

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

TENSÃO, CORRENTE	4
Analogia entre Eletricidade e Hidráulica	4
Tensão Elétrica.....	4
Corrente Elétrica	4
Corrente Elétrica Convencional	4
Fontes de Alimentação	5
Fontes de Alimentação Eletrônicas	6
Corrente Contínua	7
Corrente Alternada	7
Bipolos Gerador e Receptor	7
Terra (GND) ou Potencial De Referência	8
RESISTÊNCIA ELÉTRICA	10
Conceito	10
Primeira Lei de Ohm	10
Condutância	13
Curto-circuito	13
LEIS DE KIRCHHOFF	14
Definições	14
Ramo	14
Lei De Kirchhoff Para Correntes - Lei Dos Nós	15
Lei De Kirchhoff Para Tensões - Lei Das Malhas	15
Receptores Ativos	15
ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES	16
Associação Série	17
Associação Paralela.....	18
Associação Mista	20
DIVISORES DE TENSÃO E DE CORRENTE -PONTE DE WHEATSTONE	21
Divisor de Tensão	21
Divisor De Corrente	23
Ponte de Wheatstone	24
Ohmímetro em Ponte	25
GERADORES DE TENSÃO E DE CORRENTE	27
Gerador de Tensão	27
Reta de Carga e Ponto Quiescente	29
Rendimento	29
Fontes de Alimentação Eletrônicas	29
Máxima Transferência de Potência	31
Gerador de Corrente	33
Rendimento	34
Equivalência entre os Geradores de Tensão e de Corrente	34
REDE RESISTIVA	35
Característica da Rede Resistiva	35
Método de Análise	36

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Configurações Estrela e Triângulo	37
TEOREMAS DA SUPERPOSIÇÃO, THÉVENIN E NORTON	39
Teorema da Superposição	39
Teorema de Thévenin	40
Teorema de Norton	42
DISPOSITIVOS REATIVOS - CAPACITORES	44
Conceito de Dispositivos Reativos	44
Representação de Grandezas Elétricas Variantes no Tempo	44
Capacitor e Conceito de Capacitância	44
Capacitância x Características Elétricas	46
Capacitância x Características Físicas	46
Comportamento Elétrico do Capacitor	46
Capacitores Fixos e Variáveis	48
Especificações dos Capacitores	48
Tolerância	48
Tensão de Isolação	48
Capacitores Comerciais	49
Códigos de Especificação de Capacitores	49
Associação de Capacitores	50
Associação Série	50
Q termo E/Q corresponde ao inverso da capacitância equivalente vista pela fonte de alimentação. Assim:	51
Associação Paralela	52
Dividindo a carga Q pela tensão E, chega -se a: $\frac{Q}{E} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$	52
O resultado Q/E corresponde à capacitância equivalente C_{eq} da associação paralela, isto é, a capacitância que a fonte de alimentação entende como sendo a sua carga. Assim:	52
Associação Mista	53
DISPOSITIVOS REATIVOS - CIRCUITO RC DE TEMPORIZAÇÃO	53
Constante de Tempo	53
Carga do Capacitor	54
Tensão no Resistor	54
Tensão no Capacitor	54
Corrente no Circuito	55
E = 10V	56
Descarga do Capacitor	57
Corrente no Circuito	58
Tensão no Resistor	58
Tensão no Capacitor	59
C = 47nF	59
Aplicações do Circuito RC	60
Porta Lógica Inversora	61
Diodo Semicondutor	61
Aplicação I - Gerador de Onda Quadrada	62

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Aplicação II - Circuito de Inicialização do Computador	63
Inicialização Automática	63
Inicialização Manual	64
DISPOSITIVOS REATIVOS: INDUTORES, CIRCUITO RL E RELÉS	64
Princípios do Eletromagnetismo	64
Campo Magnético	64
Fluxo Magnético	65
Indução Magnética	65
Eletromagnetismo	65
I - Campo Magnético Criado por Corrente Elétrica	66
Onda Eletromagnética	67
Indutor e Conceito de Indutância	68
Indutor ou Bobina	68
Polaridade Magnética do Indutor	68
Indutância	69
Indutores Fixos e Variáveis	70
Especificações dos Indutores	70
❑ Tolerância	70
❑ Resistência Ôhmica	70
Indutores Comerciais	70
Característica Magnética do Núcleo	70
Projeto de um Indutor	71
Associação de Indutores	71
Associação Série	71
Associação Paralela	72
Associação Mista	72
Indutância Mútua	72
Circuito RL de Temporização	74
Constante de Tempo	74
Energização do Indutor	74
Corrente no Circuito	75
Desenergização do Indutor	76
Corrente no Circuito	77
Tensão no Indutor	77
Comparação entre o Capacitor e o Indutor	78
Relé Eletromecânico	79
Funcionamento	79
Relés Comerciais	80
Aplicação I - Temporizador para Acionamento de Cargas de Potência	81
Aplicação II - Detector de Presença	82
Circuitos RC, RL, RLC	110

