

ELETRICIDADE
(CC e CA)
Versão 3.0

Wagner da Silva Zanco
2007

<http://www.wagnerzanco.com.br>
suporte@wagnerzanco.com.br

Objetivo

O objetivo desta apostila é servir como parte do material didático utilizado no estudo de Eletricidade, curso que pode ser ministrado de forma presencial ou semipresencial. Embora o material tenha sido desenvolvido inicialmente para a disciplina de Eletricidade do curso de Eletrônica em nível técnico, não há impedimento para a sua utilização em disciplinas pertencentes a cursos técnicos de áreas afins, ou até mesmo em outros segmentos da educação profissional cujo conteúdo programático seja compatível.

Os assuntos são abordados em uma seqüência lógica respeitando a visão consagrada por muitos professores no que diz respeito a progressiva complexidade na abordagem do tema, com exemplos e exercícios propostos que ajudarão o aluno na retenção do item estudado e no desenvolvimento do raciocínio exigido para a aprendizagem da eletricidade.

Uma Breve História

Tudo começou por volta do século XVII, quando foram feitas as primeiras experiências com eletricidade. Naquela época, o homem ainda não tinha conhecimento sobre a constituição da matéria.

Em 1750, o cientista e estadista americano Benjamin Franklin, deu uma contribuição relevante a eletricidade. Ele imaginava a eletricidade como um fluido invisível. Se um corpo tivesse mais do que sua cota normal deste fluido, ele dizia que o corpo tinha uma carga positiva; se o corpo tivesse menos que sua cota normal, sua carga era considerada negativa. Com base nesta teoria, Franklin concluiu que, se um corpo com carga positiva fosse colocado em contato com um corpo com carga negativa, o fluido escoava do corpo positivo (excesso) para o corpo negativo (deficiência). Este fluido hoje é chamado corrente elétrica.

Com o descobrimento do elétron em 1897, pelo físico inglês Joseph Thomson, verificou-se que o fluido na verdade era o movimento ordenado de elétrons, daí o nome corrente elétrica.

Algumas descobertas foram fundamentais para o avanço da eletricidade, como a do físico italiano Alessandro Giuseppe Volta, que em 1800 conseguiu estocar eletricidade em uma pilha de cobre e zinco.

Em 1831, o físico inglês Michael Faraday mostra que um ímã pode gerar eletricidade numa bobina de fios de cobre.

Em 1880, Thomas Edison descobre o princípio da lâmpada elétrica.

Em 1882 é implantado o primeiro sistema de iluminação pública em Nova York.

Em 1888, George Westinghouse faz o primeiro motor elétrico, aplicando as descobertas de Faraday.

No Brasil, o emprego da energia elétrica no país teve início com a instalação da Usina Hidrelétrica Ribeirão do Inferno, em 1883, destinada ao fornecimento de força motriz a serviços de mineração em Diamantina, Minas Gerais; a Usina Hidrelétrica da Companhia Fiação e Tecidos São Silvestre, de 1885, no município de Viçosa, também em Minas Gerais; a Usina Hidrelétrica Ribeirão dos Macacos, em 1887, no mesmo estado; a Usina Termelétrica Velha Porto Alegre, em 1887, no Rio Grande do Sul; e a Usina Hidrelétrica Marmelos, realizada em 1889, em Juiz de Fora, Minas Gerais, por iniciativa do industrial Bernardo Mascarenhas.

A partir de 1899, ano em que foi autorizada a funcionar no país a São Paulo Railway, Light and Power Company Ltd. - empresa canadense que deu início à atuação do Grupo Light no Brasil, e que no mesmo ano passaria à denominação São Paulo Tramway, Light and Power Company Ltd. - o capital nacional passou a conviver com os investimentos estrangeiros, cada vez mais presentes, o que determinou, na segunda metade da década de 1920, a considerável monopolização e desnacionalização do setor.

A eletrônica inicia-se praticamente com a descoberta do diodo de emissão termiônica, estudado e desenvolvido por J. A. Fleming, em 1902. Este componente também muito conhecido como válvula de Fleming ou simplesmente válvula, é o marco inicial de toda a história da indústria eletrônica. Antes da primeira guerra mundial, o rádio passou a fazer parte do cotidiano, somando-se a outras invenções como a do automóvel e do cinema.

A válvula era uma invenção fantástica, mas tinha alguns grandes inconvenientes: era grande e pesada demais, o que tornava os aparelhos de rádio uns enormes trambolhos, exigiam um certo tempo para começar a funcionar e consumiam muita energia. Em busca de uma alternativa aconteceu o inesperado. Em 1947, comandando um grupo de físicos, Willian Shockley inventa o transistor. Foi um desses grandes acontecimentos que mudam todas as regras. Todos estavam ansiosos na época e previam que grandes coisas estavam para acontecer. O que eles não sabiam era que as previsões mais ousadas não chegavam nem perto do novo mundo que estava por vir.

Em 1946, nasce na universidade da Pensilvânia o primeiro computador eletrônico, o ENIAC. O ENIAC tinha aproximadamente 18.000 válvulas e ocupava cerca de 150m². O ENIAC deu início a primeira geração de computadores. Tais computadores custavam milhões de dólares. A partir daí teve início a indústria multibilionária dos computadores.

A indústria eletrônica é em grande parte a responsável pelo significativo avanço na utilização de tecnologia de ponta nos mais diversos segmentos da sociedade. Sem ela não existira internet, viagens espaciais, DVD, TV digital, ultra-sonografia computadorizada, Ressonância Magnética, telefone celular e tantas outras coisas que fazem parte do nosso dia-a-dia. Contudo, nada disso existiria se não fosse a eletricidade. Por isso que a eletricidade é de extrema importância àqueles que pretendem se profissionalizar em alguma área que tem nela a sua origem.

Índice Analítico

CAPÍTULO 1: GRANDEZAS ELÉTRICAS	1
1.1. ÁTOMO	1
1.2. CARGA ELÉTRICA	1
1.3. ELETRIZAÇÃO	1
1.4. ELÉTRONAS LIVRES	1
1.5. CONDUTORES E ISOLANTES	1
1.6. CORRENTE ELÉTRICA	1
1.7. POTENCIAL ELÉTRICO	2
1.8. DIFERENÇA DE POTENCIAL	3
1.1. CAPACITÂNCIA	3
1.10. INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA	3
1.11. RESISTÊNCIA ELÉTRICA	3
1.12. RESISTORES	3
1.13. CONDUTÂNCIA	4
1.14. FONTE DE TENSÃO CONTÍNUA	4
1.15. SENTIDO DA CORRENTE ELÉTRICA	4
1.16. FONTE DE TENSÃO ALTERNADA	4
1.17. TIPOS DE CORRENTE ELÉTRICA	4
1.18. MÚLTIPLOS E SUBMÚLTIPLOS	4
1.19. CONVERSÃO DE UNIDADES	5
1.20. LEI DE OHM	5
1.21. RESISTIVIDADE	5
CAPÍTULO 2: ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES	7
2.1. ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE	7
2.2. ASSOCIAÇÃO EM PARALELO	7
2.3. ASSOCIAÇÃO MISTA	7
2.4. CONVERSÃO ESTRELA - TRIÂNGULO	8
2.5. CONVERSÃO TRIÂNGULO – ESTRELA	8
CAPÍTULO 3: CIRCUITO SIMPLES DE CORRENTE CONTÍNUA	10
3.1. SÉRIE	10
3.2. CARACTERÍSTICAS DE UM CIRCUITO SÉRIE	10
3.3. CIRCUITO EM PARALELO	11
3.4. CARACTERÍSTICAS DE UM CIRCUITO EM PARALELO	11
3.5. POTÊNCIA ELÉTRICA	12
3.6. CIRCUITO MISTO	12
3.7. ASSOCIAÇÃO DE FONTES DE TENSÃO	15
3.7.1. SÉRIE	15
3.7.2. ASSOCIAÇÃO EM PARALELO	15
3.8. POLARIDADE DA TENSÃO EM UM RESISTOR	15
3.9. TENSÃO ENTRE DOIS PONTOS QUAISQUER DE UM CIRCUITO	16
3.10. RESISTÊNCIA INTERNA	17
3.11. PONTE DE WEATSTONE	17
CAPÍTULO 4: CAPACITORES	19
4.1. TIPOS DE CAPACITORES	19
4.2. CARGA DO CAPACITOR	19
4.3. DESCARGA DO CAPACITOR	19
4.4. ENERGIA ARMAZENADA NO CAPACITOR	19
4.5. FATORES QUE INFLUENCIAM NA CAPACITÂNCIA	20
4.6. ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES	20
4.6.1. SÉRIE	20
4.6.2. PARALELO	20
4.7. CIRCUITO COM UM ÚNICO CAPACITOR EXCITADO POR CORRENTE CONTÍNUA	21
4.7.1. NO INSTANTE EM QUE S1 É LIGADA	21
4.8. GRÁFICO DE CARGA DO CAPACITOR	21
4.9. DESCARGA DO CAPACITOR	22
4.10. RIGIDEZ DIELÉTRICA	22
CAPÍTULO 5: ESTRUTURAS DE CORRENTE CONTÍNUA	24
5.1. 1ª LEI DE KIRCHHOFF	24

5.2. 2ª LEI DE KIRCHHOFF	24
5.3. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO	25
5.4. TEOREMA DE THEVENIN	26
5.5. TEOREMA DE NORTON	26
5.6. MÉTODOS DAS MALHAS OU CORRENTES CÍCLICAS DE MAXWELL	27

CAPÍTULO 6: MAGNETISMO E ELETROMAGNETISMO 29

6.1. IMANTAÇÃO OU MAGNETIZAÇÃO	29
6.2. CAMPO MAGNÉTICO	29
6.3. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	29
6.4. ATRAÇÃO E REPULSÃO ENTRE ÍMÃS	30
6.5. GRANDEZAS MAGNÉTICAS	30
6.6. COMPORTAMENTO DAS SUBSTÂNCIAS EM RELAÇÃO AO MAGNETISMO	30
6.7. ELETROMAGNETISMO	30
6.8. REGRA DA MÃO ESQUERDA	31
6.9. CAMPOS QUE SE SOMAM OU SE CANCELAM	31
6.10. CAMPO MAGNÉTICO EM ESPIRAS	31
6.11. REGRA DA MÃO ESQUERDA PARA ESPIRAS	32
6.12. FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA	32
6.13. REGRA DA MÃO ESQUERDA PARA DEFINIR O SENTIDO DA FEM	32
6.14. CÁLCULO DA FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA	32
6.15. INDUTÂNCIA	32
6.16. AUTO-INDUTÂNCIA	33
6.17. INDUTÂNCIA-MÚTUA	33
6.18. FATORES QUE DETERMINAM A AUTO-INDUTÂNCIA	33
6.19. ASSOCIAÇÃO DE INDUTORES EM SÉRIE	33
6.20. ASSOCIAÇÃO DE INDUTORES EM PARALELO	33

CAPÍTULO 7: GERAÇÃO DE UMA TENSÃO ALTERNADA SENOIDAL 35

7.1. CICLO	35
7.2. FREQUÊNCIA (f)	35
7.3. GRAU ELÉTRICO DE TEMPO	35
7.4. TENSÃO ELÉTRICA CA	36
7.5. VALORES DA TENSÃO ALTERNADA SENOIDAL	36

CAPÍTULO 8: CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA 47

8.1. ÂNGULO DE DEFASAGEM	38
8.2. RESPOSTA SENOIDAL EM UM RESISTOR	38
8.3. RESPOSTA SENOIDAL EM UM CAPACITOR	38
8.4. RESPOSTA SENOIDAL EM UM INDUTOR	39
8.5. NÚMEROS COMPLEXOS	39
8.6. FORMA ALGÉBRICA OU BINÔMIA	39
8.7. MÓDULO E ARGUMENTO DE UM NÚMERO COMPLEXO	39
8.8. FORMA POLAR OU TRIGONOMÉTRICA DE UM NÚMERO COMPLEXO	40
8.9. FASOR	40
8.10. ANÁLISE DE UM CIRCUITO DE CORRENTE ALTERNADA	41
8.11. IMPEDÂNCIA (Z)	41
8.12. DIAGRAMA DE TEMPO	42
8.13. DIAGRAMA DE FASORES	42
8.14. TIPOS DE CIRCUITOS	42
8.15. PASSOS PARA ANÁLISE DE UM CIRCUITO CA	42
8.16. CIRCUITO CA EM PARALELO	42
8.17. CIRCUITO CA MISTO	44

CAPÍTULO 8: POTÊNCIA EM CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA 47

9.1. POTÊNCIA REAL (P)	47
9.2. POTÊNCIA REATIVA (Q)	47
9.3. POTÊNCIA APARENTE (S)	47
9.4. TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS	47
9.5. CORREÇÃO DO FATOR POTÊNCIA	47

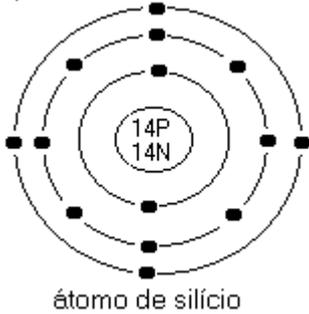
APÊNDICE – CÓDIGO DE CORES 50

BIBLIOGRAFIA	51
---------------------	----

Grandezas Elétricas

1.1. ÁTOMO

Nós sabemos que a matéria é tudo aquilo que possui massa e ocupa lugar no espaço. Toda matéria é constituída de átomos. O átomo se divide em duas partes: **Núcleo**, onde se encontram os prótons e os nêutrons e **Eletrosfera**, onde se encontram os elétrons.



Sabe-se atualmente que existem dezenas de outras partículas diferentes no átomo, tais como mésons, neutrinos, quarks, léptons, bósons etc.

1.2. CARGA ELÉTRICA

Elétricamente falando, um átomo pode se encontrar em três situações diferentes:

Neutro ⇒ quando a quantidade de prótons é igual a de elétrons. Este é o estado normal de qualquer átomo, neste caso dizemos que o mesmo está em equilíbrio.

Carregado positivamente ⇒ quando a quantidade de prótons é maior que a de elétrons.

Carregado negativamente ⇒ Quando a quantidade de prótons é menor que a de elétrons.

A menor quantidade de carga elétrica que um átomo pode adquirir é a carga de um próton ou de um elétron.

- Elétron** ⇒ carga elétrica negativa(-) fundamental da eletricidade.
- Próton** ⇒ carga elétrica positiva(+) fundamental da eletricidade
- Nêutron** ⇒ não possui carga elétrica.

A carga elétrica fundamental foi medida pela primeira vez em 1909 pelo físico norte americano R. A. Milikan. Expressa no SI, o valor numérico da carga elétrica fundamental de um elétron, expressa em Coulomb é:

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

Á carga elétrica de um próton é igual a do elétron em módulo, mudando apenas o sinal, sendo ela positiva.

Vemos a seguir o cálculo utilizado para se definir a quantidade de elétrons necessários para uma carga Q de 1 Coulomb (1C).

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

$$x = \frac{1}{1,6 \times 10^{-19}} = 6,25 \times 10^{18} \text{ elétrons}$$

$$1 \text{ C} = 6,25 \times 10^{18} \text{ elétrons}$$

1.3. ELETRIZAÇÃO ou IONIZAÇÃO

É o ato de fazer com que os átomos de um corpo ganhem ou percam elétrons. Vários são os processos de eletrização. Quando um átomo ganha elétrons, o mesmo se transforma em um **ion negativo** ou **anion**; se perder elétrons, tornar-se-á um **ion positivo** ou **cation**.

O mais antigo processo de eletrização de que se tem notícia é o da Fricção. Quando friccionamos dois corpos, ambos adquirem carga elétrica, um por perder e o outro por receber elétrons. Outros processos de eletrização são:

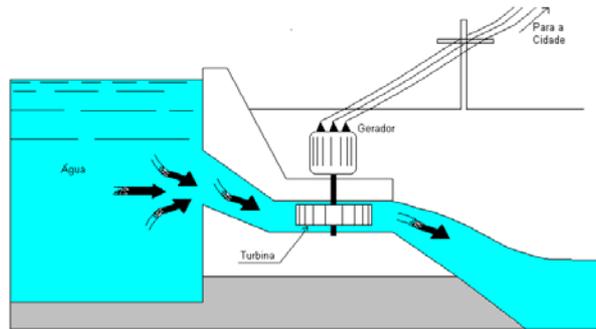
Fotoeletricidade ⇒ Determinados materiais, quando são postos em contato com a luz emitem elétrons, adquirindo carga elétrica.

Termoeletricidade ⇒ O calor também é causa de emissão de elétrons por parte de certos materiais, resultando da mesma forma em carga elétrica.

Piezoelasticidade ⇒ Certos cristais como quartzo, sais de rochelle e a turmalina ficam com seus átomos ionizados quando sofrem pressões mecânicas. Trata-se de um fenômeno conhecido como piezoelasticidade.

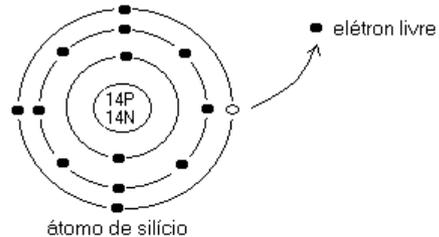
Reações químicas ⇒ Podemos produzir cargas elétricas através de reações químicas entre diferentes substâncias. Seu estudo faz parte da eletroquímica.

Magnetismo ⇒ podemos obter cargas elétricas movimentando um condutor dentro de um campo magnético. Atualmente mais de 95% da energia consumida no mundo é produzida deste modo. Seu estudo faz parte do eletromagnetismo. Vemnos na figura a seguir o princípio de funcionamento de uma usina hidroelétrica. A água movimentada a turbina, que faz girar o eixo do gerador, o que faz com que condutores se movimentem dentro de um campo magnético no interior do gerador, produzindo, assim, eletricidade.



1.4. ELÉTRONS LIVRES

O que mantém os elétrons ligados aos seus respectivos átomos é o seu movimento em torno do núcleo, associado a força de atração mutua existente entre eles e os prótons. Quanto mais afastado do átomo estiver este elétron menor será esta força de atração mutua.



Quando aplicamos em certos materiais, energia externa como luz, calor, pressão, os elétrons absorvem esta energia, e se esta for maior que a força exercida pelo núcleo, o mesmo poderá se desprender do átomo tornando-se um elétron livre. A corrente elétrica é nada mais que o movimento de elétrons livres.

1.5. CONDUTORES E ISOLANTES

Existem materiais que possuem uma grande quantidade de elétrons livres. Estes materiais são chamados de bons condutores porque a corrente elétrica tem facilidade de passar por eles. Como exemplo, podemos citar as ligas metálicas, ouro, prata, cobre, ferro, alumínio etc.

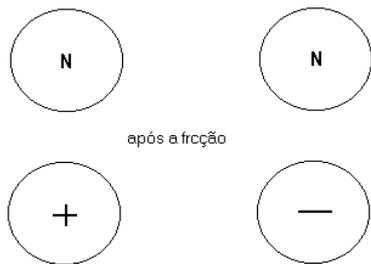
Existem materiais que não possuem ou praticamente não possuem elétrons livres, são os maus condutores ou isolantes. Estes materiais apresentam uma grande oposição a passagem da corrente elétrica. Alguns exemplos de isolantes são: vidro, porcelana, mica, borracha, madeira etc.

1.6. CORRENTE ELÉTRICA

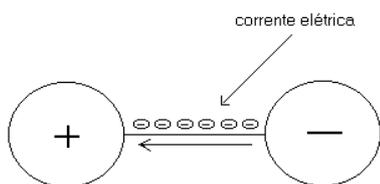
Tudo na natureza tende ao equilíbrio. O mesmo ocorre com a eletricidade. Quando um átomo ganha ou perde elétrons, sua tendência natural é voltar ao equilíbrio, ou seja, estar eletricamente neutro. Quando unimos dois corpos em situação elétrica diferente, se estabelecerá um fluxo

de elétrons de um para o outro, afim de se restabelecer o equilíbrio. Este fluxo de elétrons é denominado **corrente elétrica**.

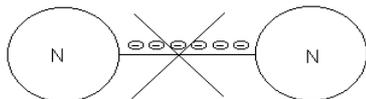
Imagine dois corpos inicialmente neutros. Após friccionarmos um ao outro, ambos irão adquirir carga elétrica, um por ceder e outro por receber elétrons.



Se colocarmos os dois corpos carregados em contato, Haverá um fluxo de elétrons do corpo que está com excesso para o corpo que está com falta de elétrons, a fim de que os dois corpos voltem a condição de equilíbrio. O fluxo de elétrons irá cessar quando todos os elétrons que estão em excesso no corpo carregado negativamente voltarem para o corpo que os cedeu, que agora está carregado positivamente, ou seja, quando os dois estiverem neutros e em equilíbrio entre si.



Ao atingir o equilíbrio, o fluxo de elétrons cessa.



Para se obter um fluxo de elétrons, necessariamente não precisa estar um corpo carregado positivamente e outro negativamente, basta que os corpos possuam potencial elétrico diferente.

1.7. POTENCIAL ELÉTRICO

Sempre que um corpo adquire carga elétrica, adquire também potencial elétrico, cuja unidade de medida é o volt. O potencial elétrico depende da quantidade de carga que o corpo possui, de suas dimensões e do meio onde se encontra. O potencial elétrico está relacionado com a capacidade que tem as cargas armazenadas de realizar um trabalho elétrico. O potencial elétrico dá ao corpo capacidade de enviar ou receber elétrons, ou seja, realizar trabalho elétrico.

No caso do corpo ser esférico e de raio R, seu potencial elétrico é dado pela seguinte equação:

$$V = \frac{K \cdot Q}{R}$$

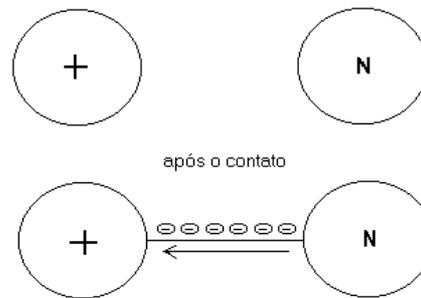
V = potencial elétrico (volts)

K = constante que depende do meio no qual se encontra a esfera (N.m/C²)

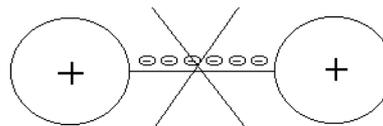
Q = carga armazenada (coulomb)

O fenômeno da corrente elétrica também pode ocorrer em qualquer uma das seguintes possibilidades.

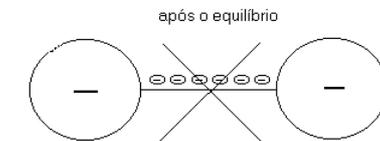
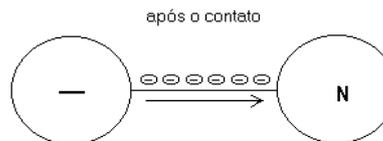
A) Entre um corpo carregado positivamente e outro neutro



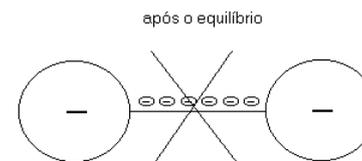
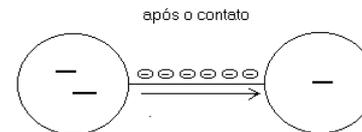
O corpo que está carregado positivamente irá atrair elétrons do corpo neutro. A medida que o corpo positivo vai recebendo elétrons, sua carga vai diminuindo, e a medida que o corpo neutro vai cedendo elétrons, o mesmo vai se carregando positivamente. Quando os dois estiverem com o mesmo potencial, o fluxo cessará. Embora os dois estejam carregados positivamente, existe um equilíbrio entre si.



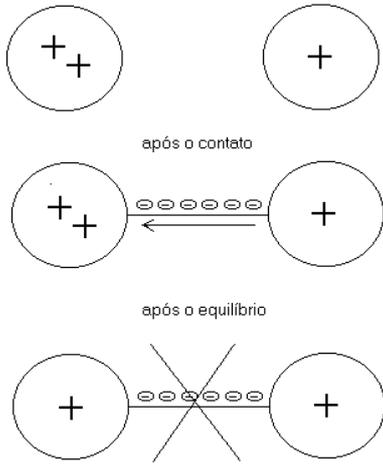
B) Entre um corpo carregado negativamente e outro neutro.



C) Entre dois corpos carregados negativamente desde que tenham potencial elétrico diferentes.

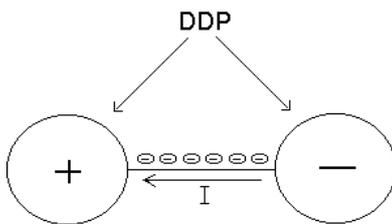


D) Entre dois corpos carregados positivamente desde que tenham potencial elétrico diferente.



1.8. DIFERENÇA DE POTENCIAL (DDP)

Dois corpos com potenciais elétricos diferentes, possuem entre si uma diferença de potencial (DDP). Para que se estabeleça uma corrente elétrica, basta unirmos dois corpos em que entre os quais, haja uma DDP. O fluxo só cessará quando os corpos atingirem o equilíbrio entre si, isto é, estiverem com o mesmo potencial. A diferença de potencial é a força que movimenta os elétrons, é a causa da corrente elétrica. A diferença de potencial também é conhecida como tensão elétrica, pressão elétrica, voltagem. É representada pelas letras V, E ou U. A unidade de tensão elétrica é o volt (V).



1.9. CAPACITÂNCIA

É a capacidade que um condutor possui de armazenar cargas elétricas. A capacitância de um condutor depende de suas dimensões e do meio no qual se encontra.

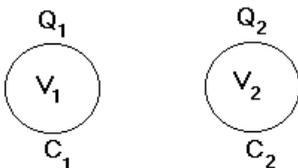
$$C = \frac{Q}{V}$$

C = capacitância (Farad)

Q = unidade de carga (Coulomb) $\Rightarrow 1C = 6,25 \times 10^{18}$ elétrons

V = potencial elétrico (Volt)

Quando dois condutores estiverem no mesmo meio e sob o mesmo potencial V, armazenará mais cargas elétricas aquele condutor que tiver maior capacitância.



Se $V_1 = V_2$ e $C_1 = C_2$, então, $Q_1 = Q_2$	Se $V_1 = V_2$ e $C_1 > C_2$, então, $Q_1 > Q_2$
---	---

Ex:

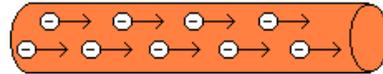
Qual a capacitância de um corpo que tem armazenado uma carga de 0,5C e um potencial de 10V?

$$C = \frac{0,5}{10} = 0,05F$$

1.10. INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA

É o número de elétrons que passam por segundo num determinado ponto. Fica complicado falar em elétrons por segundo porque o número de elétrons envolvido é muito grande. Para resolver este problema é utilizada a unidade de carga (coulomb). 1C equivale a $6,25 \times 10^{18}$ elétrons.

Abaixo vemos um condutor sendo percorrido por uma corrente elétrica. A intensidade de corrente neste ponto do condutor é igual ao número de elétrons que estiverem passando por ali em cada segundo.



A intensidade de corrente elétrica é representada pela letra I e sua unidade é o ampere (A). Quando estiver passando 1C por segundo num determinado ponto, a intensidade de corrente naquele ponto é de 1A.

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

I = intensidade de corrente elétrica (ampere)

Q = unidade de carga (coulomb)

T = tempo (segundo)

Ex:

A) Qual a intensidade de corrente elétrica que passou pelo filamento de uma lâmpada que ficou ligada durante 30Seg, tendo passado por seu filamento uma carga de 120C?

$$I = \frac{120}{30} = 4A$$

B) Quantos elétrons passaram pela resistência de um ferro elétrico que ficou ligado durante 15 minutos, sendo percorrido por uma corrente de 20A?

$$15\text{min} = 15 \times 60\text{seg} = 900\text{seg}$$

$$Q = 900 \times 20 = 18000\text{ C}$$

$$1C = 6,25 \times 10^{18}$$

$$18000C = 18000 \times 6,25 \times 10^{18} \text{ ele.}$$

$$= 11,25 \times 10^{22} \text{ ele.}$$

1.11. RESISTÊNCIA ELÉTRICA

É a oposição encontrada pela corrente elétrica ao percorrer um material. Quanto mais elétrons livres possui o material, menor é a sua resistência. É por isso que os materiais bons condutores são usados para conduzir a corrente elétrica. Mas por mais condutor que seja um material, ele sempre apresentará uma resistência elétrica. A resistência elétrica de um corpo depende de suas dimensões físicas e do tipo de material. A resistência é representada pela letra R e sua unidade de medida é o OHM, simbolizado pela letra grega ômega (Ω).

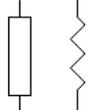
1.12. RESISTORES

São dispositivos fabricados para fazerem uso de sua resistência elétrica. A função do resistor é se opor a passagem da corrente elétrica. É amplamente usado dentro da eletrônica e eletricidade, nos mais diferentes circuitos. O chuveiro elétrico e o ferro elétrico são equipamentos que utilizam a resistência elétrica para transformar energia elétrica em energia térmica, ou calor. A lâmpada incandescente por sua vez, utiliza a resistência elétrica para produzir luz. Vemos a seguir a figura de um resistor que podemos encontrar com facilidade no mercado.

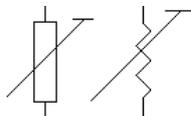


Os resistores são amplamente utilizados dentro da eletrônica e eletricidade, nos mais diferentes circuitos. Abaixo vemos os principais tipos de resistores.

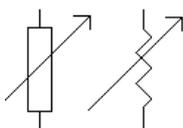
Fixo ⇒ O valor de sua resistência não pode ser alterado.



Ajustável ⇒ O valor de sua resistência pode ser modificada.



Variável ⇒ O valor de sua resistência pode ser modificada.



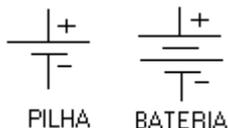
1.13. CONDUTÂNCIA

é o inverso da resistência, portanto é a facilidade encontrada pela corrente elétrica ao percorrer um material, sua unidade é o Siemens (S).

