

ESTRUTURAS ELÉTRICAS



**Prof. Eng. Giovani Batista de Souza
Prof. MEng. Werther Serralheiro**

Agosto - 2008



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISIONAL E TECNOLÓGICA
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA
UNIDADE DE ENSINO DE ARARANGUÁ

Apostila de Eletricidade

Desenvolvida pelo Prof. MEng. Werther Serralheiro (Março -2008)

Revisada e Ampliada pelo Prof. Eng. Giovani Batista de Souza (Agosto-2008)

Professor de 1º e 2º Graus da Unidade de Ensino de Araranguá

Para a Disciplina de ELETRICIDADE BÁSICA do Curso Técnico em Eletromecânica

A reprodução desta apostila deverá ser autorizada pelo CEFET

SUMÁRIO

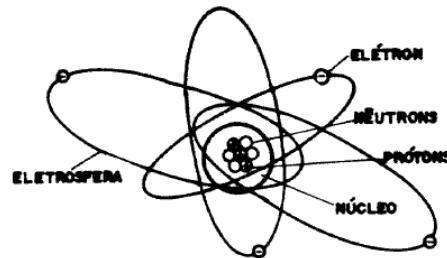
1 - Eletricidade Estática.....	5
1.1 O Átomo.....	5
1.2 Leis das Cargas Elétricas.....	6
1.3 O Coulomb.....	6
1.4 Carga Elétrica Elementar.....	7
1.5 Campo Eletrostático.....	7
1.6 Diferença de Potencial.....	8
2 - Eletrodinâmica.....	9
2.1 Corrente Elétrica.....	9
2.2 Resistividade Elétrica.....	10
2.3 Associação De Resistores.....	19
2.4 Transformação Y (T) / Δ (π) e vice-versa.....	27
3 - Geradores e Receptores.....	28
3.1 Definição de Gerador.....	28
3.2 Associação de Geradores.....	29
3.3 Receptores.....	30
4 - Leis De Kirchoff.....	32
4.1 Lei das Tensões.....	32
4.2 Lei das Correntes.....	34
4.3 Análise Nodal.....	34
5 - Capacitores.....	37
5.1 Capacitância.....	37
5.2 Força Exercida por Duas Cargas.....	37
5.3 Materiais Dielétricos.....	38
5.4 Representação Gráfica da Capacitância.....	39
5.5 Definição de Capacitor.....	39
5.6 Aplicação.....	40
5.7 Símbologia.....	40
5.8 Associação de Capacitores.....	40
5.9 Energia Elétrica de um Capacitor.....	42
5.10 Reatância Capacitiva (Xc).....	43

6 - Indutores.....	45
6.1 Indutância.....	45
6.2 Reatância Indutiva (XL).....	45
6.3 Associação de Indutores.....	46
6.4 Aplicação de Indutores.....	47
7 - Tensão Alternada.....	48
7.1 Geração de tensão alternada.....	48
7.2 Características da Tensão e da Corrente Alternada.....	49
7.3 Tipos de Cargas em Sistemas de Tensão Alternada.....	50
7.4 Circuitos elétricos em Tensão Alternada.....	55
7.5 Tensão Alternada Trifásica.....	58
7.6 Potência nos Circuitos de Tensão Alternada.....	60

1 - Eletricidade Estática

1.1 O Átomo

Tudo que ocupa lugar no espaço é matéria. A matéria é constituída por partículas muito pequenas chamada de átomos. Os átomos por sua vez são constituídos por partículas subatômicas: elétron, próton e nêutron, sendo que o elétron corresponde a carga negativa (-) da eletricidade. Os elétrons estão girando ao redor do núcleo do átomo em trajetórias concêntricas denominadas de órbitas.



O próton corresponde a carga positiva (+) da eletricidade. Os prótons se concentram no núcleo do átomo. É o número de prótons no núcleo que determina o número atômico do átomo. Também no núcleo é encontrado o nêutron, carga neutra fundamental da eletricidade.

No seu estado natural um átomo está sempre em equilíbrio, ou seja, contém o mesmo número de prótons e elétrons. Como cargas contrárias se anulam, e o elétron e próton possuem o mesmo valor absoluto de carga elétrica, isto torna o átomo natural num átomo neutro.

1.1.1 Átomo Estável e Instável

Um átomo é estável como vimos anteriormente, quando a quantidade de energia dos elétrons (-) e dos prótons (+) é igual. Mas os elétrons estão dispostos em torno do núcleo formando camadas distanciadas proporcionalmente do núcleo. Quanto mais afastado do núcleo menor será a força que prende o elétron ao átomo. Esta força que prende o elétron ao átomo é chamada de nível de energia. O nível de energia de um elétron é diretamente proporcional a distância do seu núcleo. Os elétrons situados na camada mais

externa são chamados de elétrons de valência. Quando estes elétrons recebem do meio externo mais energia, isto pode fazer com o elétron se desloque para um nível de energia mais alto. Se isto ocorre, dizemos que o átomo está num estado excitado e, portanto instável.

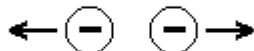
A corrente elétrica produzida num condutor metálico é fruto do fluxo de elétrons livres, que serão liberados da camada de valência de um átomo que se encontra sob a influência de energia externa (átomo em estado excitado).

1.2 Leis das Cargas Elétricas

Alguns átomos são capazes de ceder elétrons e outros são capazes de receber elétrons. Quando isto ocorre, a distribuição de cargas positivas e negativas que era igual deixa de existir. Um corpo passa a ter excesso e outro falta de elétrons. O corpo com excesso de elétrons passa a ter uma carga com polaridade negativa, e o corpo com falta de elétrons terá uma carga com polaridade positiva.

CARGAS ELÉTRICAS IGUAIS SE REPELEM

CARGAS OPOSTAS SE ATRAEM.



1.3 O Coulomb

A quantidade de carga elétrica que um corpo possui é dada pela diferença entre número de prótons e o número de elétrons que o corpo tem. A quantidade de carga elétrica é representada pela letra Q, e é expresso na unidade COULOMB (C).

A carga de 1 C = $6,25 \times 10^{18}$ elétrons. Dizer que um corpo possui de um Coulomb negativo ($-Q$), significa que um corpo possui $6,25 \times 10^{18}$ mais elétrons que prótons.

Ex.: Um material dielétrico possui uma carga negativa de $12,5 \times 10^{18}$ elétrons. Qual a sua carga em um Coulomb?

1.4 Carga Elétrica Elementar

A menor carga elétrica encontrada na natureza é a carga de um elétron ou próton. Estas cargas são iguais em valor absoluto e valem

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Para calcular a quantidade de carga elétrica de um corpo, basta multiplicar o número de elétrons pela carga elementar.

$$Q = n \times e$$

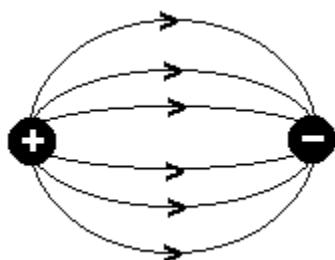
Exercício:

Um corpo apresenta-se eletrizado com carga $Q = 32 \times 10^{-19}$ Coulombs. Qual o número de elétrons retirados do corpo?

i A carga elétrica difere da corrente elétrica. Q representa um acúmulo de carga, enquanto a corrente elétrica I mede a intensidade das cargas em movimento.

1.5 Campo Eletrostático

Toda carga elétrica tem capacidade de exercer força. Isto se faz presente no campo eletrostático que envolve cada corpo carregado. Quando corpos com polaridades opostas são colocados próximos um do outro, o campo eletrostático se concentra na região compreendida entre eles. Se um elétron for abandonado no ponto no interior desse campo, ele será repelido pela carga negativa e atraído pela carga positiva.



Quando não há transferência imediata de elétrons do/para um corpo carregado, diz-se que a carga está em repouso. A eletricidade em repouso é chamada de eletricidade estática.

1.6 Diferença de Potencial

Em virtude da força do seu campo eletrostático, uma carga é capaz de realizar trabalho ao deslocar outra carga por atração ou repulsão. Essa capacidade é chamada de potencial elétrico. Cargas elétricas diferentes produzem uma d.d.p. (diferença de potencial). A Força Eletromotriz (F.E.M.) pode ser definida como a energia não-elétrica transformada em energia elétrica, ou vice-versa, por unidade de tempo. A sua unidade fundamental é o Volt. A diferença de potencial é chamada também de Tensão Elétrica. A tensão elétrica é representada pela letra E ou U.

Ex.: Qual o significado da tensão de uma bateria ser igual a 6 V?

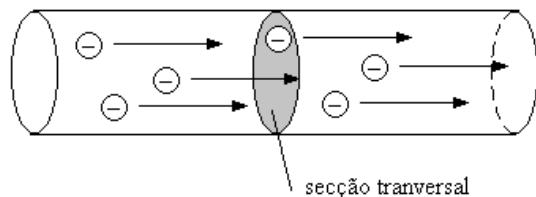
R.:

2 - Eletrodinâmica

2.1 Corrente Elétrica

Determinados materiais, quando são submetidos a uma diferença de potencial, permitem uma movimentação de elétrons de um átomo a outro fazendo os átomos se deslocar de um dos pólos da ddp para o outro polo, e é este fenômeno que é denominado de corrente elétrica. Pode-se dizer, então que cargas elétricas em movimento ordenado formam a corrente elétrica, ou seja, corrente elétrica é o fluxo de elétrons em um meio condutor. A corrente elétrica é representada pela letra I e sua unidade fundamental é o Ampère.

Define-se 1 A (Ampère) como sendo deslocamento de 1 C ($6,25 \times 10^{18}$ e) através de um condutor durante um intervalo de 1 s.



Ex.: Se uma corrente de 2 A passar através de um medidor durante um minuto, isto equivale a quantos Coulombs ?

R.:

A definição matemática da intensidade de corrente elétrica é dada por:

$$I = \frac{Q}{T}$$

onde:

I = corrente elétrica em ampère;

Q = carga em Coulomb;

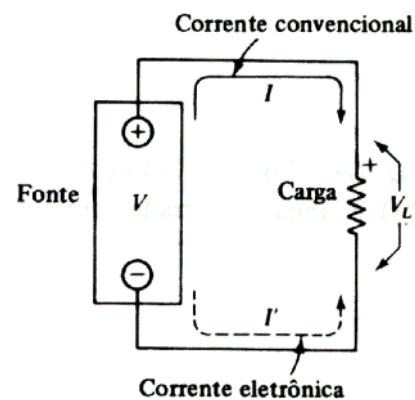
T = tempo em segundos.

2.1.1 Fluxo de Corrente

Se ligarmos às duas extremidades de um fio de cobre, uma diferença de potencial, a tensão aplicada faz com que os elétrons se desloquem. Esse deslocamento consiste num movimento de elétrons a partir do ponto de carga negativa $-Q$ numa extremidade do fio, seguindo através deste e chegando à carga positiva $+Q$ na outra extremidade.

O sentido do movimento de elétrons é de $-$ para $+$. Este é o fluxo de elétrons. No entanto para estudos convencionou-se dizer que o deslocamento dos elétrons é de $+$ para $-$

Este é o chamado de fluxo convencional da corrente elétrica.



Exercícios

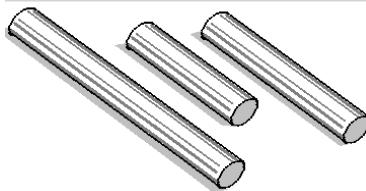
- 1) Em uma seção transversal de um fio condutor circula uma carga de 10 C a cada 2 s. Qual a intensidade de corrente?
- 2) Um fio percorrido por uma corrente de 1 A deve conduzir através da sua seção transversal uma carga de 3,6 C. Qual o tempo necessário para isto?
- 3) Qual a carga acumulada quando uma corrente de 5 A carrega um isolante durante 5 s?

2.2 Resistividade Elétrica

Define-se resistividade como sendo a capacidade de um fio condutor ser opor a passagem de corrente elétrica através de sua estrutura.

Verifica-se experimentalmente que a resistividade elétrica de um resistor depende do material que o constitui e de suas dimensões.