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

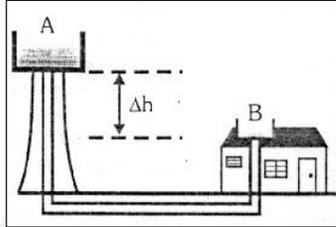
TENSÃO, CORRENTE

Analogia entre Eletricidade e Hidráulica

No sistema hidráulico abaixo, se desloca da caixa d'água **A** para **B** por causa da diferença de altura Δh .

Cada ponto do espaço possui um potencial que é proporcional à sua altura.

Portanto, a **corrente** de água existe por causa da **diferença de potencial** gravitacional entre as caixas d'água.



Tensão Elétrica

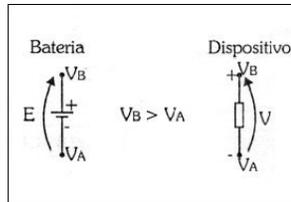
A diferença de potencial elétrico entre dois pontos é denominada **tensão elétrica**, podendo ser simbolizada pelas letras **V**, **U** ou **E**, cuja unidade de medida é também o **volt (V)**.

Matematicamente, tem-se

$$E = V_B - V_A$$

Num circuito, indica-se uma tensão por uma seta voltada para o ponto de maior potencial.

Obs.: Nesta apostila, usaremos o símbolo **E** para identificar **fontes de tensão** e o símbolo **V** para identificar a **tensão entre terminais** de **outros dispositivos**.



Corrente Elétrica

O conceito de diferença de potencial elétrico e movimento de carga elétrica leva -nos à eletrodinâmica, isto é, ao estudo das cargas elétricas em movimento.

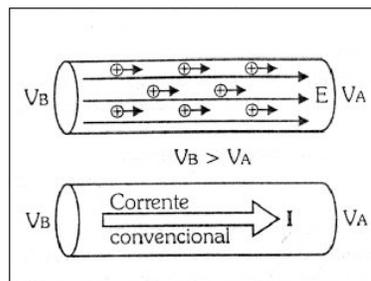
Aplicando uma diferença de potencial num condutor metálico, os seus elétrons livres movimentam-se de forma ordenada no sentido contrário ao do campo elétrico.

Essa movimentação de elétrons denomina -se **corrente elétrica** que é simbolizada pela letra **I**, sendo que sua unidade de medida é o **ampère [A]**.

Corrente Elétrica Convencional

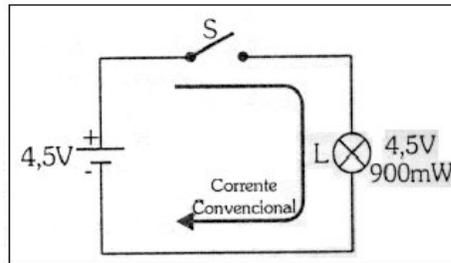
Nos condutores, a corrente elétrica é formada apenas por cargas negativas (elétrons) que se deslocam do potencial menor para o maior.

Assim, para evitar o uso freqüente de valor negativo para corrente, utiliza -se um **sentido convencional** para ela, isto é, considera-se que a corrente elétrica num condutor metálico seja formada por cargas positivas, indo, porém, do **potencial maior para o menor**.



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Num circuito, indica-se a corrente convencional por uma seta, no sentido do potencial maior para o menor, como no circuito da lanterna, em que sai do pólo positivo da bateria (maior potencial) e retorna ao seu pólo negativo (menor potencial).