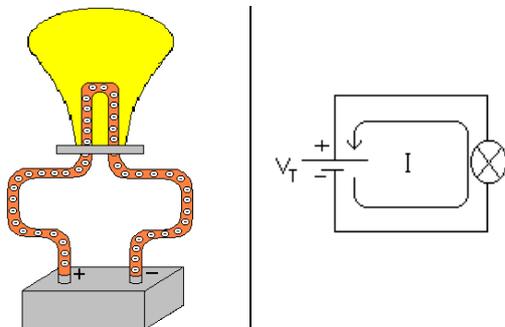
$$G = \frac{1}{R}$$

1.14. FONTE DE TENSÃO CONTÍNUA

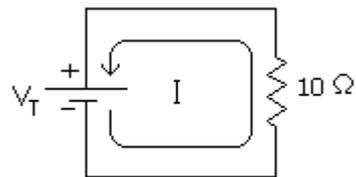
Dispositivo que mantém constante a diferença de potencial entre os seus terminais. Como exemplo podemos citar a pilha, bateria de automóvel etc.



A seguir vemos a ilustração de uma bateria conectada aos terminais de uma lâmpada. O fluxo de elétrons sai do terminal negativo da bateria, passa pelo filamento da lâmpada e entra no terminal positivo. Ao ser percorrido pela corrente elétrica, o filamento se aquece e se torna incandescente, produzindo luz. Ao longo dos anos, a eletricidade evoluiu, permitindo ao homem transformar a energia elétrica em outras formas de energia, como a mecânica, a química, a térmica etc. Ao lado vemos o diagrama esquemático do mesmo circuito.

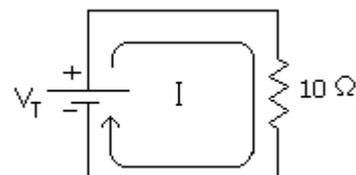


Se ligarmos um resistor aos terminais de uma fonte de tensão contínua, se estabelecerá um fluxo de elétrons no circuito, a fim de que se restabeleça o equilíbrio entre os terminais da fonte. Como a fonte de alguma forma consegue manter a diferença de potencial entre os seus terminais, a corrente circulará no circuito até que o mesmo seja interrompido. Ao passar pelo resistor, a corrente elétrica é convertida em energia térmica



Os elétrons saem pelo terminal negativo da fonte, passam pela resistência e entram no terminal positivo. Dentro da fonte, os elétrons passam do terminal positivo para o negativo, e assim o ciclo vai se repetindo.

A mesma explicação poderia ser dada considerando que os elétrons estivessem saindo do terminal positivo e entrando no terminal negativo da fonte de tensão.

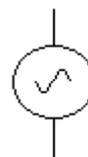


1.15. SENTIDO DA CORRENTE ELÉTRICA

Quando consideramos que a corrente sai do terminal negativo da fonte e entra no terminal positivo, dizemos que ela tem **sentido eletrônico**. Quando consideramos que a corrente sai do terminal positivo e entra no terminal negativo da fonte, dizemos que ela tem **sentido convencional**. Tanto um quanto outro pode ser usado sem problema, visto que ambos nos leva ao mesmo resultado. Por motivos que nos convêm, adotaremos o sentido eletrônico para a corrente elétrica.

1.16. FONTE DE TENSÃO ALTERNADA

Ao contrário da fonte de tensão contínua, a fonte de tensão alternada não tem polaridade definida, ora um terminal é positivo ora é negativo, ou seja, seus terminais mudam de polaridade periodicamente.



As tomadas existentes em nossas casas, onde nós ligamos os eletrodomésticos como televisão, liquidificador etc..., são exemplos de fontes de tensão alternada.



1.17. TIPOS DE CORRENTE ELÉTRICA

Quando a corrente sai sempre do mesmo terminal da fonte dizemos que esta corrente é **contínua**; se os elétrons ora saem de um terminal, ora de outro, a corrente é **alternada**. A fonte de tensão contínua produz corrente contínua e a fonte de corrente alternada produz corrente alternada.

1.18. MÚLTIPLOS E SUBMÚLTIPLOS

A unidade natural de qualquer grandeza é chamada de unidade padrão. Veja a seguir a unidade padrão de algumas grandezas.

- Resistência elétrica ⇒ Ohm (Ω)
- Corrente elétrica ⇒ Ampere (A)
- Distância ⇒ Metro (m)
- Peso ⇒ Grama (g)
- Frequência ⇒ Hertz (Hz)
- Tensão elétrica ⇒ Volt (V)

As vezes temos que representar um valor muito grande ou muito pequeno de uma determinada grandeza. Não é elegante, por exemplo, a gente dizer que um saco de açúcar tem mil gramas, dizemos que tem 1kg, ou que um copo tem capacidade para 0,2 litros, dizemos que o mesmo tem capacidade para 200mL. Os múltiplos e submúltiplos foram criados para facilitar a representação de quantidades muito grandes ou muito pequenas, eles são:

MÚLTIPLOS

Giga (G)
Mega (M)
Kilo (K)

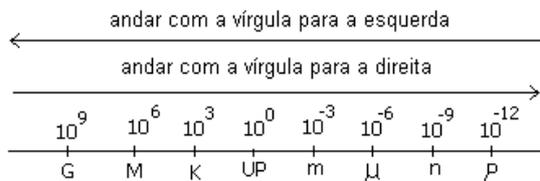
SUBMÚLTIPLOS

Mili (m)
Micro (μ)
Nano (n)
Pico (p)

1.19. CONVERSÃO DE UNIDADES

Usaremos a escala a seguir para efetuar a conversão de unidades. Primeiro temos de saber qual a direção tomada na conversão. Se for da direita para a esquerda (por exemplo, de kilo para mega), andaremos com a vírgula para a esquerda. Se for da esquerda para a direita (por exemplo, de mili para micro), andaremos com a vírgula para a direita, como mostram as setas.

Sabendo a direção tomada na conversão, temos de definir quantas casas andaremos com a vírgula. Num deslocamento para cada unidade vizinha (à direita ou à esquerda) a vírgula andarás três casas.



Ex.:

$$1000 \Omega \rightarrow K \Omega$$

$$1000 \Omega = 1K \Omega$$

1) Faça as conversões abaixo:

- 13800V ⇒ kV
- 0,052A ⇒ mA
- 0,42mC ⇒ μC
- 470.F ⇒ nF
- 1680000000000 PΩ ⇒ KΩ

1.20. LEI DE OHM

Um cientista e físico alemão chamado George Simon Ohm (1789 – 1854), estudou as relações existente entre tensão, corrente e resistência elétrica, publicando em seu estudo *Exposição Matemática das Correntes Galvânicas*, a **LEI DE OHM**. O enunciado da lei de Ohm diz que " **A intensidade de corrente elétrica é diretamente proporcional a tensão elétrica e inversamente proporcional a resistência elétrica**". A expressão matemática da lei de Ohm é:

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

I = intensidade de corrente elétrica (A)
V = tensão elétrica (V)
R = resistência elétrica (Ω)

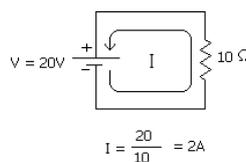
Isto significa que se uma resistência fixa for submetida a uma DDP, a intensidade de corrente irá variar na mesma proporção que a tensão, ou seja, se a tensão aumenta, a intensidade de corrente aumenta na mesma proporção; se a tensão diminui, a intensidade de corrente diminui na mesma proporção.

Se submetermos uma resistência a uma DDP fixa e variarmos o valor da resistência, a intensidade de corrente irá variar na proporção

inversa, ou seja, se a resistência aumenta, a intensidade de corrente diminui; se a resistência diminui, a intensidade de corrente aumenta.

Ex :

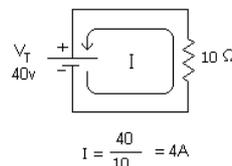
a)



Calcule a intensidade de corrente substituindo o resistor pelos valores abaixo:

- 20 Ω
- 5 Ω

b)



Calcule a intensidade de corrente substituindo a fonte pelos valores abaixo:

- 80v
- 20v

1.21. RESISTIVIDADE

A resistência de um condutor depende do tipo de material, de seu comprimento e de sua área de seção transversal.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

R = resistência elétrica Ω

ρ = resistividade (Ω . m)

L = comprimento (m)

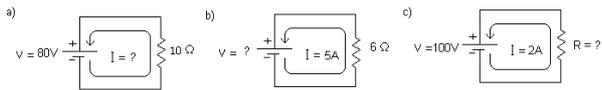
A = área (m²)

Material	Resistividade(Ω . m)
Prata	1.6 x 10 ⁻⁸
Cobre	1.7 x 10 ⁻⁸
Ouro	2.4 x 10 ⁻⁸
Alumínio	2.7 x 10 ⁻⁸
Tungstênio	5.5 x 10 ⁻⁸
Bronze	7.0 x 10 ⁻⁸
Ferro	10.0 x 10 ⁻⁸
Chumbo	22.0 x 10 ⁻⁸
Mercúrio	95.7 x 10 ⁻⁸
Níquel-cromo	150.0 x 10 ⁻⁸
Carbono	3500 x 10 ⁻⁸
vidro	10 ¹⁷ x 10 ⁻⁸

EXERCÍCIOS

- Eletricamente falando um átomo pode se apresentar de três maneiras, Quais são?
- O que é eletrização?
- Cite cinco processos de eletrização?
- Quando um átomo se transforma num íon?
- Defina anion e cation.
- O que mantém os elétrons ligados aos seus respectivos átomos?
- O que é um elétron livre?
- Quando um material é bom condutor e quando é mau condutor de eletricidade? Dê exemplos?
- Quando um corpo adquirir carga elétrica, adquirir também_ _ _
- _____?
- O que é corrente elétrica?
- O que é necessário para que se estabeleça uma corrente elétrica?
- O que é tensão elétrica?
- O que é intensidade de corrente elétrica?
- O que é resistência elétrica?
- O que é condutância?

- 16) O que é capacitância?
- 17) Quantos elétrons em excesso possui um condutor com uma capacitância de 0.0074mF e um potencial elétrico de 25V ?
- 18) Qual o valor da carga elétrica de um elétron?
- 19) Um Coulomb equivale a quantos elétrons?
- 20) Quando a corrente elétrica tem sentido eletrônico e quando tem sentido convencional?
- 21) Qual a diferença entre uma fonte de tensão contínua e uma fonte de tensão alternada? Dê exemplos?
- 22) Quando uma corrente é contínua e quando é alternada?
- 23) Qual a intensidade de corrente que passou pelo filamento de uma lâmpada que esteve ligada durante 1 hora, tendo sido percorrido por uma carga de 506mC ?
- 24) Qual a quantidade de elétrons que passou pela resistência de uma torradeira elétrica que esteve ligada durante 3 minutos, sendo percorrida por uma corrente de 12A ?
- 25) Qual o enunciado da lei de Ohm?
- 26) Dado os circuitos abaixo, calcule:



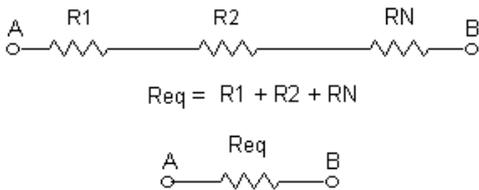
- 27) Qual a condutância de um pedaço de cobre que tem uma resistência de 0.045Ω ?

Associação de Resistores

Podemos associar resistores e obter resistências equivalentes diferentes dos resistores associados. Uma associação de resistores pode ser série, paralelo ou mista.

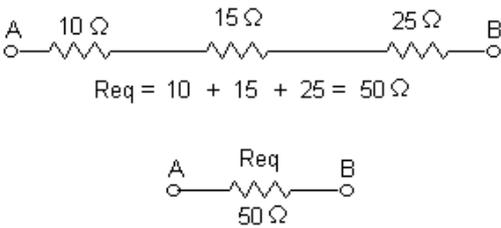
2.1. ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE

Resistores estão ligados em série quando a saída de um estiver ligada à entrada do outro, e quando só tiver um caminho para a corrente elétrica. Uma associação em série pode ser substituída por uma única resistência, chamada de resistência equivalente (Req). A Req de uma associação em série é sempre maior que o maior dos resistores.



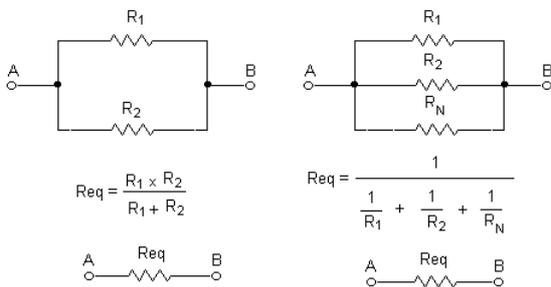
Ex.:

Qual a Req entre os pontos A e B do circuito abaixo?



2.2. ASSOCIAÇÃO EM PARALELO

Resistores estão ligados em paralelo quando seus terminais estiverem diretamente interligados. Assim como na associação em série, a associação em paralelo pode ser substituída por uma Req, sendo a mesma menor que o menor dos resistores.

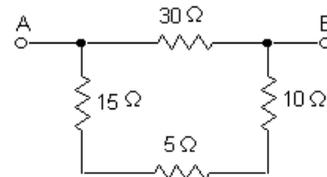


2.3. ASSOCIAÇÃO MISTA

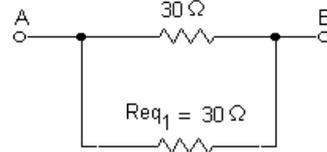
É um circuito onde encontramos tanto associação em série quanto associação em paralelo.

Ex.:
Calcule a Req entre os pontos A e B dos circuitos abaixo.

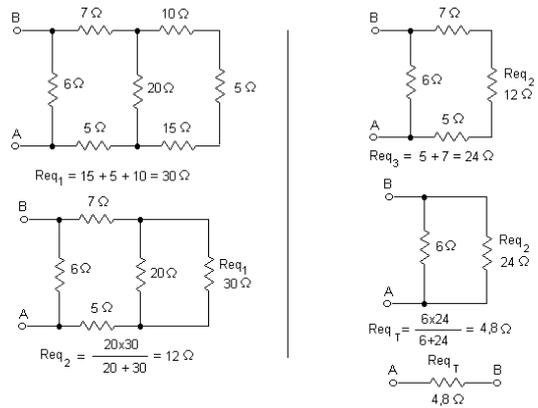
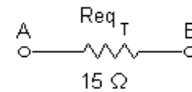
a)



$R_{eq_1} = 15 + 5 + 10 = 30 \Omega$



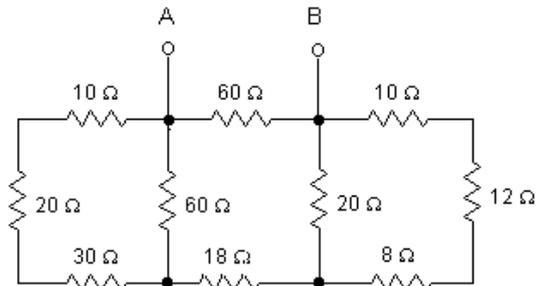
$R_{eq_T} = \frac{30 \times 30}{30 + 30} = 15 \Omega$



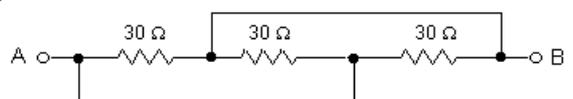
EXERCÍCIOS

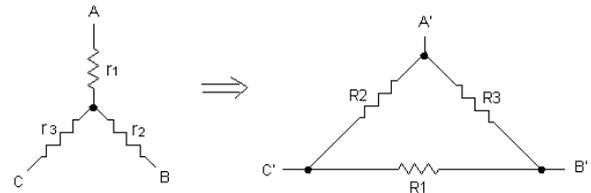
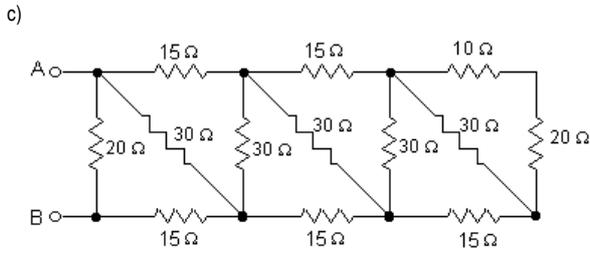
Calcular a Req entre A e B.

a)



b)

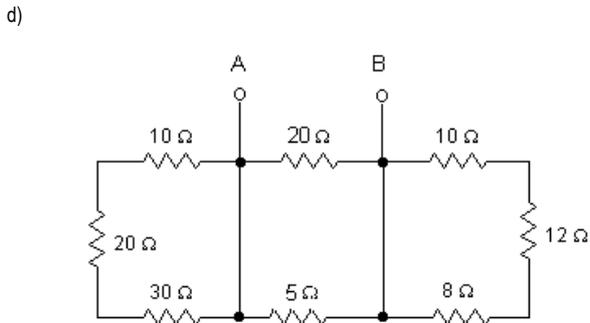




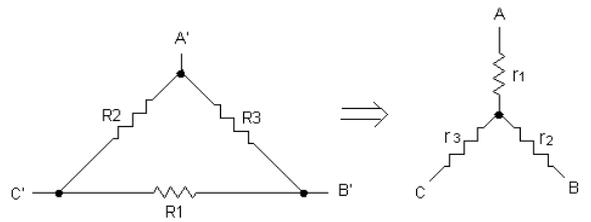
$$R1 = \frac{r1 \cdot r2 + r1 \cdot r3 + r2 \cdot r3}{r1}$$

$$R2 = \frac{r1 \cdot r2 + r1 \cdot r3 + r2 \cdot r3}{r2}$$

$$R3 = \frac{r1 \cdot r2 + r1 \cdot r3 + r2 \cdot r3}{r3}$$



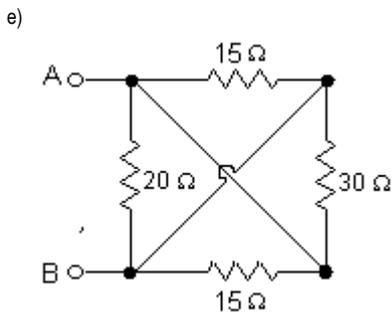
2.5. CONVERSÃO TRIÂNGULO - ESTRELA



$$r1 = \frac{R2 \cdot R3}{R1 + R2 + R3}$$

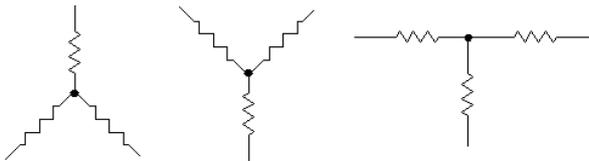
$$r2 = \frac{R1 \cdot R3}{R1 + R2 + R3}$$

$$r3 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2 + R3}$$

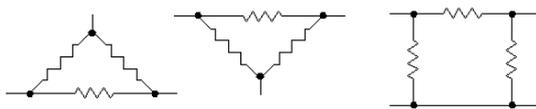


2.4. CONVERSÃO ESTRELA - TRIÂNGULO

Há combinações especiais de três resistores que não podem ser simplificadas como os circuitos série, paralelo e misto. Podemos resolvê-las aplicando regras especiais. Uma destas ligações é a estrela, e podemos encontrá-la das formas a seguir. Este tipo de ligação é também conhecido com Y ou T.

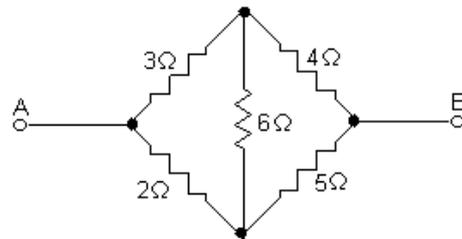


Outro tipo é chamado ligação triângulo, e também recebe as denominações Δ(delta) ou π(pi).

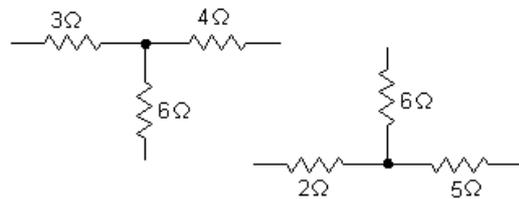


É possível converter um tipo de ligação em outro. Para fazer a conversão de uma ligação em ESTRELA para TRIÂNGULO basta:

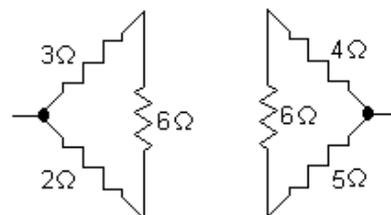
Ex.:
Req entre A e B?



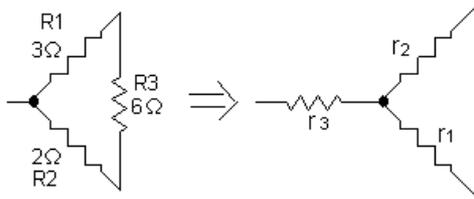
O circuito acima possui as estrelas formadas pelos resistores:



E os triângulos:



Para encontrar a Req entre A e B temos de converter uma das estrelas para triângulo ou um dos triângulos para estrela. Teoricamente, qualquer uma das conversões pode ser feita, mas temos de optar por aquela que irá nos trazer uma maior simplificação. Vamos escolher o triângulo formado pelos resistores:

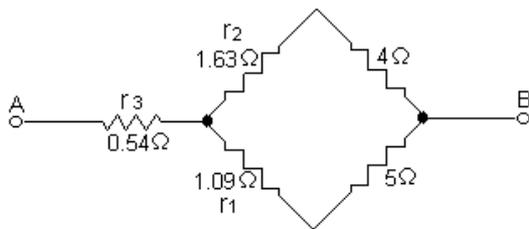


$$r_1 = \frac{2 \cdot 6}{2 + 6 + 3} = 1.09\Omega$$

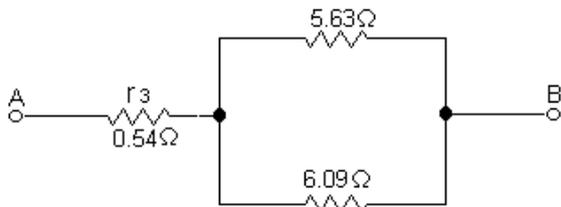
$$r_2 = \frac{3 \cdot 6}{2 + 6 + 3} = 1.63\Omega$$

$$r_3 = \frac{3 \cdot 2}{2 + 6 + 3} = 0.54\Omega$$

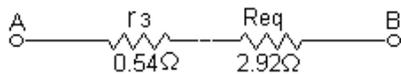
Substituindo o triângulo pela estrela no circuito teremos:



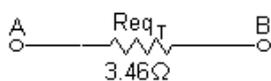
Após a conversão, o circuito se transformou num circuito misto, que nós conhecemos bem. Agora podemos calcular Req entre A e B com facilidade.



$$Req = \frac{5.63 \cdot 6.09}{5.63 + 6.09} = 2.92\Omega$$



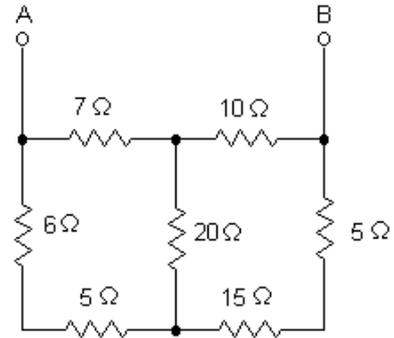
$$Req_T = 0.54 + 2.92 = 3.46\Omega$$



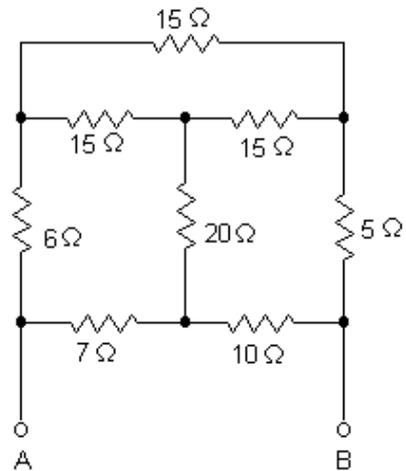
EXERCÍCIOS

Calcular a Req entre os pontos A e B.

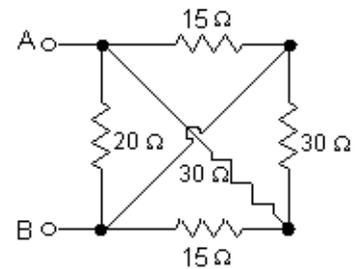
a)



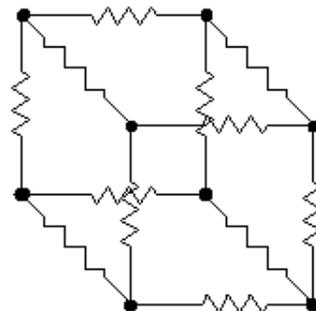
b)



c)



d) todos de 10Ω.

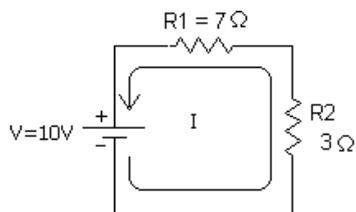


Circuitos Simples de Corrente Contínua

São circuitos formados por cargas puramente resistivas e alimentados por uma única fonte de tensão contínua. Podem ser série, paralelo e misto.

3.1. CIRCUITO SÉRIE

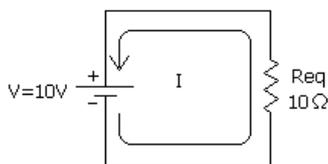
É um circuito em que todos os componentes estão em série, ou seja, a saída de um está ligada a entrada do outro. O circuito série também é chamado de divisor de tensão.



Como R_1 está em série com R_2 , podemos substituí-los pela R_{eq} .

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

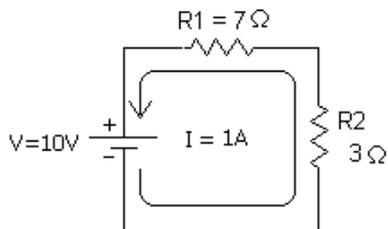
$$R_{eq} = 7 + 3 = 10\Omega$$



aplicamos a lei de Ohm para calcular a intensidade de corrente.

$$I = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{10}{10} = 1A$$

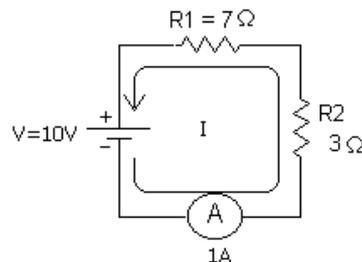
A corrente I no circuito equivalente é a mesma corrente I no circuito original.



Se nós montarmos o circuito acima no laboratório, podemos usar um instrumento de medida para medir a intensidade de corrente, este instrumento é o **AMPERÍMETRO**. O amperímetro é ligado em série.



Vemos a seguir o circuito original com o amperímetro inserido nele. Como o circuito é série, a corrente é a mesma em qualquer ponto do circuito.



Sempre que a corrente elétrica passa por um resistor, aparece em seus terminais uma DDP, que nós chamamos de queda de tensão. A queda de tensão em um resistor pode ser medida com um instrumento chamado **VOLTÍMETRO**. Ao contrário do amperímetro, o voltímetro é ligado em paralelo.

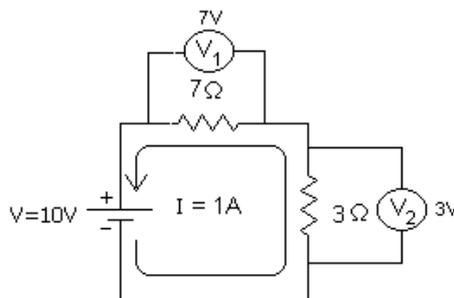


$$V_1 = R_1 \times I$$

$$V_1 = 7 \times 1 = 7V$$

$$V_2 = R_2 \times I$$

$$V_2 = 3 \times 1 = 3V$$



Observe que a tensão da fonte é igual a soma das tensões nos resistores.

$$V = V_1 + V_2$$

V = tensão da fonte
 V_1 = tensão em R_1
 V_2 = tensão em R_2

3.2. CARACTERÍSTICAS DE UM CIRCUITO SÉRIE

- 1) A corrente é a mesma em qualquer ponto do circuito.
- 2) A tensão da fonte se divide entre os resistores de forma que, soma das tensões nos resistores é igual a tensão da fonte.

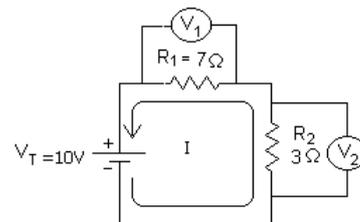
$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$I = \frac{V}{R_{eq}}$$

$$V_1 = R_1 \times I$$

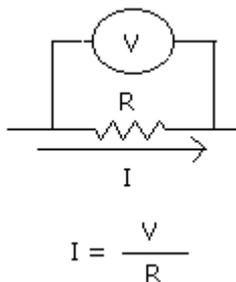
$$V_2 = R_2 \times I$$

$$V_T = V_1 + V_2$$

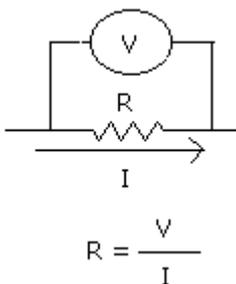


IMPORTANTE!

a) A corrente que passa por um resistor é igual a tensão em cima dele dividido pela corrente que passa por ele.



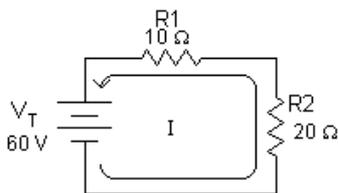
b) A resistência de um resistor é igual a tensão em cima dele dividido pela corrente que passa por ele.



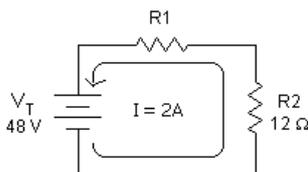
EXERCÍCIOS:

1) Dado circuitos abaixo, calcule :

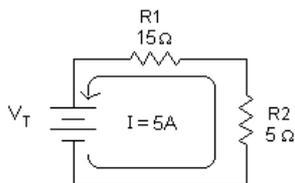
a) $I = ?$
 $V_{R1} = ?$
 $V_{R2} = ?$



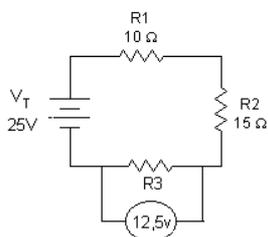
b) $V_{R1} = ?$
 $V_{R2} = ?$
 $R1 = ?$



c) $V_{R1} = ?$
 $V_{R2} = ?$
 $V_T = ?$

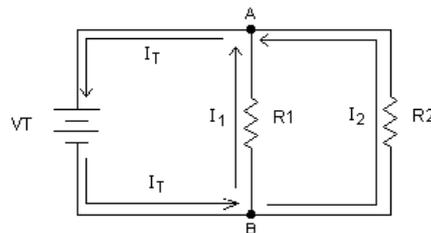


d) $R_{eq} = 50\Omega$
 $I = ?$
 $V_{R2} = ?$
 $V_{R1} = ?$
 $R3 = ?$



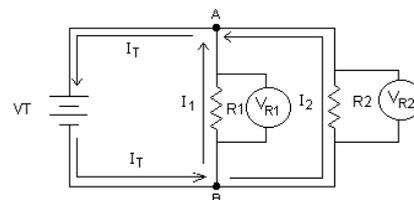
3.3. CIRCUITO EM PARALELO

É caracterizado por estarem todos os componentes ligados em paralelo, ou seja, com seus terminais diretamente interligados. O circuito paralelo também é chamado divisor de corrente.