Para simplificar a análise dessas dependências, vamos considerar que os condutores tenham a forma de um fio cilíndrico como mostra a figura abaixo. Esta é a forma largamente utilizada tanto na transmissão de energia elétrica como na construção de resistores.



Considere vários fios condutores de mesmo material, mesma área de secção transversal de comprimentos (L) diferentes. Verifica-se que quanto maior o comprimento tanto maior é a resistência do fio. Então, a resistência é diretamente proporcional ao comprimento do fio.

Matematicamente: $R = k \cdot L$

Se tomarmos vários condutores de mesmo material, mesmo comprimento, mas de diâmetro diferentes, verificamos que a resistência é inversamente proporcional à área (A) da seção reta do fio.



$$R = k \cdot \frac{1}{A}$$

Matematicamente:

Relacionando as duas conclusões acima, obtemos: $R = k \cdot (L / A)$

A constante de proporcionalidade é uma característica do material e simboliza-se por ρ (letra grega *rô*). Recebe o nome de resistividade.

A resistência de um condutor é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área da secção transversal do fio. Assim:

$$R = \rho \cdot (L / A)$$

No Sistema Internacional a unidade de resistividade é ohm-metro (Ωm).

A condutância é o inverso de resistência. A unidade da condutividade é o mho (Ω^{-1}) ou Siemens (S).

2.2.1 Características dos Condutores

O material utilizado em eletricidade tem características quanto à condução de corrente elétrica. Esta característica é relacionada às características dos átomos que formam o material, onde podemos verificar que entre o núcleo e o elétron em órbita do átomo, existe uma força atrativa, força esta tanto menor quanto maior a distância entre eles. Sendo que todos os materiais apresentam uma resistividade (ρ) específica, com unidade de ohm vezes centímetros ($\Omega \times \text{cm}$).

2.2.2 Corpos Bons Condutores

Corpos bons condutores são aqueles em que os elétrons mais externos, mediante estímulo apropriado (atraito, contato ou campo magnético), podem ser retirados dos átomos.

Exemplos de corpos bons condutores: alumínio, platina, prata, ouro.

A resistividade do cobre é aproximadamente de $10^{-6} \Omega\text{cm}$.

2.2.3 Corpos Isolantes

Corpos maus condutores são aqueles em que os elétrons estão tão rigidamente solidários aos núcleos que somente com grandes dificuldades podem ser retirados por um estímulo exterior.

Exemplos de corpos maus condutores: porcelana, vidro, madeira, borracha.

A resistividade da mica é aproximadamente de $10^{12} \Omega\text{cm}$.

2.2.4 Resistor Elétrico

A energia elétrica pode ser convertida em outras formas de energia. Quando os elétrons caminham no interior de um condutor, eles se chocam contra os átomos do material de que é feito o fio. Nestes choques, parte da energia cinética de cada elétron se transfere aos átomos que começam a vibrar mais intensamente. No entanto, um aumento de vibração significa um aumento de temperatura.

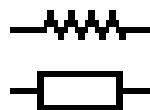
O aquecimento provocado pela maior vibração dos átomos é um fenômeno físico a que damos o nome de **efeito joule**.

É devido a este efeito joule que a lâmpada de filamento emite luz. Inúmeras são as aplicações práticas destes fenômenos. Exemplos: chuveiro, ferro de engomar, ferro elétrico, fusível, etc.

O efeito joule é o fenômeno responsável pelo consumo de energia elétrica do circuito, quando essa energia se transforma em calor.

O componente que realiza essa transformação é o **resistor**, que possui a capacidade de se opor ao fluxo de elétrons (corrente elétrica).

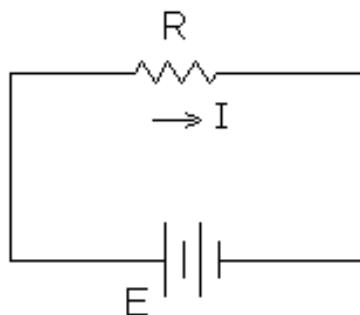
Símbolo:



2.2.5 Lei De Ohm

Considere o resistor abaixo, mantido a uma temperatura constante. Quando o mesmo for submetido a uma tensão elétrica (d.d.p.) E circulará pelo mesmo uma corrente elétrica I .

Mudando o valor da d.d.p. para E_1 , E_2 , ... E_n , o resistor passa a ser percorrido por uma corrente I_1 , I_2 , ... I_n . O Físico alemão *George Simon Ohm*, verificou que o quociente da tensão aplicada pela respectiva corrente circulante era uma constante do resistor.



$$\frac{E}{I} = \frac{E_1}{I_1} = \frac{E_2}{I_2} = \frac{E_n}{I_n} = \text{Constante} = R$$



A resistência elétrica não depende nem da tensão, nem da corrente elétrica, mas sim da temperatura e do material condutor.

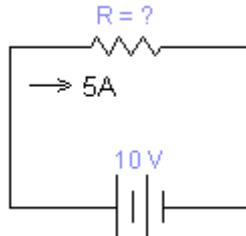
Exercícios. Calcule:

$$R = 50 \Omega; E = 10 V; I = ?$$

$$E = 3,5 V; I = 5mA; R = ?$$

$$E = 180 \text{ V}; R = 30 \Omega; I = ?$$

$$E = 220 \text{ V}; I = 4,4 \text{ A}; R = ?$$



2.2.6 Código de Cores para Resistores

O código de cores é a convenção utilizada para identificação de resistores de uso geral. Como é impossível a fabricação de resistores de todos os valores estes são fabricados com um intervalo de tolerância entre eles. O processo de fabricação em massa de resistores não consegue garantir para estes componentes um valor exato de resistência. Assim, pode haver variação dentro do valor especificado de tolerância. É importante notar que quanto menor a tolerância, mais caro o resistor, pois o processo de fabricação deve ser mais refinado para reduzir a variação em torno do valor nominal. Esta faixa de tolerância é conhecida por séries E12 e E24 da norma internacional IEC.

2.2.7 Procedimento para Determinar o Valor do Resistor:

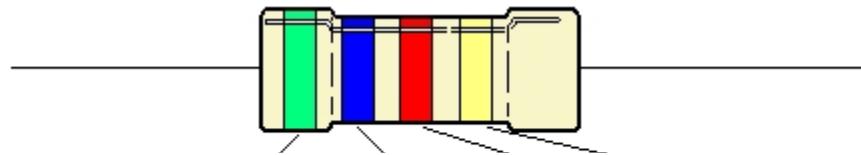
Identificar a cor do primeiro anel, e verificar através da tabela de cores o algarismo correspondente à cor. Este algarismo será o primeiro dígito do valor do resistor.

Identificar a cor do segundo anel. Determinar o algarismo correspondente ao segundo dígito do valor da resistência.

Identificar a cor do terceiro anel. Determinar o valor para multiplicar o número formado pelos itens 1 e 2. Efetuar a operação e obter o valor da resistência.

Identificar a cor do quarto anel e verificar a porcentagem de tolerância do valor nominal da resistência do resistor.

OBS.: A primeira faixa será a faixa que estiver mais perto de qualquer um dos terminais do resistor.



Cores	1º anel 1º dígito	2º anel 2º dígito	3º anel Multiplicador	4º anel Tolerância
Prata	-	-	0,01	10%
Ouro	-	-	0,1	5%
Preto	0	0	1	-
Marrom	1	1	10	1%
Vermelho	2	2	100	2%
Laranja	3	3	1 000	3%
Amarelo	4	4	10 000	4%
Verde	5	5	100 000	-
Azul	6	6	1 000 000	-
Violeta	7	7	10 000 000	-
Cinza	8	8	-	-
Branco	9	9	-	-

Exemplo:

1º Faixa Vermelha = 2

2º Faixa Violeta = 7

3º Faixa Marrom = 10

4º Faixa Ouro = 5%

O valor será 270W com 5% de tolerância. Ou seja, o valor exato da resistência para qualquer elemento com esta especificação estará entre 256,5W e 283,5W.

Entenda o multiplicador. Ele é o número de zeros que você coloca na frente do número. No exemplo é o 10, e você coloca apenas um zero se fosse o 100 você colocaria 2 zeros e se fosse apenas o 1 você não colocaria nenhum zero.

2.2.8 Serie Comercial

Comercialmente para cada faixa de tolerância encontramos uma serie de valores padronizados para a comercialização. Para resistores com tolerância de 10% encontrados a série E12 que permite representar toda a faixa de resistores com 12 valores padronizados. Para a tolerância de 5% utilizamos a serie E24 com 24 valores padronizados.

E12	Faixa 10%	E24	Faixa 5%
1,0	0,9 a 1,1	1,0	0,95 a 1,05
		1,1	1,04 a 1,15
1,2	1,08 a 1,32	1,2	1,14 a 1,26
		1,3	1,23 a 1,37
1,5	1,35 a 1,65	1,5	1,43 a 1,58
		1,6	1,52 a 1,68
1,8	1,62 a 1,98	1,8	1,71 a 1,89
		2,0	1,90 a 2,10
2,2	1,98 a 2,42	2,2	2,09 a 2,31
		2,4	2,28 a 2,52
2,7	2,43 a 2,97	2,7	2,57 a 2,83
		3,0	2,85 a 3,15
3,3	2,97 a 3,63	3,3	3,13 a 3,47
		3,6	3,42 a 3,78
3,9	3,51 a 4,29	3,9	3,70 a 4,10
		4,3	4,09 a 4,51
4,7	4,23 a 5,17	4,7	4,47 a 4,93
		5,1	4,85 a 5,35
5,6	5,04 a 6,16	5,6	5,32 a 5,88
		6,2	5,89 a 6,51
6,8	6,12 a 7,48	6,8	6,46 a 7,14
		7,5	7,13 a 7,88
8,2	7,38 a 9,02	8,2	7,79 a 8,61
		9,1	8,65 a 9,55

2.2.9 Potência Elétrica

Se um trabalho está sendo executado em um sistema elétrico, uma quantidade de energia está sendo consumida. A razão em que o trabalho está sendo executado, isto é, a razão em que a energia está sendo consumida é chamada Potência.

$$\text{Potência} = \frac{\text{Trabalho}}{\text{Tempo}}$$

Em eletricidade, a tensão realiza trabalho de deslocar uma carga elétrica, e a corrente representa o número de cargas deslocadas na unidade de tempo. Assim em eletricidade:

$$\text{Potência} = \frac{\text{Trabalho}}{\text{Unid. de carga}} \times \frac{\text{carga movida}}{\text{Unid. de tempo}} = E \times I$$

A unidade fundamental de potência elétrica é o WATT

Fórmulas Matemáticas Relacionando Tensão, Corrente, Resistência e Potência Elétricas.

$$(a) E = R \times I \quad (b) P = E \times I \quad (c) P = R \times I^2 \quad (d) I = E \div R \quad (e) R = E \div I$$

$$(f) P = E^2 \div R \quad (g) I = P \div E$$

Unidades das Grandezas Elétricas – Múltiplos e Submúltiplos

GRANDEZA	UNIDADE	$\times 1.000$	$\times 1.000.000$	$\div 1.000$	$\div 1.000.000$
Tensão	Volt (V)	kV	MV	mV	μ V
Corrente	Ampère	kA	MA	mA	μ A
Resistência	Ohm (Ω)	K Ω	M Ω	m Ω	μ Ω
Potência	Watt (W)	kW	MW	mW	μ W

Prefixos das Unidades: São múltiplos ou submúltiplos da unidade básica no S.I.:

Prefixo	Símbolo	Fator de Multiplicação
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo	K	10^3
Mili	m	10^{-3}
Micro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Pico	p	10^{-12}
Fento	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}

Exercícios

Realize as conversões requeridas abaixo:

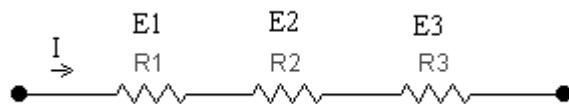
5.850.000Ω em MΩ	2.318 mA em A	0,000654 A em mA
2,8 MΩ em Ω	45.910 μA em A	0,8 A em μA
45.000 μA em A	28.700 V em kV	12.000.000 KΩ em MΩ
2 A em mA	0,00196 V em mV	14.800 V em kV
0,00053 A em mA	0,077 MΩ em Ω	40.890 mA em A
270 kΩ em Ω	180 μA em A	1A em μA
1470 Ω em kΩ	120μV em mV	10A em mA
5,2 kΩ em Ω	250 MΩ em kΩ	1000Ω em kΩ
870 kΩ em MΩ	0,017 kV em V	

2.3 Associação De Resistores

2.3.1 Associação em Série

Quando resistores são conectados de forma que a saída de um se conecte a entrada de outro e assim sucessivamente em uma única linha, diz-se que os mesmos estão formando uma ligação série.

