 – Fundamentos Relacionados à Potência e Correção de Fator de Potência Considerando Corrente Alternada Monofásica.

4.1 Introdução

Neste capítulo, serão abordadas noções fundamentais referentes à potência elétrica, com maior ênfase em corrente alternada, incluindo os seguintes tópicos:

- Definição de potência em circuitos de corrente alternada;
- Fator de potência e triângulo de potência: primordialmente será abordado o caso com correntes, tensões e potência em ondas senoidais sem distorção, porém, a noção de distorção harmônica será apresentada brevemente;
- Correção de fator de potência;
- Medição de potência e energia.

4.2 Potência Elétrica em Circuitos de Corrente Alternada

A potência elétrica instantânea em um circuito de corrente alternada é o produto de duas formas de onda, a tensão e a corrente. Na Figura 4.1, é mostrado isso para um caso de circuito resistivo puro. A Figura foi obtida do livro disponibilizado na Internet de autoria de Tony Kuphaldt [1]. “e” denota tensão instantânea, “i” denota corrente instantânea e “p” a potência instantânea. Note que a onda de potência é positiva em toda a sua extensão nesse caso. (Por quê?).

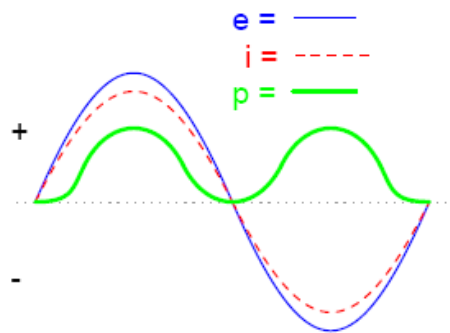


Figura 4.1: Potência Instantânea em Circuito Puramente Resistivo [1].

Analogamente, a Figura seguinte mostra o caso do circuito indutivo, indicando que a potência é hora positiva (absorvida pela carga) e hora negativa (fornecida pela carga).

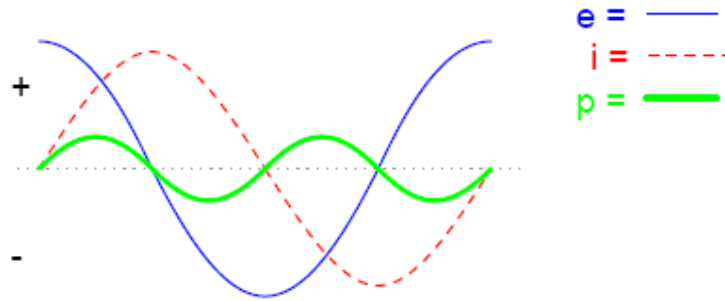


Figura 4.1: Potência Instantânea em Circuito Puramente Indutivo [1].

4.3 Fator de Potência e Triângulo de Potência [2]

Em circuitos de corrente alternada (CA) puramente resistivos, as ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase, ou seja, mudando a sua polaridade no mesmo instante em cada ciclo, como mostra a Figura 4.3.

Quando cargas reativas estão presentes, tais como capacitores ou condensadores e indutores, o armazenamento de energia nessas cargas resulta em uma diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente. Uma vez que essa energia armazenada retorna para a fonte e não produz trabalho útil, um circuito com baixo fator de potência terá correntes elétricas maiores para realizar o mesmo trabalho do que um circuito com alto fator de potência.

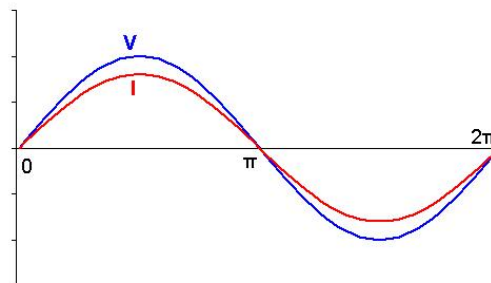


Figura 4.3: Ondas de Tensão e Corrente em Fase, caso Resistivo.

A potência ativa é a capacidade do circuito em produzir trabalho em um determinado período de tempo. Devido aos elementos reativos da carga, a potência aparente, que é o produto da tensão pela corrente do circuito, será igual ou maior do que a potência ativa. A potência reativa é a medida da energia armazenada que é devolvida para a fonte durante cada ciclo de corrente alternada.