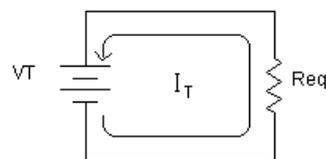


A corrente sai do terminal negativo da fonte como I_T . Chegando no ponto A os elétrons se dividem, uma parte sobe como I_1 passando por R_1 e a outra parte segue como I_2 passando por R_2 . No ponto B os elétrons se unem novamente seguindo para o terminal positivo como I_T .

Como os resistores estão em paralelo com a fonte, a tensão da fonte será igual a tensão da nos resistores.



Redesenhando o circuito teremos.



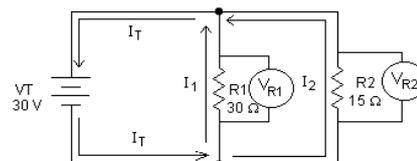
$$I_T = \frac{V_T}{R_{eq}}$$

3.4. CARACTERÍSTICAS DE UM CIRCUITO PARALELO

- 1) A corrente se divide
- 2) A tensão em cada componente do circuito é igual a tensão da fonte

Ex.:
 Dado o circuito abaixo, calcule:

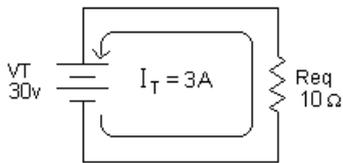
$I_T = ?$
 $I_1 = ?$
 $I_2 = ?$
 $V_{R1} = ?$
 $V_{R2} = ?$



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

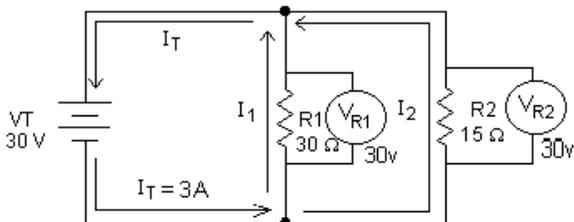
$$R_{eq} = \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 10\Omega$$

Redesenhando o circuito,



$$I_T = \frac{30}{10} = 3A$$

Como o circuito é paralelo, $V_T = V_{R1} = V_{R2} = 30v$. Sendo assim:

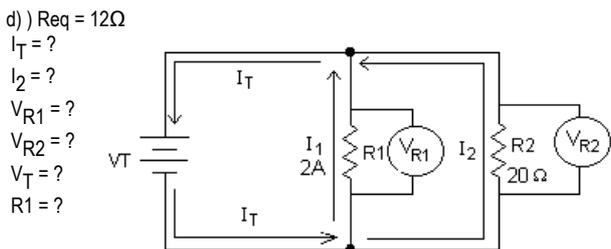
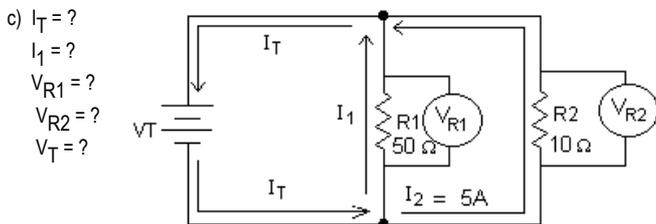
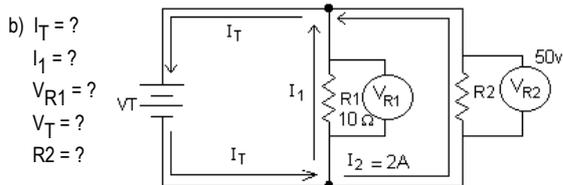
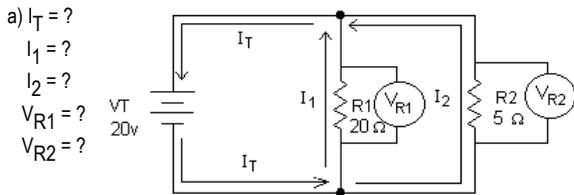


$$I_1 = \frac{V_{R1}}{R1} = \frac{30v}{30 \Omega} = 1A$$

$$I_2 = \frac{V_{R2}}{R2} = \frac{30v}{15 \Omega} = 2A$$

EXERCÍCIOS:

Dado os circuitos abaixo, calcule:



3.5. POTÊNCIA ELÉTRICA

Quando a corrente passa por uma resistência, produz calor. A energia elétrica se transforma em energia térmica. A rapidez com que se processa esta transformação é chamada Potência Elétrica. Sua unidade é o Watt(W).

A potência é determinada pelo produto da corrente que atravessa a resistência pela tensão em seus terminais. Podemos chamar esta potência de Potência dissipada.

$$P = V \times I$$

$P =$ Potência elétrica(W)

$V =$ Tensão elétrica(V)

$I =$ Corrente elétrica(A)

como,

$$V = R \times I$$

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

$$P = R \times I \times I$$

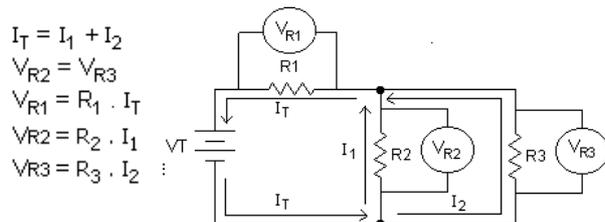
$$P = V \times \frac{V}{R}$$

$$P = R \times I^2$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

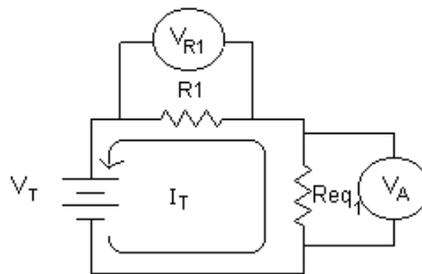
3.6. CIRCUITO MISTO

É um circuito que contém características de circuito série e de circuito paralelo.



$$Req_1 = \frac{R2 \cdot R3}{R2 + R3}$$

Chamaremos de V_A a tensão em cima de Req_1 .



$$V_A = V_{R1} = V_{R2}$$

$$V_T = V_{R1} + V_A$$

$$V_{R1} = R1 \cdot I_T$$

$$V_A = Req_1 \cdot I_T$$

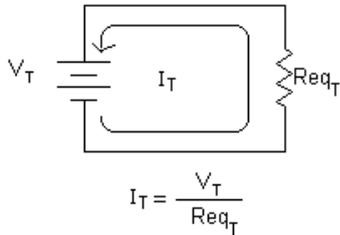
$$Req = Req_1 + R1$$

IMPORTANTE!

Quando uma associação em paralelo é substituída pela Req, a tensão em cima da Req é igual a tensão em cada resistor que deu origem a Req.

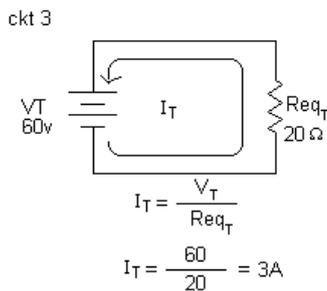
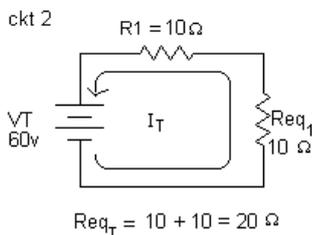
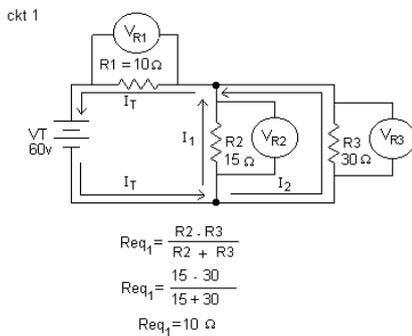
A corrente que passa pela Req de uma associação em paralelo é a soma das correntes que passam pelos resistores que deram origem a Req.

Como R1 está em série com Req1, podemos substituí-los pela ReqT.

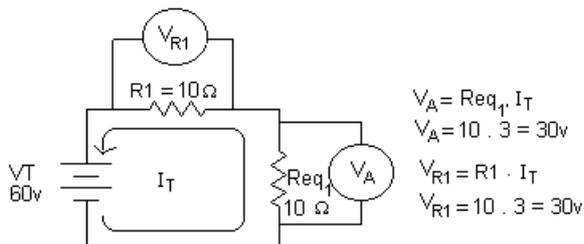


Ex.:

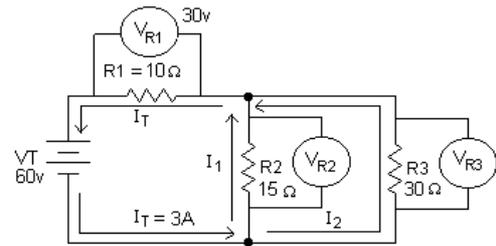
1) Dado o circuito abaixo, calcule:



Substituindo IT no ckt 2, podemos calcular V1 e VA.



Substituindo IT, VR1 e VA no ckt 1 podemos calcular as grandezas que faltam. Lembre-se de que a tensão em cima da Req de uma associação em paralelo é igual a tensão em cada resistor que deu origem a Req, portanto:

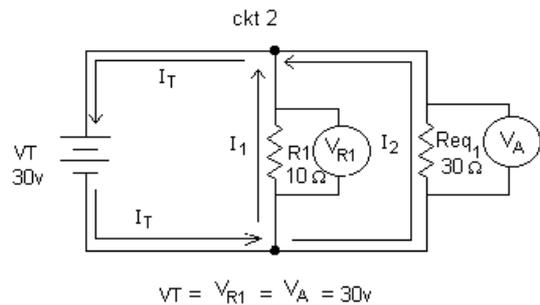
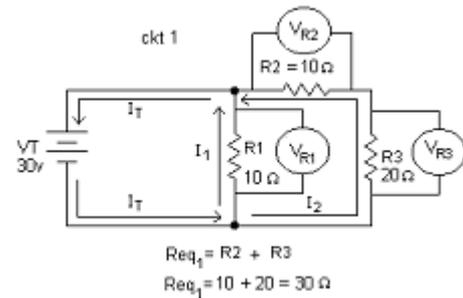


$$V_A = V_{R2} = V_{R3} = 30v$$

$$I_1 = \frac{V_{R2}}{R_2} = \frac{30}{15} = 2A$$

$$I_2 = \frac{V_{R3}}{R_3} = \frac{30}{30} = 1A$$

2)
IT = ?
I1 = ?
I2 = ?
VR1 = ?
VR2 = ?
VR3 = ?



$$I_1 = \frac{V_{R1}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_A}{Req_1}$$

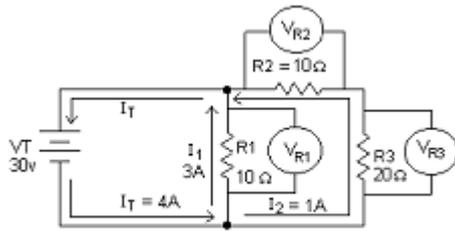
$$I_1 = \frac{30}{10} = 3A$$

$$I_2 = \frac{30}{30} = 1A$$

$$I_T = I_1 + I_2$$

$$I_T = 3 + 1 = 4A$$

Substituindo I_2 no ckt 1 podemos encontrar as tensões V_{R2} e V_{R3} .



$$V_{R2} = R2 \cdot I_2$$

$$V_{R2} = 10 \cdot 1 = 10v$$

$$V_{R3} = R3 \cdot I_2$$

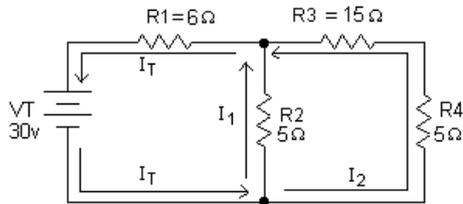
$$V_{R3} = 20 \cdot 1 = 20v$$

IMPORTANT!

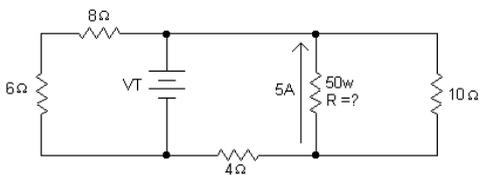
A tensão em cima da Req de uma associação em série é igual a soma das tensões nos resistores que deram origem a Req.

EXERCÍCIOS

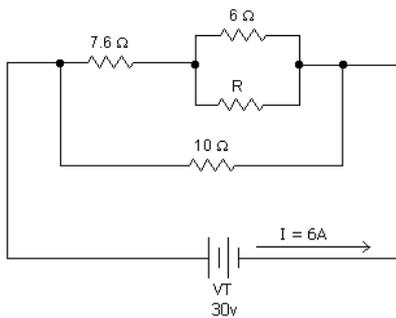
- a)
Tensão em cada resistor = ?
Potência em cada resistor = ?
 $I_T = ?$
 $I_1 = ?$
 $I_2 = ?$



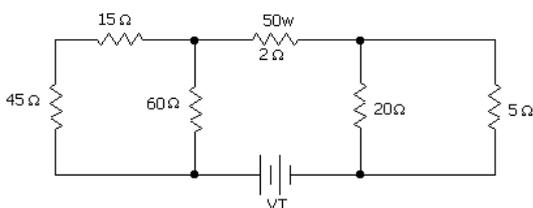
- b)
 $I_T = ?$
 $V_T = ?$
 $R = ?$



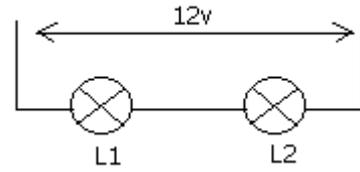
- c)
 $R = ?$



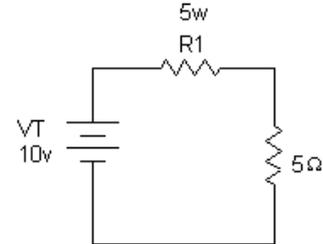
- d)
 $I_T = ?$
 $V_T = ?$



e) duas lâmpadas com as seguintes características: L1(12v/6w) e L2(12v/12w). Essas lâmpadas são ligadas em série com uma fonte de 12v conforme o esquema abaixo. Determine a tensão em cada lâmpada?



- f)
 $I = ?$
 $V_{R1} = ?$
 $V_{R2} = ?$
 $R1 = ?$

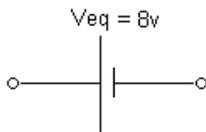
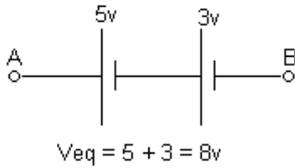


3.7. ASSOCIAÇÃO DE FONTE DE TENSÃO

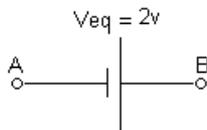
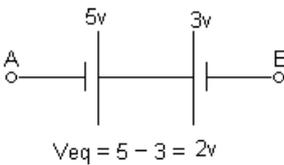
Da mesma forma que os resistores, as fontes também podem ser associadas e substituídas por uma única fonte equivalente.

3.7.1. SÉRIE

Uma associação de fontes em série pode ser substituída por uma única fonte equivalente. Se as fontes possuem a mesma polaridade (positivo com negativo) soma-se as fontes.

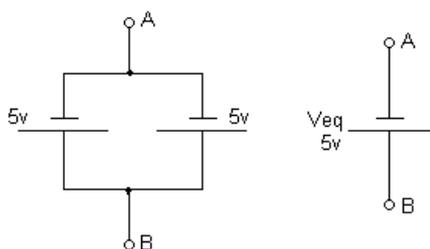
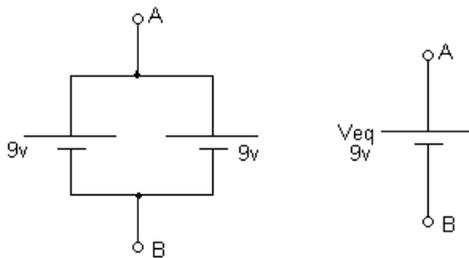


Se as fontes possuem polaridades opostas (positivo com positivo ou negativo com negativo), subtrai-se a menor da maior e prevalece a polaridade da maior fonte.



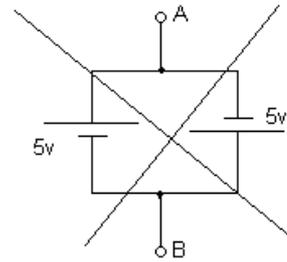
3.7.2. ASSOCIAÇÃO EM PARALELO

Assim como uma associação em série, uma associação em paralelo pode ser substituída por uma única fonte equivalente. A tensão equivalente é igual a tensão das fontes que fazem parte da associação.



IMPORTANTE!

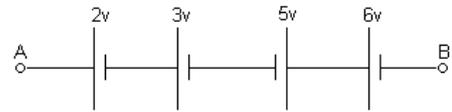
Só podemos associar fontes em paralelo se tiverem o mesmo valor e se os terminais positivos tem de estar diretamente interligados. A ligação abaixo está errada.



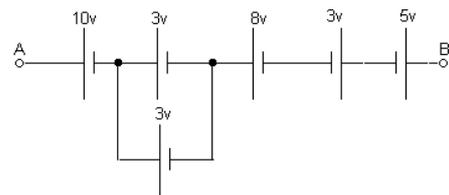
EXERCÍCIOS

Calcule a V_{eq} entre os pontos A e B ?

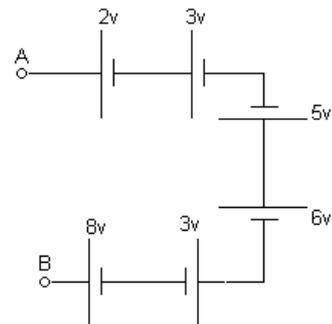
a)



b)

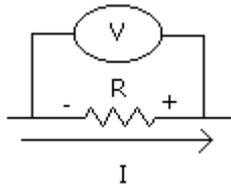


c)

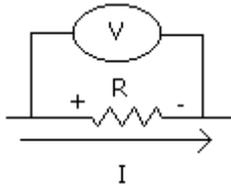


3.8. POLARIDADE DA TENSÃO EM UM RESISTOR

Toda vez que a corrente passa por um resistor, aparece em seus terminais uma tensão que nós chamamos de queda de tensão. Se a corrente for contínua, a tensão será contínua, ou seja, terá polaridade definida. Se o sentido da corrente for o eletrônico, o terminal do resistor que a corrente entrar será a polaridade negativa da tensão.

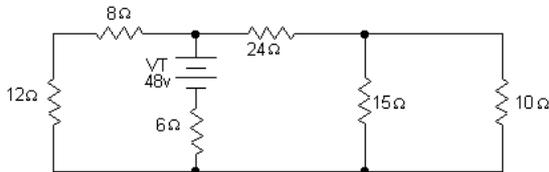


Se o sentido da corrente for o convencional, o terminal do resistor que a corrente entra será a polaridade positiva da tensão.



EXERCÍCIO

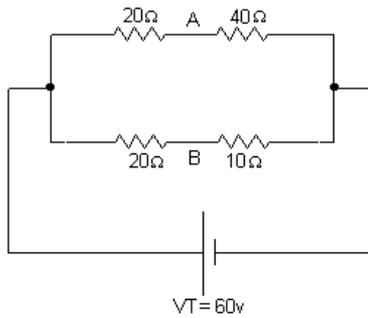
Dado o circuito abaixo, calcule a tensão em cada resistor e indique a polaridade das mesmas.



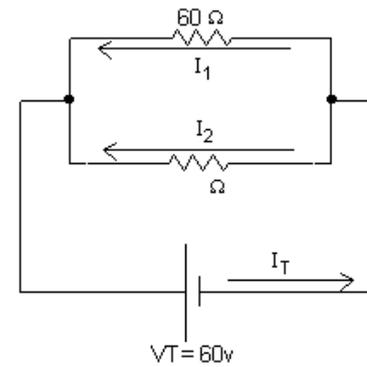
3.9. TENSÃO ENTRE DOIS PONTOS QUAISQUER DE UM CIRCUITO

A tensão entre dois pontos quaisquer de um circuito é a soma algébrica das tensões nos componentes que interligam os dois pontos. Podemos seguir qualquer caminho que interligue os dois pontos e efetuar a soma algébrica das tensões.

EX:



Redesenhando o circuito

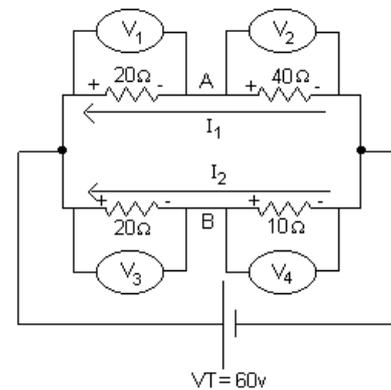


$$I_1 = \frac{60}{60} = 1A \quad I_2 = \frac{60}{30} = 2A$$

$$I_T = I_1 + I_2$$

$$I_T = 1 + 2 = 3A$$

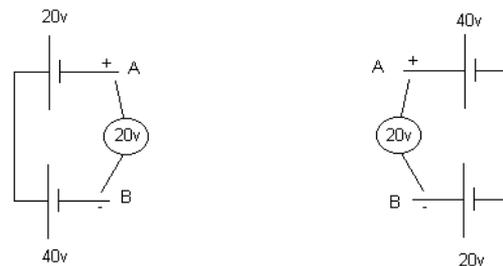
Assim,



$$V_1 = 20 \cdot 1 = 20v \quad V_3 = 20 \cdot 2 = 40v$$

$$V_2 = 40 \cdot 1 = 40v \quad V_4 = 10 \cdot 2 = 20v$$

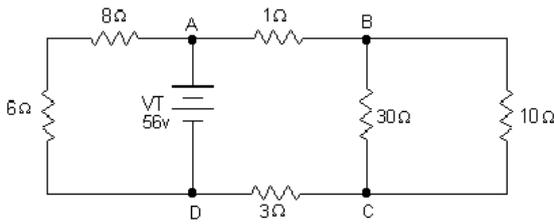
A tensão entre os pontos A e B (V_{AB}) é igual a soma algébrica das tensões num dos caminhos que interligam os dois pontos. Usamos o símbolo da fonte apenas para mostrar que ali existe uma tensão com aquela polaridade e não que o resistor seja uma fonte de tensão.



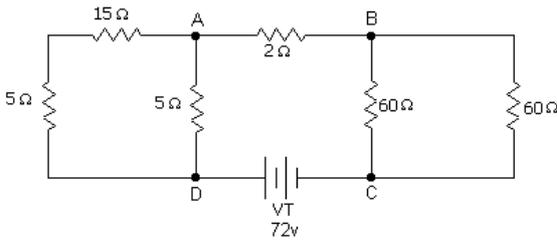
EXERCÍCIOS

Calcule a tensão entre os pontos A e C nos circuitos a seguir.

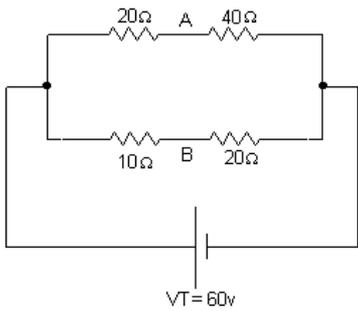
a)



b)

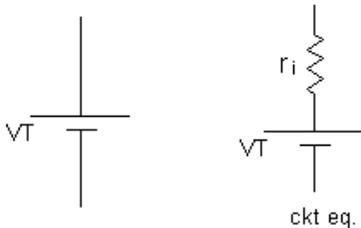


2) Calcule a tensão entre os pontos A e B do circuito a seguir .

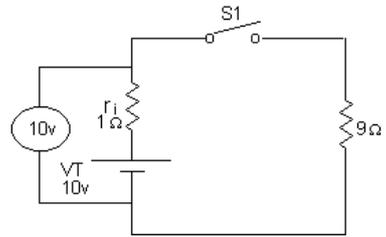


3.10. RESISTÊNCIA INTERNA

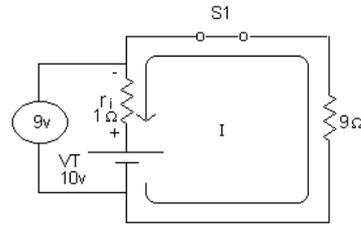
Toda fonte possui uma resistência interna. A resistência interna não é um resistor físico, mas comporta-se como se fosse.



O efeito da resistência interna só é percebido quando a fonte estiver fornecendo corrente a um circuito. Observe o circuito abaixo, veja que o voltímetro ligado aos terminais da fonte está marcando o mesmo valor da fonte. Isto ocorre porque a tensão em r_i é nula, pois não está circulando corrente.



Com a chave S1 fechada, o voltímetro passa a marcar 9v, porque?



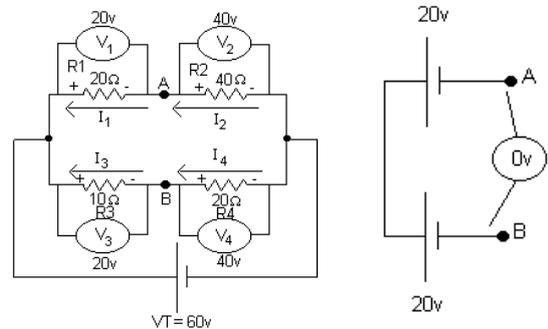
$$I = \frac{VT}{r_i + R} = \frac{10}{1 + 9} = 1A$$

$$V_{r_i} = r_i \cdot I = 1 \cdot 1 = 1v$$

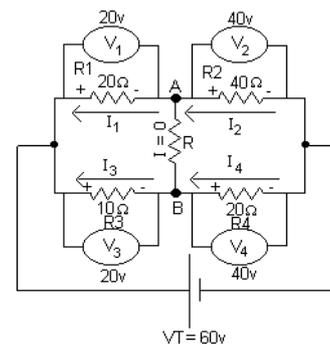
A corrente fornecida pela fonte passa por r_i , fazendo com que apareça em seus terminais DDP. Como a resistência interna está dentro da fonte, a tensão útil da fonte será menor. Quanto maior a corrente, maior a queda de tensão em r_i e menor será a tensão útil da fonte. Fontes de boa qualidade possuem resistência interna muito menores que 1Ω.

3.11. PONTE DE WEATSTONE

Calculando a tensão entre os pontos A e B do circuito abaixo, verificamos que a DDP entre estes pontos é zero. Quando isso ocorre dizemos que o circuito está em equilíbrio.



Se colocarmos um resistor entre os pontos A e B, não haverá corrente circulando pelo mesmo. Isto ocorre porque não existe DDP entre os pontos onde o mesmo está ligado.



Como a corrente que passa pelo resistor R é zero, podemos dizer que:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 \\ I_3 &= I_4 \\ V_1 &= V_3 \\ V_2 &= V_4 \end{aligned}$$

Aplicando a lei de Ohm,

$$\begin{aligned} V_1 &= R_1 \cdot I_1 \\ V_2 &= R_2 \cdot I_2 \\ V_3 &= R_3 \cdot I_3 \\ V_4 &= R_4 \cdot I_4 \end{aligned}$$

Como $V_1 = V_3$ e $V_2 = V_4$

$$R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_3 \Rightarrow \frac{R_1}{R_3} = \frac{I_3}{I_1}$$

$$R_2 \cdot I_2 = R_4 \cdot I_4 \Rightarrow \frac{R_2}{R_4} = \frac{I_4}{I_2}$$

Esta relação só é verdadeira se o circuito estiver em equilíbrio, ou seja, se a tensão entre os pontos A e B for zero. Este circuito é de grande precisão na medição de resistores. Utilizando um resistor variável em um dos braços, podemos calcular o valor de um resistor qualquer colocado em outro braço, mantendo fixo os valores dos outros dois.

As pontes de weatstone comerciais se apresentam sob vários aspectos, porém seu princípio de funcionamento é o mesmo que o exposto acima. Podemos colocar um galvanômetro(microamperímetro) no lugar do resistor R. quando a corrente que passar pelo galvanômetro for zero, a ponte estará em equilíbrio e a relação abaixo é válida.

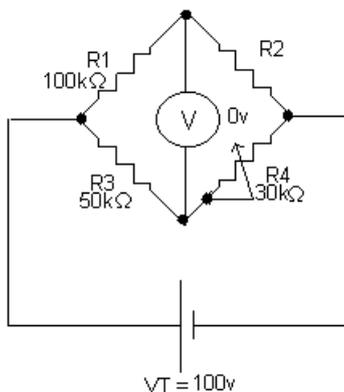
$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

Ex.:

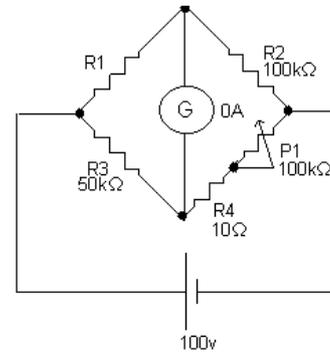
Calcule o valor do resistor R1 .

EXERCÍCIOS

1) calcule o valor da resistência desconhecida no circuitos abaixo.



2) Quais os valores mínimo e máximo de R1 para que ao circuito possa estar em equilíbrio?

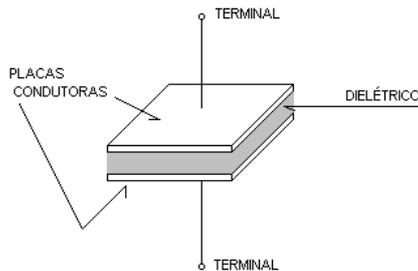


Capacitores

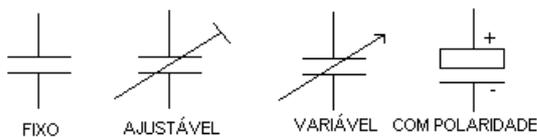
É um conjunto formado por duas placas condutoras separadas por um material isolante. As placas condutoras também são chamadas de armadura e o isolante de dielétrico. A função do capacitor é armazenar cargas elétricas.

O dielétrico deve isolar eletricamente uma placa da outra, além de reduzir o campo elétrico formado entre as duas placas quando o capacitor estiver carregado, aumentando assim sua capacitância.