Neste tipo de ligação a corrente que circula tem o mesmo valor em todos os resistores da associação, mas a tensão aplicada se divide proporcionalmente em cada resistor.



Os resistores que compõem a série podem ser substituídos por um único resistor chamado de Resistor Equivalente.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad \rightarrow \quad RxI = R_1xI + R_2xI + R_3xI$$

Como a corrente é comum a todos os termos da equação ela pode ser simplificada (cortada) nos dois lados da igualdade:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

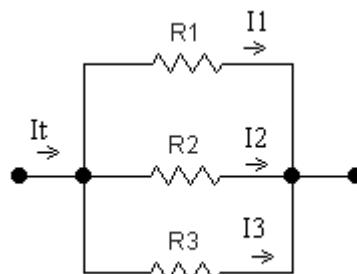


A R_{eq} de uma associação em série é igual à soma das resistências dos resistores.

2.3.2 Associação em Paralelo

Quando a ligação entre resistores é feita de modo que o início de um resistor é ligado ao início de outro, e o terminal final do primeiro ao terminal final do segundo, caracteriza-se uma ligação paralela.

Neste tipo de ligação, a corrente do circuito tem mais um caminho para circular,



sendo assim ela se divide inversamente proporcional ao valor do resistor. Já a tensão aplicada é a mesma a todos os resistores envolvidos na ligação paralela.

Analizando o circuito vemos que: $I_t = I_1 + I_2 + I_3$.

Pela Lei de Ohm temos que a corrente elétrica é igual à tensão dividido pela resistência, então:

$$\frac{E}{R} = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} + \frac{E}{R_3}$$

Como a tensão é a mesma, e é comum a todos os termos da igualdade, ela pode ser simplificada, restando então:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$



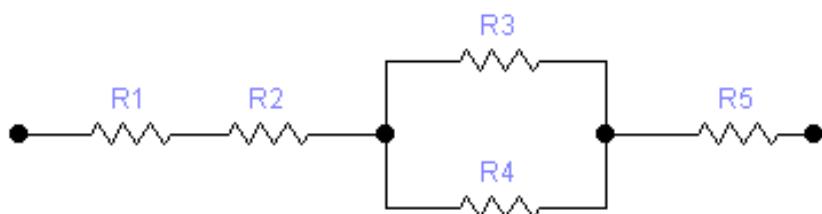
O inverso da R_{eq} de uma associação em paralelo é igual à soma dos inversos das resistências dos resistores.

Para dois resistores em paralelo é possível calcular a R_{eq} através de uma fórmula obtida da anterior:

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

2.3.3 Associação Mista

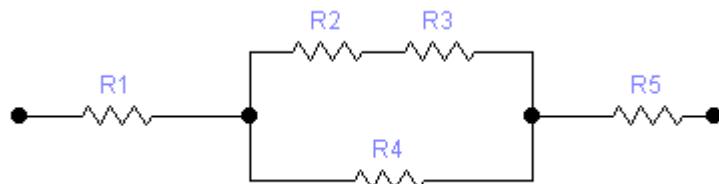
É o caso mais encontrado em circuitos eletrônicos. Neste caso há resistores ligados em série e interligados a outros em paralelo. Para se chegar a R_{eq} , faz-se o cálculo das associações série e paralelo ordenadamente, sem nunca “misturar” o cálculo, ou seja, associar um resistor em série a outro esteja numa ligação paralela.



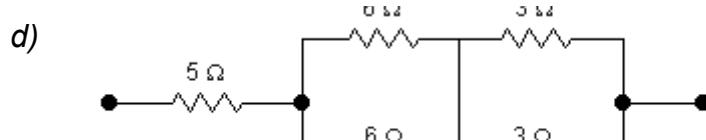
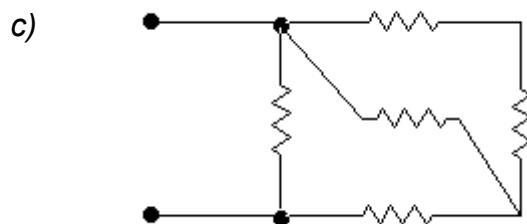
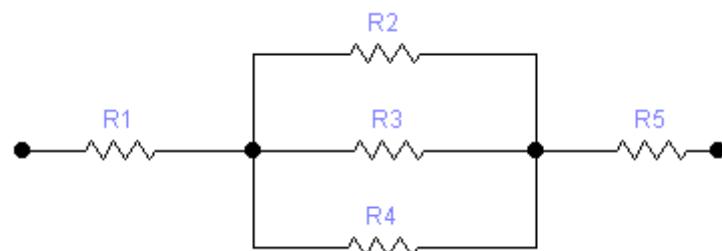
Exercícios:

1) Calcule a resistência equivalente dos circuitos abaixo.

a) Dados: $R_1=2\Omega$; $R_2=6\Omega$; $R_3=2\Omega$; $R_4=4\Omega$; $R_5=3\Omega$



b) Dados: $R_1=R_5=4\Omega$; $R_2=R_3=R_4=3\Omega$



f)

2) Calcule os valores das variáveis dependentes:

a) $E= 120 \text{ V}$; $P= 60 \text{ W}$; $I= ?$; $R= ?$

b) $E= 8 \text{ V}$; $I= 0,2 \text{ A}$; $P= ?$; $R= ?$

c) $R= 2.000 \Omega$; $E= 40 \text{ V}$; $I= ?$; $P=?$

3) Quatro resistores estão conectados em série. Se a resistência equivalente é 49Ω , qual o valor de cada resistor?

2.3.4 Considerações finais sobre a Lei de Ohm

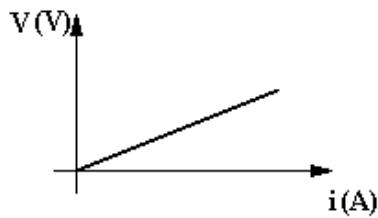
A Lei de Ohm pode ser definida como a relação entre a Tensão, a Corrente e a Resistência em um circuito elétrico de corrente contínua. Ela pode ser definida como uma constante de proporcionalidade entre as três grandezas.

Ela estabelece que:

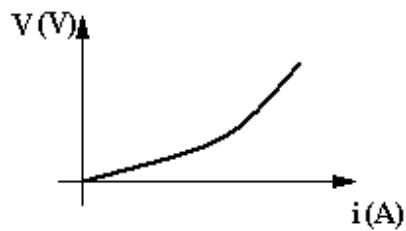
i A corrente elétrica em um condutor metálico é diretamente proporcional à tensão aplicada em seus terminais, desde que a temperatura e outras grandezas físicas forem constantes.

Com a passagem da corrente elétrica pelo condutor, há choques dos elétrons contra os átomos do material, com consequente aumento da temperatura (efeito Joule). Este fato acarreta dois fenômenos opostos no condutor: um aumento da energia de vibração dos átomos do material, opondo-se à corrente elétrica (aumento da resistência); e um aumento do número de cargas livres e também de suas velocidades, favorecendo a passagem de corrente elétrica (diminuição da resistência).

Quando os dois fenômenos se contrabalançam, o condutor é ôhmico ou linear, pois sua resistência permanece constante.

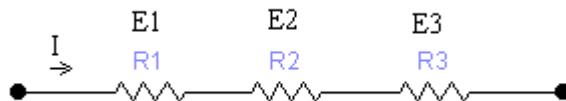


Quando o primeiro fenômeno predomina, a resistência do condutor aumenta com a temperatura, e é o que ocorre com o filamento de uma lâmpada incandescente.



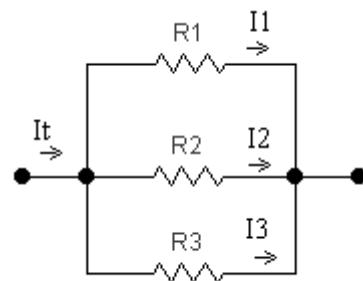
2.3.5 Lei de Ohm em Circuitos com Resistência em Série

A corrente elétrica é a mesma em todas as resistências, e a tensão elétrica se dividirá proporcionalmente ao valor das resistências.



2.3.6 Aplicação da Lei de Ohm em Circuitos Resistências em Paralelo

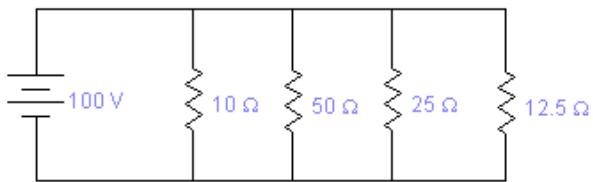
A tensão elétrica será a mesma em todas as resistências, e a corrente elétrica se dividirá inversamente proporcional ao valor da resistência.



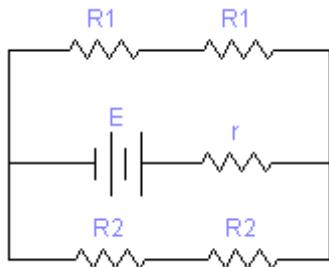
Exercícios:

1) Um resistor de $10\ \Omega$; outro de $15\ \Omega$ e um de $30\ \Omega$ são conectados em série com uma fonte de $120\ V$. Qual a R_{eq} ? Qual a corrente que circula no circuito? Qual a potência dissipada por cada resistência?

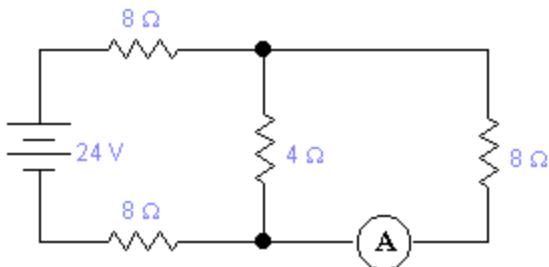
2) Qual a corrente total fornecida pela bateria no circuito abaixo e a potência dissipada em cada resistor?



3) Para o circuito abaixo onde $E = 12\ V$, $r = 2\ \Omega$, $R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 5\ \Omega$, calcule a intensidade de corrente que passa pela fonte.



4) Qual a corrente que indicará o amperímetro ideal no circuito abaixo:



5) Quatro lâmpadas idênticas L , de $110\ V$, devem ser ligadas a uma fonte de $220\ V$, a fim de produzir, sem queimar, a maior claridade possível. Qual a ligação mais adequada?

6) Numa indústria de confecções abastecida por uma rede de $220\ V$, é utilizado um fusível de $50\ A$ para controlar a entrada de corrente. Nessa indústria

existem 100 máquinas de costura, todas ligadas em paralelo. Se a resistência equivalente de cada máquina é 330 Ω, qual o número máximo de máquinas que podem funcionar simultaneamente?

7) *Uma lâmpada de filamento dissipa a potência elétrica de 60 W quando ligada em 110 V. Calcule a resistência elétrica do filamento.*

8) *Um aparelho elétrico quando em funcionamento, é percorrido por uma corrente de 20 A, alimentado por 110 V. Determine a potência elétrica consumida pelo aparelho.*

9) *Um resistor de 200 Ω de resistência elétrica dissipa a potência de 3200 W. Calcule a intensidade corrente que o atravessa.*

2.3.7 Circuito Divisor de Tensão

Num circuito série, cada resistência produz uma queda de tensão “E” igual a sua parte proporcional da tensão total aplicada. Portanto podemos chamar este circuito de divisor de tensão, pois teremos queda de tensão em cada resistor, diminuída o valor de tensão em um dos resistores.