O fluxo de potência em circuitos de corrente alternada tem três componentes: potência ativa (P), medida em watts (W); potência aparente (S), medida em volt-ampères (VA); e potência reativa (Q), medida em volt-ampères reativos (VAr).

O fator de potência (FP) de um sistema elétrico qualquer, que está operando em corrente alternada (CA), é definido pela razão da potência real ou potência ativa pela potência total ou potência aparente.

O fator de potência pode ser expresso então como:

$$FP = \frac{P}{S}$$

No caso de formas de onda perfeitamente senoidais, P, Q e S podem ser representados por vetores que formam um triângulo retângulo, também conhecido como triângulo de potências, mostrado na Figura 4.4, sendo que:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Sendo φ o ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão, o Fator de Potência é igual a “ $\cos \varphi$ ”, e a equação abaixo expressa a potência ativa em função dessa variável:

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

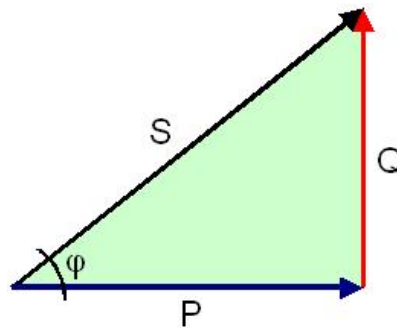


Figura 4.4: Triângulo de Potências.

Por definição, o fator de potência é um número adimensional entre 0 e 1. Quando o fator de potência é igual a zero (0), o fluxo de energia é inteiramente reativo, e a energia armazenada é devolvida totalmente à fonte em cada ciclo. Quando o fator de potência é 1, toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga. Normalmente o fator de potência é assinalado como atrasado ou adiantado para identificar o sinal do ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão elétricas.

O fator de potência é determinado pelo tipo de carga ligada ao sistema elétrico, que pode ser:

- Resistiva;
- Indutiva;
- Capacitiva.

Onda de corrente (I) atrasada em relação à onda de tensão (V). A carga possui característica indutiva. $FP < 1$ (atrasado), caso mostrado na Figura 4.5.

Onda de corrente (I) adiantada em relação à onda de tensão (V). A carga possui característica capacitiva. $FP < 1$ (adiantado), caso mostrado na Figura 4.6.

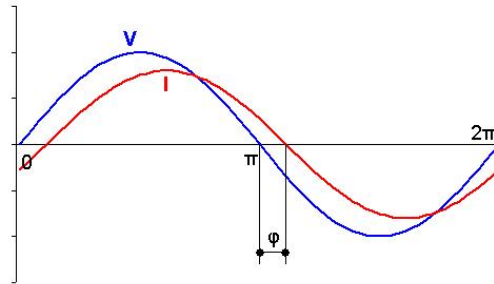


Figura 4.5: Tensão e Corrente no Circuito com Fator de Potência Indutivo.

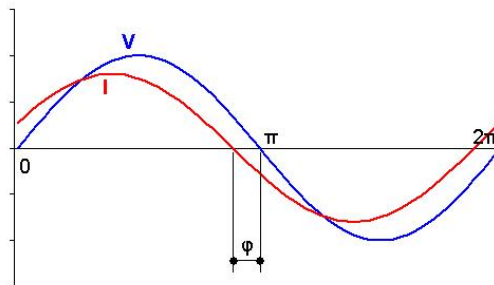


Figura 4.6: Tensão e Corrente no Circuito com Fator de Potência Capacitivo.

Se uma carga puramente resistiva é conectada ao sistema, a corrente e a tensão mudarão de polaridade em fase, nesse caso o fator de potência será unitário (1), e a energia elétrica flui numa mesma direção através do sistema em cada ciclo. Cargas indutivas tais como motores e transformadores (equipamentos com bobinas) produzem potência reativa com a onda de corrente atrasada em relação à tensão. Cargas capacitivas tais como bancos de capacitores ou cabos elétricos subterrâneos produzem potência reativa com corrente adiantada em relação à tensão. Ambos os tipos de carga absorverão energia durante parte do ciclo de corrente alternada, apenas para devolver essa energia novamente para a fonte durante o resto do ciclo.