Capacitância ⇒ É a capacidade que tem o capacitor em armazenar cargas elétricas. Sua unidade é o Farad (F).



SÍMBOLOS



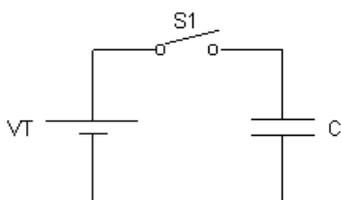
4.1. TIPOS DE CAPACITORES

Os capacitores comerciais são denominados de acordo com o seu dielétrico. Os capacitores mais comuns são os de ar, mica, papel, cerâmica, poliéster e eletrolítico. A maioria dos capacitores podem ser ligados aos circuitos sem dar importância a polaridade, mas capacitores eletrolíticos e certos capacitores cerâmicos tem a sua polaridade marcada, devendo ser esta respeitada.

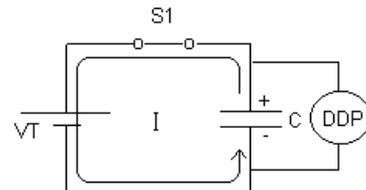
Dielétrico	Construção	Faixa de capacitância
Ar	Placas entrelaçadas	10 – 400 Pf
Mica	Folhas superpostas	10 – 5000 pF
Papel	Folha enrolada	0.01 – 1 µF
Cerâmica	Tubular	0.5 – 1600 µF
Eletrolítico	Disco	0.02 – 0.1 µF
	Alumínio	5 – 1000 µF
	Tântalo	0.01 – 300 µF

4.2. CARGA DO CAPACITOR

O circuito abaixo nos dará uma dimensão exata de como o capacitor funciona. Consideremos o capacitor inicialmente descarregado.



Com a chave S1 aberta, as placas do capacitor estão eletricamente neutras. Fechando a chave S1, o terminal positivo da fonte (+) atrai elétrons da placa superior, estes entram no terminal positivo da fonte, saem pelo terminal negativo (-), sendo repelidos para a placa inferior. A medida que os elétrons vão saindo da placa superior, a mesma vai se carregando positivamente. A medida que os elétrons vão entrando na placa inferior, a mesma vai se carregando negativamente.



$$VT = VC$$

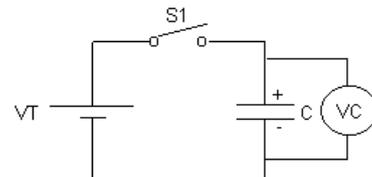
VT = tensão da fonte

VC = tensão no capacitor

IMPORTANTE!

No instante em que a chave S1 é fechada, a corrente de carga I é máxima e a tensão no capacitor é zero. A medida que o capacitor vai se carregando, a corrente de carga vai diminuindo e a tensão entre as placas do capacitor vai aumentando. Quando a tensão nos terminais do capacitor se iguala a tensão da fonte (VC=VT), a corrente de carga I cessa.

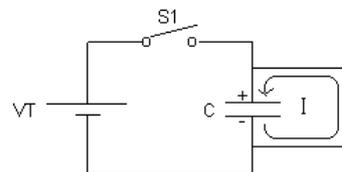
Uma vez carregado, a chave S1 pode ser aberta que o capacitor manterá a carga armazenada em suas placas, assim como a DDP entre elas.



$$VT = VC$$

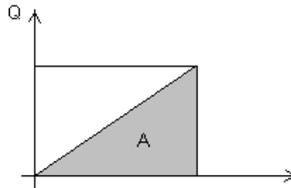
4.3. DESCARGA DO CAPACITOR

Para descarregar um capacitor basta dar um curto em seus terminais. Com o curto, os elétrons que estão em excesso na placa inferior, se deslocam para a placa superior, com o objetivo de restabelecer o equilíbrio. Quando todos os elétrons voltarem a sua placa de origem, a DDP entre as placas cai a zero e o capacitor estará completamente descarregado.



4.4. ENERGIA ARMAZENADA EM UM CAPACITOR

Sendo $Q = C.V$ e a capacitância constante, podemos concluir que a carga armazenada no capacitor é diretamente proporcional a DDP entre suas placas. Se plotarmos o gráfico de Q versus V, podemos visualizar a energia elétrica armazenada no capacitor (W), cuja unidade é o Joule(J). esta energia elétrica armazenada pelo capacitor é dada, numericamente, pela área sombreada no gráfico.



$$W = \frac{Q \cdot V}{2}$$

sendo $Q = C \cdot V$, resulta :

$$W = \frac{C \cdot V^2}{2}$$

4.5. FATORES QUE INFLUENCIAM NA CAPACITÂNCIA

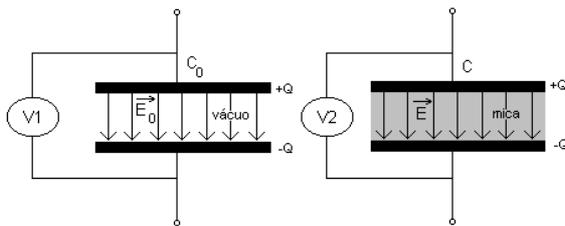
A capacitância de um capacitor depende da área das placas, da distância entre as placas e do material usado como isolante. Para um capacitor com duas placas paralelas, a fórmula para calcular a capacitância é:

$$C = k \cdot \frac{A}{D} \quad (8,85 \cdot 10^{-12})$$

- C = capacitância do capacitor (F)
- K = constante dielétrica do material isolante
- A = área das placas (m²)
- D = distância entre as placas (m)
- $8,85 \cdot 10^{-12}$ = permissividade do vácuo (F/m)

Dielétrico	K
Vácuo	1
Ar	1,0006
Âmbar	2,7
Papel	3,5
Mica	5,4
Porcelana	6,5
Água pura	8,1

Imagine dois capacitores carregados com a mesma carga, de placas paralelas com as mesmas dimensões, mesma distância entre as placas, mas com dielétricos diferentes:



Sempre que um capacitor se carrega, se estabelece um campo elétrico uniforme entre as placas. A intensidade deste campo elétrico é:

$$\vec{E} = \frac{V}{D}$$

- \vec{E} = Intensidade de campo elétrico (N/C)
- V = Tensão entre as placas (V)
- D = Distância entre as placas (m)

Assim:

$$\vec{E}_0 = \frac{V1}{D} \quad \vec{E} = \frac{V2}{D}$$

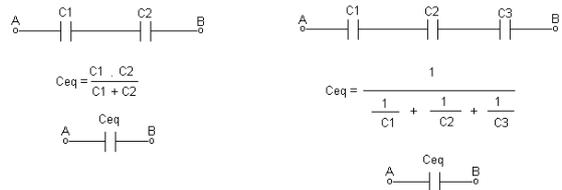
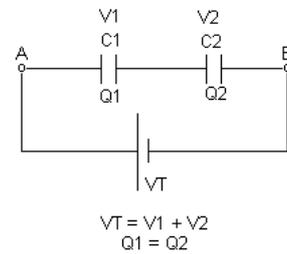
Com o exposto acima, podemos concluir que o dielétrico não serve apenas para isolar eletricamente as placas, mas também para reduzir o campo elétrico que se forma entre elas quando o capacitor se carrega. Os capacitores são amplamente usados em circuitos elétricos e eletrônicos.

4.6. ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES

Assim com os resistores, os capacitores podem ser associados, obtendo assim valores de capacitância equivalente C_{eq} .

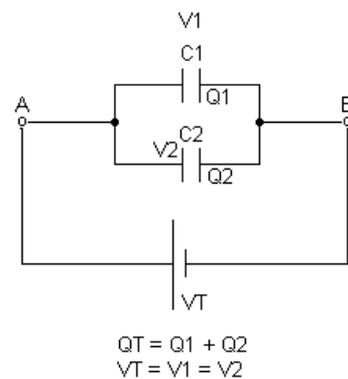
4.6.1. SÉRIE

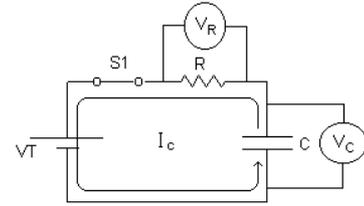
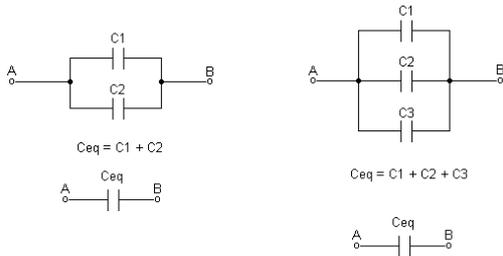
Quando aplicamos uma DDP aos extremos de uma associação em série, todos os capacitores apresentarão a mesma carga Q. A DDP aplicada a associação é igual a soma das tensões nos capacitores que fazem parte da associação.



4.6.2. PARALELO

Todos os capacitores apresentam a mesma DDP e a carga total da associação é a soma das cargas nos capacitores que fazem parte da associação.





$$V_T = V_R + V_C$$

Como $V_C = 0$, no instante em que S_1 é ligada, neste instante:

$$V_T = V_R$$

A corrente de carga (I_C) inicial será:

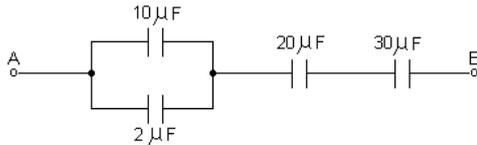
$$I_C = \frac{V_T}{R}$$

Podemos concluir que quanto maior o valor de R , menor será a corrente de carga (I_C) inicial, e mais tempo o capacitor levará para se carregar.

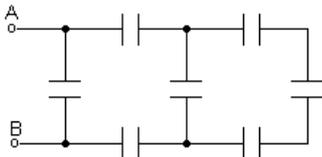
EXERCÍCIOS

1) Calcule a C_{eq} entre A e B?

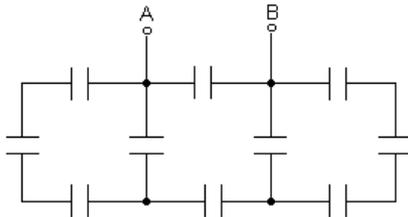
a)



b) todos de $20\mu F$

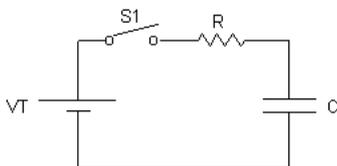


c) todos de $30\mu F$



4.7. CIRCUITO COM UM ÚNICO CAPACITOR EXCITADO POR CORRENTE CONTÍNUA

A presença do resistor R no circuito, não irá alterar o funcionamento dele, apenas fará com que o capacitor leve um tempo maior para se carregar com a tensão da fonte. Isso acontecerá porque o resistor limitará a corrente de carga inicial.

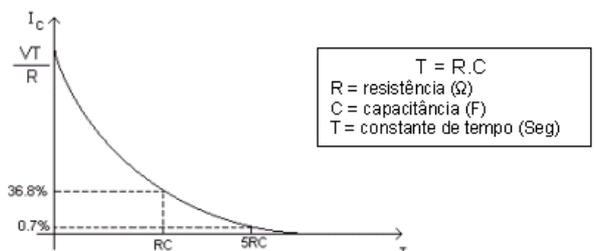
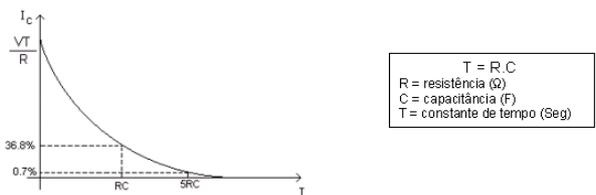
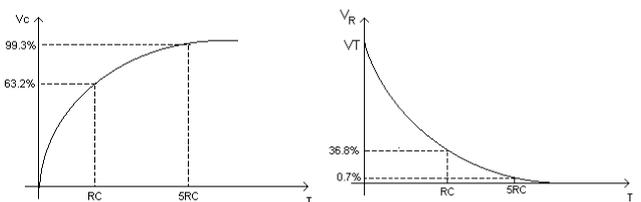


4.7.1 NO INSTANTE EM QUE S_1 É LIGADA

Suponha que o capacitor esteja inicialmente descarregado. No instante em que a chave S_1 é ligada a tensão no capacitor ainda é zero, isto significa que toda a tensão da fonte aparecerá no resistor, visto que ambos estão em série.

4.8. GRÁFICO DE CARGA DO CAPACITOR

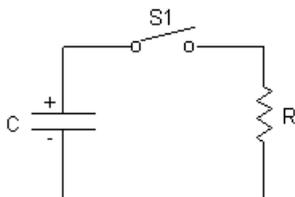
Quando S_1 é fechada, o terminal positivo da fonte começa a atrair os elétrons da placa superior. Os elétrons saem da placa superior, passam pelo resistor R , entram no terminal positivo da fonte, saem pelo terminal negativo, sendo repelidos para a placa inferior. A placa superior vai se carregando positivamente e a inferior negativamente. Entre ambas aparecerá uma DDP, que vai aumentando até atingir o valor da tensão da fonte, quando então a corrente de carga (I_C) cessa. Vemos a seguir como as tensões e correntes variam com o tempo.



Quando fechamos S1, todas as tensões e correntes se alteram exponencialmente de seus valores iniciais para seus valores finais. As tensões e correntes realmente nunca atingem seus valores finais. Entretanto, de um modo geral, após 5.R.C(cinco constantes de tempo), elas estão bastante próximas para serem consideradas constando nestes valores.

4.9. DESCARGA DO CAPACITOR

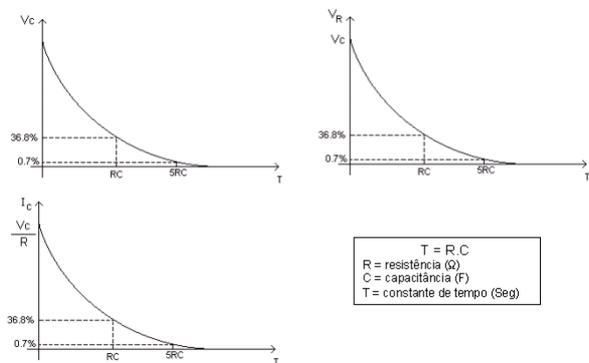
Se for conectado nos terminais de um capacitor carregado um resistor, o capacitor irá se descarregar de forma exponencial até suas placas se descarregarem e a DDP entre elas voltar a zero. Isto ocorre porque a placa superior (carregada positivamente), irá atrair os elétrons em excesso da placa inferior (carregada negativamente). O resistor irá aumentar o tempo de descarga porque ele limita a corrente inicial de descarga. Quanto maior o valor do resistor, mais tempo o capacitor levará para se descarregar.



Como $V_R = V_C$, a corrente inicial de descarga estará limitada em:

$$I_D = \frac{V_C}{R}$$

Da mesma forma que na carga, as tensões se alteram exponencialmente de seus valores iniciais para seus valores finais. Após 5.R.C (cinco constantes de tempo), o capacitor estará praticamente descarregado.



4.10. RIGIDEZ DIELÉTRICA

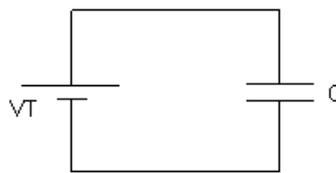
Aumentando a DDP em um capacitor, aumenta-se a intensidade do campo elétrico entre as armaduras. Um campo elétrico suficientemente intenso pode arrancar os elétrons dos átomos do dielétrico, ocasionado a ionização mesmo.

O valor máximo do campo elétrico que um isolante suporta sem se ionizar recebe o nome de rigidez dielétrica do isolante. Atingida a rigidez dielétrica do isolante que preenche o espaço entre as armaduras, tem-se uma fâsca entre elas, o que danifica o capacitor. Se por exemplo você comprar um capacitor de 1000μF/25v, saiba que os 25v é a máxima tensão que pode o capacitor ter entre as suas placas. Se ele for carregado com uma tensão maior que 25v, ele será danificado por causa da sua rigidez dielétrica.

EXERCÍCIOS

1) Tem-se um capacitor plano eletrizado com carga $Q = 2 \cdot 10^{-7} C$ e sob uma DDP de $10^3 v$. estando o capacitor desligado de qualquer gerador, duplica-se a distância entre as armaduras. Determine:

- A) A nova DDP do capacitor;
- B) As energias eletrostática inicial e final, explicando de onde

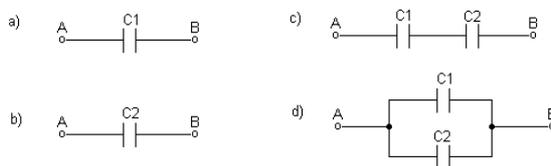


provém eventual diferença;

2) As armaduras de um capacitor plano são ligadas aos terminais de uma fonte de tensão contínua VT. A seguir sem desligar a fonte, as armaduras são afastadas. Nestas condições:

- a) A carga do capacitor aumenta.
- b) A energia eletrostática do capacitor aumenta.
- c) A capacitância do capacitor aumenta.
- d) A energia eletrostática do capacitor diminui.

3) Entre dois pontos A e B é mantida uma DDP constante. Dispondo-se de dois capacitores de capacitâncias C1 e C2, sendo $C1 > C2$, indique qual das ligações teríamos maior energia elétrica armazenada:

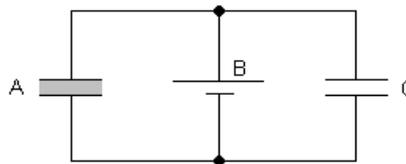


e) A energia elétrica armazenada é a mesma em qualquer uma destas ligações

4) Sejam três capacitores iguais de capacitância C cada um. Vamos associá-los em série e depois em paralelo. Se aplicar-mos uma tensão VT na associação em paralelo, qual deverá ser a tensão na associação em série, para que ambas as associações tenham as mesmas cargas:

- a) $(1/9)VT$
- b) $(1/3)VT$
- c) $1VT$
- d) $3VT$
- e) $9VT$

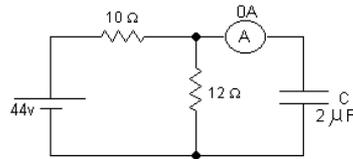
5) Constroem-se dois capacitores idênticos (A e C). em um deles é introduzido um dielétrico (A) enquanto o outro (C) contém ar a pressão normal. Uma bateria B carrega os dois capacitores com a mesma DDP. Nestas condições afirmamos que:



- a) A carga acumulada no capacitor A é menor que a acumulada no capacitor C.
- b) A carga acumulada no capacitor A é maior que a acumulada no capacitor C.
- c) O capacitor A tem capacitância nula.
- d) Os capacitores A e C acumulam a mesma carga.
- e) Os capacitores A e C possuem a mesma capacitância

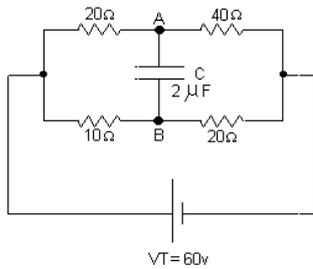
6) Dado o circuito abaixo, Calcule:

- a) Carga armazenada no capacitor.
 b) DDP entre seus terminais.

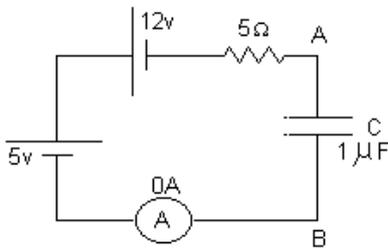


7) Qual a DDP entre os pontos A e B dos circuitos abaixo.

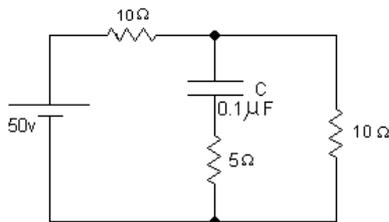
a)



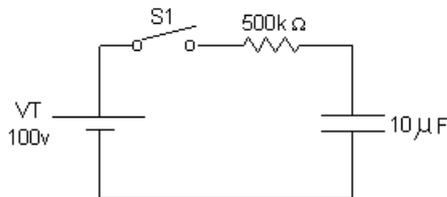
b)



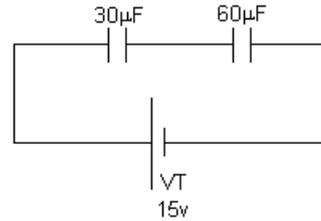
c)



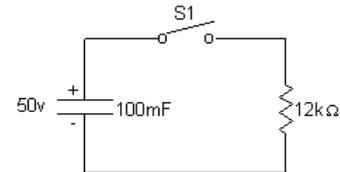
8) Quanto tempo que o capacitor levará para se carregar com a tensão da fonte após a chave S1 ser fechada?



9) associaram-se em série dois capacitores, de $C_1 = 30\mu\text{F}$ e $C_2 = 60\mu\text{F}$. Aplicou-se ao conjunto uma DDP de 15v. Qual a tensão em cada um?



11) Um resistor é conectado aos terminais de um capacitor carregado com uma tensão de 50v. quanto tempo o capacitor levará para se descarregar após a chave S1 for fechada? Qual a corrente de descarga inicial?



12) Dado um capacitor de placas planas, paralelas, separadas por uma camada de material dielétrico, de constante dielétrica igual a 10, espessura 1cm e área 40cm^2 , pede-se:

- a) a capacitância do capacitor.
 b) A energia armazenada quando se liga este capacitor a um fonte de 200v.

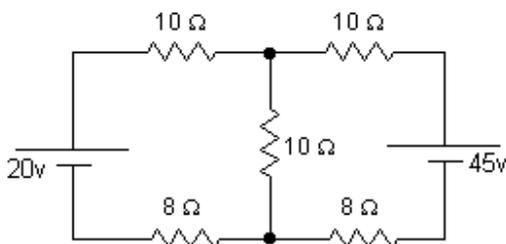
Estruturas de Corrente Contínua

Vamos definir aqui estruturas de corrente contínua como sendo circuitos puramente resistivos que possuem mais de uma fonte de tensão. Para resolver tais circuitos, dispomos de várias leis e teoremas que foram desenvolvidos exclusivamente para tal finalidade. Antes, porém, vejamos o que significam três expressões muito utilizadas neste estudo.

Nó ⇒ É o ponto de encontro entre três ou mais braços.

Braço ⇒ É uma parte do circuito que interliga dois nós, e onde todos os elementos que nele figuram estão em série.

Circuito fechado ⇒ Quando partimos de um nó, realizamos um determinado percurso e voltamos ao mesmo nó, o caminho percorrido é um circuito fechado.

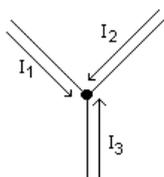


O circuito acima tem:

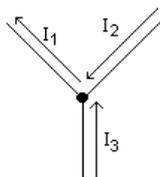
- Nós – 2
- Braços – 3
- Circuitos fechados – 3

5.1. 1ª LEI DE KIRCHHOFF

A soma das correntes que entram em um nó é igual a soma das correntes que dele se afastam.



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

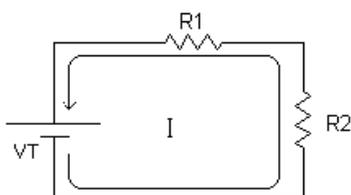


$$I_2 + I_3 = I_1$$

5.2. 2ª LEI DE KIRCHHOFF

A soma algébrica das fontes de tensão nos diferentes braços de um circuito fechado é igual a soma algébrica das quedas de tensão nos mesmos.

$$\sum V = \sum RI$$



$$VT = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$$

Para calcular as correntes em um circuito aplicando as leis de Kirchoff, temos de seguir os seguintes passos:

1º Passo ⇒ Arbitrar um sentido de corrente para cada braço e dar nome a cada uma delas.

2º Passo ⇒ Definir o número de equações das 1ª e 2ª leis de Kirchoff, usando as equações a seguir.

1ª lei

$$n - 1$$

$$n = n^\circ \text{ de nós}$$

2ª lei

$$b - n + 1$$

$$b = n^\circ \text{ de braços}$$

$$n = n^\circ \text{ de nós}$$

3º passo ⇒ Deduzir as equações da 1ª lei.

4º Passo ⇒ Escolher os circuitos fechados para análise e arbitrar um sentido de percurso para cada um.

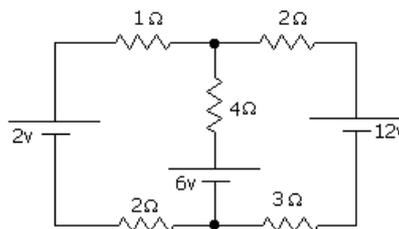
OBS ⇒ O número de circuitos fechados escolhidos deve ser igual ao número de equações da 2ª lei.

5º Passo ⇒ Deduzir as equações de 2ª lei.

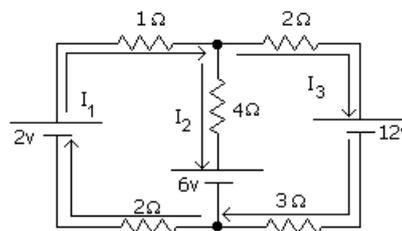
OBS ⇒ Dar sinal negativo a toda queda de tensão em que o sentido da corrente for contrário ao do percurso.
Dar sinal negativo a toda fonte de tensão quando se deparar com o terminal negativo da mesma (sentido eletrônico).

Ex.:

Dado o circuito abaixo, calcule a corrente em cada braço.



1º Passo ⇒ Arbitrar um sentido de corrente para cada braço.



OBS ⇒ O termo arbitrar significa que você pode escolher o sentido que quiser. Se o sentido que você escolheu não for o verdadeiro, o resultado dará negativo, bastando apenas inverter o sentido da corrente.

2º Passo ⇒ Definir o nº de equações da 1ª e 2ª leis.

1ª lei

$$n - 1$$

$$2 - 1 = 1$$

2ª lei

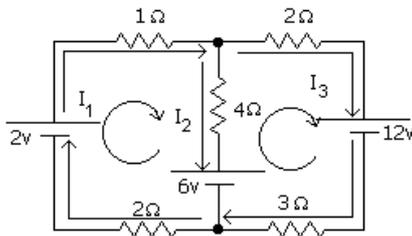
$$b - n + 1$$

$$3 - 2 + 1 = 2$$

3º Passo ⇒ Deduzir a equação da 1ª lei.

$$(a) I_1 = I_2 + I_3$$

4º Passo ⇒ Escolher os circuitos fechados para análise e arbitrar um sentido de percurso para o mesmo.



5º Passo ⇒ Deduzir as equações da 2ª lei.

$$(b) 1 \cdot I_1 + 4 \cdot I_2 + 2 \cdot I_1 = +6 - 2$$

$$(c) 2 \cdot I_3 + 3 \cdot I_3 - 4 \cdot I_2 = +12 - 6$$

Para resolver um sistema de equações, o número de incógnitas deve ser igual ao número de equações. Como no sistema acima, nós temos duas equações e três incógnitas, temos que eliminar uma das incógnitas. Para fazer isto, temos que:

Substituir a equação da 1ª lei numa das equações da Segunda lei.

$$3 \cdot I_1 + 4 \cdot I_2 = 4$$

como:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 + I_3 \\ 3 \cdot (I_2 + I_3) + 4 \cdot I_2 &= 4 \\ 3 \cdot I_2 + 3 \cdot I_3 + 4 \cdot I_2 &= 4 \\ 3 \cdot I_3 + 7 \cdot I_2 &= 4 \end{aligned}$$

montando novamente o sistema,

$$\begin{aligned} 3 \cdot I_3 + 7 \cdot I_2 &= 4 \\ 5 \cdot I_3 - 4 \cdot I_2 &= 6 \end{aligned}$$

Resolvendo os sistema,

$$\begin{aligned} 3 \cdot I_3 + 7 \cdot I_2 &= 4 \quad (4) \\ 5 \cdot I_3 - 4 \cdot I_2 &= 6 \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 12 \cdot I_3 + 28 \cdot I_2 &= 16 \\ + 35 \cdot I_3 - 28 \cdot I_2 &= 42 \end{aligned}$$

$$47 \cdot I_3 + 0 = 58$$

$$I_3 = 58 / 47 = 1,23A$$

Substituindo I_3 na equação (c),

$$\begin{aligned} 5 \cdot I_3 - 4 \cdot I_2 &= 6 \\ 5 \cdot 1,23 - 4 \cdot I_2 &= 6 \\ 6,15 - 4 \cdot I_2 &= 6 \\ -4 \cdot I_2 &= 6 - 6,15 \quad (-1) \\ 4 \cdot I_2 &= -6 + 6,15 \\ 4 \cdot I_2 &= 0,15 \end{aligned}$$

$$I_2 = 0,15 / 4 = 0,0375A$$

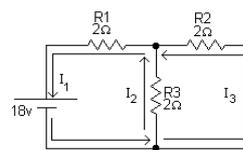
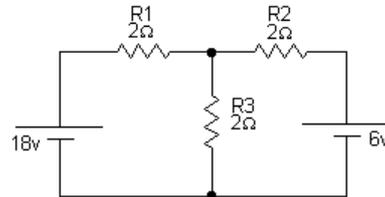
$$\text{Como } I_1 = I_2 + I_3,$$

$$I_1 = 0,0375 + 1,23 = 1,26A$$

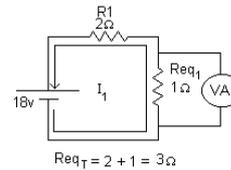
Como todas as correntes tiveram resultados positivos, significa que o sentido arbitrado inicialmente é o verdadeiro.