E= tensão sobre a resistência, em Volt;

$$E = \frac{R}{Rt} \cdot E_t$$

R= resistência, em Ω;

Rt= resistência total do circuito;

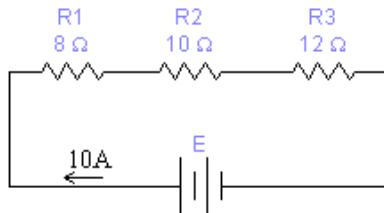
E_t= tensão total do circuito.



Uma resistência R mais alta produz uma queda de tensão maior do que uma resistência mais baixa no circuito série. Resistências iguais apresentam quedas de tensão iguais.

Exercícios

No circuito abaixo calcule a queda de tensão por divisor de tensão em cada resistor.



2.3.8 Circuito Divisor de Corrente

Às vezes torna-se necessário determinar as correntes em ramos individuais num circuito em paralelo, se forem conhecidas as resistências e a corrente total, e se não for conhecida a tensão através do banco de resistências. Quando se considera somente dois ramos do circuito, a corrente que passa num ramo será uma fração da I_{total} . Em um circuito paralelo a corrente que entra num nó é dividida em cada ramo deste circuito, dependendo do valor da resistência em cada ramo.

Aplicando a **lei de Ohm**, podemos determinar uma formula para calculo do divisor de tensão. Essa fração é quociente da segunda resistência pela soma das resistências.

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I_t$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I_t$$

Onde I_1 e I_2 são as correntes nos respectivos ramos. Observe que a equação para a corrente em cada ramo tem o resistor oposto no numerador. Isto porque a corrente em cada ramo é inversamente proporcional à resistência do ramo.

Exercícios

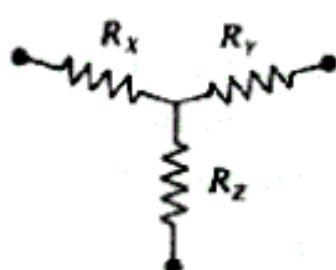
1) Qual o valor de um resistor que deve ser ligado em paralelo através de outro resistor de $100\text{ k}\Omega$ para reduzir a R_{eq} para:

- a) $50\text{ k}\Omega$ b) $25\text{ k}\Omega$ c) $10\text{ k}\Omega$

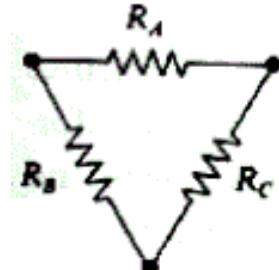
2) Que resistência deve ser ligada em paralelo com um resistor de $20\text{ }\Omega$, e um de $60\text{ }\Omega$ a fim de reduzir a R_{eq} para $10\text{ }\Omega$?

2.4 Transformação Y (T) / Δ (π) e vice-versa

Alguns circuitos possuem resistências interligadas de uma maneira que não permite o cálculo da R_{eq} pelos métodos conhecidos – série e paralelo. As resistências podem estar ligadas em forma de redes Y ou Δ . A solução do circuito então é converter uma ligação em outra, de modo a permitir a associação em série e/ou paralelo após essa conversão.



Círculo Y



Círculo Δ

$$R_A = \frac{R_X R_Y + R_Y R_Z + R_Z R_X}{R_Z}$$

$$R_B = \frac{R_X R_Y + R_Y R_Z + R_Z R_X}{R_Y}$$

$$R_C = \frac{R_X R_Y + R_Y R_Z + R_Z R_X}{R_X}$$

$$R_X = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C}$$

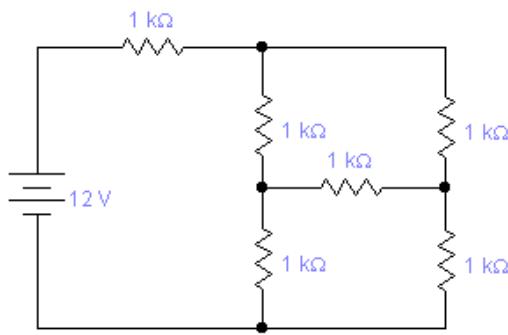
$$R_Y = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

$$R_Z = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C}$$

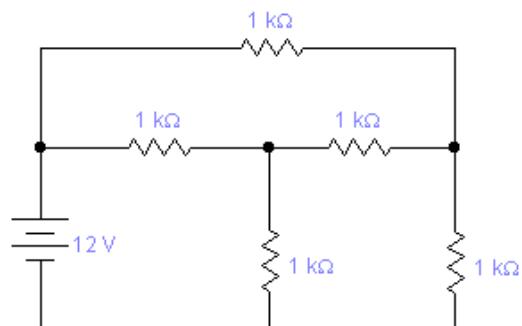
Exercícios:

Calcule a R_{eq} e a I_{total} dos circuitos abaixo:

a)



b)



3 - Geradores e Receptores

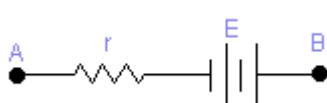
3.1 Definição de Gerador

Gerador é um dispositivo capaz de criar e manter uma d.d.p. entre dois pontos de um circuito. É essa d.d.p. que permite o movimento de cargas elétricas que constituem a corrente elétrica. Para “transportar” uma carga de um ponto a outro, o gerador realiza um trabalho sobre ela. A razão entre o trabalho realizado e a carga transportada mede a capacidade do gerador de levar cargas dos potenciais mais baixos para potenciais mais altos. Essa razão é a Força Eletromotriz (fem) do gerador representado pela letra “E”. Assim:

$$E = \frac{W}{q}$$

A força eletromotriz do gerador é sempre constante, pois ela não depende da corrente elétrica que atravessa.

3.1.1 Circuito Equivalente do Gerador



$$V_B - V_A = E - r \cdot I$$

Onde:

$V_B - V_A$ é a d.d.p. mantida entre os pólos do gerador;

E é a força eletromotriz do gerador;

r é a resistência interna do gerador;

r.I é a queda de tensão interna.

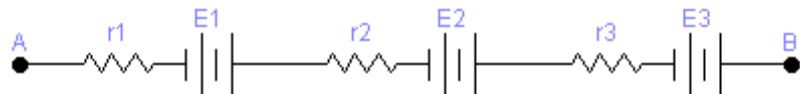
Ex.: Um gerador tem força eletromotriz E= 1,5 V e r interna = 0,5 Ω. Qual a d.d.p. entre os pólos quando percorrido por uma corrente de:

- a) 1 A
- b) 1mA

3.2 Associação de Geradores

3.2.1 Associação em Série

Os geradores são associados de forma que o pólo positivo de um se ligue diretamente ao pólo negativo do outro.



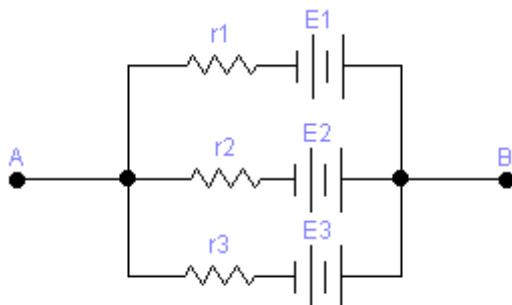
A corrente que atravessa todos os geradores é a mesma;

A fem da associação é a soma das fem's dos componentes da série;

A resistência interna da associação é igual à soma das resistências dos elementos da associação.

3.2.2 Associação em Paralelo

Os geradores são associados de forma que os pólos positivos fiquem ligados a um único ponto, e os pólos negativos da mesma forma a outro ponto.



A corrente se subdivide entre os geradores;

A fem da associação é a própria fem de um dos elementos da associação;

A resistência interna é o inverso da resistência de cada elemento da associação.

3.2.3 Rendimento do Gerador (η)

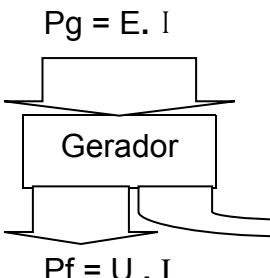
No interior do gerador a corrente vai do pólo de menor potencial para o de maior potencial. Estão envolvidas neste caso três formas de potência: gerada; fornecida e dissipada. Cada uma das potências tem sua forma de cálculo, como segue:

$$P_{gerada} = E \cdot I$$

$$P_{fornecida} = U \cdot I \quad \text{onde } U \text{ é } V_B - V_A$$

$$P_{dissipada} = r \cdot I^2$$

O rendimento do gerador é razão entre a Pf e a Pg, assim como entre a ddp e a FEM do mesmo.



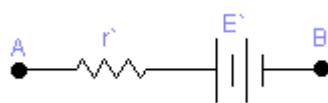
Rendimento

$$\eta = \frac{P_f}{P_g} = \frac{U}{E}$$

3.3 Receptores

São os elementos do circuito que transformam a energia elétrica em outra forma de energia que não exclusivamente térmica. Contudo uma parte da energia elétrica recebida é dissipada na resistência interna do receptor assim como no gerador. Nos receptores, a tensão necessária para o seu funcionamento interno é dada por E' , ou Força Contra-Eletromotriz (fcem).

3.3.1 Circuito Equivalente do Receptor



Onde:

$V_B - V_A$ é a d.d.p. mantida entre os pólos do receptor;

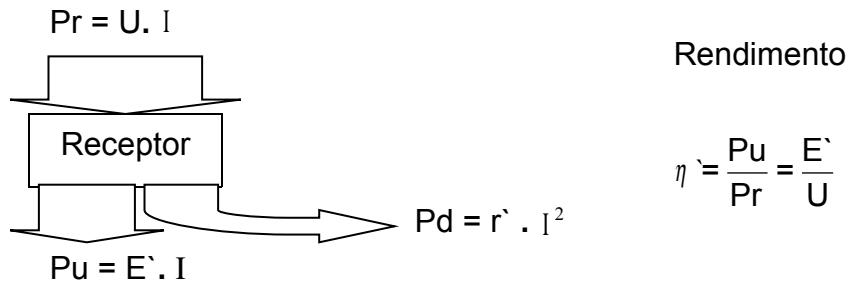
$$V_B - V_A = -E' - r' \cdot I$$

E' é a força contra-eletromotriz do receptor;

$r' \cdot I$ é a queda de tensão interna.

3.3.2 Rendimento Elétrico do Receptor (η')

Em um receptor estão em jogo, assim como no gerador três formas de potência: recebida (fornecida para o receptor); útil (transformada em trabalho) e a dissipada internamente.



Exercícios

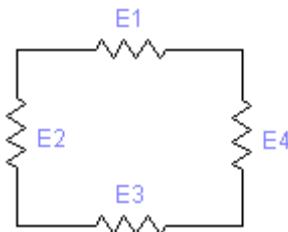
- 1) Um gerador de fem E e resistência interna r , fornece energia a uma lâmpada L . A ddp nos terminais do gerador é de 100 V e a corrente que atravessa é de 1 A. Sendo o rendimento 80 %, calcule E e r .
- 2) Quando uma bateria está em circuito aberto, um voltímetro ideal ligado aos seus terminais indica 12 V. Quando a bateria fornece energia a um resistor R , estabelece no circuito uma corrente de 1 A, e o voltímetro indica 10 V. Determine a fem e a resistência interna da bateria.

4 - Leis De Kirchoff

4.1 Lei das Tensões

A Lei das Tensões de Kirchoff pode ser utilizada para determinar as várias correntes em um circuito elétrico. Uma vez em que as correntes elétricas estão definidas, torna-se simples a tarefa de calcular as várias tensões do circuito. Esta lei pode ser definida como:

(i) A soma algébrica das tensões em um circuito fechado é sempre igual a zero

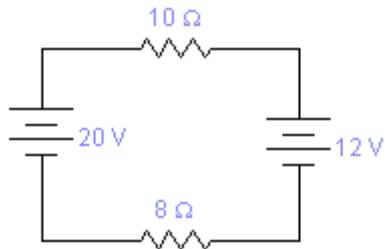


$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 0$$

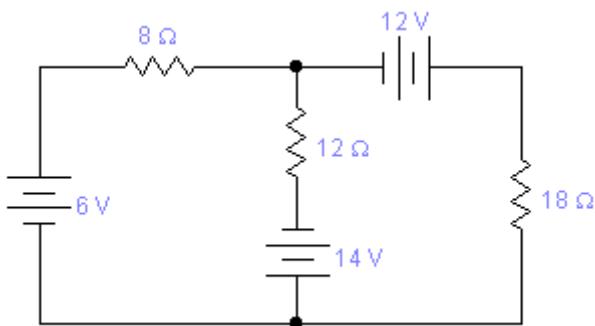
Método para cada malha:

- a) Arbitre um sentido para a corrente elétrica;
- b) Siga o sentido desta corrente, realizando o somatório das tensões;
- c) Para fontes, considere sua tensão com o sinal do pólo de entrada;
- d) Para resistências, considere a queda de tensão $R \cdot i$;
- e) Iguale o somatório a zero.