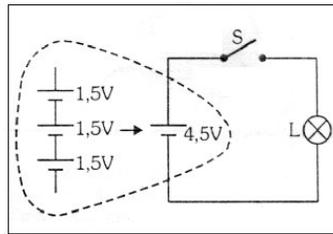


Fontes de Alimentação

O dispositivo que fornece tensão a um circuito é chamado genericamente de *fonte de tensão* ou *fonte de alimentação*.

Pilhas e Baterias

Voltando ao circuito da lanterna, nele identificamos a bateria, que nada mais é do que um conjunto de pilhas.



A pilha comum, quando nova, possui tensão de 1,5V. Associadas em série, elas podem aumentar essa tensão, como no caso da lanterna, cuja bateria é formada por três pilhas de 1,5V, resultando numa tensão de 4,5V.



Existem, ainda, outros tipos de baterias como, por exemplo, a de 9V e a minibateria de 3V.

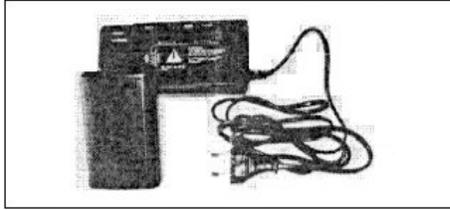
Todas essas baterias produzem energia elétrica a partir de energia liberada por reações químicas.

Com o tempo de uso, as reações químicas dessas baterias liberam cada vez menos energia fazendo com que a tensão disponível seja cada vez menor.

Hoje em dia, existem muitos tipos de baterias que podem ser recarregadas por aparelhos apropriados, inclusive as pilhas comuns, o que é um avanço importante, sobretudo no que se refere ao meio ambiente.

As baterias recarregáveis mais difundidas são aquelas utilizadas em equipamentos de uso constante, como os telefones celulares, ou de equipamentos que demandam maiores correntes elétricas, como as das filmadoras de videocassete.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



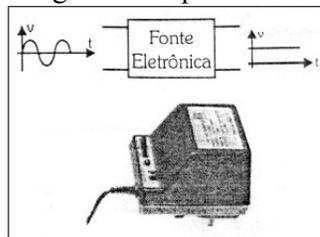
NÓS CUIDAMOS DO MEIO AMBIENTE?

As pilhas e baterias recarregáveis e não recarregáveis não deveriam ser jogadas em lixos comuns, pois são fabricadas com materiais altamente tóxicos, podendo causar danos à saúde e ao meio ambiente. Infelizmente, somente nesse final de século nós passamos a nos preocupar com o meio ambiente, embora ainda não tenhamos uma solução concreta para o problema da destinação desse tipo de lixo.

Fontes de Alimentação Eletrônicas

No lugar das pilhas e baterias, é comum a utilização de circuitos eletrônicos que convertem a tensão alternada da rede elétrica em tensão contínua.

Esses circuitos são conhecidos por *eliminadores de bateria*, e são fartamente utilizados em equipamentos portáteis como "vídeo games" e aparelhos de som.



Porém, em laboratórios e oficinas eletrônica, é mais utilizada a *fonte alimentação variável (ou ajustável)*.

Essa fonte tem a vantagem de fornecer tensão contínua e constante, cujo valor pode ser ajustado manualmente, conforme a necessidade.

Nas fontes variáveis mais simples, o único tipo de controle é o de ajuste de tensão. Nas mais sofisticadas, existem ainda os controles de ajuste fino de tensão e de limite de corrente.



Exercícios

1) Dê um exemplo de outro tipo de fonte de alimentação de corrente contínua não citado nesse item.

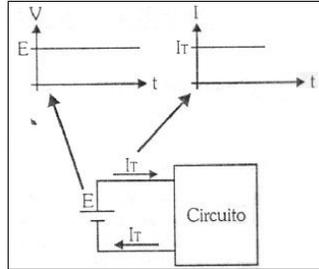
2) Dê um exemplo de um gerador de corrente alternada que substitui a energia elétrica da rede quando ela é interrompida:

Corrente Contínua

As pilhas e baterias analisadas têm em comum a característica de fornecerem *corrente contínua* ao circuito.

Obs.: Abrevia-se corrente contínua por **CC** (ou **DC** - Direct Current).

Isso significa que a fonte de alimentação CC mantém sempre a *mesma polaridade*, de forma que a corrente no circuito tem sempre o *mesmo sentido*.