5.3. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

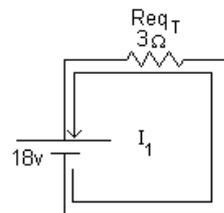
Este método é baseado no teorema da superposição. Em uma estrutura com mais de uma fonte de tensão, a corrente em cada braço é igual a soma algébrica das correntes que seriam produzidas com cada fonte atuando isoladamente, sendo as outras fontes substituídas pelas respectivas resistências internas.



$$Req_1 = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 1 \Omega$$



$$Req_T = 2 + 1 = 3 \Omega$$



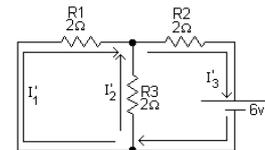
$$I_1 = \frac{18}{3} = 6A$$

$$VA = Req_1 \cdot I_1$$

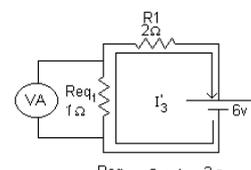
$$VA = 1 \cdot 6 = 6v$$

$$VR_2 = VR_3 = VA = 6v$$

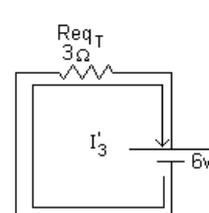
$$I_2 = I_3 = \frac{6}{2} = 3A$$



$$Req_1 = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 1 \Omega$$



$$Req_T = 2 + 1 = 3 \Omega$$



$$I'_3 = \frac{6}{3} = 2A$$

$$VA = Req_1 \cdot I'_3$$

$$VA = 1 \cdot 2 = 2v$$

$$VR_3 = VR_1 = VA = 2v$$

$$I'_2 = I'_1 = \frac{2}{2} = 1A$$

Agora que já calculamos a intensidade de corrente em cada braço com cada fonte atuando isoladamente, podemos calcular a intensidade de corrente realmente está passando em cada braço. Para isso efetuamos a soma algébrica das correntes em cada braço, prevalecendo o sentido da corrente de maior valor.

$$I_A = I_1 - I'_1$$

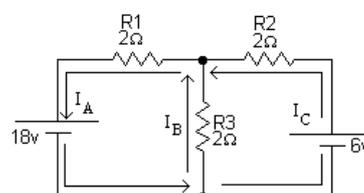
$$I_A = 6 - 1 = 5A$$

$$I_B = I_2 + I'_2$$

$$I_B = 3 + 1 = 4A$$

$$I_C = I_3 - I'_3$$

$$I_C = 3 - 2 = 1A$$

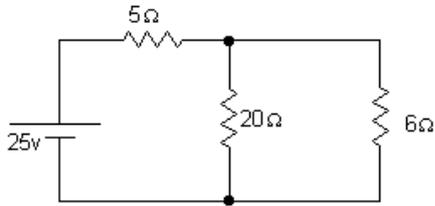


5.4. TEOREMA DE THEVENIN

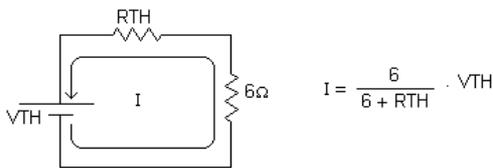
Para determinar a intensidade de corrente que passa por um resistor ligado aos terminais de uma estrutura de corrente contínua linear, a estrutura pode ser substituída por uma única fonte de tensão com um resistor e série. A fonte de tensão é designada V_{TH} e o resistor R_{TH} .

Ex.:

Calcule a corrente que passa pelo resistor de 6Ω .



Circuito equivalente Thevenin,

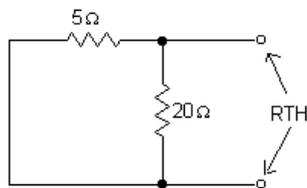


Para calcular R_{TH} :

1° \Rightarrow retira-se do circuito o resistor no qual se deseja saber a corrente (6Ω);

2° \Rightarrow substitui as fontes de tensão pelas suas respectivas resistências equivalentes;

3° \Rightarrow calcula-se a R_{eq} vista pelos terminais de onde estava ligado o resistor de 6Ω . Esta R_{eq} será a R_{TH} .

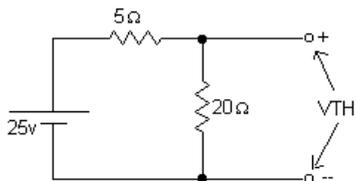


$$R_{TH} = \frac{5 \cdot 20}{5 + 20} = 4\Omega$$

Para calcular V_{TH} :

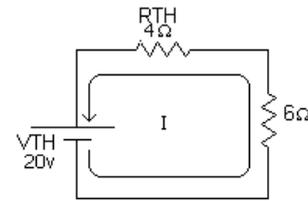
1° \Rightarrow recoloca as fontes em seus lugares;

2° \Rightarrow Ainda com o resistor fora do circuito, calcule a tensão entre os terminais onde o mesmo estava interligado.



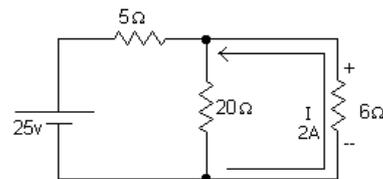
$$V_{TH} = \frac{20}{20 + 5} \cdot 25 = 20\text{V}$$

Calculamos agora a corrente no circuito equivalente Thevenin,



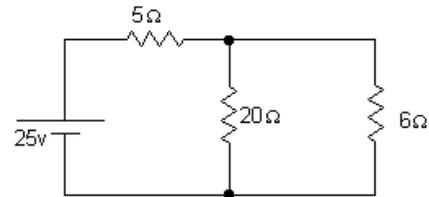
$$I = \frac{20}{6 + 4} = 2\text{A}$$

Esta é a corrente que passa pelo resistor de 6Ω no circuito original. A polaridade da tensão no resistor de 6Ω é a mesma polaridade da tensão Thevenin sem o resistor no circuito. O teorema de Thevenin é usado quando desejamos saber a intensidade de corrente em um componente ou em um braço do circuito.

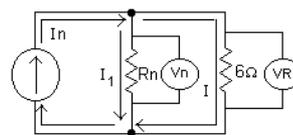


5.5. TEOREMA DE NORTON

O teorema de Norton afirma que para se determinar a corrente que passa por um resistor ligado aos terminais de uma estrutura linear, a estrutura pode ser substituída por uma fonte de corrente em paralelo com uma resistência Norton. A fonte de corrente é designada I_n e a resistência R_n .



Circuito equivalente Norton,



$$\begin{aligned} I_n &= I_1 + I \\ I_1 &= I_n - I \\ V_n &= R_n \cdot I_1 \\ V_R &= 6\Omega \cdot I \end{aligned}$$

como $V_n = V_R$,

$$\begin{aligned} R_n \cdot I_1 &= 6\Omega \cdot I \\ R_n (I_n - I) &= 6\Omega \cdot I \\ R_n I_n - R_n I &= 6\Omega \cdot I \\ R_n I_n &= 6\Omega \cdot I + R_n I \\ R_n I_n &= I (6\Omega + R_n) \\ \frac{R_n I_n}{6\Omega + R_n} &= I \end{aligned}$$

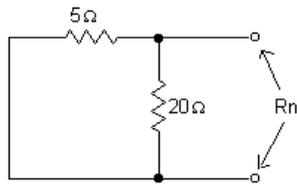
$$I = \frac{R_n}{6\Omega + R_n} \cdot I_n$$

Para calcular R_n :

1° \Rightarrow retira-se do circuito o resistor no qual se deseja saber a corrente (6Ω);

2° \Rightarrow substitui as fontes de tensão pelas suas respectivas resistências equivalentes;

3° \Rightarrow calcula-se a R_{eq} vista pelos terminais de onde estava ligado o resistor de 6Ω . Esta R_{eq} será a R_n .

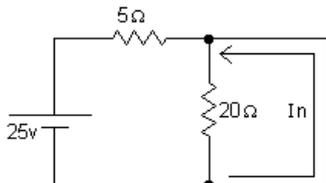


$$R_n = \frac{5 \cdot 20}{5+20} = 4 \Omega$$

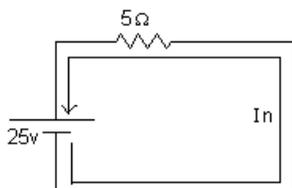
Para calcular I_n :

1° ⇒ recoloca as fontes em seus lugares,

2° ⇒ Dê um curto entre os terminais onde estava ligado o resistor que foi retirado do circuito e calcule a intensidade de corrente neste ponto. Esta corrente será a corrente Norton.

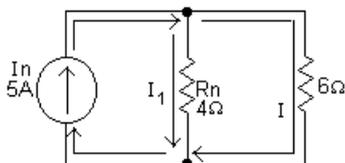


Ckt equivalente,



$$I_n = \frac{25}{5} = 5A$$

Montamos agora o circuito equivalente Norton e calculamos a corrente I .



$$I = \frac{R_n}{6 + R_n} \cdot I_n$$

$$I = \frac{4}{6 + 4} \cdot 5$$

$$I = 2A$$

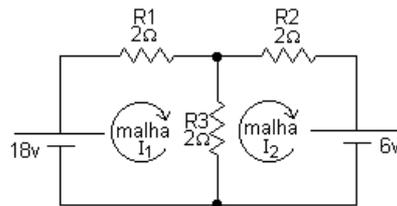
O sentido da corrente que passa pelo resistor de 6Ω no circuito original é o mesmo que I_n com um curto no lugar do resistor.

5.6. MÉTODOS DAS MALHAS OU CORRENTES CÍCLICAS DE MAXWELL

Ao contrário das leis de Kirchhoff, o método das malhas se baseia na corrente em cada malha ao invés da corrente em cada braço.

Malha ⇒ É um circuito fechado que não possui nenhum circuito fechado no seu interior. O circuito a seguir possui duas malhas.

Ex.:



Para calcular as correntes nos diferentes braços do circuito acima aplicando Maxwell temos de:

1° ⇒ Arbitrar um sentido de percurso para cada malha do circuito, como já foi feito.

2° ⇒ montar uma equação para cada malha do circuito.

Malha 1

a) somamos todas as quedas de tensão que pertencem a malha.

$$R1 \cdot I_1 + R3 \cdot I_1$$

Como $R3$ pertence também a malha I_2 , temos de incluir a queda de tensão $R3 \cdot I_2$ na equação. Nestes casos, o produto (queda de tensão) será positivo se as duas correntes de malhas tiverem o mesmo sentido ao passar pelo resistor em questão. Como neste caso I_1 e I_2 tem sentidos contrários ao passarem por $R3$, o produto $R3 \cdot I_2$ presente na equação da malha 1 será negativo.

$$R1 \cdot I_1 + R3 \cdot I_1 - R3 \cdot I_2$$

b) O somatório das quedas de tensão será igual a soma algébrica das fontes de tensão nos diferentes braços de uma malha. O procedimento será o mesmo usado em Kirchhoff para incluir as fontes de tensão na equação.

Percorremos a malha e ao depararmos com o terminal positivo da fonte, damos sinal positivo a esta; se depararmos com o terminal negativo, damos sinal negativo.

A equação completa da malha 1 será:

$$R1 \cdot I_1 + R3 \cdot I_1 - R3 \cdot I_2 = -18$$

$$2 \cdot I_1 + 2 \cdot I_1 - 2 \cdot I_2 = -18$$

$$4 \cdot I_1 - 2 \cdot I_2 = -18$$

Malha 2

$$R2 \cdot I_2 + R3 \cdot I_2 - R3 \cdot I_1 = +6$$

$$2 \cdot I_2 + 2 \cdot I_2 - 2 \cdot I_1 = +6$$

$$4 \cdot I_2 - 2 \cdot I_1 = +6$$

Montando o sistema.

$$4 \cdot I_1 - 2 \cdot I_2 = -18 \quad (2)$$

$$-2 \cdot I_1 + 4 \cdot I_2 = +6 \quad (4)$$

$$8 \cdot I_1 - 4 \cdot I_2 = -36$$

$$-8 \cdot I_1 + 16 \cdot I_2 = 24$$

$$0 + 12 I_2 = -12$$

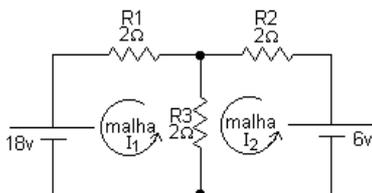
$$I_2 = -12 / 12 = -1A$$

Substituindo I_2 na equação da malha 1,

$$\begin{aligned} 4 \cdot I_1 - 2 \cdot I_2 &= -18 \\ 4 \cdot I_1 - 2 \cdot (-1) &= -18 \\ 4 \cdot I_1 + 2 &= -18 \\ 4 \cdot I_1 &= -18 - 2 \\ 4 \cdot I_1 &= -20 \\ I_1 &= -20/4 \end{aligned}$$

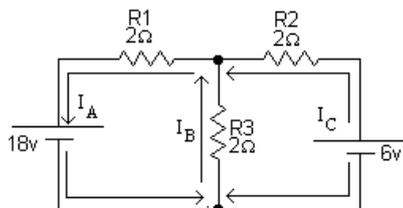
$$I_1 = -5A$$

Como o resultado das correntes de malha I_1 e I_2 deram negativo, temos que inverter o sentido de ambas.



As corrente que realmente estarão passando em cada braço:

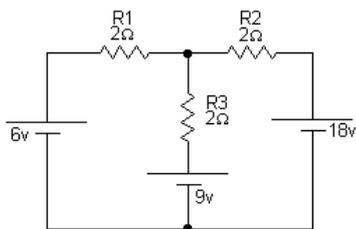
$$I_A = I_1 = 5A \quad I_B = 5 - 1 = 4A \quad I_C = I_2 = 1A$$



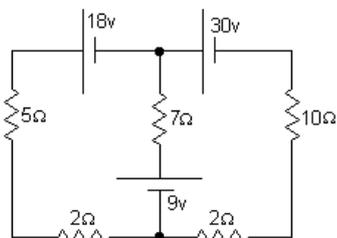
EXERCÍCIOS

1) Calcule a corrente em cada braço aplicando Kirchhoff, superposição e Maxwell.

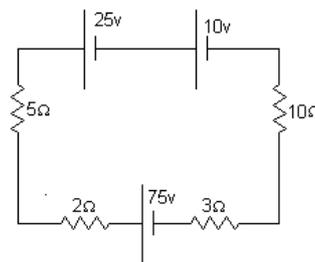
a)



b)

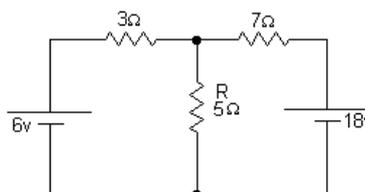


c)

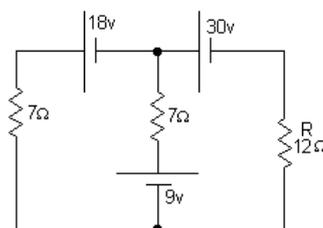


2) Calcule a corrente que passa pelo resistor R aplicando os teoremas de Thevenin e Norton.

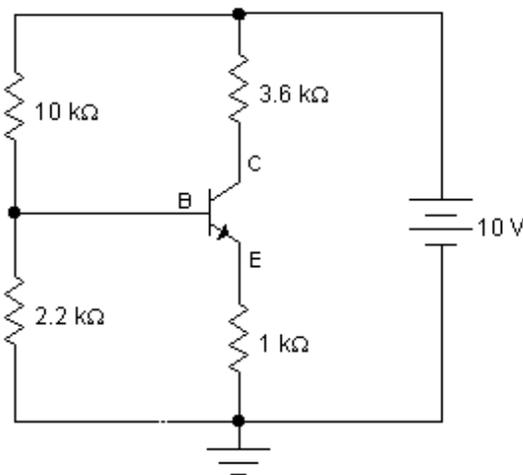
a)



b)



3) substitua a parte do circuito que alimenta a base do transistor pelo equivalente Thevenin.



Magnetismo e Eletromagnetismo

O magnetismo é uma forma de energia cuja principal propriedade é atrair outros corpos. Os corpos que possuem o magnetismo são chamados de ímãs. Os ímãs podem ser naturais ou artificiais.

Ímãs naturais – São compostos de ferro conhecidos como magnetita, encontrados com certa facilidade na natureza. Conta a lenda que na Grécia antiga vivia um camponês chamado Magnês. Certo dia ele percebe que uma força estranha atraía a sola de sua sandália e que o mesmo acontecia com a ponta do seu cajado. Ao escavar a terra, Magnês percebeu que aquela força vinha de uma rocha negra. A esta rocha deram o nome de magnetita em homenagem a Magnês. Alguns estudiosos acreditam que a magnetita tem este nome por se encontrar em grande quantidade em uma cidade da antiga Grécia chamada de Magnésia. Há também quem acredite que o magnetismo foi descoberto pelos chineses por volta do ano de 2637 a.C.

Ímãs artificiais - São ímãs produzidos pelo homem. Existem hoje ímãs artificiais tão poderosos que, trabalhando em conjunto com guindastes, conseguem levantar até carros.

Os ímãs também podem ser classificados como temporários ou permanentes. Um ímã é permanente quando as propriedades magnéticas adquiridas pelo corpo são mantidas por toda a sua existência. Por outro lado um ímã é temporário quando as propriedades magnéticas adquiridas pelo corpo são perdidas em pouco tempo.

Várias teorias têm sido apresentadas para tentar explicar o magnetismo. J.P. Mendes Cavalcante, em seu livro "Fundamentos da Eletrotécnica para Técnicos em Eletrônica", descreve a Teoria dos domínios magnéticos, o que segundo ele, é a mais moderna e completa teoria desenvolvida para explicar a origem do magnetismo. De acordo com P. J. Mendes:

"A teoria dos domínios magnéticos baseia-se no fato de que os fenômenos magnéticos resultam do movimento de cargas elétricas. É fato comprovado e de grande aplicação que uma carga elétrica em movimento apresenta não só um campo elétrico como também, e principalmente, propriedades magnéticas; convém ressaltar que as propriedades magnéticas só são observadas quando a carga elétrica está em movimento, ao passo que o campo elétrico existe também quando ela está em repouso.

Conhecendo o fato acima e sabendo que os elétrons de um corpo estão sempre em movimento ("spin" e movimento em suas órbitas), o homem concluiu que todos os elétrons de um corpo têm propriedades magnéticas (são ímãs pequeníssimos).

Mas, esta conclusão não contraria o que foi escrito no primeiro parágrafo? Se todos os corpos apresentam elétrons em movimento, todos têm propriedades magnéticas?

A resposta é NÃO para as duas perguntas. Sabe-se que quando duas cargas elétricas iguais movimentam-se em sentidos opostos os seus efeitos magnéticos se anulam. Sabe-se também que os elétrons dos átomos constituem dois grupos que giram em sentidos opostos. Quando esses grupos são iguais (em números de elétrons), as propriedades magnéticas dos átomos são nulas, fato que ocorre com a maioria das substâncias. Quando os grupos são quantidades de elétrons diferentes, há o predomínio de um deles, e os átomos são minúsculos ímãs; isto é o que ocorre com os materiais a que nos referimos no início... e que são chamados MATERIAIS MAGNÉTICOS.

Os átomos com propriedades magnéticas reúnem-se em grupos de aproximadamente 10^8 unidades, constituindo DOMÍNIOS MAGNÉTICOS. Um pedaço de ferro por exemplo é formado por domínios. Observa-se, entretanto, que os efeitos dos domínios não se somam, como acontece com os efeitos dos átomos que os constituem, e, em verdade, praticamente se anulam. É por este motivo que normalmente um corpo de material magnético não é um ímã. Este fato é consequência da má disposição dos domínios, cujas ações estão em oposição, fazendo com que o corpo, como um todo, não apresente qualidades magnéticas.

É possível, porém, dar nova disposição aos domínios, que resulte numa ajuda mútua por parte desses grupos de átomos, produzindo-se então um ímã.

Fazer um corpo apresentar propriedades magnéticas, ou IMANTÁ-LO (ou ainda MAGNETIZÁ-LO), é, portanto, orientar os seus domínios de modo que somem suas ações magnéticas:"(1)

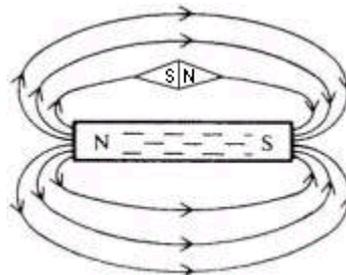
(1) J.P. Mendes Cavalcante. **Fundamentos da Eletrotécnica para Técnicos em Eletrônica**, Editora Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 1980, 12ª edição, pg 72.

6.1. IMANTAÇÃO OU MAGNETIZAÇÃO

É o ato de fazer com que um corpo apresente propriedades magnéticas. Existem várias formas de se imantar um corpo, sendo talvez a mais fácil de todas, imantação por aproximação. Quando aproximarmos um corpo magnético de um ímã, o corpo adquire propriedades magnéticas, tornando-se, deste modo, um ímã temporário. Uma experiência simples pode ser feita para provar este fenômeno: encoste a ponta de uma chave de fenda em um ímã e depois a aproxime de um parafuso. Você verá que a chave de fenda irá atrair o parafuso. Isso ocorreu por que a chave de fenda foi imantada, ou seja, adquiriu propriedades magnéticas.

6.2. CAMPO MAGNÉTICO

É a região ou matéria onde são observados as propriedades magnéticas. Durante a idade média, descobriu-se que se uma agulha magnética for colocada sobre um eixo de forma que ela pudesse se mover livremente, ela invariavelmente se alinharia na direção norte-sul geográfico da terra. Uma extremidade da agulha foi assim chamada de pólo norte magnético (a que apontava para o norte geográfico), e a outra, de pólo sul magnético (a que apontava para o sul geográfico). Os chineses foram os primeiros a registrar este fato pouco antes de 1100 d.C. Cem anos depois os europeus desenvolveram a idéia, ali nascia a bússola. A bússola pode ser utilizada para se verificar a existência de um campo magnético. Ao introduzir a bússola em um campo magnético, a sua agulha irá se movimentar indicando a direção e o sentido do campo. Gráficamente, o campo magnético é representado por linhas que nós chamamos de LINHAS DE FORÇA. Um ímã possui extremidades (ou pólos) norte e sul, tendo sido convenção que as linhas de força saem sempre da extremidade norte e entram na extremidade sul do ímã. Veja na figura a seguir como as linhas de força se difundem em um ímã em forma de barra. Observe como a agulha da bússola indica a direção e o sentido das linhas de força do campo magnético. Isso acontecerá sempre que uma bússola for colocada dentro de um campo magnético.



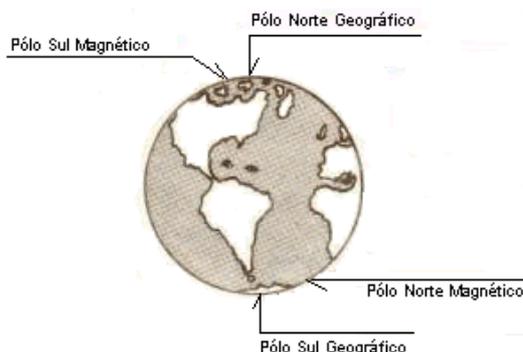
6.3. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

É de conhecimento de poucos que a terra é um gigantesco, mas relativamente fraco ímã. Observe na figura a seguir que os pólos norte e sul magnéticos da terra estão próximos dos pólos norte e sul geográficos dela. Como as linhas de força saem do pólo norte magnético e entram no pólo sul magnético da terra, o que a bússola faz é apontar o lado norte da agulha para o pólo sul magnético da terra, como este está bem próximo do pólo norte geográfico, temos a impressão que o lado norte da agulha da bússola está apontando sempre para o pólo norte geográfico da terra. O que a bússola faz na verdade é indicar a direção e o sentido do campo magnético da nossa mãe terra.

O pólo sul magnético foi localizado em 1831 no litoral ocidental da península de Boothia, pelo explorador escocês James Clark Ross (1800 - 1862). Nesta região, a ponta da agulha apontou para baixo. O pólo norte magnético foi localizado no contorno da Antártica em 1909 pelo geólogo australiano Edgeworth David (1858 - 1934) e pelo explorador Douglas Mawson (1882 - 1958).

Muitos cientistas acreditam que o campo magnético da terra tem a sua origem em sua rotação. Como o centro da terra é composto por metais (ferro e níquel) superaquecidos e no estado líquido (magma), a rotação da

terra provoca um grande redemoinho no centro dela. Os elétrons dos metais no estado líquido em movimento (devido ao redemoinho), seriam o motivo do campo magnético terrestre, simulando o efeito de uma corrente elétrica com movimento circular (fato que resulta em um campo magnético semelhante ao de um ímã em forma de barra), visto que as propriedades magnéticas estão associadas ao movimento de cargas elétricas.



O campo magnético da terra, porém, não é um fenômeno perfeitamente constante. Os polos magnéticos trocam de posição com o tempo e, por alguma razão desconhecida, ficam a 1600 quilômetros dos polos geográficos. Além disso, os polos magnéticos não ficam em lados exatamente opostos da terra. Uma linha imaginária ligando os polos norte e sul magnéticos passa a 1100 quilômetros do centro da terra.

Dentre os componentes da lava expelida pela ação vulcânica, há vários minerais fracamente magnéticos. As moléculas desses minerais tendem a se orientar paralelamente as linhas de força magnéticas da terra. Enquanto os minerais estão no estado líquido, essa tendência é superada pelo movimento aleatório das moléculas devido a alta temperatura. Com o resfriamento das rochas vulcânicas, porém, o movimento das moléculas se torna lento, e elas então se orientam na direção norte-sul. Quando a rocha se solidifica, a orientação se cristaliza, ou seja, as rochas cristalizadas são ímãs, com polos magnéticos; o polo norte aponta para o norte geográfico e o polo sul para o sul geográfico da terra.

Em 1906, um físico francês, Bernard Brunhes, verificou que alguns cristais rochosos vulcânicos eram magnetizados na direção oposta da esperada. Seu polo norte magnético apontava para o sul geográfico da terra. Nos anos seguintes a descoberta original de Brunhes, um grande número de rochas vulcânicas foi estudada e verificou-se que, embora em muitos casos os polos norte magnéticos dos cristais apontassem para o norte geográfico da terra, em muitos outros casos os polos norte magnéticos dos cristais apontavam para o sul geográfico.

Medindo a idade das rochas estudadas, concluiu-se que nos últimos 76 milhões de anos, foram identificadas nada menos que 171 inversões do campo magnético da terra, com um intervalo médio entre inversões de 450.000 anos e, que nos últimos 700.000 anos, o campo magnético terrestre tem mantido sua direção atual.

Se o campo magnético da terra tem sua origem nos redemoinhos existentes no centro dela, seu sentido e intensidade dependem respectivamente da direção e da velocidade do redemoinho no centro líquido da terra. Neste caso, uma inversão no sentido do campo magnético terrestre só poderia ocorrer se houvesse uma inversão na direção de tais redemoinhos.

Até hoje desconhecemos o motivo da mudança na direção do redemoinho, bem como a mudança na velocidade ou da irregularidade entre as inversões, mas parece que o campo magnético da terra tem perdido 15% da força que tinha em 1670, quando começaram a ser feitas as primeiras medições confiáveis em sua intensidade. Com o atual grau de diminuição, alcançará zero antes de 4000 d.C. As conseqüências de tal fato são ainda um mistério, pois se sabe que o campo magnético terrestre funciona como uma espécie de escudo, nos protegendo de substâncias vindas do espaço em rota de colisão com a terra. É melhor pararmos por aqui, caso contrário não vamos dormir hoje.

6.4. ATRAÇÃO E REPULSÃO ENTRE ÍMÃS

Quando aproximamos polos iguais de dois ímãs, haverá repulsão entre eles. Veja a experiência a seguir, onde um ímã em forma de barra foi colocado sobre dois lápis. Ao aproximarmos do seu polo sul o polo sul de outro ímã, observamos que o ímã sobre os lápis começa a se deslocar devido a repulsão que existe entre polos de mesmo nome.



Da mesma forma, se nós aproximarmos os polos de nomes diferentes de dois ímãs, veremos que haverá uma atração entre eles. A figura a seguir mostra que o polo sul do ímã sobre o lápis será atraído pelo polo norte do outro ímã. Isto ocorre porque polos de nomes diferentes se atraem.



6.5. GRANDEZAS MAGNÉTICAS

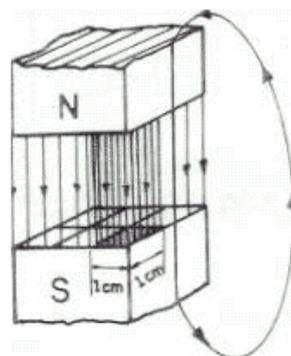
Permeabilidade Magnética (μ) - Exprime a facilidade com que um meio ou um corpo oferece ao estabelecimento de um campo magnético.

Permeância Magnética (p) - É a facilidade que um meio qualquer oferece ao estabelecimento de um campo magnético.

Relutância Magnética (R) - Exprime a dificuldade que um meio ou um corpo oferece ao estabelecimento de um campo magnético.

Fluxo Magnético (ϕ) - É o número de linhas de força utilizado para representar um campo magnético.

Densidade de Fluxo Magnético (β) - É o número de linhas de força que atravessa uma área de seção transversal de 1cm^2 . A figura abaixo mostra este conceito de forma bastante clara.



6.6. COMPORTAMENTO DAS SUBSTÂNCIAS EM RELAÇÃO AO MAGNETISMO

Substâncias Ferromagnéticas - São substâncias que se imantam de forma intensa. Como exemplo de substâncias ferromagnéticas podemos citar o Ferro, o Cobalto e o Níquel.

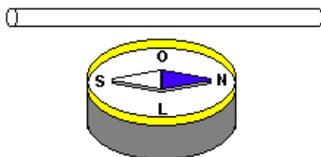
Substâncias Paramagnéticas - São substâncias que se imantam de forma pouco intensa. Alumínio, Cromo, Estanho e Ar são exemplos de substâncias paramagnéticas.

Substâncias Diamagnéticas - São substâncias que enfraquecem o campo magnético ao qual são submetidas. Cobre, Zinco, Mercúrio, Chumbo e Água são exemplos de substâncias com esta característica.

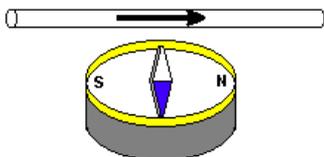
6.7. ELETROMAGNETISMO

Nos itens anteriores nós aprendemos que o magnetismo está associado ao movimento de cargas elétricas. Se a corrente elétrica é o movimento ordenado de elétrons, seria correto dizer que o magnetismo está associado a corrente elétrica? Para responder esta pergunta, vamos fazer uma experiência.

Observe no desenho a seguir que uma bússola foi colocada sob um condutor. Suponha que não esteja passando nenhuma corrente elétrica pelo condutor. Veja que a agulha da bússola está apontando para os polos norte e sul magnéticos da terra.

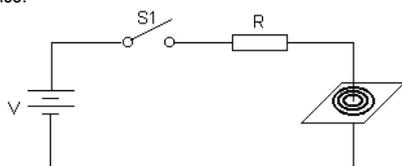


A figura a seguir mostra a mesma bússola sob o mesmo condutor, só que agora sendo percorrido por uma corrente elétrica cujo sentido arbitrado é o eletrônico. Observe que a agulha se deslocou 90°, no sentido horário, sendo agora a sua direção perpendicular a do condutor. O que aconteceu? Se você acha que a corrente elétrica provocou o aparecimento de um campo magnético em torno do condutor, você acertou.