Exemplo 1:

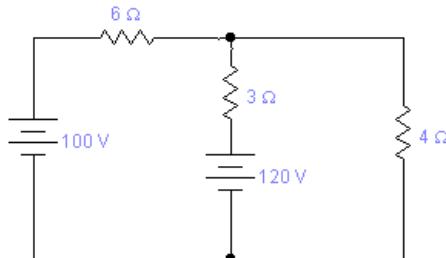


Exemplo 2:

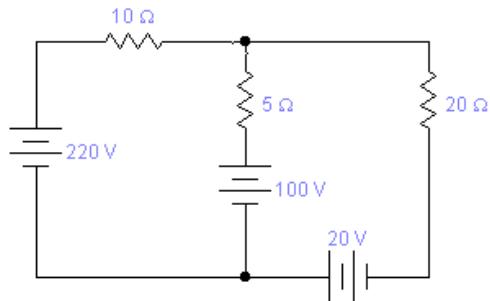


Exercícios: Determine os valores das correntes dos circuitos abaixo:

a)



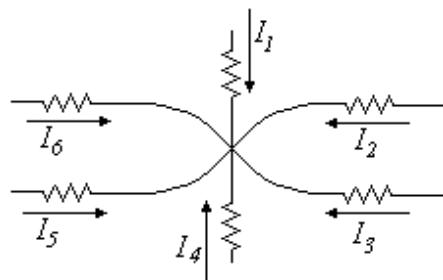
b)



4.2 Lei das Correntes

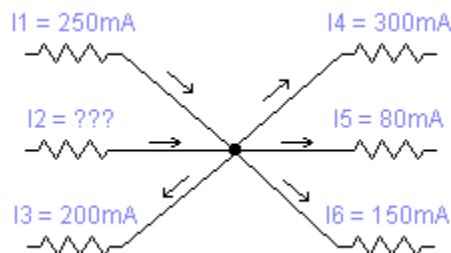
Esta lei visa o equacionamento das correntes nos diversos nós de um circuito, e por isso é também conhecida por “Lei de Nós”.

i A soma algébrica das correntes que entram em um nó é igual à soma das correntes que dele saem.



$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 = 0$$

Exemplo: Calcule a corrente I_2 na figura abaixo:



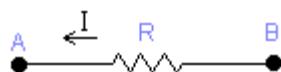
4.3 Análise Nodal

Em um circuito elétrico há n nós principais; um deles é escolhido como nó de referência, e a ele é atribuído arbitrariamente um potencial zero Volt. Aos demais nós são atribuídos então diferentes potenciais simbólicos.

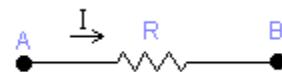
Passos para Análise Nodal:

- Selecione o nó principal, que será o nó de referência, e atribua a cada um dos nós restantes seus próprios potenciais em relação ao nó de referência;
- Atribua correntes nos ramos (a escolha da direção é arbitrária);
- Expresse as correntes nos ramos em termos de potenciais dos nós;
- Escreva uma equação de corrente para cada um dos nós conhecidos;

Sentido da Corrente:

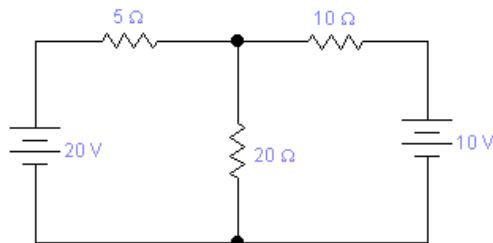


$$I = \frac{V_B - V_A}{R}$$

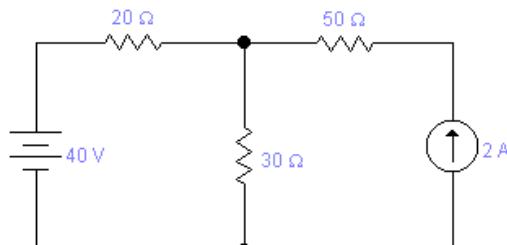


$$I = \frac{V_A - V_B}{R}$$

Exemplo 1:



Exemplo 2: Encontre a corrente que circula pelo resistor de 30 Ω do circuito abaixo.





5 - Capacitores

Tratamos até agora das propriedades resistivas dos circuitos elétricos. A resistência, que é a oposição ao fluxo de corrente está associada à dissipação de energia.

Além da propriedade resistência, um circuito elétrico também pode possuir as propriedades da indutância e da capacitância, sendo que ambas estão associadas ao armazenamento de energia.

5.1 Capacitância

Propriedade de um circuito se opor a qualquer variação de tensão no circuito. Alternativamente, capacidade é a capacidade de um circuito elétrico armazenar energia em um campo eletrostático.

5.2 Força Exercida por Duas Cargas

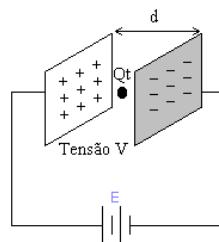
Pelos conceitos da eletrostática, cargas iguais se repelem, e cargas diferentes se atraem. A força exercida entre elas é dada pela Lei de Coulomb como:

Onde: F é a força, dada em Newton;

$$F = k \frac{Q_1 \times Q_2}{d^2}$$

Q₁ e Q₂ são quantidades de carga elétrica, em Coulomb;
d é distância, em metro;

k é a constante dielétrica (k do ar = 9 × 10⁹)



5.3 Materiais Dielétricos

Isolantes ou dielétricos são caracterizados pelo fato de possuírem poucos elétrons livres, isto é, os elétrons estão fortemente ligados ao núcleo. Sem a aplicação de um campo elétrico, um átomo dielétrico é simétrico, mas na presença de um campo elétrico os elétrons se deslocam de forma a ficarem próximos da carga positiva do campo elétrico.

Uma medida de como as linhas de força são estabelecidas em um dielétrico é denominada permissividade. A permissividade absoluta (ϵ) é a relação entre a densidade de fluxo no dielétrico e o campo elétrico sobre o mesmo.

A constante dielétrica é a relação entre permissividade de um material e a permissividade do vácuo, e é definida como:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Sendo $\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$

Material	ϵ_r	Rigidez Dielétrica (V/m)
Vácuo	1	
Ar	1,0006	3×10^6
Óleo Mineral	2,3	$1,5 \times 10^7$
Papel Isolante	3	2×10^7
Porcelana	7	10×10^7
Vidro	6	8×10^7
Parafina	2	3×10^7
Quartzo	4	14×10^7
Poliestireno	2,6	5×10^7
Mica	6	6×10^7

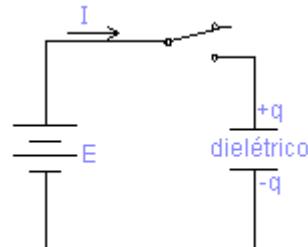
Óxido de Alumínio	10	800×10^6
Água destilada	81	

Tabela Rigidez e Permissividade (Fonte: Bastos,1989 e Saraiva [–])

5.4 Representação Gráfica da Capacitância

Existe uma relação entre a tensão aplicada entre duas placas paralelas separadas por um dielétrico, e a carga que aparece nestas placas. Analise o circuito abaixo:

Ao fecharmos a chave, circulará uma corrente da fonte para as placas, no início de alta intensidade. Quando houver um equilíbrio de cargas, isto é $E = v$, a corrente I tenderá a zero. Este processo é chamado “carga”, e leva um tempo muito pequeno.



Um gráfico relacionando a tensão e a carga acumulada gera uma relação linear. A constante de proporcionalidade a tensão e a carga acumulada e a tensão, isto é, a inclinação da reta é a capacitância.

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

$$Q = C \times E$$

A unidade de capacitância é o coulomb/Volt, que é definida Farad.

A capacitância é determinada pelos fatores geométricos A (área) e d (distância) das placas que formam o capacitor. Quando a área das placas é aumentada, aumenta a capacitância. Da mesma forma quando a separação entre as placas aumenta, a capacitância diminui. Então temos que:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

C = capacitância em Farad;

A = área das placas em m²

d = distância entre as placas em m

5.5 Definição de Capacitor

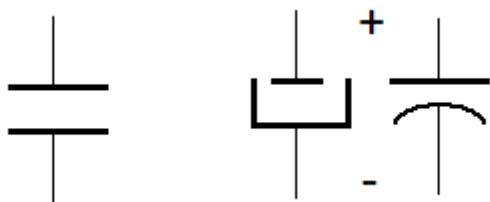


Dispositivo ou componente designado especificamente para ter capacidade.

5.6 Aplicação

Os capacitores têm várias aplicações nos circuitos elétricos e eletrônicos. Uma das principais é a filtragem. Eles podem acumular uma razoável quantidade de cargas quando estão ligados a uma tensão. Quando esta tensão é desligada, o capacitor é capaz de continuar fornecendo esta mesma tensão durante um pequeno período de tempo, funcionando como uma espécie de bateria de curta duração.

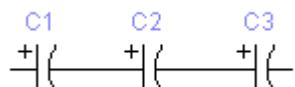
5.7 Símbologia



5.8 Associação de Capacitores

5.8.1 Associação em série

Quando os capacitores são conectados em série, a fem “E” é dividida pelos capacitores, e a capacidade equivalente ou total C_t , é menor que o menor dos capacitores. Analisando o circuito abaixo:



Todos os capacitores adquirem a mesma carga elétrica; ou seja; $Q_1 = Q_2 = Q_3$. A tensão total é igual a $E_t = E_1 + E_2 + E_3$.

Então:

$$Et = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3} \Rightarrow \frac{Qt}{C_t} = \frac{Qt}{C_1} + \frac{Qt}{C_2} + \frac{Qt}{C_3} \quad (\div Qt)$$

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Capacitância equivalente para capacitores em série

$$C_t = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

Ceq para 2 capacitores em série

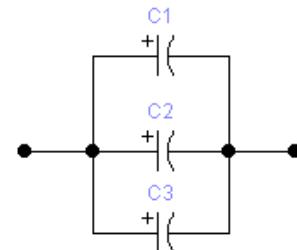
5.8.2 Associação em paralelo

Quando dois capacitores são conectados em paralelo, a carga total adquirida pela combinação é dividida pelos capacitores da associação, e a capacidade total é a soma das capacidades individuais.