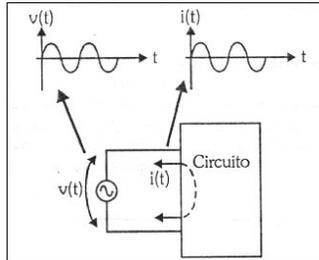


Corrente Alternada

Já, a rede elétrica fornece às residências, indústrias a *corrente alternada*.

Obs.: Abrevia-se corrente alternada **CA** (ou **AC** - Alternate Current).

Nesse caso, a tensão *muda de polaridade* em períodos bem-definidos, de forma que a corrente no circuito circula *ora num sentido, ora no outro*.



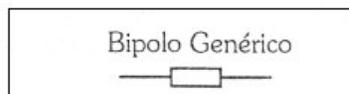
A corrente alternada pode ser gerada em diferentes tipos de usinas de energia elétrica como, por exemplo, as hidrelétricas, termoelétricas e nucleares.

O Brasil é um dos países que possui mais usinas hidrelétricas no mundo, devido ao seu enorme potencial hídrico.



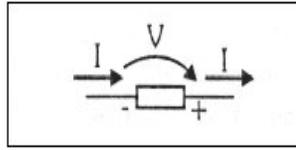
Bipolos Gerador e Receptor

Denomina-se *bipolo* qualquer dispositivo formado por *dois terminais*, podendo ser representado genericamente pelo símbolo mostrado abaixo.

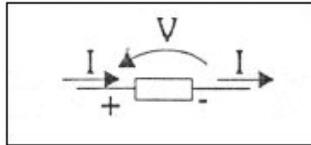


ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Se o bipolo *eleva o potencial elétrico* do circuito, ou seja, se a corrente entra no dispositivo pelo pólo de menor potencial e sai pelo pólo de maior potencial, o dispositivo é chamado de *gerador* ou *bipolo ativo*, como a fonte de alimentação.



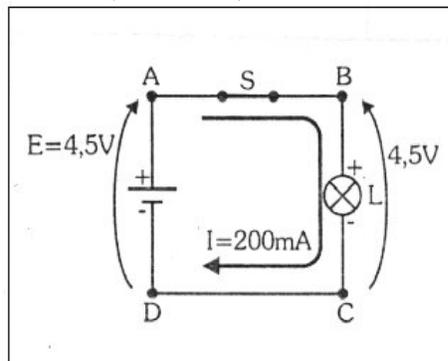
Se o bipolo provoca *queda de potencial elétrico* no circuito, ou seja, se a corrente entra no dispositivo pelo pólo de maior potencial e sai pelo pólo de menor potencial, o dispositivo é chamado de *receptor* ou *bipolo passivo*, como a lâmpada.



No circuito da lanterna, a bateria de 4,5V fornece uma corrente de 200mA à lâmpada (no módulo 5 mostraremos como se calcula esse valor de corrente).

A corrente sai do ponto A (pólo positivo da bateria) indo em direção ao ponto B, atravessa a lâmpada até o ponto C e retorna pelo ponto D (pólo negativo da bateria).

Analisando o sentido da corrente elétrica, verificamos que a bateria eleva o potencial do circuito, fornecendo energia, e a lâmpada provoca queda de potencial no circuito, consumindo energia, isto é, transformando-a em luz (e em calor).



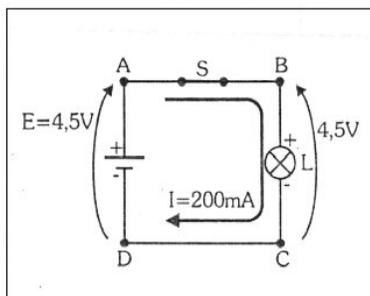
Terra (GND) ou Potencial De Referência

Num circuito, deve-se sempre estabelecer um ponto cujo potencial elétrico servirá de *referência* para a medida das tensões.

Em geral, a referência é o *pólo negativo* da fonte de alimentação, que pode ser considerado um ponto de *potencial zero*, fazendo com que a tensão entre qualquer outro ponto do circuito e essa referência seja o próprio potencial elétrico do ponto considerado.