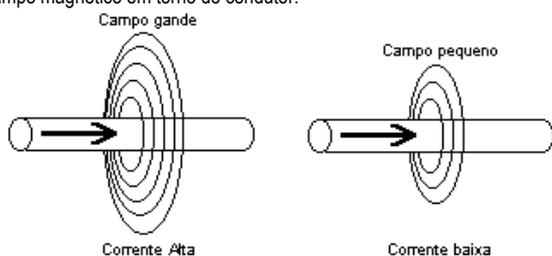
Esta experiência foi feita em 1830 pelo físico e químico dinamarquês Hans Cristian Oersted, quando descobriu que a corrente elétrica é sempre acompanhada de um campo magnético. O estudo do magnetismo produzido pela corrente elétrica é chamado de ELETROMAGNETISMO.

Uma outra experiência pode ser feita para mostrar como as linhas de força se difundem neste campo magnético em torno do condutor. O condutor passou pelo furo feito numa lâmina de vidro, tendo sido depositado em sua superfície limalhas de ferro. Ao se ligar o circuito, os pedacinhos do ferro (limalhas), irão se magnetizar mostrando a forma do campo magnético em torno do condutor, ou seja, como estão distribuídas as linhas de força do campo magnético.



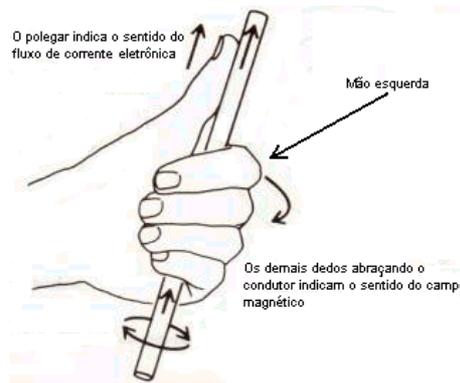
A conclusão que nós chegamos com a experiência acima é que o campo magnético em torno do condutor percorrido por uma corrente elétrica é circular, formando um ângulo de 90° com relação ao condutor, se estendendo por toda a extensão dele.

A intensidade deste campo (número de linhas de força), depende da intensidade de corrente que está passando pelo condutor. Quanto maior a intensidade da corrente elétrica, maior o número de linhas de força do campo magnético em torno do condutor.



6.8. REGRA DA MÃO ESQUERDA

O sentido do campo magnético em torno do condutor pode ser definido com a regra da mão esquerda. Abraça o condutor com a mão esquerda como mostra figura. O dedo polegar indica o sentido da corrente (sentido eletrônico, enquanto que os outros dedos indicam o sentido das linhas de força. Se for utilizado o sentido convencional da corrente, use a mão direita.

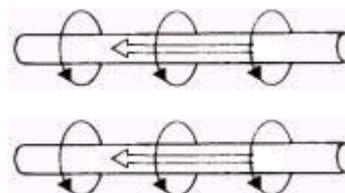


Veja na figura a seguir o sentido das linhas de forças em torno do condutor. A seta no interior do condutor representa o sentido da corrente, use a regra da mão esquerda para se certificar que o sentido das linhas de força está correto.

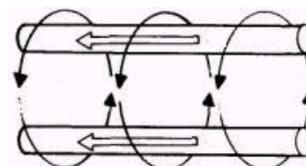


6.9. CAMPOS QUE SE SOMAM OU SE CANCELAM

Na figura a seguir vemos dois condutores lado a lado percorridos por uma corrente elétrica. Observe que os campos magnéticos nos condutores têm o mesmo sentido. O que acontecerá se os condutores forem aproximados?

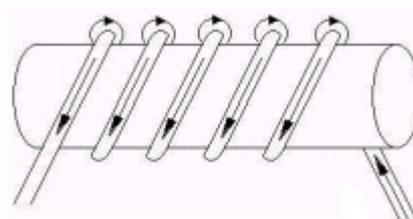


Ao serem aproximados, os campos irão se somar formando um único campo magnético em torno dos dois condutores. Esta é a idéia usada na construção das bobinas.

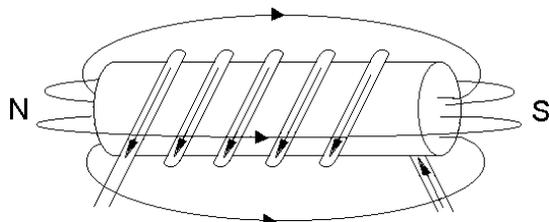


6.10. CAMPO MAGNÉTICO EM ESPIRAS

Enrolando um condutor em forma de espiras, teremos um campo magnético semelhante ao campo magnético em um ímã em forma de barra. Quando as espiras são enroladas sobre um núcleo de ferro, temos um ELETROÍMÃ. Observe no desenho como as linhas de força em cada espira está no mesmo sentido que as linhas nas demais espiras.

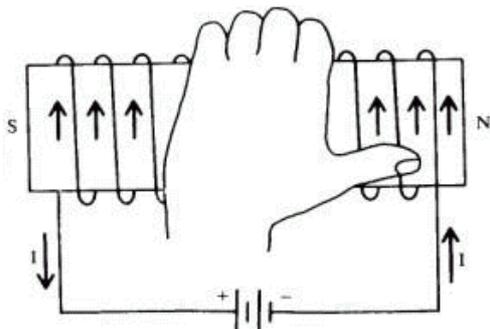


O que acontecerá se as espiras forem aproximadas umas das outras? Isso mesmo, será formado um único campo magnético, com as linhas de força passando por dentro das espiras e retornando por fora. Observe na figura a seguir a semelhança deste campo magnético com o campo magnético de um ímã em forma de barra.



6.11. REGRA DE MÃO ESQUERDA PARA ESPIRAS

Se o sentido arbitrado para a corrente for o eletrônico, utilize a regra da mão esquerda para identificar os pólos norte e sul do eletroímã. Abraze mentalmente as espiras, com exceção do polegar, de forma que os dedos indicador, médio, anular e mínimo indiquem o sentido da corrente nas espiras. O dedo polegar irá indicar o pólo norte do eletroímã. Se for usado o sentido convencional para corrente, utilize a mão direita.



Solenóide - É um conjunto de espiras de uma só camada.

Bobina - É um condutor enrolado em forma de espiras e em muitas camadas.

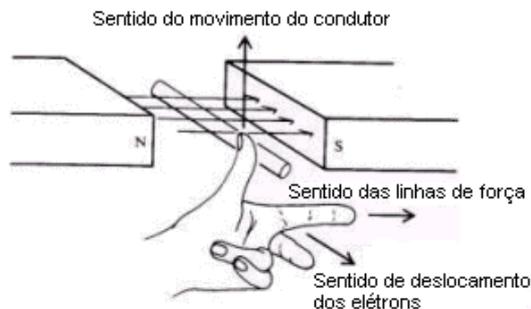
6.12. FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA (FEM)

Sempre que um condutor se movimentar dentro de um campo magnético, aparecerá em seus terminais uma DDP. Esta DDP é chamada de FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA e o fenômeno em questão é chamado de INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA. O mesmo acontecerá se o condutor se mantiver em repouso dentro de um campo magnético variável. Uma DDP também aparecerá nos terminais de um condutor em repouso se um ímã for aproximado e afastado do mesmo. Destas três situações nós podemos concluir que: *para que apareça uma DDP nos terminais de um condutor, tem de haver um movimento relativo entre o condutor e o campo magnético, ou seja, as diversas linhas de força do campo magnético têm de atravessar o condutor.*

O que ocorre dentro do condutor que resulte na DDP?. É de nosso conhecimento que os elétrons são pequeníssimos ímãs e que os mesmos, estando livres, movimentam-se aleatoriamente dentro do condutor. Ao ser atravessado pelas linhas de força do campo, os elétrons livres são obrigados a se deslocar para uma das extremidades do condutor. A extremidade do condutor para onde os elétrons se deslocam será a polaridade negativa da DDP, a outra extremidade do condutor será a positiva.

6.13. REGRA DA MÃO ESQUERDA PARA DEFINIR O SENTIDO DA FEM

Esta regra consiste em posicionar os dedos polegar, indicador e médio como se fossem arestas de um cubo que saem do mesmo vértice. O polegar indica o sentido do movimento do condutor, o indicador mostra o sentido das linhas de força e o dedo médio aponta para a extremidade do condutor para onde os elétrons irão se deslocar (polaridade negativa). A mão direita pode ser usada, neste caso o dedo médio apontará para a polaridade positiva da DDP.



6.14. CÁLCULO DA FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA

Vemos a seguir uma fórmula que nos permite calcular o valor instantâneo da força eletromotriz induzida num condutor que atravessa um campo magnético constante. Observe que o valor instantâneo da fem depende da velocidade com que o condutor atravessa o campo, da densidade de fluxo magnético, do comprimento do condutor inserido no campo e do ângulo formado entre a direção do movimento do condutor e a direção do campo magnético.

$$e = \beta \cdot L \cdot V \cdot \text{sen } \alpha$$

e = Valor instantâneo da fem no condutor, em volts (v)
 β = Densidade de fluxo magnético, em Tesla (T)
 L = Comprimento do condutor inserido no campo magnético, em metros (m)
 V = Velocidade constante com que o condutor atravessa o campo magnético, em metros por segundo (m/s)
 $\text{sen } \alpha$ = Seno do ângulo formado entre a direção do movimento do condutor em relação com a direção do campo magnético.

Ao analisarmos a equação acima nós observamos que, se a densidade de fluxo magnético (β), o comprimento do condutor submetido ao campo (L) e a velocidade do movimento do condutor (V) forem constantes, o valor instantâneo da fem dependerá somente do seno do ângulo formado entre a direção do movimento do condutor e a direção do campo magnético ($\text{sen } \alpha$). Se o condutor corta o campo magnético perpendicularmente ($\alpha = 90^\circ$), isto é, se o ângulo formado entre a direção do movimento do condutor e a direção campo magnético for de 90° ($\text{sen } \alpha = 1$), o valor instantâneo da fem será máximo ($e = E_{\text{max}}$). Por outro lado, se o condutor se movimenta dentro do campo magnético paralelamente as linhas de força ($\alpha = 0^\circ$), a fem será nula ($e = 0v$) porque $\text{sen } \alpha = 0$. Baseado no que foi escrito neste parágrafo, nós podemos dizer que:

$$E_{\text{max}} = \beta \cdot L \cdot V$$

E_{max} = valor máximo da fem

Substituindo E_{max} na fórmula, teremos:

$$e = E_{\text{max}} \cdot \text{sen } \alpha$$

e = Valor instantâneo da fem
 E_{max} = Valor máximo da fem
 $\text{sen } \alpha$ = Seno do ângulo formado entre a direção do movimento do condutor com a direção do campo magnético

6.15. INDUTÂNCIA

É a propriedade que um condutor possui de fazer aparecer em si mesmo ou em outro condutor uma tensão induzida. Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, aparece um campo magnético em torno dele. Se a corrente elétrica varia de intensidade, o campo magnético em torno do condutor também varia. Como o condutor está submetido ao campo magnético variável (devido a variação da corrente elétrica que o percorre), aparecerá em seus terminais uma tensão induzida. É importante ressaltar que a indutância só se manifesta se a corrente que passa pelo condutor varia. Isso significa que quando a corrente que passa pelo condutor é contínua e constante, a indutância não se manifesta. A tensão induzida em um condutor percorrido por uma corrente elétrica é uma resposta oferecida por ele as variações de intensidade de corrente elétrica, devido a sua característica em se opor a tais variações. É por isso que a indutância só se manifesta quando a corrente varia.

O físico e químico Inglês Michael Faraday (1791 - 1867) descobriu a indução eletromagnética (fem) em 1831 e Henrich Lenz (1804 -1865) determinou o seu sentido, apresentando em sua conclusão a conhecida LEI DE LENZ:

"O SENTIDO DA FORÇA ELETROMOTRIZ É TAL QUE ELA SE OPÕE, PELOS SEUS EFEITOS, A CAUSA QUE A PRODUZIU."

A unidade de indutância é o Henry (H), escolhido em homenagem a Josep Henry, que segundo alguns estudiosos, foi quem realmente descobriu as propriedades de auto-indução (induzir uma fem em si mesmo) de uma bobina. A fórmula abaixo nos mostra como calcular a tensão média induzida.

$$V = L \cdot (\Delta I / \Delta t)$$

V = Tensão média induzida, em volts (V)

L = Indutância, em Henry (H)

ΔI = Variação da corrente

Δt = variação do tempo

6.16. AUTO-INDUTÂNCIA

É o fenômeno em que um condutor induz uma fem em si mesmo. Esta fem é chamada de fem auto induzida ou força contra-eletromotriz (FCEM), porque foi induzida no próprio condutor que conduz a corrente. O condutor que possui esta capacidade tem uma auto-indutância. A indutância de um condutor pode ser aumentada se ele for enrolado em forma de espiras (solenóide ou bobina). Quando um solenóide (ou bobina) é construído para se fazer uso de sua indutância, ele é comumente chamado de indutor ou indutância. Um indutor tem uma auto-indutância de 1H quando uma fem de 1V é induzida no mesmo sempre que a corrente que passa por ele varia na razão de 1A/seg.

6.17. INDUTÂNCIA MÚTUA

Suponha que dois condutores sejam colocados lado a lado e uma corrente variável é feita passar por um deles. Se as linhas de força do campo magnético produzido pela corrente corta o outro condutor, aparecerá nele uma fem. O mesmo acontecerá se, ao invés de condutores, forem dois indutores colocados lado a lado. Este fenômeno é conhecido como indutância mútua. Este é o princípio de funcionamento de um dispositivo chamado transformador, de grande aplicação em circuitos elétricos e eletrônicos.

Dois indutores têm uma indutância mútua de 1H quando uma fem de 1V é induzida em um deles sempre que a corrente no outro varia na razão de 1A/seg.

6.18. FATORES QUE DETERMINAM A AUTO-INDUTÂNCIA

Vários fatores podem influenciar na indutância de um condutor. Vemos a seguir a fórmula usada para se calcular a indutância de um indutor.

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot S}{\ell}$$

L = Auto indutância (Henry)

μ = Permeabilidade do meio em que é criado o campo magnético (H/m)

N = Número de espiras

S = Seção transversal do circuito magnético (m²)

ℓ = Comprimento do circuito magnético da bobina (m)

A fórmula acima nós fornece informações importantes, como por exemplo, quanto maior o número de espiras maior a indutância da bobina. Outra coisa importante a observar é que, quanto maior a seção transversal do núcleo, maior também será a indutância dele. O comprimento da bobina é inversamente proporcional a indutância, ou seja, quanto maior o comprimento da bobina, menor será a indutância dela e vice-versa. O meio em que o campo magnético é criado também influencia na indutância, uma bobina com núcleo de ar tem uma indutância menor que uma outra bobina idêntica, mas com núcleo de ferro. Isso ocorre porque o ferro tem uma permeabilidade magnética maior que a do ar.

6.19. SÍMBOLO DO INDUTOR

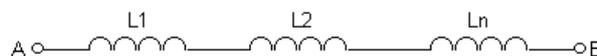
Como já foi dito anteriormente, o indutor é um solenóide ou bobina que foi projetado para fazer uso de sua indutância. Os indutores encontrados no mercado normalmente são especificados em mili Henry (mH) ou micro Henry (μ H). Sua utilização é bastante ampla em circuitos

elétricos e também eletrônicos, principalmente aqueles usados em telecomunicações.

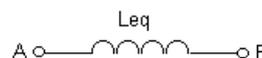


Assim como os resistores e capacitores, os indutores podem ser associados obtendo assim indutâncias equivalentes. As associações podem ser série, paralelo e mista.

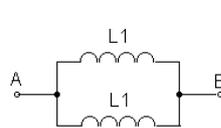
6.19. ASSOCIAÇÃO DE INDUTORES EM SÉRIE



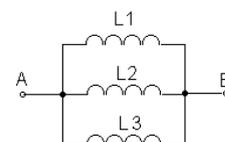
$$L_{eq} = L1 + L2 + Ln$$



6.20. ASSOCIAÇÃO DE INDUTORES EM PARALELO



$$L_{eq} = \frac{L1 \times L2}{L1 + L2}$$



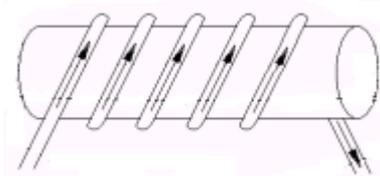
$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{L1} + \frac{1}{L2} + \frac{1}{L3}}$$



EXERCÍCIOS

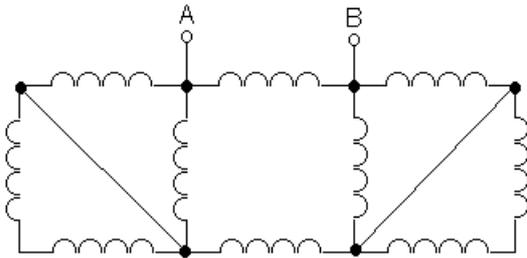
- O que é magnetismo e qual a sua principal característica?
- Quais as diversas classificações podem ser dadas a um ímã? Defina-as?
- Segundo a teoria dos domínios magnéticos, porque nem todas as substâncias são ímãs?
- Defina Imantação ou Magnetização.
- Como representamos graficamente um campo magnético?
- A que se atribui a origem do campo magnético da terra?
- O número de linhas de forças que atravessa uma área de seção transversal de 1cm² é chamada de:
 - Permeabilidade Magnética
 - Permeância Magnética
 - Relutância Magnética
 - Fluxo Magnético
 - Densidade de Fluxo Magnético
- Defina
 - Substâncias Ferromagnéticas
 - Substâncias Paramagnéticas
 - Substâncias Diamagnéticas
- Qual o significado de Eletromagnetismo?
- Qual a forma de um campo magnético em torno de um condutor percorrido por uma corrente elétrica?
- O que acontecerá se três condutores paralelos forem percorridos por uma corrente elétrica no mesmo sentido?

- 12) A que se assemelha o campo magnético produzido por um condutor enrolado em forma de espiras em torno de um núcleo de ferro?
- 13) Utilize a regra da mão esquerda para identificar os pólos norte e sul do solenóide abaixo.



- 14) O que é uma Força eletromotriz?
- 15) Descreva como a regra da mão esquerda é utilizada para definir o sentido da uma FEM em um condutor que se movimenta dentro de um campo magnético.
- 16) Quais os fatores que influenciam no cálculo de uma FEM?
- 17) O que é indutância? Quando ela se manifesta?
- 18) Qual o enunciado da Lei de Lenz ?
- 19) Defina:
- Auto-Indutância
 - Indutância-Mútua
- 20) Quais os fatores que influenciam na indutância?
- 21) Dado o circuito abaixo, calcule a Leq entre os pontos A e B?

Obs - Todos de $50\mu\text{H}$.

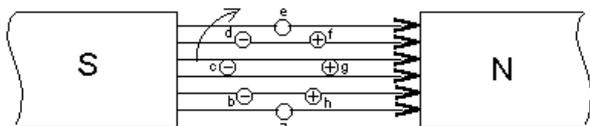


Geração de Uma Tensão Alternada Senoidal

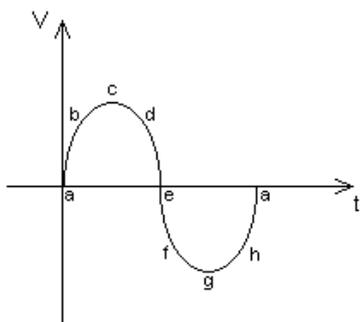
Já vimos que o valor instantâneo de uma FEM induzida em um condutor que se movimenta dentro de um campo magnético com densidade de fluxo magnético constante, com velocidade constante e com o comprimento (do condutor) submetido ao campo constante, é dado por:

$$e = V_{max} \cdot \text{Sen } \alpha$$

Sendo V_{max} constante, o valor instantâneo da FEM induzida no condutor dependerá do seno do ângulo formado entre o sentido do movimento do condutor com relação ao sentido do campo magnético.

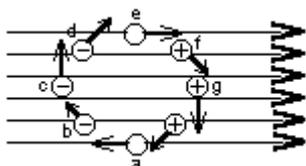


Se o condutor efetuar um movimento circular dentro do campo magnético, como mostra a figura anterior, onde se vê apenas as extremidades do condutor, a FEM induzida no condutor terá a forma mostrada na figura a seguir:

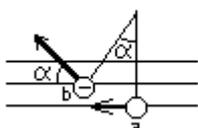


Observe que a FEM será nula nos pontos A e E. A DDP atingira o valor máximo nos pontos C e G. A tensão nos pontos B, D, F e H terão um valor instantâneo intermediário.

A figura a seguir mostra o sentido do movimento do condutor com relação ao sentido do campo magnético em cada um dos pontos.



Se analisarmos atentamente a figura anterior veremos que o ângulo α , que é o ângulo formado entre o sentido do movimento do condutor naquele ponto e o sentido do campo magnético é igual ao ângulo formado entre o ponto A e o ponto em questão, tomando como referência o centro da circunferência descrita pelo movimento circular do condutor. A figura a seguir mostra graficamente o que foi descrito neste parágrafo.



É muito mais conveniente considerar este novo ângulo, principalmente porque ele corresponde ao arco descrito pelo condutor a partir do ponto A. O valor deste arco (ou ângulo) é facilmente determinado sendo conhecida a velocidade angular do condutor.

$$\alpha = W \cdot t$$

α = ângulo descrito pelo condutor a partir do ponto A

W = Velocidade angular

t = Tempo

Diante do exposto, podemos representar o valor instantâneo da FEM no condutor pela fórmula a seguir:

$$e = E_{max} \cdot W \cdot t$$

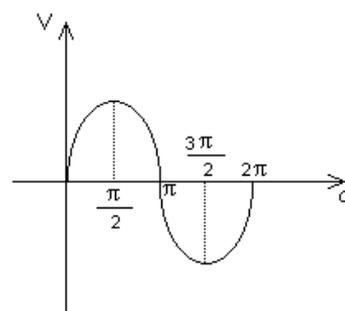
e = Valor instantâneo da FEM induzida no condutor

E_{max} = Valor máximo da FEM

W = Velocidade angular

t = Tempo

A figura a seguir mostra a FEM induzida no condutor em função do ângulo descrito pelo condutor a partir do ponto A, em radianos.



Observe na figura que o gráfico da FEM induzida no condutor é idêntica ao gráfico da função seno. Por este motivo ela é chamada de tensão alternada senoidal.

7.1. CICLO

Para cada volta completa do condutor é produzido um ciclo de tensão, que é representado por todos os valores instantâneos da FEM correspondentes a uma volta completa.

Um ciclo é composto por dois semiciclos, um positivo e outro negativo. Os semiciclos positivo e negativo estão diretamente relacionados com a mudança de polaridade que ocorre na FEM induzida no condutor devido a mudança no sentido do movimento do condutor a partir da segunda metade de uma volta completa. Desta forma, o semiciclo positivo é composto por todos os valores positivos de tensão, enquanto que o semiciclo negativo é composto por todos os valores negativos.

7.2. FREQUÊNCIA (f)

É o número de ciclos produzidos em cada segundo. A frequência é o inverso do período (T). Período é o tempo gasto para se completar um ciclo, ou seja, é o tempo gasto pelo condutor para descrever uma volta completa. A unidade de frequência é o hertz (Hz) e a unidade do período é o segundo.

$$f = 1 / T$$

f = frequência (Hertz)

T = Período (Segundo)

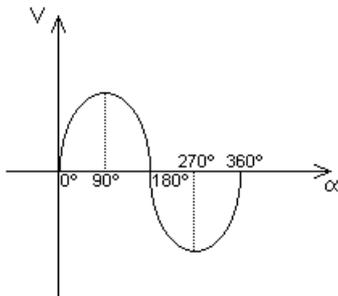
7.3. GRAU ELÉTRICO DE TEMPO

O início deste capítulo descreveu a produção de uma tensão alternada senoidal (CA) utilizando um ímã de dois pólos. Esta, porém, não é a única forma de se produzir uma tensão CA. Em outras palavras, mais pólos podem ser utilizados para produzir o campo magnético no qual o condutor irá se movimentar. Isto significa que quando são utilizados mais de dois pólos, o condutor poderá produzir mais de um ciclo em apenas uma

volta descrita. Sendo assim, não é prático indicar os valores dos ângulos descritos pelo condutor, mas sim o grau elétrico.

O grau elétrico corresponde a 1/360 do período, independente de quantos ângulos o condutor precisará descrever para completar um ciclo de tensão. Deste modo, um ciclo será sempre realizado em 360 graus elétricos, sendo os valores da tensão CA sempre referidos em graus elétricos.

Deste modo, a tensão será sempre nula nos pontos 0°, 180° e 360° elétricos, e o tempo correspondente a um grau elétrico será sempre igual a T/360. A figura a seguir mostra o gráfico de uma tensão CA em função do grau elétrico de tempo.



abemos que um ciclo é produzido em 360° elétricos. Da mesma forma, sabemos que a velocidade angular é dada pela fórmula:

$$W = \alpha / t$$

W = Velocidade angular

α = graus elétricos

t = tempo

O tempo correspondente a 360° elétricos é o período. Sendo assim:

$$W = 360 / T$$

Substituindo T por 1 / F, teremos:

$$W = 360 / (1/f)$$

Representadno graus elétricos em radianos, teremos:

$$W = 2 \pi / (1/f) \quad \text{ou} \quad W = 2 \pi f$$

Sendo assim, as quações para determinação dos valores instantâneos de uma tensão ou corrente alternada senoidal serão:

$$e = V_{max} \cdot \text{sen } 2 \pi f$$

$$i = I_{max} \cdot \text{sen } 2 \pi f$$

7.4. FONTE DE TENSÃO CA

Mais de 95% da energia consumida no mundo é produzida a partir do magnetismo, da forma como foi descrita no início deste capítulo. Claro que com os devidos aperfeiçoamentos exigidos. A figura a seguir mostra o símbolo de uma fonte de tensão alternada senoidal. O número de ciclos sproduzidos a cadaq segundo dependerá da freqüência da tensão gerada. Esta é a energia utilizada em nossas casas para fazer funcionar os aparelhos eletrodomésticos como televisão, geladeira, ar condicionado etc.



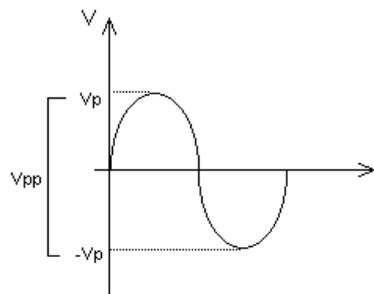
7.5. VALORES DA TENSÃO ALTERNADA SENOIDAL

Existem várias formas de se representar numericamente uma tensão alternada senoidal. Estes são:

- Valor de pico
- Valor de pico a pico
- Valor eficaz

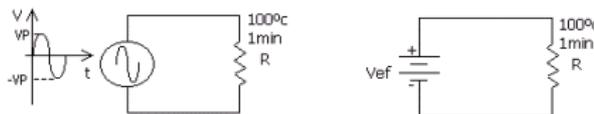
Valor de pico(VP) --> É o valor máximo (Emax) atingido pela senoide A tensão atinge o valor de pico uma vez a cada semiciclo.

Valor de pico a pico(VPP) --> É o dobro do valor de pico. É a faixa de tensão entre o pico positivo e o pico negativo.



$$VPP = 2 \cdot VP$$

Valor eficaz(Vef) --> É o valor que a tensão alternada deveria ter se fosse contínua, para produzir a mesma quantidade de calor. Suponha que ligamos uma fonte de tensão alternada aos terminais de um resistor durante um minuto, levando o mesmo se aquecer a 100°. O valor de tensão contínua aplicada ao mesmo resistor, durante o mesmo tempo, fazendo com que ele se aqueça com a mesma temperatura, é o valor eficaz daquela tensão alternada senoidal.



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

EXEMPLOS

A) Qual o período de uma tensão alternada senoidal com uma freqüência de 60Hz?

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

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{60} = 16,67 \text{ mSeg}$$

B) Quais os valores de pico a pico e eficaz de uma tensão alternada senoidal, que tem um valor de pico de 180v?

$$V_{ef} = \frac{180}{\sqrt{2}} = 127,65 \text{ v}$$

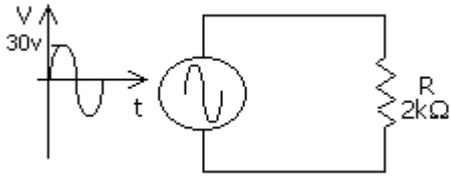
$$V_{pp} = 2 \cdot 180 = 360 \text{ v}$$

EXERCÍCIOS

1) Se uma tensão alternada tem um valor eficaz de 150v, quais os seus valores de pico e de pico a pico?

2) Dado o circuito abaixo, calcule:

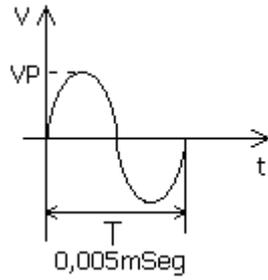
- a) V_{ef} no resistor?
- b) V_{pp} no resistor?
- c) Corrente eficaz?



3) tendo uma tensão alternada senoidal um valor de pico a pico de 250v, calcule:

- a) V_{ef} ?
- b) V_p ?

4) Qual a frequência da tensão alternada abaixo?



Circuitos de Corrente Alternada

8.1. ÂNGULO DE DEFASAGEM

Antes de começarmos a falar sobre circuitos acionados por uma tensão alternada temos de conhecer a relação de fase existente entre duas ou mais tensões ou correntes CA de mesma frequência.

A fórmula a seguir mostra como calcular o valor instantâneo de uma tensão CA levando em conta o seu ângulo de defasagem, representado na fórmula por θ .

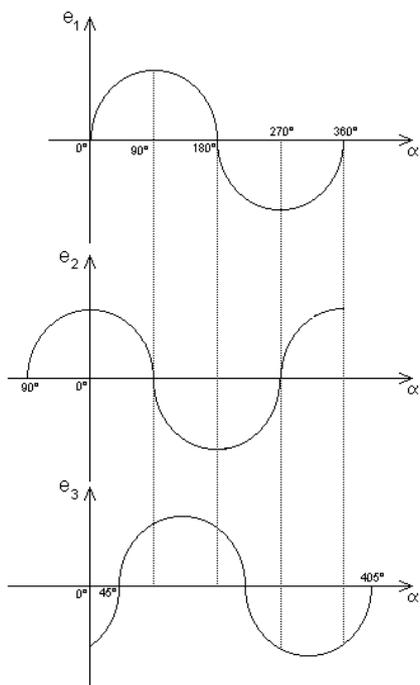
$$e = V_p \cdot \text{sen}(2 \pi f t + \theta)$$

Para exemplificar, vejamos as tensões a seguir.

$$e_1 = 100 \cdot \text{sen } 377t$$

$$e_2 = 100 \cdot \text{sen}(377t + 90^\circ)$$

$$e_3 = 100 \cdot \text{sen}(377t - 45^\circ)$$



e_2 está adiantada com relação a e_1 em 90° . Isto significa que todos os valores instantâneos de e_2 são atingidos 90° elétricos antes de e_1 . Quando o ciclo de e_1 tem início, e_2 já está no valor máximo positivo (V_p). Quando e_1 atinge o valor máximo, e_2 já terminou o semiciclo positivo e assim sucessivamente.

e_3 está atrasada 45° em relação a e_1 . conclui-se que todos os valores instantâneos atingidos por e_3 se darão com um atraso de 45° com relação a e_1 .