Analisando o circuito:

Cada capacitor adquire uma carga dada por:

$$Q_1 = C_1 \times E_1 \quad Q_2 = C_2 \times E_2 \quad Q_3 = C_3 \times E_3$$



Como $E_t = E_1 = E_2 = E_3$ e $Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$
 têm-se:

$$C_t \times E_t = C_1 \times E_1 + C_2 \times E_2 + C_3 \times E_3 \Rightarrow$$

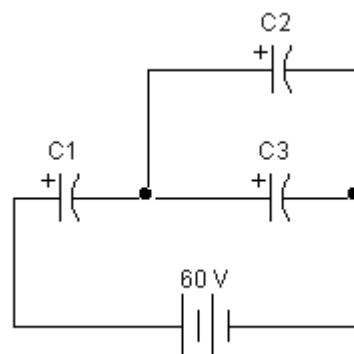
$$C_t \times E_t = C_1 \times E_t + C_2 \times E_t + C_3 \times E_t \quad (\div E_t)$$

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3$$

Exercícios

1) Dados $C_1 = 12 \mu F$, $C_2 = 6 \mu F$, $C_3 = 30 \mu F$; Calcule:

- a) capacidade total
- b) a carga em cada capacitor
- c) a tensão sobre cada capacitor

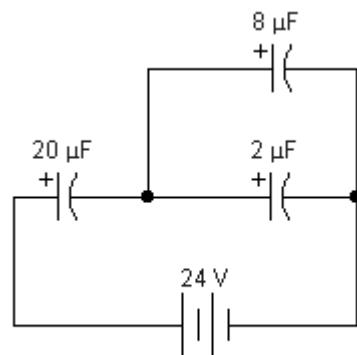


2) Qual a capacidade total de quatro capacitores de $20\mu F$ conectados:

- a) em série
- b) em paralelo

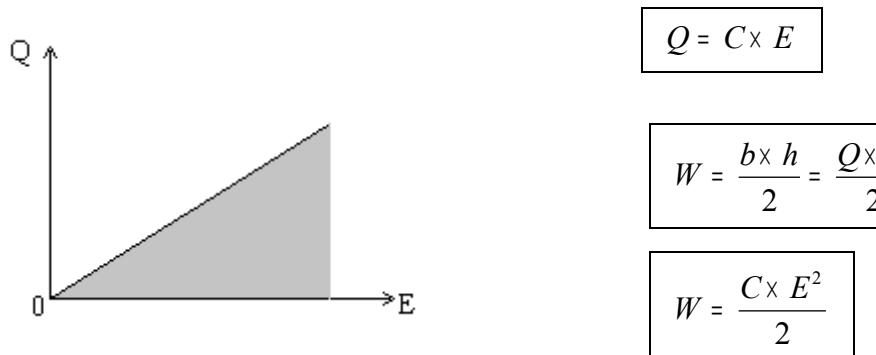
3) No circuito ao lado, calcule:

- a) a capacidade total;
- b) a tensão em cada capacitor;
- c) a carga em cada capacitor.



5.9 Energia Elétrica de um Capacitor

A energia armazenada em um capacitor é medida pelo trabalho elétrico, quando a carga Q passa de uma armadura para a outra descarregando o capacitor. Ocorre que durante essa operação a tensão “ E ” do capacitor diminui até zero. Com o auxílio da matemática pode-se demonstrar que a energia armazenada num capacitor é representada pela área do gráfico abaixo:



Exercícios:

1) Têm-se 20 capacitores de $2 \mu F$ cada, associados em 5 séries iguais, ligados em paralelo. Quanto vale a Ceq da associação?

2) Um capacitor de $2 \mu\text{F}$ é ligado a uma d.d.p. de 3 V. Calcule a carga e a energia acumulada no capacitor.

3) Dos capacitores iguais são ligados em série e, aos extremos da associação aplica-se uma tensão de 400 V. A seguir descarregam-se um deles, e verifica-se que o calor desenvolvido foi de 0,5 J. Calcule a capacidade de cada capacitor.

4) Calcule capacidade total de um capacitor de $3 \mu\text{F}$, um de $5 \mu\text{F}$ e um de $10 \mu\text{F}$ associados em série.

5.10 Reatância Capacitiva (X_c)

A reatância capacitiva é a oposição ao fluxo de corrente CA devido à capacidade no circuito. A unidade de reatância capacitativa é o OHM. Pode-se calcular a reatância capacitativa através da equação abaixo:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Onde: X_c = reatância capacitativa, Ω ;

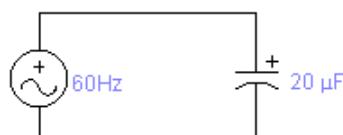
f = freqüência, Hz;

C = capacidade, F.

A tensão e a corrente num circuito contendo somente reatância capacitativa podem ser determinadas utilizando-se a Lei de Ohm. Entretanto, no caso de um circuito capacitivo substitui-se R por X_c .

Exercícios

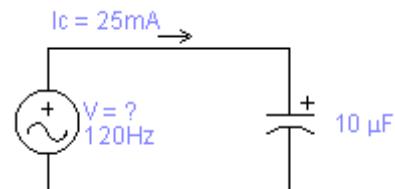
1) Qual a reatância capacitativa de um capacitor de $20 \mu\text{F}$ em 60 Hz?



2) Um capacitor de circuito de telefone tem uma capacidade de $3 \mu\text{F}$. Que corrente passa através dele quando se aplicam 15 V em 800 Hz?



3) Uma corrente CA de 25 mA e 120 Hz passa por um circuito contendo um capacitor de 10 μF. Qual a queda de tensão através do capacitor?



6 - Indutores

6.1 Indutância

A capacidade que um condutor possui de induzir tensão em si mesmo quando a corrente varia é a sua auto-indutância ou simplesmente indutância. O símbolo da indutância é o L e a sua unidade é o Henry (H). Um Henry é a quantidade de indutância que permite uma quantidade de indutância que permite uma indução de 1 V quando a corrente varia na razão de 1 A/ 1s. A fórmula para a indutância é:

$$L = \frac{vL}{\Delta i/\Delta t}$$

Onde:

L : indutância, H;

VL : tensão induzida através da bobina, V;

$\Delta i/\Delta t$: a taxa de variação da corrente, A/s.

Exercícios

1) Qual a indutância de uma bobina que induz 20 V quando a corrente que passa pela bobina varia de 12 A para 20 A em 2 s?

2) Uma bobina tem uma indutância de 50 μ H. Qual a tensão induzida na bobina quando a taxa de variação da corrente for 10000 A / s?

6.2 Reatância Indutiva (X_L)

A reatância indutiva é a oposição à corrente CA devida à indutância do circuito. A unidade da reatância indutiva é o OHM. A fórmula para a reatância indutiva é:

Onde:

$$X_L = 2\pi f L \quad X_L : \text{reatância indutiva, } \Omega;$$

f : freqüência, Hz;

L : indutância, H.

Num circuito apenas formado por indutância, pode-se calcular a tensão e a corrente aplicando a Lei de Ohm, bastando para isto substituir R por XL.

Exercícios

- 1) Um circuito é formado por uma bobina de 20 mH que funciona a uma freqüência de 950 kHz. Qual a reatância indutiva da bobina?
- 2) Qual deve ser a indutância de uma bobina a fim de que ela tenha uma reatância de 942 Ω a uma freqüência de 60 kHz?
- 3) A bobina de sintonia de um radiotransmissor tem uma indutância de 300 μH. Para que a freqüência ela terá uma reatância indutiva de 3.768 Ω?
- 4) Uma bobina de 225 μH de resistência desprezível serve para limitar a corrente a 25 mA quando aos seus terminais se aplicam 40 V. Qual a freqüência da corrente?
- 5) Calcule a reatância indutiva de uma bobina de 0,5 H para: (a) 200 Hz (b) 20 kHz (c) 2 MHz.
- 6) Uma bobina de sintonia de um transmissor deve ter uma reatância de 95,6 Ω em 3,9 MHz. Calcule a indutância da bobina.

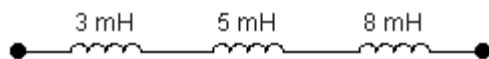
6.3 Associação de Indutores

O sistema de associação de indutores é o mesmo de resistores e capacitores, ou seja, em série, paralelo e mista. O método de cálculo para se chegar à indutância equivalente é o mesmo para resistores.

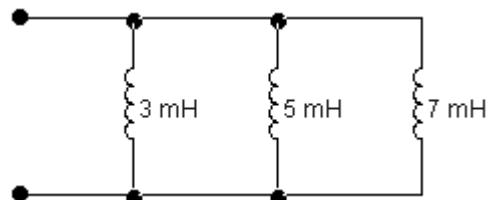
Exercício

Calcule a indutância total dos circuitos abaixo:

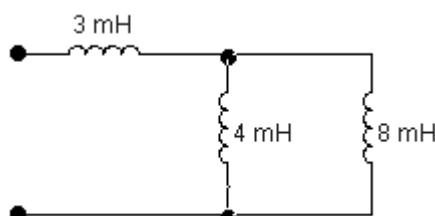
a)



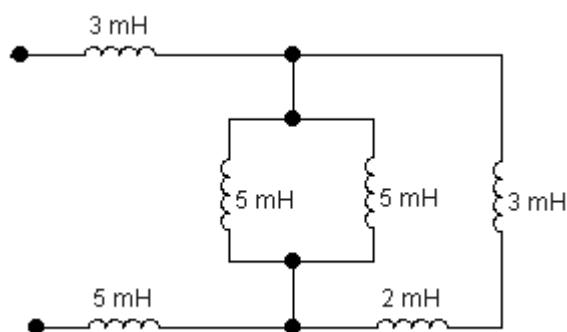
b)



c)



d)



6.4 Aplicação de Indutores

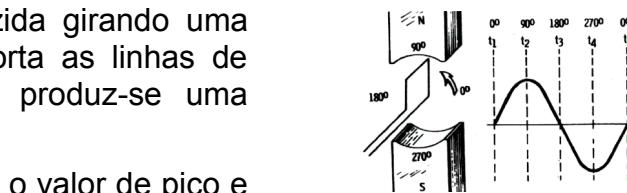
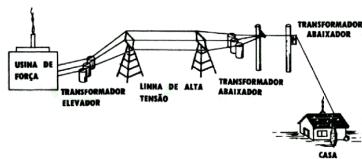
Estes conceitos são aplicados na construção de instrumentos de medidas, em eletros-imã, solenóides, reles, trancas eletrônicas, transformadores, filtros, motores elétricos, etc

7 - Tensão Alternada

7.1 Geração de tensão alternada

A tensão alternada é produzida girando uma bobina. À medida que a bobina corta as linhas de força entre os pólos magnéticos, produz-se uma tensão.

Essa tensão varia de zero até o valor de pico e volta a zero conforme uma senóide. Assim é produzida a eletricidade nas usinas hidrelétricas. A geração ocorre quando um condutor se movimenta num campo magnético, induzindo uma tensão nesse condutor.



Esta tensão depende da intensidade do campo magnético, da velocidade do condutor e da direção em que se movimenta o condutor. A senóide é obtida pelo movimento de rotação do condutor.

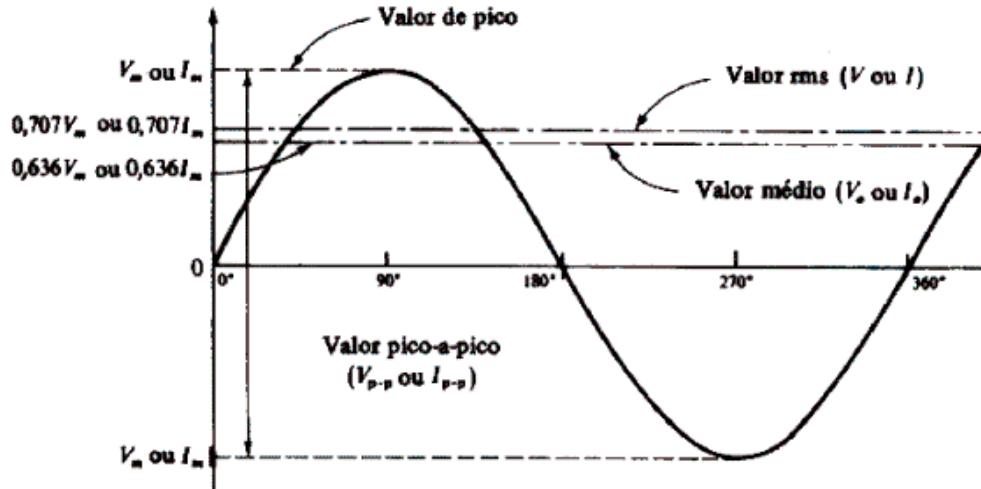
A polaridade da tensão induzida depende da posição da espira em relação aos pólos do ímã. Na corrente alternada os elétrons mudam o sentido do seu movimento. Em altas freqüências, a corrente se limita à superfície do condutor, com isso, a resistência aumenta.

Vantagens da corrente alternada: ela pode ser transmitida a grandes distâncias mais economicamente que a corrente contínua, sem grandes perdas. Para isso, pode-se elevar e diminuir a tensão por meio de transformadores.

A equação da tensão alternada senoidal é

$$V = V_m \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \phi)$$

7.2 Características da Tensão e da Corrente Alternada



- **Valor eficaz (V_{ef} ou I_{ef})**: também chamado de RMS (root mean square), é o valor que produz o mesmo efeito que um valor em corrente contínua faria. É igual a 0,707 vezes o valor de pico (V_p). A maioria dos instrumentos de medida é calibrada em unidades eficazes ou médio-quadráticas, o que permite a comparação direta dos valores CC e CA.