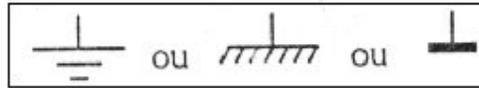
Assim, se V_A é a referência, a tensão V_{BA} entre os pontos **B**; e **A** é dada por:

$$V_{BA} = V_B - V_A = V_B - 0 = V_B$$

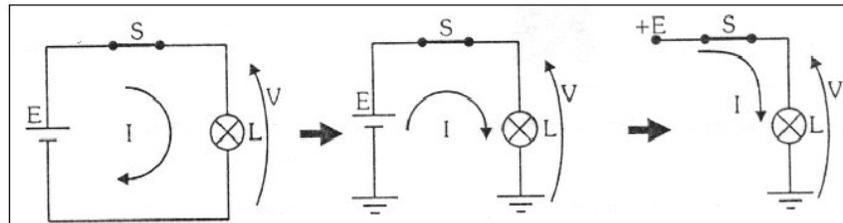


ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

A essa referência, damos o nome de *terra* ou **GND** ("ground"), cujos símbolos mais usuais são mostrados abaixo.



No caso da lanterna, podemos substituir a linha do potencial de referência por símbolos de terra, simplificando o seu circuito para um dos seguintes diagramas:



Em muitos equipamentos, esse potencial de referência do circuito é ligado à sua carcaça (quando esta é metálica) e a um terceiro pino do plugue que vai ligado à tomada da rede elétrica.

Esse terceiro pino serve para conectar o terra do circuito à malha de aterramento da instalação elétrica, com o objetivo de proteger o equipamento e o usuário de qualquer acúmulo de carga elétrica.

ATERRAMENTO JÁ?

No Brasil, é muito comum as malhas de aterramento existirem apenas em instalações industriais, e não em instalações residenciais, o que é um grave erro.

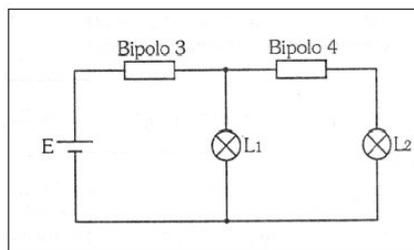
A "norma técnica popular" recomenda a ligação do fio terra à torneira para que o encanamento sirva de aterramento. Grande bobagem! Qualquer descarga elétrica estaria sendo espalhada para diversos pontos do encanamento residencial, sem contar que há vários anos os canos de ferro estão sendo substituídos por canos de PVC, que é um isolante.

Nos computadores, simplesmente corta-se o pino terra do plugue, já que a maioria das tomadas residenciais têm apenas dois pontos de conexão (fase e neutro). Já inventaram até o "adaptador" de plugue de três para dois pinos.

Temos que mudar isso!

Exercícios

Dado o circuito abaixo, represente seus dois diagramas elétricos equivalentes utilizando símbolo de terra.



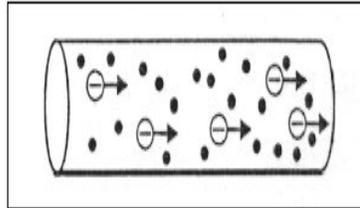
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

RESISTÊNCIA ELÉTRICA

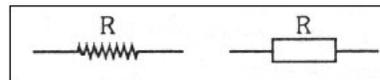
Conceito

A resistência é a característica elétrica dos materiais que representa a **oposição** à passagem da corrente elétrica.

Essa oposição à condução da corrente elétrica é provocada, principalmente, pela dificuldade de os elétrons livres se movimentarem pela estrutura atômica dos materiais.



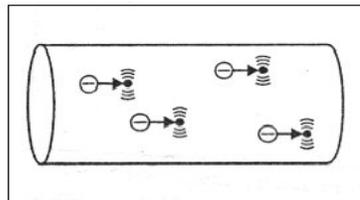
A resistência elétrica é representada pela , **R** letra R e sua unidade de medida é **ohm** [Ω]. Ao abaixo, estão os símbolos mais usuais para representá-la num circuito elétrico.



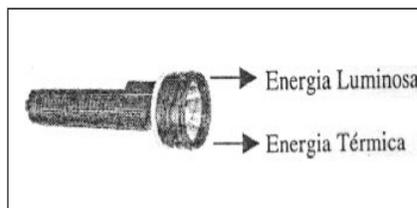
O valor da resistência elétrica depende basicamente da **natureza** dos materiais, de suas **dimensões** e da **temperatura**.