Para que seja observado a relação de fase entre tensões e correntes alternadas é necessário que elas tenham a mesma frequência.

EXERCÍCIOS

1) Represente graficamente as seguintes tensões:

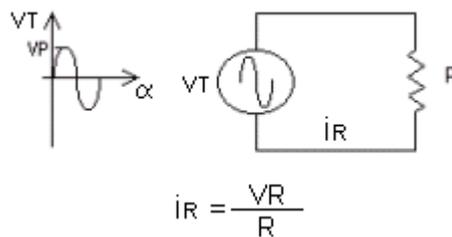
$$e_1 = 180 \cdot \text{sen } 377t$$

$$e_2 = 120 \cdot \text{sen}(377t - 90^\circ)$$

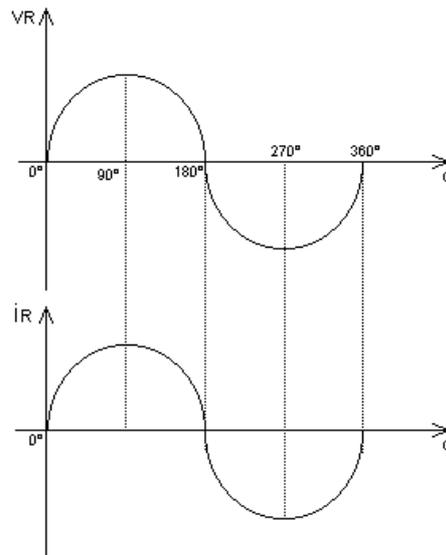
$$e_3 = 100 \cdot \text{sen}(377t + 180^\circ)$$

8.2. RESPOSTA SENOIDAL EM UM RESISTOR

Devido ao fato do resistor ser um componente ôhmico, a tensão em cima dele estará sempre em fase com a corrente que passa por ele. A figura a seguir mostra um resistor sendo acionado por uma tensão CA.

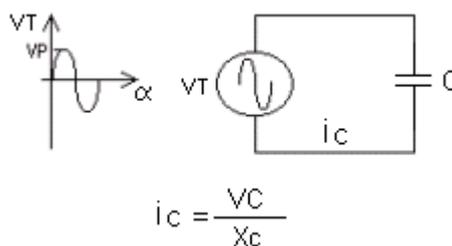


Observe que a corrente tem a mesma forma da tensão em cima do resistor, estando ambas em fase.



8.3. RESPOSTA SENOIDAL EM UM CAPACITOR

Quando um capacitor é alimentado por uma tensão alternada senoidal, a corrente que passa por ele estará adiantada em 90° elétricos em relação a tensão em cima dele. A figura a seguir mostra um capacitor sendo acionado por uma tensão CA.



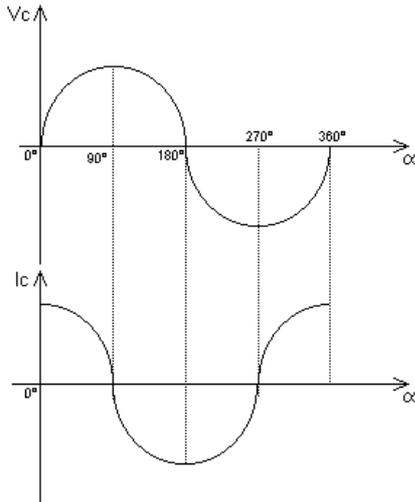
i_c = Intensidade de corrente elétrica (eficaz ou de pico)
 V_c = Tensão no capacitor (eficaz ou de pico)
 X_c = Reatância Capacitiva

A Reatância Capacitiva é a oposição que um capacitor oferece a passagem da corrente alternada devido a sua capacitância. Quanto maior a frequência da tensão de entrada, menor a reatância capacitiva.

$$X_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$$

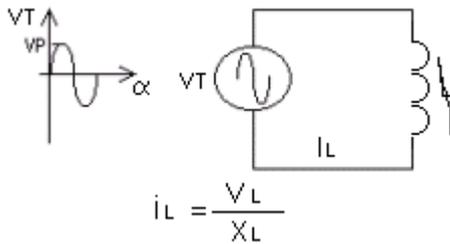
X_c = Reatância capacitiva
 f = Frequência
 C = Capacitância
 $\pi = 3,14$

Observe que a corrente no capacitor tem a mesma forma que a tensão, estando, porém, adiantada em 90° elétricos em relação a tensão em cima dele.



8.4. RESPOSTA SENOIDAL EM UM INDUTOR

Quando o indutor é alimentado por uma tensão alternada, a corrente que passa por ele estará atrasada em 90° elétricos em relação a tensão em cima dele. A figura a seguir mostra um indutor sendo acionado por uma tensão CA.



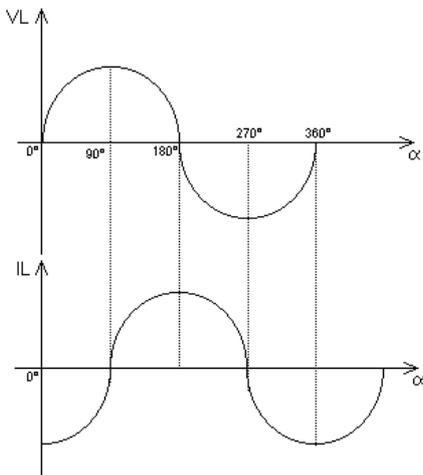
I_c = Intensidade de corrente elétrica (eficaz ou de pico)
 V_c = Tensão no capacitor (eficaz ou de pico)
 X_L = Reatância Indutiva

A Reatância Indutiva é a oposição que um indutor oferece a passagem da corrente alternada devido a sua indutância. Quanto maior a frequência da tensão de entrada, maior a reatância indutiva.

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

X_L = Reatância capacitiva
 f = Frequência
 L = Indutância
 $\pi = 3,14$

Observe que a corrente no indutor tem a mesma forma que a tensão, estando, porém, atrasada em 90° elétricos em relação a tensão em cima dele.



8.5. NÚMEROS COMPLEXOS

No século XVI, vários matemáticos realizaram progressos no estudo das raízes de números negativos. Dentre eles podemos citar os matemáticos Cardano e Bombelli. Dois séculos depois, estes estudos foram ampliados por Wesses, Argand e Gauss, que passaram a ser considerados os criadores da teoria dos números complexos. Os números complexos permitiram a resolução de equações envolvendo raiz quadrada de números negativos, antes sem solução. Os números complexos são utilizados na análise de circuitos de corrente alternada, como veremos mais adiante neste capítulo.

8.6. FORMA ALGÉBRICA OU BINÔMIA

Um número complexo é composto por uma parte real e uma parte imaginária, sendo representado na forma algébrica como mostrado a seguir.

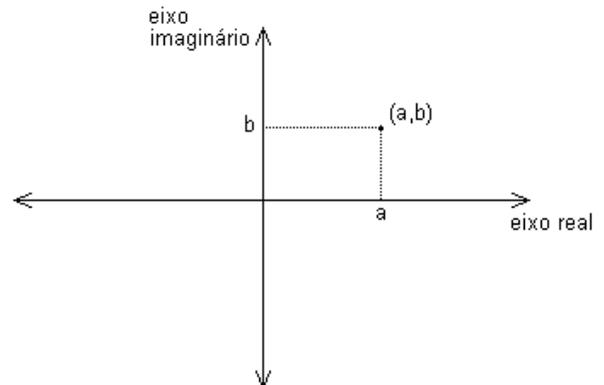
$$Z = a + bJ$$

a = parte real
 b = parte imaginária
 $J = \sqrt{-1}$

Como $J = \sqrt{-1}$, podemos afirmar que:

$$\begin{aligned} J^0 &= 1 \\ J^1 &= J \\ J^2 &= -1 \\ J^3 &= -J \end{aligned}$$

Um número complexo pode ser representado no plano cartesiano, estando a parte real ocupando o eixo horizontal e a parte imaginária ocupando o eixo vertical, como mostra a figura a seguir. O plano cartesiano utilizado para representar um número complexo é chamado de Plano de Argand Gauss.



a = parte real
 b = parte imaginária
 (a, b) = afixo
 $Z = a + bJ$

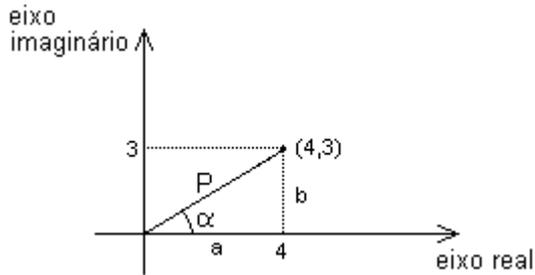
EXERCÍCIO

2) Represente no plano cartesiano os números complexos a seguir:

- a) $Z = 2 + 4J$
- b) $Z = -3 + 2J$
- c) $Z = 5 - J$
- d) $Z = -3J$
- e) $Z = 4$

8.7. MÓDULO E ARGUMENTO DE UM NÚMERO COMPLEXO

O módulo de um número complexo é a distância entre a origem e o afixo, enquanto que o argumento é o ângulo formado entre o módulo e o eixo real positivo medido no sentido anti-horário. Vamos representar no plano de Argand Gauss o número complexo $Z = 4 + 3J$.



Observe que foi formado um triângulo retângulo, sendo o módulo P a hipotenusa, **b** o cateto oposto e **a** o cateto adjacente. Sendo assim, pode-se utilizar o teorema de Pitágoras para calcular o módulo do número complexo $Z = 4 + 3j$.

$$P = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$P = \sqrt{4^2 + 3^2}$$

$$P = \sqrt{25}$$

$$P = 5$$

A trigonometria nos mostra que:

$$\text{sen } \alpha = b / P$$

$$\text{cos } \alpha = a / P$$

$$\text{tag } \alpha = \text{cos } \alpha / \text{sen } \alpha$$

$$\text{tag } \alpha = b/a$$

Sendo assim,

$$\alpha = \text{arc tg } b / a$$

$$\alpha \text{ arc tg } = 3/4$$

$$\alpha = 36,86^\circ$$

8.8. FORMA POLAR OU TRIGONOMÉTRICA DE UM NÚMERO COMPLEXO

A forma algébrica não é a única maneira de representarmos um número complexo. Uma outra forma de representação muito utilizada é a forma Polar ou Trigonométrica.

$$Z = P (\text{cos } \alpha + \text{sen } \alpha j)$$

OU

$$Z = P \angle \alpha$$

Desta forma, o número complexo $Z = 4 + 3j$ será representado na forma polar como:

$$Z = 5 \angle 36,86^\circ$$

Diante do exposto, podemos afirmar que:

$$a = p \cdot \text{cos } \alpha = 5 \cdot \text{cos } 36,86^\circ = 4$$

$$b = P \text{sen } \alpha = 5 \cdot \text{sen } 36,86^\circ = 3$$

EXERCÍCIOS

3) Converta os números complexos a seguir para a forma polar e depois para a forma algébrica.

- $5 + 6j$
- $-2 + 3j$
- $4j$
- 5
- $-3j$
- $-3 - 4j$
- $5 - 3j$

4) Efetue as operações a seguir:

- $(4 + 3j) + (5 + 4j) =$
- $(2 + 3j) + (5 - 2j) =$
- $(6 - 3j) - (4 + 2j) =$
- $6 - (4 + j) =$
- $(2 + 3j) \times (4 - 2j) =$
- $(5 + 4j) / (4 + 3j) =$
- $25 \angle 45^\circ \times 4 \angle 15^\circ =$
- $50 \angle 30^\circ / 10 \angle 12^\circ =$
- $16 \angle 60^\circ + 4 \angle 90^\circ =$
- $35 \angle 40^\circ - 10 \angle 15^\circ =$

8.9. FASOR

Vamos definir aqui fasor como sendo um número complexo associado a uma onda senoidal defasada, de modo que se ele estiver representado na forma polar, o módulo será o valor eficaz da tensão ou corrente e o argumento será o ângulo de defasagem.

EX.:

$$e = 180 \text{sen } (377t + 90^\circ)$$

Representando esta senoide na forma de um fasor, nós teremos:

$$e = 127 \angle 90^\circ$$

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

$$V_{\text{ef}} = 180 / 1,42$$

$$V_{\text{ef}} = 127V$$

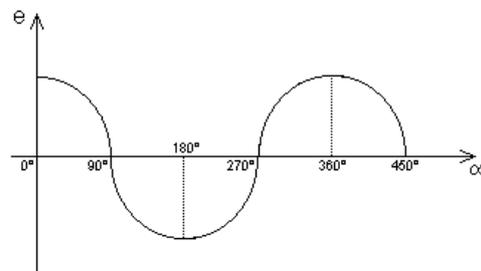
Na forma algébrica ela seria representada da seguinte forma:

$$a = 127 \text{cos } 90^\circ = 0$$

$$b = 127 \text{sen } 90^\circ = 127$$

$$e = 127j$$

Representando graficamente a senoide, nos teremos:



Como $2 \pi f = 377$, a frequência da senoide será:

$$f = 377 / 2 \cdot \pi$$

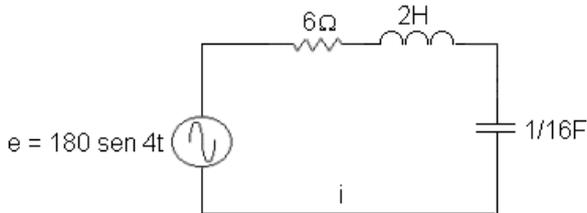
$$f = 60\text{Hz}$$

8.10 ANÁLISE DE UM CIRCUITO DE CORRENTE ALTERNADA

Uma das formas mais eficientes de se analisar um circuito de corrente alternada é converter o circuito no domínio do tempo para o domínio da frequência. A figura a seguir mostra um circuito CA série representado no domínio do tempo. Esta é a forma mais comum de se representar um circuito CA.

As características de tensão e corrente de um circuito série CC são válidas para um circuito série CA:

- A tensão se divide de forma que a soma das tensões nos componentes é igual a tensão da fonte;
- A corrente é a mesma em qualquer ponto do circuito.



Para converter o circuito acima para o domínio da frequência precisamos converter as tensões e correntes em fasores e representar as indutâncias e capacitâncias pelas respectivas reatâncias indutivas e capacitivas. A tabela a seguir mostra como isto é feito.

Domínio do tempo	Domínio da frequência
Tensão	$V_{ef} \angle \alpha$
Corrente	$i_{ef} \angle \alpha$
Resistência	$R + 0j$ ou $R \angle 0^\circ$
Indutância	$0 + XLj$ ou $XL \angle 90^\circ$
Capacitância	$0 - XcJ$ ou $Xc \angle -90^\circ$

Sendo assim,

$$XL = 2\pi f L$$

$$XL = 4 \cdot 2 = 8\Omega$$

$$XL = 8j\Omega \text{ ou } XL = 8 \angle 90^\circ\Omega$$

$$XC = 1 / (2\pi f C)$$

$$XC = 1 / (4 \cdot 0,0625) = 4\Omega$$

$$XC = -4j\Omega \text{ ou } XC = 4 \angle -90^\circ\Omega$$

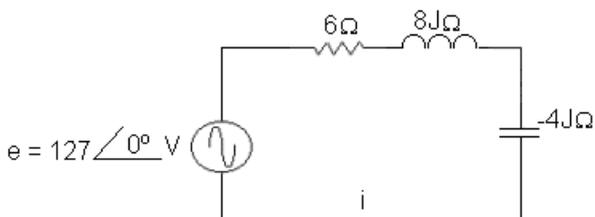
$$R = 6 + 0j\Omega \text{ ou } R = 6 \angle 0^\circ\Omega$$

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

$$V_{ef} = 180 / 1,42$$

$$V_{ef} = 127V$$

Agora nós podemos representar o circuito no domínio da frequência.



8.11. IMPEDÂNCIA (Z)

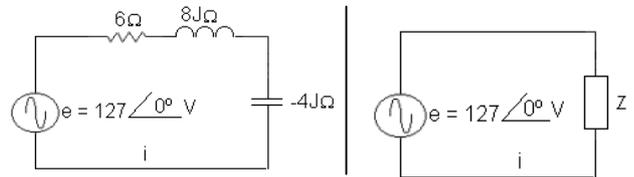
Impedância é a oposição total encontrada pela corrente alternada. A impedância está para a corrente alternada assim como a resistência está para a corrente contínua.

A impedância pode ser representada na forma de um número complexo, onde a parte real representa as resistências e a parte imaginária as reatâncias indutivas e capacitivas, como é mostrado a seguir.

$$Z = R + Xj$$

Z = Impedância
R = resistências
X = Reatâncias indutivas e capacitivas

Desta forma, o circuito anteriormente convertido para o domínio da frequência pode ser representado como mostrado a seguir:



$$Z = R + (XL + XC)j$$

$$Z = 6 + [8 + (-4)]j$$

$$Z = 6 + 4j\Omega \text{ ou } Z = 7,21 \angle 33,69^\circ\Omega$$

Observe que a tensão da fonte está sendo aplicada diretamente aos terminais da impedância, deste modo:

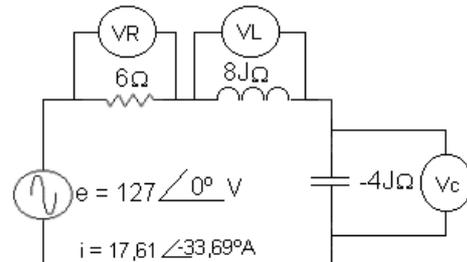
$$i = VT / Z$$

$$i = 127 \angle 0^\circ / 7,21 \angle 33,69^\circ$$

$$i = 17,61 \angle -33,69^\circ A$$

O resultado mostra duas coisas: o valor eficaz da corrente é 17,61A e o ângulo de defasagem dela com relação a tensão da fonte é $-33,69^\circ$. Em outras palavras, a corrente no circuito está atrasada em $33,69^\circ$ elétricos em relação a tensão da fonte.

Nós podemos agora calcular a tensão em cada componente do circuito, uma vez que a intensidade de corrente que passa por cada um deles é conhecida.



$$VR = R \times i$$

$$VR = 6 \angle 0^\circ \times 17,61 \angle -33,69^\circ$$

$$VR = 105 \angle -33,69^\circ V$$

$$VL = XL \times i$$

$$VL = 8 \angle 90^\circ \times 17,61 \angle -33,69^\circ$$

$$VL = 140,88 \angle +56,31^\circ V$$

$$VC = XC \times i$$

$$VC = 4 \angle -90^\circ \times 17,61 \angle -33,69^\circ$$

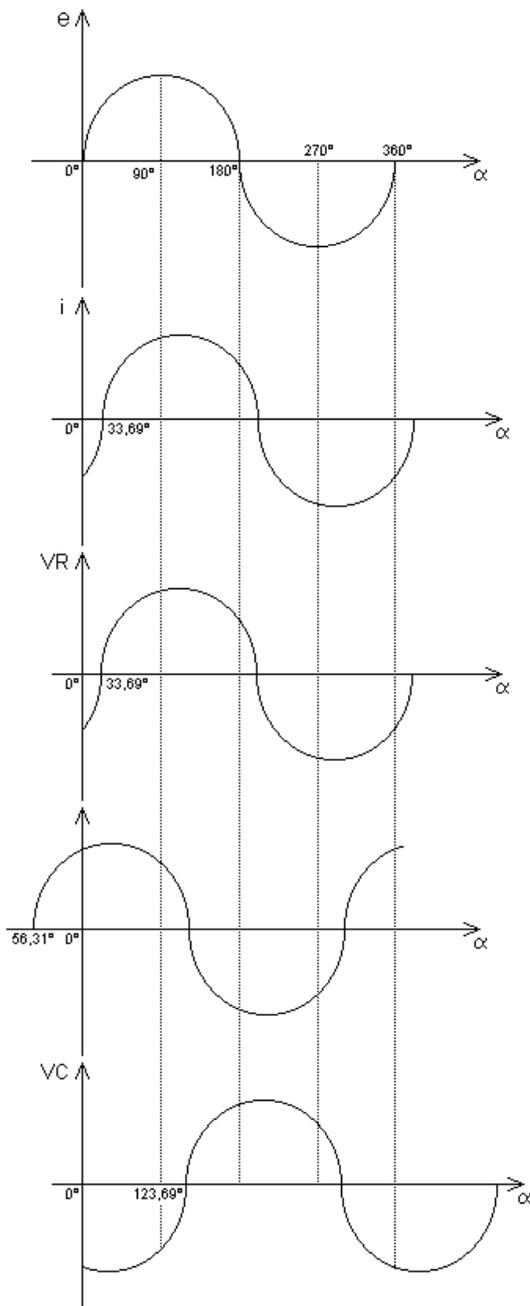
$$VC = 70,44 \angle -123,69^\circ V$$

Não esqueça de que o módulo é o valor eficaz e o argumento é o ângulo de defasagem em relação a tensão da fonte.

Observe que a soma dos valores eficazes das tensões no resistor, no capacitor e no indutor não é igual ao valor eficaz da tensão da fonte como determina a lei de Kirchhoff. Isto se deve ao fato de que existe um ângulo de defasagem entre elas. Sendo assim, a soma das tensões dos componentes do circuito deve incluir os respectivos ângulos de defasagem.

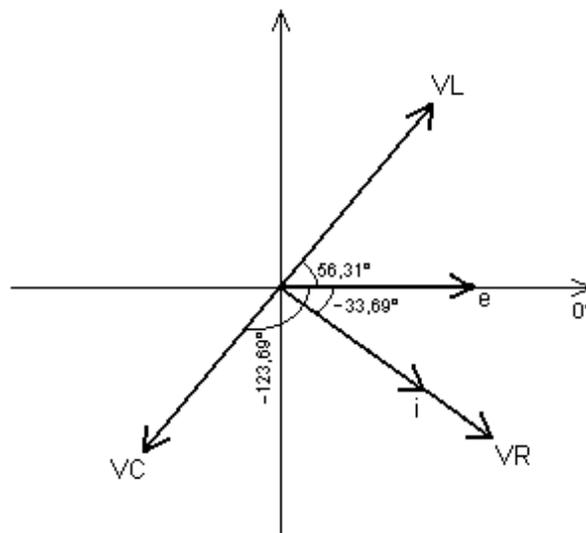
8.12. DIAGRAMA DE TEMPO

Vemos a seguir o diagrama de tempo das tensões e da corrente no circuito estudado. Observe que os ângulos de defasagem fazem com que os valores instantâneos do ciclo correspondente aos respectivos graus elétricos ocorram em tempos distintos.



8.13. DIAGRAMA DE FASORES

Uma outra forma de representarmos tensões e correntes CA é na forma de fasores. A figura a seguir mostra as tensões e corrente do circuito estudado, só que representados na forma de fasores utilizando o plano cartesiano, onde 0° é representado pelo eixo real positivo. Os ângulos positivos são contados a partir do eixo real positivo no sentido anti-horário e os ângulos negativos no sentido horário.



8.14. TIPOS DE CIRCUITOS

Levando em consideração o ângulo de defasagem entre a tensão da fonte e a corrente total de um circuito CA qualquer, podemos classificá-lo como:

- Circuito Resistivo
- Circuito Indutivo
- Circuito Capacitivo

Circuito Resistivo – Quando a tensão da fonte está em fase com a corrente total do circuito.

Circuito Indutivo – Quando a tensão da fonte está adiantada em relação a corrente total do circuito.

Circuito Capacitivo – Quando a tensão da fonte está atrasada em relação a corrente total do circuito.

8.15. PASSOS PARA ANÁLISE DE UM CIRCUITO CA

Agora nós temos todas as informações necessárias para analisarmos um circuito CA. Para isso devemos seguir os seguintes passos:

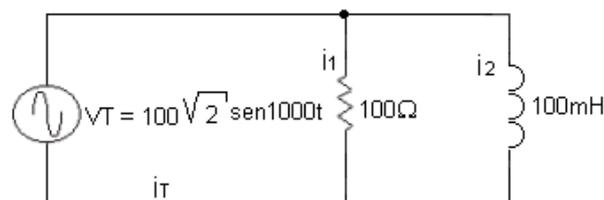
- 1 – Converter o circuito no domínio do tempo para o circuito no domínio da frequência;
- 2 – Calcular a impedância em todos os braços do circuito;
- 3 – Calcular as intensidades de corrente em cada braço e as tensões nos componentes que compõem o circuito;
- 4 – Utilizar o diagrama de tempo para representar as tensões e correntes;
- 5 – Utilizar o diagrama de fasores para representar as tensões e corrente.

8.16. CIRCUITO CA EM PARALELO

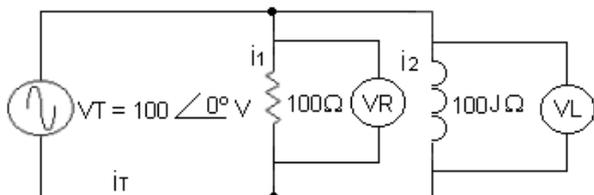
As características de tensão e corrente de um circuito em paralelo CC são válidas para um circuito CA:

- A tensão é a mesma;
- A corrente se divide.

Vejamos o circuito seguir:



Convertendo o circuito para o domínio da frequência:



$$V_{ef} = 100\sqrt{2} / \sqrt{2}$$

$$V_{ef} = 100V$$

$$V_T = 100 \angle 0^\circ V$$

$$R = 100 + 0j\Omega \text{ ou } R = 100 \angle 0^\circ \Omega$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$X_L = 1000 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 100\Omega$$

$$X_L = 0 + 100j\Omega \text{ ou } X_L = 100 \angle 90^\circ \Omega$$

Como o circuito está em paralelo:

$$V_T = V_R = V_L = 100 \angle 0^\circ V$$

Sendo assim:

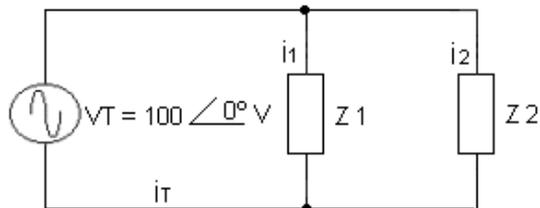
$$i_1 = V_T / R = 100 \angle 0^\circ / 100 \angle 0^\circ$$

$$i_1 = 1 \angle 0^\circ A \text{ ou } i_1 = 1 + 0jA$$

$$i_2 = V_T / X_L = 100 \angle 0^\circ / 100 \angle 90^\circ$$

$$i_2 = 1 \angle -90^\circ A \text{ ou } i_2 = -1jA$$

Calculando a impedância em cada braço do circuito:



$$Z_1 = 100 + 0j\Omega \text{ ou } Z_1 = 100 \angle 0^\circ \Omega$$

$$Z_2 = 0 + 100j\Omega \text{ ou } Z_2 = 100 \angle 90^\circ \Omega$$

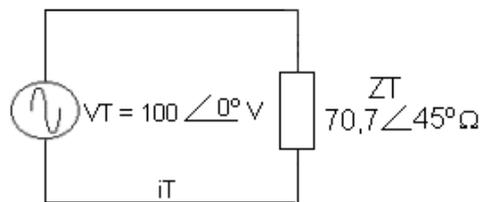
$$Z_T = \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$Z_T = \frac{100 \angle 0^\circ \times 100 \angle 90^\circ}{(100 + 0j) + (0 + 100j)}$$

$$Z_T = \frac{10000 \angle 90^\circ}{100 + 100j}$$

$$Z_T = \frac{10000 \angle 90^\circ}{141,42 \angle 45^\circ}$$

$$Z_T = 70,7 \angle 45^\circ \Omega$$



$$i_T = V_T / Z_T$$

$$i_T = 100 \angle 0^\circ / 70,7 \angle 45^\circ$$

$$i_T = 1,41 \angle -45^\circ A$$

A corrente i_T pode também ser calculada da seguinte forma:

$$i_T = i_1 + i_2$$

$$i_T = (1 + 0j) + (0 - 1j)$$

$$i_T = 1 - 1j \text{ ou } i_T = 1,41 \angle -45^\circ A$$

O circuito é indutivo devido ao fato de que a corrente total está atrasada em relação a tensão da fonte.