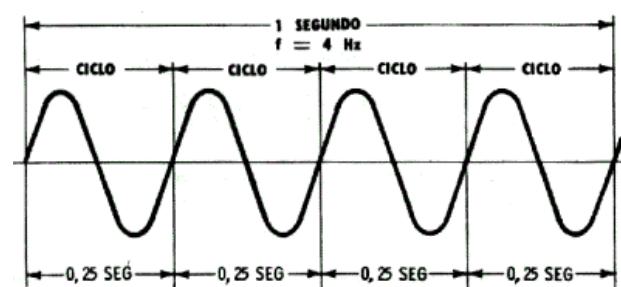
$$V_{\text{ef}} = V_p / \sqrt{2}$$

- **Valor médio (Vm)**: é a tensão média da onda senoidal durante um meio ciclo. Geometricamente, corresponde a altura de um retângulo que tem a mesma área da senóide.

$$V_m = 2 \cdot V_p / \pi$$

- **Freqüência (f)**: é o número de ciclos por segundo, dada em Hertz.

- **Período (T)**: é o tempo necessário para completar um ciclo. É o inverso da freqüência. No Brasil a freqüência é de 60Hz, o que dá um período de 16,5ms.



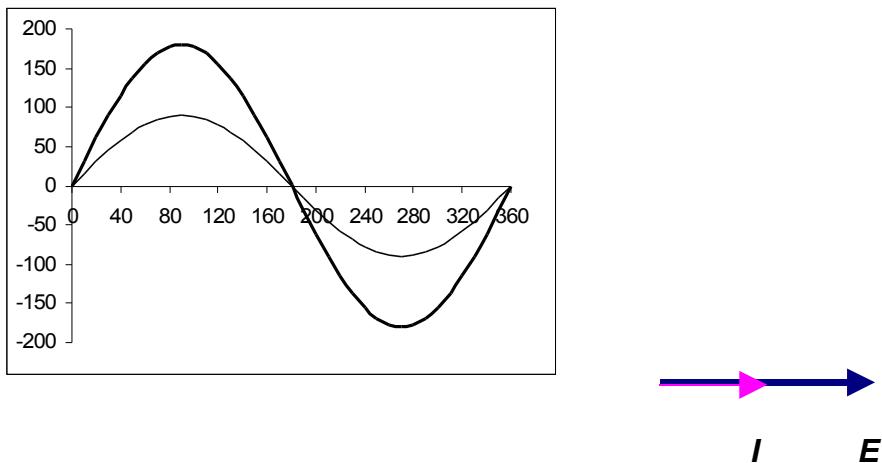
$$f = \frac{1}{T}$$

7.3 Tipos de Cargas em Sistemas de Tensão Alternada

Existem três tipos de cargas nos sistemas de tensão alternada: as resistivas, as indutivas e as capacitivas. As capacitivas não realizam trabalho e são utilizadas normalmente como filtros, como elementos auxiliares de partida de motores monofásicos e como compensadores de reações indutivas.

7.3.1 Carga Resistiva

De acordo com a Lei de Ohm, a carga resistiva funciona como um limitador de corrente, não existindo outro tipo de reação, ou seja, $I = E/R$. Graficamente, pode-se observar que a corrente em uma carga puramente resistiva se mantém em fase com a tensão aplicada em seus terminais, como apresentado na figura abaixo.



Uma carga resistiva funciona como um dissipador de energia, consumindo toda a energia fornecida pela rede elétrica. A potência fornecida pela rede é dada pelo produto da tensão e da corrente, denominada potência aparente, dados pela equação:

$$S = E \cdot I$$

Onde

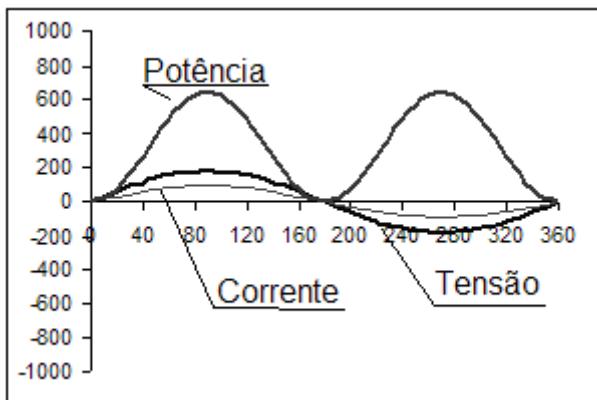
S : potência aparente em kVA

E : tensão em V

I : corrente em A



Uma carga resistiva mantém a corrente em fase com a tensão



A potência útil dissipada por uma carga resistiva é dada pelo valor médio do produto da tensão e da corrente, ou seja, o valor médio da potência aparente. Graficamente, se observa na figura abaixo que toda a potência fornecida pela fonte é dissipada na forma de calor, ou em outras palavras, a área sob a curva do produto tensão corrente é positiva, indicando que a carga está consumindo energia.

7.3.2 Carga Indutiva

As cargas indutivas são aquelas que na presença de tensão alternada armazenam energia sob a forma de campo eletromagnético, como é o caso de reatores e motores, dentre outras. A carga puramente indutiva produz uma reação na corrente elétrica como limitação de seu valor e ainda provoca um atraso de 90 graus em relação à tensão induzida em seus terminais. Essa reação é denominada reatância indutiva, representada de acordo com a equação:

$$X_L = 2 \pi f L$$

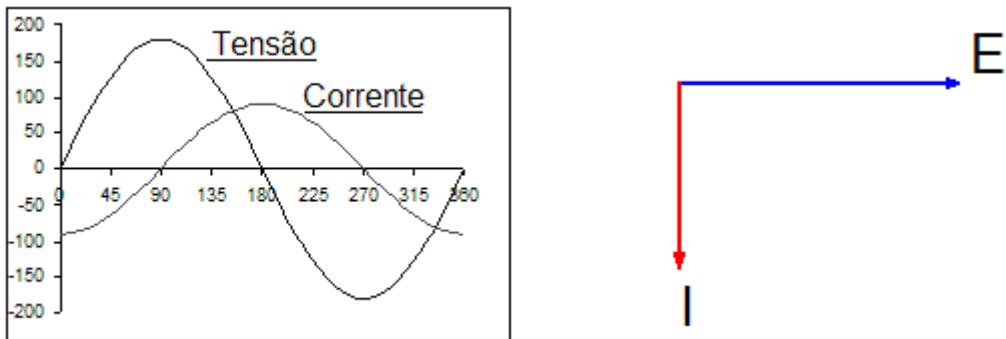
Em que,

X_L : reatância indutiva em Ω

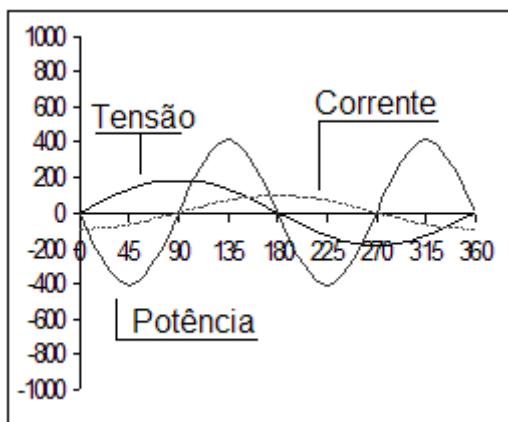
F : freqüência da tensão da rede [V]

L : indutância dado em Henry

A figura abaixo apresenta graficamente o defasamento angular entre a corrente e a tensão para uma carga puramente indutiva.



Uma carga puramente indutiva não realiza trabalho, ou seja, durante meio ciclo da tensão da fonte, o indutor armazena energia sob a forma de campo eletromagnético e durante o segundo meio ciclo da tensão ele devolve a energia para a fonte, o que pode ser mais bem compreendido ao se observar à figura abaixo.



7.3.3 Carga Capacitiva

As cargas capacitivas são aquelas que na presença de tensão alternada armazenam energia sob a forma de campo elétrico, como é o caso de condensadores, filtros, dentre outras. A carga puramente capacitativa produz

uma reação na corrente elétrica como limitação de seu valor e ainda provoca um atraso de 90 graus na tensão em relação à corrente.

Essa reação é denominada reatância capacitiva, representada de acordo com a equação:

$$X_c = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot f \cdot C$$

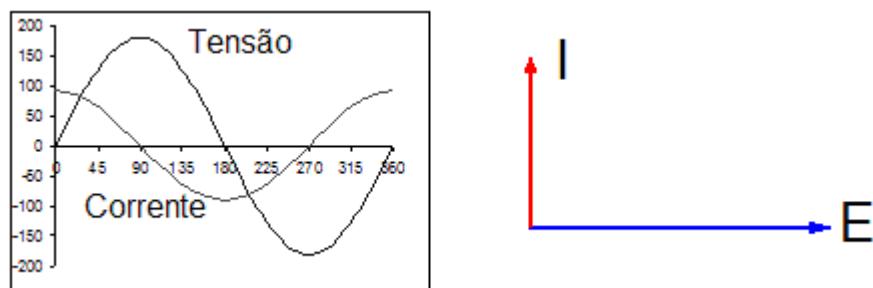
Onde,

X_c : reatância capacitiva dada em Ω

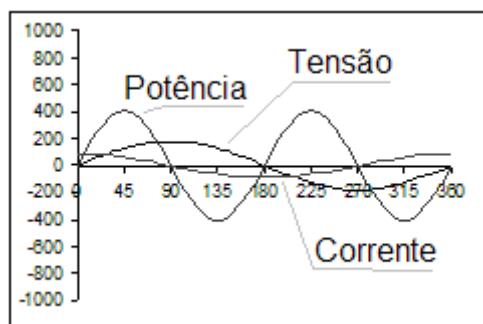
F : freqüência da tensão da rede em V

C : capacidade em Farad

A figura abaixo apresenta graficamente o defasamento angular entre a tensão e a corrente para uma carga puramente capacitiva.



Uma carga puramente capacitiva não realiza trabalho, ou seja, durante meio ciclo da tensão da fonte, o capacitor armazena energia sob a forma de campo elétrico e durante o segundo meio ciclo da tensão ele devolve a energia para a fonte, o que pode ser mais bem compreendido ao se observar à figura abaixo.





*Uma carga indutiva ATRASA em 90° a corrente em relação à tensão
e Uma carga capacitiva ADIANTA em 90° a corrente em relação à tensão*

7.4 Circuitos elétricos em Tensão Alternada

7.4.1 Circuito Série

Num circuito série constituído por um resistor e um indutor, aplicamos uma tensão E de uma fonte geradora da CA, de freqüência f .