O choque dos elétrons com os átomos provoca a transferência de parte da sua energia para eles, que passam a vibrar com mais intensidade, aumentando a temperatura do material.

Esse aumento de temperatura do material devido à passagem da corrente elétrica é denominado efeito **Joule**.



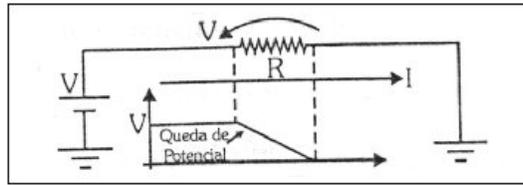
A lâmpada da lanterna comporta-se como uma resistência elétrica. O aumento da temperatura por efeito Joule leva seu filamento interno à incandescência, transformando parte da energia elétrica em calor e parte em radiação luminosa.



Primeira Lei de Ohm

A resistência é um **bipolo passivo**, isto é, **consome** a energia elétrica fornecida por uma fonte de alimentação, provocando **queda de potencial** no circuito, quando uma corrente passa por ela.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

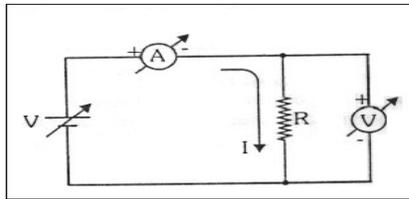


A intensidade dessa corrente I depende do valor da tensão V aplicada e da própria resistência R .

Vejamos o seguinte experimento:

O circuito abaixo mostra uma fonte variável ligada a uma resistência elétrica. Em paralelo com a resistência, o voltímetro mede a tensão nela aplicada. Em série com a resistência, o amperímetro mede a corrente que a atravessa.

Para cada tensão aplicada à resistência (V_1, V_2, \dots, V_n), obtém-se uma corrente (I_1, I_2, \dots, I_n).

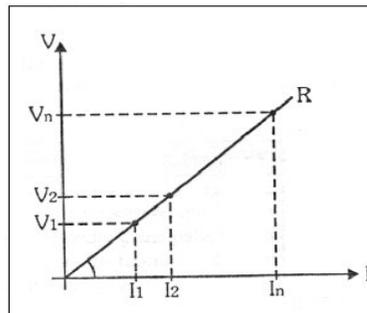


Fazendo a relação entre V e I para cada caso, observa-se que:

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \dots = \frac{V_n}{I_n} = \text{constante}$$

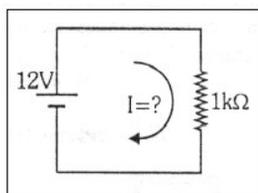
Essa característica linear é o chamamos de comportamento ôhmico, sendo que esse valor constante equivale à **resistência elétrica** R do material, cuja unidade de medida é volt/ampère [V/A] ou, simplesmente, **ohm** [Ω].

A relação entre tensão, corrente e resistência é denominada **Primeira Lei Ohm**, cuja expressão matemática é: $V = R \cdot I$



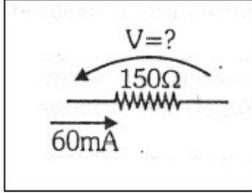
Exercícios

- Qual é a intensidade da corrente elétrica que passa por uma resistência de $1 \text{ k}\Omega$ submetida a uma tensão de 12 V ?

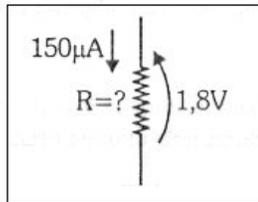


ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

- 2) Por uma resistência de $150\ \Omega$ passa uma corrente elétrica de 60mA . Qual a queda de tensão que a provoca no circuito?



- 3) Por uma resistência passa uma corrente de $150\ \mu\text{A}$, provocando uma queda de tensão de $1,8\text{V}$. Qual é o valor dessa resistência?



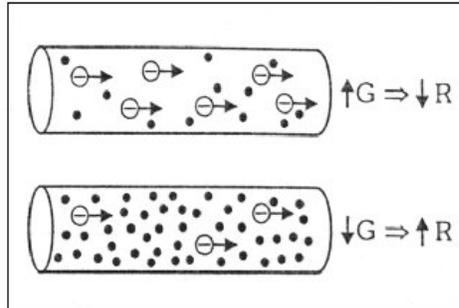
Condutância

A **condutância** é outra característica dos materiais e, ao contrário da resistência, expressa a **facilidade** com que a corrente elétrica pode atravessá-los.