Diagrama de tempo:

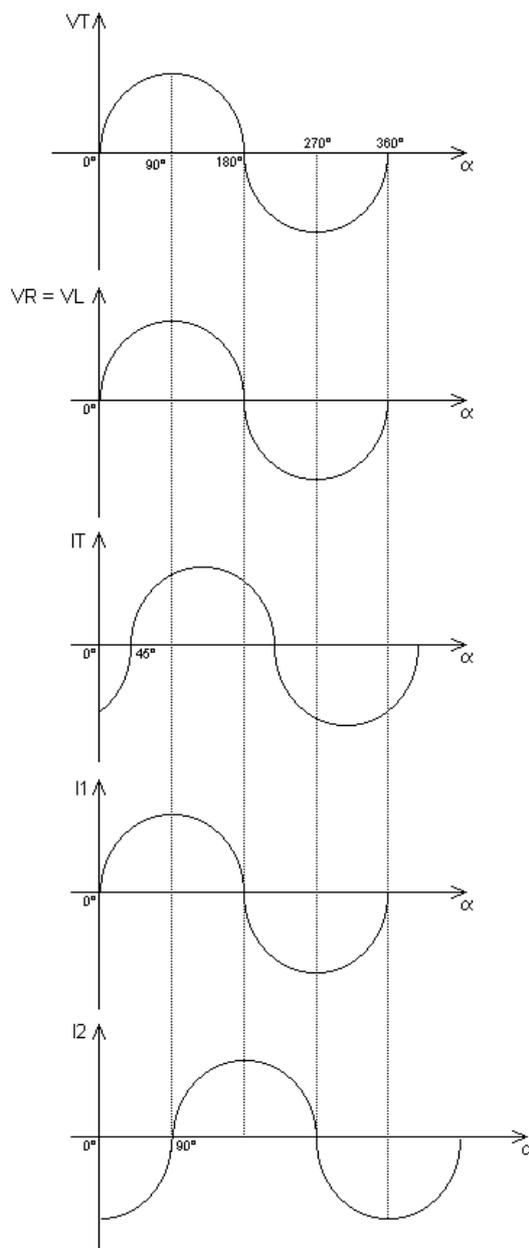
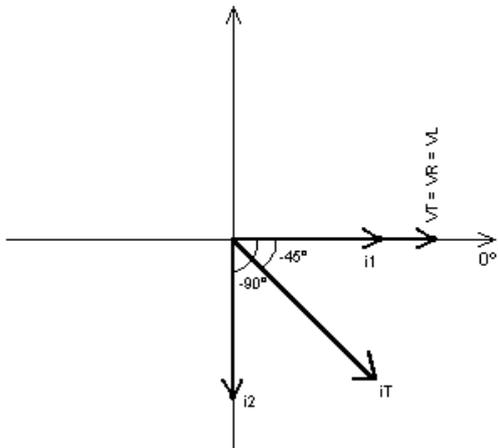
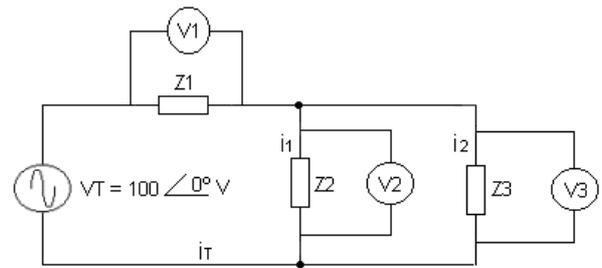


Diagrama de fasores:



Calculando a impedância em cada braço do circuito:

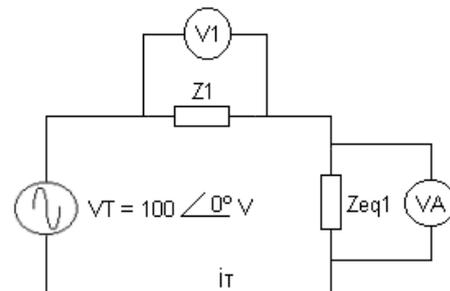


$$Z_1 = +50\text{J}\Omega \text{ ou } 50 \angle 90^\circ \Omega$$

$$Z_2 = 100\Omega \text{ ou } 100 \angle 0^\circ \Omega$$

$$Z_3 = -100\text{J}\Omega \text{ ou } 100 \angle -90^\circ \Omega$$

Calculando a Z_{eq} entre Z_2 e Z_3 :



$$Z_{eq1} = \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$Z_{eq1} = \frac{100 \angle 0^\circ \times 100 \angle 90^\circ}{(100 + 0\text{J}) + (0 - 100\text{J})}$$

$$Z_{eq1} = \frac{10000 \angle -90^\circ}{100 - 100\text{J}}$$

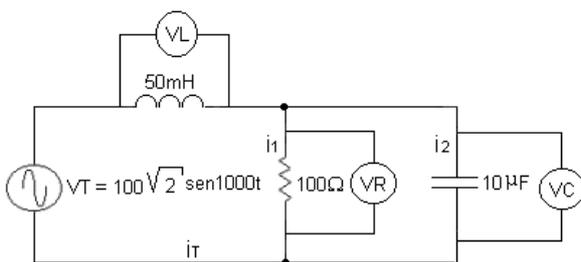
$$Z_{eq1} = \frac{10000 \angle -90^\circ}{141,42 \angle -45^\circ}$$

$$Z_{eq1} = 70,7 \angle -45^\circ \Omega$$

ou

$$Z_{eq1} = 50 - 50\text{J}\Omega$$

8.17. CIRCUITO CA MISTO



Convertendo o circuito para o domínio da frequência:

$$V_{ef} = 100\sqrt{2} / \sqrt{2}$$

$$V_{ef} = 100\text{V}$$

$$V_T = 100 \angle 0^\circ \text{V}$$

$$R = 100 + 0\text{J}\Omega \text{ ou } R = 100 \angle 0^\circ \Omega$$

$$X_L = 2\pi f L$$

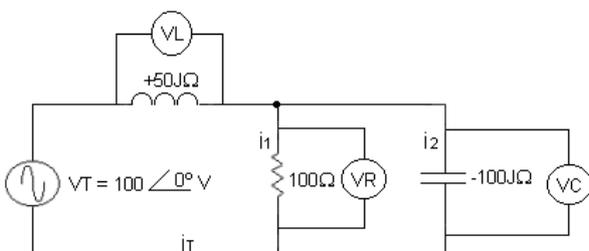
$$X_L = 1000 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 50\Omega$$

$$X_L = 0 + 50\text{J}\Omega \text{ ou } X_L = 50 \angle 90^\circ \Omega$$

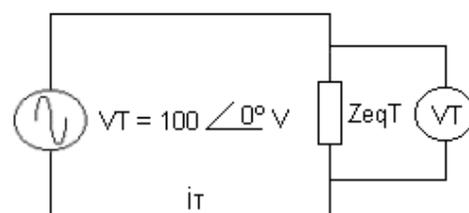
$$X_C = 1 / (2\pi f C)$$

$$X_C = 1 / (1000 \cdot 10\mu) = 100\Omega$$

$$X_C = -100\text{J}\Omega \text{ ou } X_C = 100 \angle -90^\circ \Omega$$



Calculando Z_{eqT} :



$$Z_{eqT} = Z_1 + Z_{eq1}$$

$$Z_{eqT} = (0 + 50\text{J}) + (50 - 50\text{J})$$

$$Z_{eqT} = 50 + 0\text{J}\Omega \text{ ou } 50 \angle 0^\circ \Omega$$

Calculando i_T e V_A :

$$i_T = V_T / Z_{eqT}$$

$$i_T = 100 \angle 0^\circ / 50 \angle 0^\circ$$

$$i_T = 2 \angle 0^\circ A$$

O circuito é resistivo devido ao fato de que a corrente total está em fase com a tensão da fonte

$$V_A = i_T \times Z_{eq1}$$

$$V_A = 2 \angle 0^\circ \times 70,7 \angle -45^\circ$$

$$V_A = 141,4 \angle -45^\circ V$$

Devido ao fato de que Z_2 e Z_3 estarem em paralelo e terem dado origem a Z_{eq1} :

$$V_A = V_2 = V_3 = 141,4 \angle -45^\circ V$$

Calculando i_1 e i_2 :

$$i_1 = V_2 / Z_2$$

$$i_1 = 141,4 \angle -45^\circ / 100 \angle 0^\circ$$

$$i_1 = 1,41 \angle -45^\circ A$$

$$i_2 = V_3 / Z_3$$

$$i_2 = 141,4 \angle -45^\circ / 100 \angle -90^\circ$$

$$i_2 = 1,41 \angle 45^\circ A$$

Calculando as tensões nos componentes do circuito:

$$V_L = i_T \times X_L$$

$$V_L = 2 \angle 0^\circ \times 50 \angle 90^\circ$$

$$V_L = 100 \angle 90^\circ V$$

$$V_R = i_1 \times R$$

$$V_R = 1,41 \angle -45^\circ \times 100 \angle 0^\circ$$

$$V_R = 141 \angle -45^\circ V$$

$$V_C = i_2 \times X_C$$

$$V_C = 1,41 \angle 45^\circ \times 100 \angle -90^\circ$$

$$V_C = 141 \angle -45^\circ V$$

Diagrama de fasores:

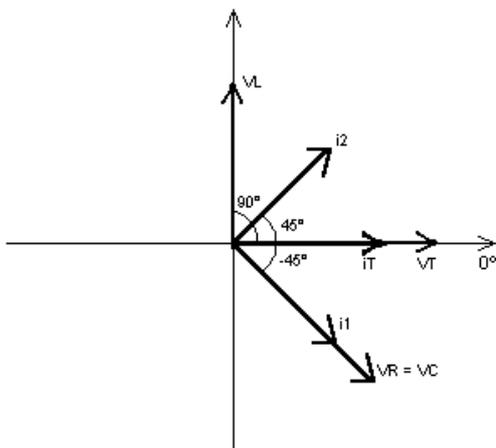
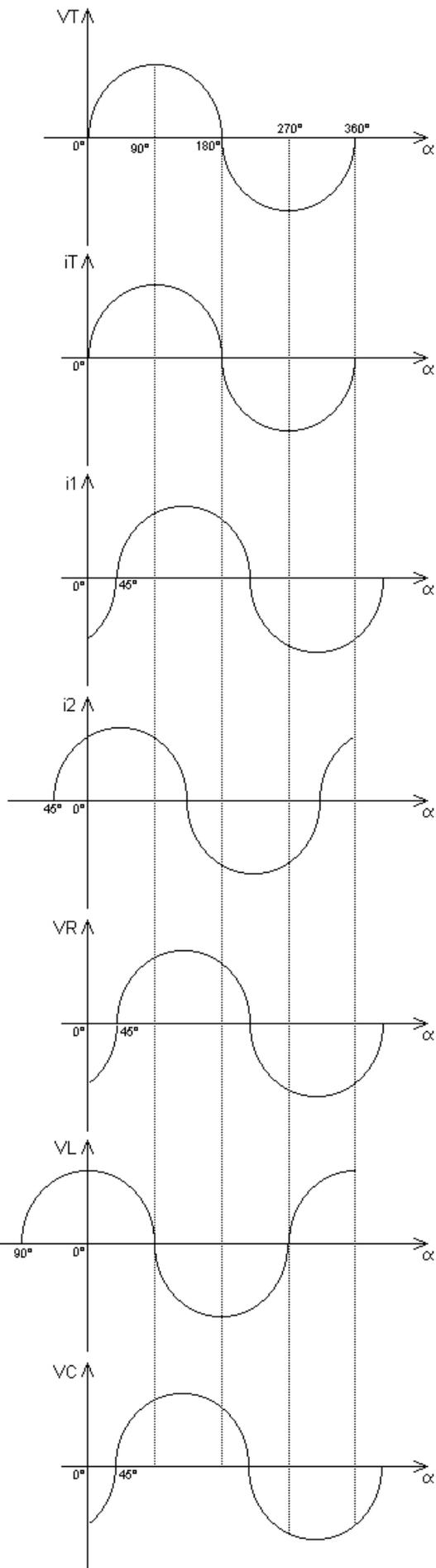


Diagrama de tempo:

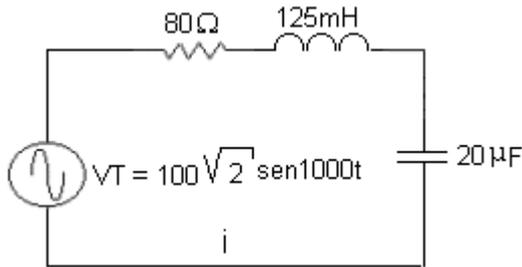


EXERCÍCIOS

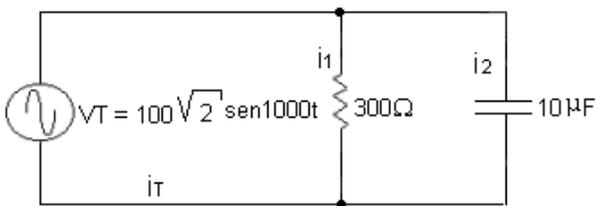
5) Dado os circuitos a seguir, calcule:

- a) Intensidade de corrente em cada braço
- b) Tensão em cada componente do circuito
- c) Diagrama de tempo
- d) Diagrama de fasores
- e) Determine o tipo de circuito

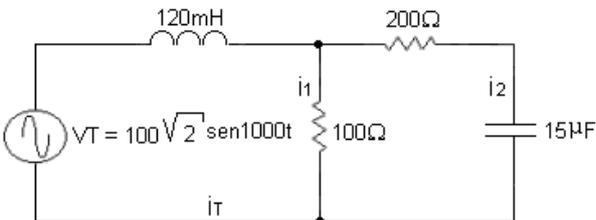
Circuito 1:



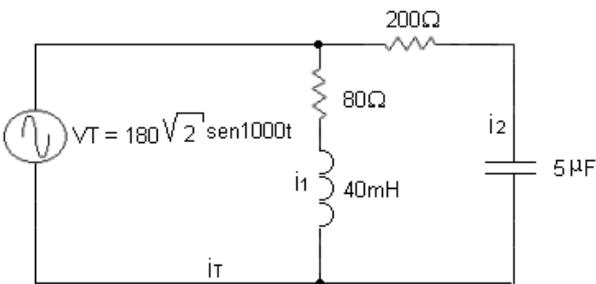
Circuito 2:



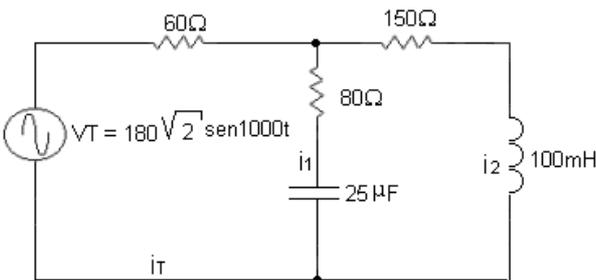
Circuito 3:



Circuito 4:



Circuito 5



Potência em Circuitos de Corrente Alternada

O cálculo da potência de um circuito de corrente alternada difere do cálculo de um circuito de corrente contínua. Três potências podem ser medidas em um circuito de corrente alternada: potência real, potência reativa e potência aparente.

9.1. POTÊNCIA REAL (P)

A potência real, também conhecida como potência média, é a potência que é absorvida pelas cargas resistivas do circuito e convertida em calor. Vemos a seguir a fórmula para o cálculo da potência real em um circuito CA.

$$P = V.I. \cos \theta \text{ (W)}$$

P = Potência Real

V = Tensão da fonte

I = Corrente total

θ = ângulo de defasagem entre a tensão da fonte e a corrente total. Este é o ângulo da impedância

$\cos \theta$ = Fator potência

9.2. POTÊNCIA REATIVA (Q)

Esta é a potência que é armazenada no campo magnético de um indutor, ou no campo elétrico de um capacitor. A potência reativa não é convertida em calor como a potência real, ela é devolvida ao circuito.

$$Q = V.I.\sin \theta \text{ (VAR)}$$

Q = Potência Reativa

V = Tensão da fonte

I = Corrente total

θ = ângulo de defasagem entre a tensão da fonte e a corrente total. Este é o ângulo da impedância

9.3. POTÊNCIA APARENTE (S)

Esta potência é o resultado do produto da tensão eficaz da fonte pela corrente eficaz total.

$$S = V.I \text{ (VA)}$$

S = Potência aparente

V = Tensão da fonte

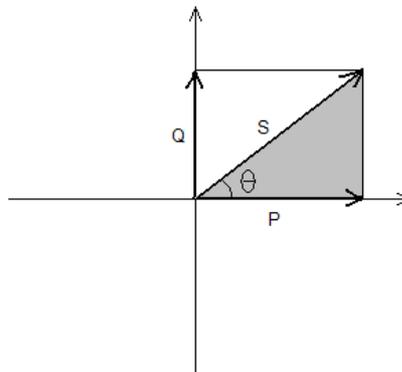
I = Corrente total

EXERCÍCIO

1) Calcule as potências real, reativa e aparente dos circuitos propostos do exercício 5 do capítulo 8.

9.4. TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS

As potências em um circuito CA podem ser representadas no plano cartesiano no que nós chamamos de triângulo das potências. A figura a seguir ilustra a ideia. Observe que a potência real é o cateto adjacente, a potência reativa o cateto oposto, a potência aparente a hipotenusa e o ângulo θ o ângulo da impedância. Veja também que as fórmulas da potências foram real, e reativa forma deduzidas do triângulo das potências.



9.5. CORREÇÃO DO FATOR POTÊNCIA

Quanto maior o ângulo de defasagem entre a tensão da fonte e a corrente total em um circuito de corrente alternada, maior será a intensidade de corrente que a fonte de tensão terá de fornecer ao circuito. Um parâmetro chamado fator de Potência nos coloca a par da situação. O fator de potência é o cosseno do ângulo da impedância, sendo adimensional.

$$FP = \cos \theta$$

FP = Fator potência

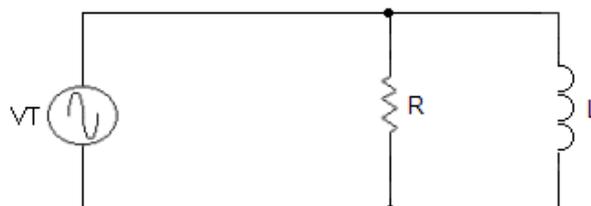
θ = Ângulo da impedância

Podemos afirmar que quanto menor o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, menor será o ângulo da impedância, maior será o fator potência e menor é a intensidade de corrente que a fonte tem de fornecer ao circuito.

Quando o circuito é puramente resistivo a corrente total está em fase com a tensão da fonte. Neste caso, como o ângulo de defasagem é 0° e o fator de potência é:

$$FP = \cos 0^\circ = 1$$

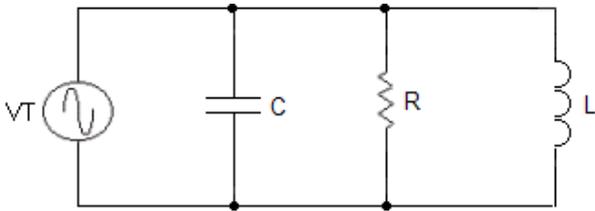
Não é muito comum, no entanto, encontrarmos circuitos puramente resistivos tanto em residências quanto em empresas, uma vez que a maior parte das cargas existentes são cargas indutivas. Veja a seguir o circuito equivalente típico em uma residência ou em uma empresa seja ou não ela de natureza industrial.



A resistência R representa as cargas resistivas como lâmpadas incandescentes, resistências elétricas etc. O indutor L representa as cargas indutivas como motores, geradores, máquinas etc.

Não é necessário efetuarmos cálculos para nos certificarmos de que o circuito acima é um circuito indutivo, estando a corrente total atrasada em relação a tensão da fonte. Sendo assim, o fator potência é menor que 1. Isto significa que a fonte terá de fornecer mais corrente do que o necessário ao circuito.

Para aumentar o fator potência do circuito e, conseqüentemente, reduzirmos a corrente total nós podemos introduzir capacitores em paralelo com a fonte de alimentação. Os capacitores irão fornecer a potência reativa consumida pela carga indutiva, aliviando a fonte desta tarefa. Como conseqüência a corrente fornecida pela fonte diminui. A figura a seguir ilustra a ideia.



O capacitor no circuito está funcionando como um elemento de correção do fator potência, uma vez que a sua presença fará com que o ângulo de defasagem entre a tensão da fonte e a corrente total diminua, fazendo com que aumente o fator potência. A questão é saber qual o valor do capacitor. Se o valor for muito alto corremos o risco de transformar o circuito em um circuito capacitivo, o que não resolverá o problema.

É possível aumentar o fator potência até a unidade, embora isto pode tornar-se uma solução pouco econômica. Existe uma legislação aplicada somente a empresas que as obriga a manter o fator potência acima de um determinado valor. No Rio de Janeiro, o valor mínimo do fator potência permitido para indústrias é de 0,92. A indústria que desrespeitar esta norma pagará uma salgada multa integrada a cada conta de luz, ou seja, é uma multa mensal.

O problema do fator potência pode ser resolvido, como já foi dito, com a inserção de capacitores em paralelo com a linha de alimentação. Uma forma de calcular o seu valor é apresentada a seguir.

- 1º - calcula-se o VAR gerado pelo indutor;
- 2º - Calcula-se o fator potência desejado;
- 3º - Calcula-se o VAR que deve ser gerado pelo capacitor para o fator potência desejado;
- 4º - Calcula-se o valor do capacitor para o VAR a ser gerado por ele.

VAR gerado pelo indutor:

$$Q_i = V_i \times I_i \times \sin \theta_i$$

Q_i = VAR gerado pelo indutor
 V_i = Tensão em cima do indutor
 I_i = Corrente no indutor
 θ_i = Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no indutor

Fator Potência desejado:

$$FP = 0,92 \text{ (exemplo)}$$

$$\theta_f = \cos^{-1} 0,92$$

$$\theta_f = 23,07^\circ$$

FP = Fator potência desejado
 θ_f = Ângulo de defasagem da impedância total para o FP desejado

VAR total do circuito para o FP desejado:

$$Q_f = P \operatorname{tg} \theta_f$$

Q_f = VAR total do circuito para o FP desejado
 P = Potência real
 θ_f = Ângulo de defasagem da impedância para o FP desejado

VAR a ser gerado pelo capacitor:

Q_f é o somatório das potências Q_i e Q_c . Como elas estão defasadas entre si de 180° , Q_f será igual a:

$$Q_f = Q_i - Q_c$$

Deduzindo Q_c na fórmula teremos:

$$Q_c = Q_i - Q_f$$

Q_c = VAR a ser gerado pelo capacitor
 Q_f = VAR gerado pelo indutor
 Q_i = VAR gerado pelo indutor

Calculo do capacitor para o FP desejado:

$$Q_c = V_c \cdot I_c \cdot \sin \theta_c$$

Como $I_c = V_c / X_c$,

$$Q_c = (V_c^2 / X_c) \cdot \sin \theta_c$$

Sendo $X_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$,

$$Q_c = V_c^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \sin \theta_c$$

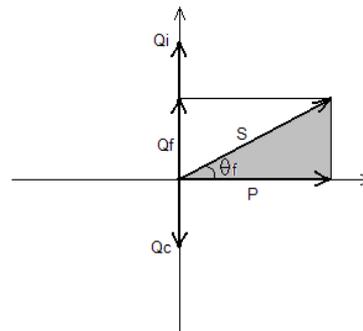
Deduzindo C na fórmula teremos que:

$$C = Q_c / (V_c^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin \theta_c)$$

C = Valor do capacitor
 V_c = Tensão no capacitor
 Q_c = VAR a ser gerado pelo capacitor
 $\pi = 3,14$
 f = Frequência da tensão de entrada
 θ_c = Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no capacitor

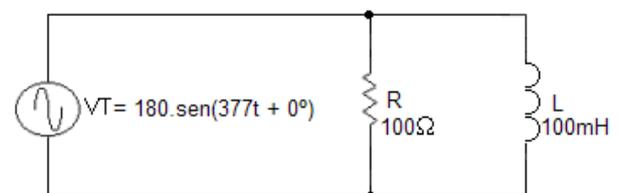
Obs.: Caso o cálculo do capacitor der um valor negativo, deve ser desprezado o sinal.

Vemos a seguir o triângulo das potências sendo utilizado para efetuarmos o cálculo do capacitor que fará a sua correção.

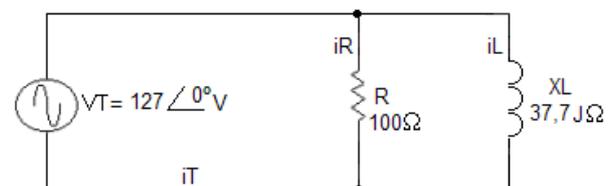


Exemplo:

Dado o circuito a seguir, calcule o valor do capacitor necessário para elevar o fator potência para 0,92.



Convertendo o circuito para o domínio da frequência



$$X_L = 37,7j\Omega \text{ ou } 37,7\angle 90^\circ\Omega$$

$$R = 100\Omega \text{ ou } 100\angle 0^\circ\Omega$$

$$i_R = V_T / R$$

$$i_R = 127\angle 0^\circ / 100\angle 0^\circ$$

$$i_R = 1,27\angle 0^\circ \text{ A ou } 1,27 \text{ A}$$

$$Z_T = R // X_L$$

$$Z_T = 100\angle 0^\circ \times 37,7\angle 90^\circ / (100 + 37,7j)$$

$$Z_T = 35,29\angle 69,4^\circ\Omega$$

$$\theta = 69,4^\circ$$

$$FP = 0,35$$

$$i_T = V_T / Z_T$$

$$i_T = 127\angle 0^\circ / 35,29\angle 69,4^\circ$$

$$i_T = 3,59\angle -69,4^\circ \text{ A}$$

$$i_L = V_T / X_L$$

$$i_L = 127\angle 0^\circ / 37,7\angle 90^\circ$$

$$i_L = 3,36\angle -90^\circ \text{ A ou } -3,36j \text{ A}$$

$$Q_i = V_L \cdot i_L \cdot \sin \theta$$

$$Q_i = 127 \cdot 3,36 \cdot \sin 90^\circ$$

$$Q_L = 427,8 \text{ VA}$$

$$P = V_T \cdot i_T \cdot \cos \theta$$

$$P = 127 \cdot 3,59 \cdot \cos 69,4^\circ$$

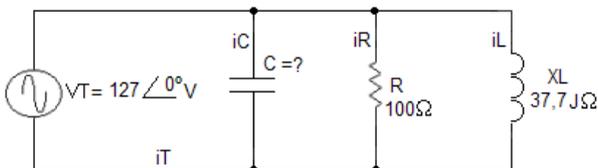
$$P = 160,4 \text{ W}$$

$$S = V_T \cdot i_T$$

$$S = 127 \cdot 3,59$$

$$S = 455,9 \text{ VAR}$$

Cálculo com o capacitor no circuito,



Fator potência desejado = 0,92

$$\theta_f = 23,07$$

$$Q_f = P \cdot \text{Tg } \theta_f$$

$$Q_f = 160,4 \cdot \text{Tg } 23,07$$

$$Q_f = 68,3 \text{ VAR}$$

$$Q_c = Q_i - Q_f$$

$$Q_c = 427,8 - 68,3$$

$$Q_c = 359,5 \text{ VAR}$$

$$C = Q_c / (V_c^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin \theta_c)$$

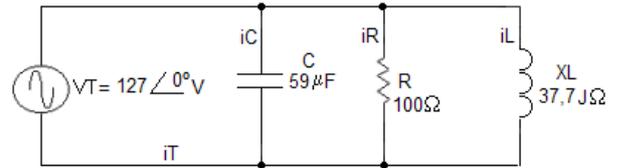
Como a tensão no capacitor é a própria tensão da fonte, cujo ângulo de defasagem é 0° , a corrente no capacitor está avançada 90° . Sendo θ_c o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no capacitor, $\theta_c = -90^\circ$. Sendo assim:

$$C = 359,5 / (127^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot \sin -90^\circ)$$

$$C = -59\mu\text{F} \text{ (desprezamos o sinal negativo)}$$

$$C = 59\mu\text{F}$$

Recalculando a corrente total teremos:



$$X_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$$

$$X_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 59\mu)$$

$$X_c = 44,49\Omega$$

$$X_c = 44,49j\Omega \text{ ou } 44,49\angle -90^\circ\Omega$$

$$i_c = V_T / X_c$$

$$i_c = 127\angle 0^\circ / 44,49\angle -90^\circ$$

$$i_c = 2,85\angle 90^\circ \text{ A ou } 2,85j \text{ A}$$

$$i_T = i_c + i_R + i_L$$

$$i_T = 1,27 - 3,36j + 2,85j$$

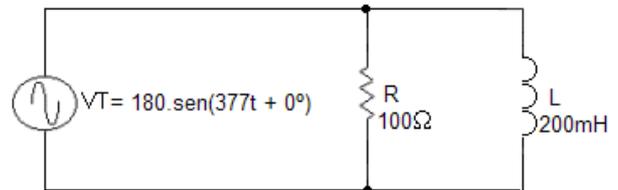
$$i_T = 1,27 - 0,51j \text{ A ou } 1,36\angle -21,8^\circ \text{ A}$$

Observe que a presença do capacitor no circuito fez com que a corrente total caísse para 1,36A. Isso aconteceu porque a maior parte da corrente necessária para acionar o indutor agora está sendo fornecida pelo capacitor, como já foi dito anteriormente.

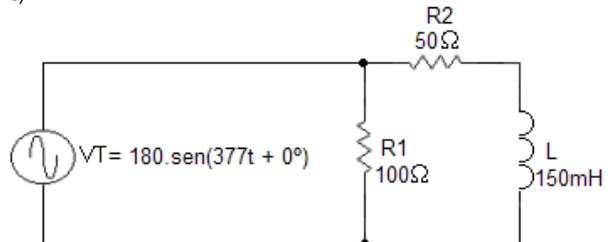
EXERCÍCIO

2) Dado os circuitos a seguir, calcule o valor do capacitor para elevar o fator potência para 0,95.

a)



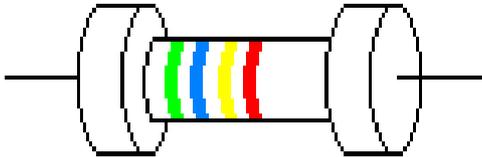
b)



Apêndice

CÓDIGO DE CORES

Normalmente os resistores têm indicados em seus corpos o valor de sua resistência, em decimal ou através de um código de cores, o qual é apresentado a seguir.



OBS ⇒ A primeira faixa é aquela que estiver mais próxima de um dos terminais do resistor.

Cores	1º faixa (valor significativo)	2º faixa (valor significativo)	3ª faixa Fator multiplicativo	4º faixa (tolerância)
Preto	0	0	X1	-
Marrom	1	1	X10	1%
Vermelho	2	2	X100	2%
Laranja	3	3	X1000	3%
Amarelo	4	4	X10000	4%
Verde	5	5	X100000	-
Azul	6	6	X1000000	-
Violeta	7	7	-	-
Cinza	8	8	-	-
Branco	9	9	-	-
Ouro	-	-	X0,1	5%
Prata	-	-	X0,01	10%
Sem cor	-	-	-	20%

Obs.: Quando o resistor tem 5 cores, a 3ª faixa também é valor significativo, assim como as 1ª e 2ª faixas nos resistores de quatro cores.

BIBLIOGRAFIA

GUSSOW, MILTON. *Eletricidade Básica*. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1985.

O'MALLEY, JHON. *Análise de Circuitos*. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1983.

EDMINISTER, JOSEP A. *Circuitos Elétricos, 2ª edição*. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1985.

CAVALCANTI, PAULO JOÃO MENDES. *Eletrotécnica - para Técnicos em Eletrônica, 12ª edição*. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1980.

RAMALHO, NICOLAU e TOLEDO. *Fundamentos da Física 3 - Eletricidade, 6ª edição*. São Paulo: Editora Moderna, 1993.

MORETTO, VASCO PEDRO. *Eletricidade e Eletromagnetismo, 3ª edição*. São Paulo: Ática, 1989.

CHIQUETO e PARADA. *Física Volume 3- Eletricidade*. São Paulo: Scipione, 1982.

A HISTÓRIA DA ELETRÔNICA. BRASIL, 2005. Disponível em: <http://www.wagnerzanco/artigo/artigo.htm>. Acesso em: 01 de Agosto de 2005.

A HISTÓRIA DA ELETRICIDADE. BRASIL, 2005. Disponível em: <http://www.sel.eesc.sc.usp.br/protecao/conteudodehistorico.htm>. Acesso em: 10 de Agosto de 2005.