Por exemplo, para se obter 1 kW de potência ativa quando o fator de potência é unitário (igual a 1), 1 kVA de potência aparente será necessariamente transferida ($1 \text{ kVA} = 1 \text{ kW} \div 1$). Sob baixos valores de fator de potência, será necessária a transferência de uma maior quantidade de potência aparente para se obter a mesma potência ativa. Para se obter 1 kW de potência ativa com fator de potência 0,2 será necessário transferir 5 kVA de potência aparente ($1 \text{ kW} = 5 \text{ kVA} \times 0,2$).

As perdas de energia aumentam com o aumento da corrente elétrica transmitida.

Quando a carga tem fator de potência menor do que 1, mais corrente é requerida para suprir a mesma quantidade de potência útil. As concessionárias de energia estabelecem que os consumidores, especialmente os que possuem cargas maiores, mantenham os fatores de potência de suas instalações elétricas dentro de um limite mínimo, caso contrário serão penalizados com cobranças adicionais. Engenheiros frequentemente analisam o fator de potência de uma carga como um dos indicadores que afetam a eficiência da transmissão e geração de energia elétrica (esse assunto será tratado na Seção 4.4).

4.3.1 Componentes não Senoidais de Tensão e Corrente e sua Relação com a Potência

[2]

Em circuitos que têm apenas tensão e corrente alternadas, o efeito do fator de potência cresce somente com a diferença de fase entre ambas. Isso é conhecido como "fator de potência de

deslocamento". Este conceito pode ser generalizado para fatores de potência reais onde a potência aparente inclui componentes de distorção harmônica. Isso possui uma importância prática em sistemas de potência que contêm cargas não-lineares tais como retificadores, algumas formas de iluminação elétrica, fornos à arco, equipamentos de solda, fontes chaveadas, entre outros.

Um exemplo particularmente importante são os milhões de computadores pessoais que possuem fontes chaveadas com potência variando entre 150 W a 500 W. Historicamente, essas fontes de baixo custo incorporam um retificador simples de onda completa que conduz apenas quando a tensão instantânea excede a tensão no capacitor de entrada. Isso produz altos picos de corrente de entrada, que, por sua vez, produzem distorções no fator de potência e problemas de carregamento, tanto dos condutores fase como neutro das instalações e dos sistemas elétricos.

No Brasil, ainda não existe legislação, para regulamentar os limites das distorções harmônicas nas instalações elétricas.

4.4 Correção de Fator de Potência [2]

Freqüentemente, é possível corrigir o fator de potência para um valor próximo ao unitário. Essa prática é conhecida como correção do fator de potência e é conseguida mediante o acoplamento de bancos de indutores ou capacitores, com uma potência reativa Q contrário ao da carga, tentando ao máximo anular essa componente. Por exemplo, o efeito indutivo de motores pode ser anulado com a conexão em paralelo de um capacitor (ou banco) junto ao equipamento.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras deve ser superior a 0,92 capacitivo durante 6 horas da madrugada e 0,92 indutivo durante as outras 18 horas do dia. Esse limite é determinado pelo Artigo nº 64 da Resolução ANEEL nº 456 de 29 de novembro de 2000 e quem descumpre está sujeito a uma espécie de multa que leva em conta o fator de potência medido e a energia consumida ao longo de um mês.

A mesma resolução estabelece que a cobrança do fator de potência pelas concessionárias é obrigatória para unidades consumidoras de média tensão (alimentadas com mais de 2.300 V) e facultativas para unidades consumidoras de baixa tensão (abaixo dos 2.300 V, como residências em geral). A cobrança em baixa tensão, na prática, raramente ocorre, pois o fator de potência deste tipo de unidade consumidora geralmente está acima dos 0,92, não havendo grande ocorrência de multas que possa compensar a instalação de medidores de energia reativa.

4.5 Medição de Potência, Fator de Potência e Energia

A medição de potência em circuitos elétricos é feita através do Wattímetro, que é um instrumento que possui duas bobinas, a saber:

- Bobina de tensão;
- Bobina de corrente.