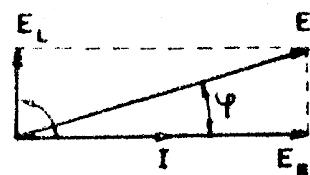
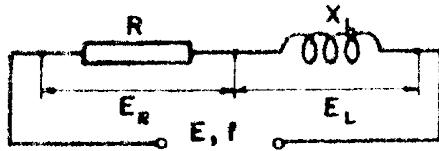
Sendo I a corrente alternativa que circula pelo circuito, a queda de tensão no resistor será:

$$E_R = I \times R, \text{ em fase com a corrente};$$

e a queda de tensão no indutor será:

$$E_L = I \times X_L, \text{ adiantada da corrente em } 90^\circ.$$

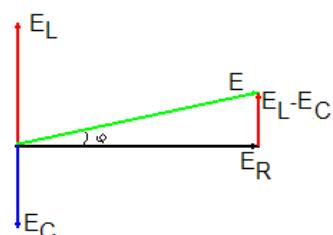
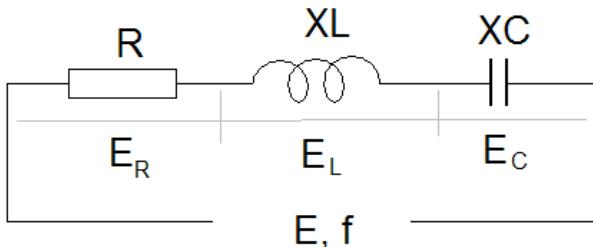
A tensão aplicada está defasada de um ângulo φ da corrente, cujo valor é a soma geométrica entre E_R e E_L .



$$E = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$$

Colocando-se em série um capacitor no circuito, a queda de tensão será:

$$E_C = I \times X_C, \text{ atrasada da corrente em } 90^\circ.$$



Assim a tensão aplicada será:

$$E = \sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$

pois E_L e E_C estão sobre uma mesma reta, porém são de sentido oposto. A impedância total será:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

E a relação entre corrente e tensão, respeitando-se a lei de Ohm é $\mathbf{E} = ZI$

O *fator de potência*, ou seja, a defasagem da corrente em relação à tensão é dada por:

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{E_R}{E}$$

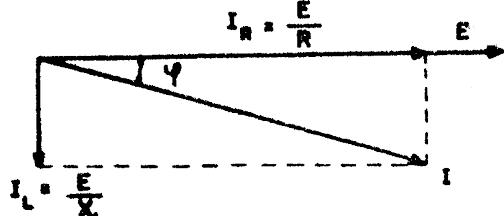
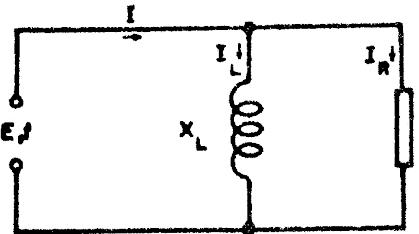
7.4.2 Circuito Paralelo

Num circuito paralelo, constituído por um resistor e um indutor, aplicamos uma tensão E , de freqüência f de uma fonte geradora de CA. Pelo resistor circula uma corrente I_R dada por:

$$I_R = \frac{E}{R}, \text{ em fase com } E.$$

Pelo indutor temos:

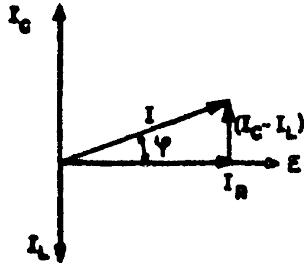
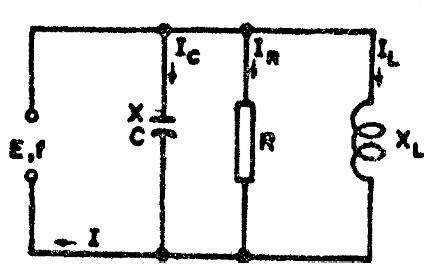
$$I_L = \frac{E}{X_L}, \text{ atrasado em } 90^\circ.$$



Pela linha circula uma corrente I , defasada de um ângulo ϕ em relação a E , cujo valor é a soma geométrica entre I_R e I_L :

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

Se ligarmos um capacitor em paralelo, teremos:



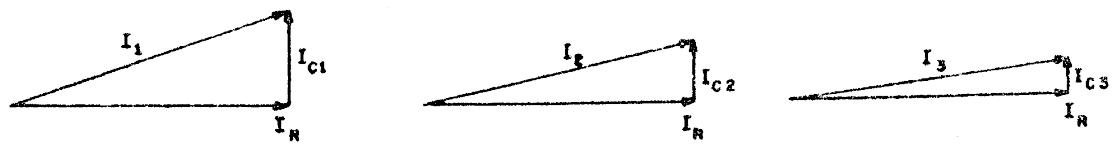
$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

A impedância total do circuito será $Z=E/I$, e o fator de potência será:

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{I_R}{I}$$

Na prática, costuma-se ligar capacitores em paralelos aos circuitos (que na maioria das vezes são de comportamento indutivo) com o fim de se ter um fator de potência próximo a unidade ($\phi = 0^\circ$).

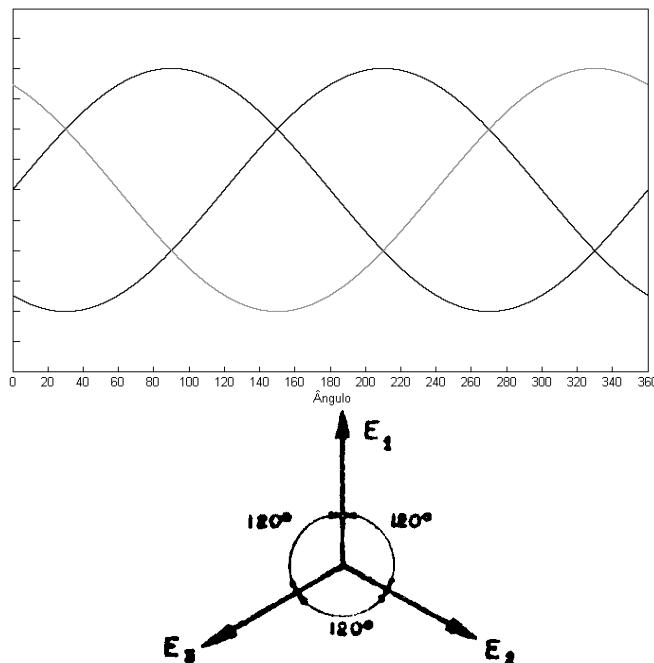
Isto equivale tornar o circuito com comportamento próximo ao resistivo ou ôhmico. Tal medida é interessante, uma vez que a componente, defasada de 90° em relação à tensão, diminui, permitindo o melhor aproveitamento das linhas de transmissão.



7.5 Tensão Alternada Trifásica

Quando uma linha é formada por três condutores com as tensões entre um e outro condutor iguais, porém defasadas de 120° , temos uma rede trifásica.

A representação da corrente alternada ou tensão trifásica é a que se vê nas figuras abaixo.

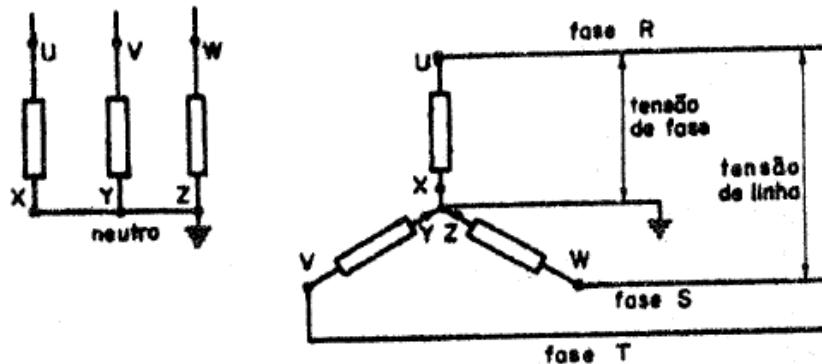


Quando ligamos a uma linha trifásica três fontes receptoras, ou três elementos de uma fonte receptora, temos um circuito trifásico.

Conforme a maneira de efetuarmos as ligações temos um circuito estrela ou triângulo (Y ou Δ).

7.5.1 Circuito estrela ou Y

As três extremidades dos finais dos elementos são ligadas entre si, e as três iniciais à linha. Como se pode ver na figura abaixo, a corrente que passa pela linha, é a mesma que passa pelos elementos, isto é, à *corrente de linhas* é igual à *corrente de fase*.



O ponto comum aos três elementos chama-se neutro.

Se deste ponto se tira um condutor, temos o condutor neutro, que em geral é ligado à terra. A tensão aplicada a cada elemento (entre condutores de fase e neutro) é chamada tensão de fase e a entre dois condutores de fase tensão de linha.

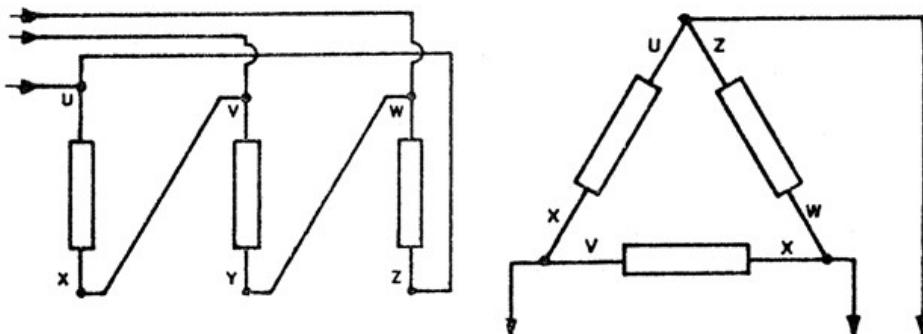
$$A \text{ relação entre elas é: } E = E_{\text{linha}} = E_{\text{fase}} \cdot \sqrt{3}$$

7.5.2 Circuito triângulo ou Delta

A extremidade final de um elemento é ligada à inicial do outro, de modo que os três fiquem dispostos eletricamente, segundo os lados de um triângulo eqüilátero. Os vértices são ligados à linha.

Temos que a tensão da linha é igual à tensão da fase e a corrente da linha será:

$$I = I_{\text{linha}} = I_{\text{fase}} \cdot \sqrt{3}$$



Os elementos de um receptor trifásico são representados respectivamente por U-X, V-Y e W-Z, onde U, V e W representam as extremidades iniciais, ou por 1-4, 2-5 e 3-6, sendo 1, 2 e 3 os inícios, pois cada

elemento tem sua polaridade que deve ser conservada na ligação. A distribuição de energia elétrica é feita em geral em sistemas trifásicos, cujas redes podem ser ligadas em estrela ou triângulo.

Quando a rede é em triângulo, em casos especiais, podemos retirar um condutor do centro de cada fase, obtendo-se duas tensões, sendo uma o dobro da outra.

Exemplo: 110 e 220 V.

Em geral, as cargas monofásicas (lâmpadas e pequenos motores) são ligadas à tensão mais baixa e as trifásicas (força, aquecimento industrial etc.) a mais alta.

As cargas monofásicas, num circuito trifásico, devem ser distribuídas igualmente entre as fases, para que uma não fique sobrecarregada em detrimento das outras.

7.6 Potência nos Circuitos de Tensão Alternada

A potência consumida por um circuito de corrente contínua é dada em watts, pelo produto da tensão pela corrente.

Em corrente alternada, este produto representa a **potência aparente** do circuito, isto é, a potência que o circuito aparenta ter uma vez que há uma defasagem entre E e I . É medida em volt-ampère (VA):

$$N = E \times I$$

Onde:

N = potência aparente, em volts-ampère;

E = tensão em volts;

I = corrente em ampères.

A potência que produz trabalho nos circuitos de CA é chamada potência ativa, e é dada, em watts (W), pelo produto:

$$P = E \times I \times \cos \varphi$$

Onde:

P = potência ativa, em watts;

E = tensão, em volts;

I = corrente em ampères;

O fator $\cos \phi$ (coseno do ângulo de base) é chamado fator de potência do circuito, pois é ele que determina qual a percentagem de potência aparente que é empregada para produzir trabalho.

O fator de potência é de suma importância nos circuitos de CA.

No Brasil foi especificado o valor mínimo do fator de potência em 0,8, medido junto ao medidor de energia. Mede-se o fator de potência em aparelhos chamados de medidores de $\cos \phi$. O fator de potência pode ser determinado por:

$$\cos \phi = \frac{P}{E \cdot I}$$

O fator de potência deve ser o mais alto possível, isto é, próximo à unidade. Deste modo, com a mesma corrente e a mesma tensão, conseguimos uma maior potência ativa, que, como sabemos, é a que produz trabalho no circuito.

Ao produto $Q = E \times I \times \sin \phi$ denominamos de **potência reativa**; é a porção da potência aparente que hora é fornecida pelo gerador à carga, hora é devolvida pela carga ao gerador.

Nos circuitos trifásicos, a potência ativa total é a soma das potências de cada fase.

$$P_F = E_F \cdot I_F \cdot \cos \phi$$

Como temos, no circuito estrela:

$$E_F = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad \text{e} \quad I_F = I$$

e no triângulo:

$$E_F = E \quad \text{e} \quad I_F = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

resulta:

$$P = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \cos \phi$$

tanto para circuito estrela como para o circuito triângulo, dado em função dos elementos de linha. A potência aparente (N) num sistema trifásico será:

$$N = \sqrt{3} \cdot E \cdot I$$