Assim, a expressão da condutância é o inverso da resistência, sendo simbolizada pela letra **G**, cuja unidade de medida é **1/ohm** [Ω] ou **siemens** [S].

Matematicamente:

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



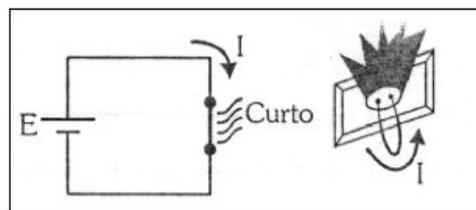
Exercícios:

- 1) Determine a condutância correspondente a uma resistência de 10k Ω .
- 2) Determine a condutância correspondente a uma resistência de 1 Ω .

Curto-circuito

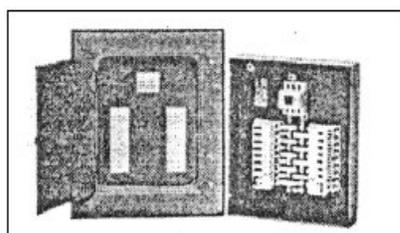
Quando ligamos um condutor ($R \cong 0$) diretamente entre os pólos de uma fonte de alimentação ou de uma tomada da rede elétrica, a **corrente** tende a ser **extremamente elevada**.

Essa condição é denominada curto-circuito, devendo ser evitada, pois a corrente alta produz um calor intenso por efeito Joule, podendo danificar a fonte de alimentação ou provocar incêndio na instalação elétrica.



Por isso, é comum as fontes de alimentação possuírem internamente circuitos de proteção contra curto-circuito e/ou circuitos limitadores de corrente.

É o que ocorre também com as instalações elétricas, que possuem **fusíveis** que queimam ou **disjuntores** que se desarmam na ocorrência de uma elevação brusca da corrente, protegendo toda a fiação da instalação.



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

LEIS DE KIRCHHOFF

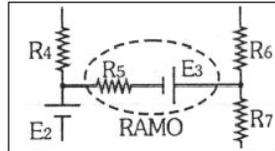
As leis de Kirchhoff envolvem conceitos básicos para a resolução e análise de circuitos elétricos, tanto em corrente contínua como em alternada.

Definições

Antes de apresentar essas leis, vejamos algumas definições relacionadas aos circuitos elétricos:

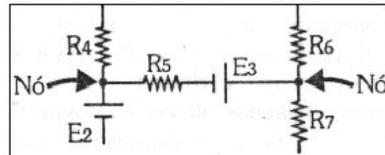
Ramo

Qualquer parte de um circuito elétrico composta por um ou mais dispositivos ligados em série é denominada **ramo**.



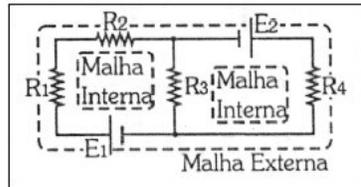
Nó

Qualquer ponto de um circuito elétrico qual há a conexão de três ou mais ramos denominado **nó**.



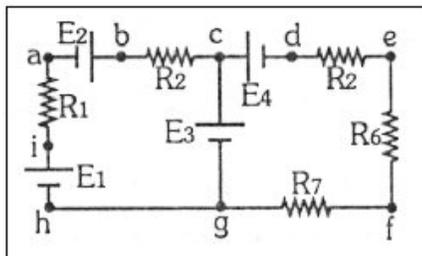
Malha

Qualquer parte de um circuito elétrico cujos ramos formam um caminho fechado para a corrente é denominada **malha**.



Exercícios

No circuito abaixo, identificar os seus nós, ramos e malhas:



Nós:

Ramos:

Malhas:

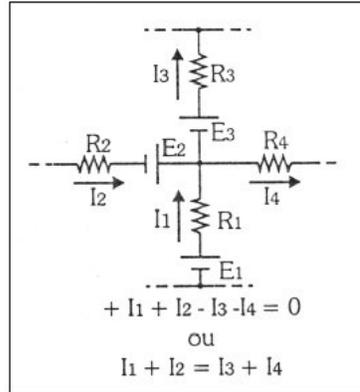
Lei De Kirchhoff Para Correntes - Lei Dos Nós

Definindo *arbitrariamente* as correntes que *chegam* ao nó como *positivas* e as que *saem* do nó como *negativas*, a Lei de Kirchhoff para Correntes pode ser enunciada como segue:

"A soma algébrica das correntes em um nó é igual a zero".