A conexão para essas duas bobinas em uma carga monofásica é mostrada nas Figuras 4.7 (a) e (b), sendo essas duas configurações possíveis que estão sujeitas aos erros introduzidos por cada uma das bobinas (BT – Bobina de Tensão e BC – Bobina de Corrente).

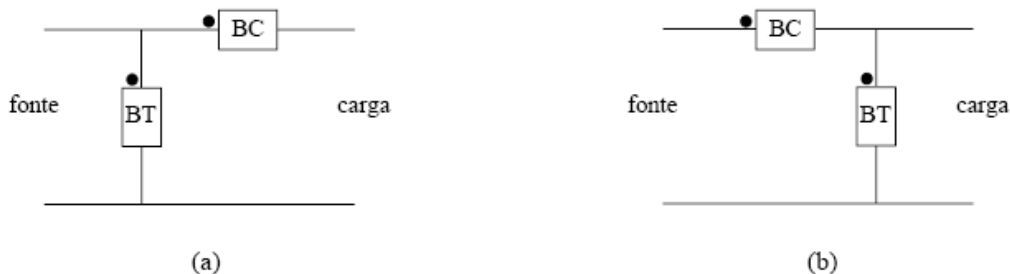


Figura 4.7: Conexões das Bobinas de Wattímetros para Cargas Monofásicas.

Fonte: [3].

Já para a medição do fator de potência, utilizam-se aparelhos denominados Fasímetros ou Cosfímetros, por muitos fabricantes. A escala desses instrumentos para leitura pode ser dada em graus ou em valores do fator de potência em si, entre 0 e 1, capacitivo ou indutivo.

Quando não se dispõe de um medidor para fator de potência, mas se dispõe de um Wattímetro, um Amperímetro e um Voltímetro, pode-se adotar o esquema da Figura 4.8 para se determinar o fator de potência, tomando-se a razão da leitura do Wattímetro pelo produto da tensão e da corrente lidos nos outros dois instrumentos.

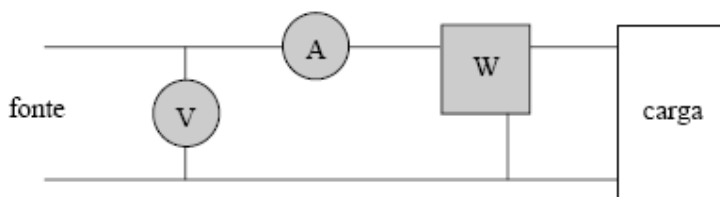


Figura 4.8: Esquema Alternativo para Medição de Fator de Potência [3].

A medição de energia elétrica, que é a integração da potência elétrica no tempo durante o qual essa potência é consumida, é feita por instrumentos integradores. Ou seja, é a soma ao longo do tempo dos ínfimos intervalos de tempos onde a potência é calculada. Nesse caso um disco gira por indução magnética com velocidade proporcional à corrente e à tensão da carga. A tarifação de energia no Brasil segue regras diferenciadas para os diversos tipos de unidades consumidoras, sendo a cartilha da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) sobre o assunto uma importante referência para leitura [4].

Em circuitos de alta-tensão, é preciso transformar os valores de tensão e corrente para ordens de grandeza compatíveis com a utilização dos instrumentos de medida de potência ou energia. Dessa forma, empregam-se transformadores de corrente e tensão, conhecidos, nesse contexto, como Transformadores de Instrumentos (fazendo referência a “instrumentos de medição”).

REFERÊNCIAS

- [1] KUPHALDT, T. R.; “Lessons in Electric Circuits”, 5ª Edição.
- [2] WIKIPEDIA; “Potência Elétrica”, Disponível em: pt.wikipedia.org/wiki/Potência_elétrica (Último acesso: agosto de 2007).
- [3] Escola Politécnica da USP; “Energia, Potência e Fator de Potência – Apostila”. Disponível em www.pea.usp.br/apostilas (Último acesso em Agosto de 2007).



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS CHAPECÓ
CURSO TÉCNICO EM ELETROELETRÔNICA – MÓDULO II
UNIDADE CURRICULAR – CIRCUITOS ELÉTRICOS I

[4] ANEEL, “Tarifas de Energia Elétrica”, Caderno temático disponível em www.aneel.gov.br.