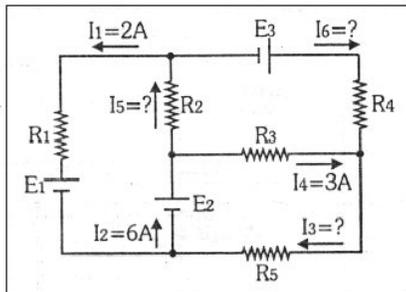
Ou

"A soma das correntes que chegam a um nó é igual à soma das correntes que saem desse nó".



Exercícios

No circuito abaixo, são conhecidos os valores I_1 , I_2 e I_4 . Determine I_3 , I_5 e I_6 :

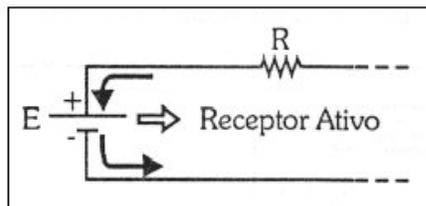


Lei De Kirchhoff Para Tensões - Lei Das Malhas

Receptores Ativos

Antes de enunciar a Lei de Kirchhoff para Tensões, é necessário analisar um outro comportamento possível para as fontes de tensão num circuito elétrico.

Num circuito elétrico formado por mais de uma fonte de alimentação, é possível que em alguma fonte a corrente entre pelo pólo positivo e saia pelo pólo negativo. Nesse caso, ao invés de elevar o potencial do circuito, a fonte estaria provocando a sua queda, isto é, ao invés de gerador, ela estaria funcionando como um *receptor ativo*.



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

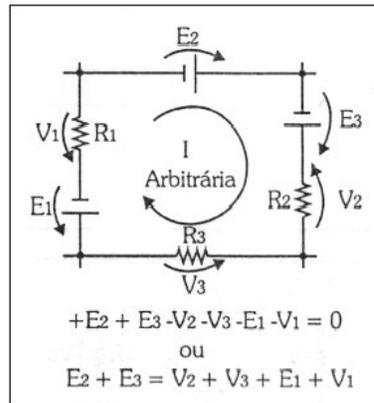
Vejamos agora o que é a Lei de Kirchoff para Tensões.

Adotando um sentido *arbitrário* de corrente para a análise de uma malha, e considerando as tensões que *elevam o potencial* do circuito como *positivas* (geradores) e as tensões que causam *queda de potencial* como *negativas* (receptores passivos e ativos), a Lei de Kirchoff para Tensões pode ser enunciada como segue:

"A soma algébrica das tensões em uma malha é zero".

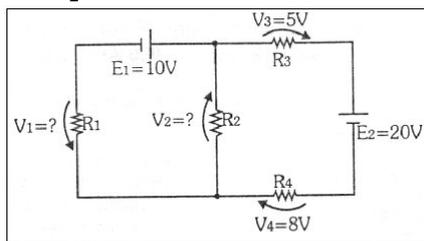
Ou

"A soma das tensões que elevam o potencial do circuito é igual à soma das tensões que causam a queda de potencial".

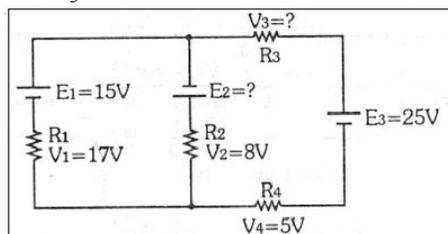


Exercícios

- 1) No circuito abaixo, são conhecidos os valores E_1 , E_2 e E_3 , V_3 e V_4 . Determine V_1 e V_2 .



- 2) No circuito abaixo, são conhecidos os valores de E_1 , E_3 , V_1 , V_2 e V_4 . Determine E_2 e V_3 .



Obs.: As polaridades de V_1 , V_2 e V_4 não são conhecidas.

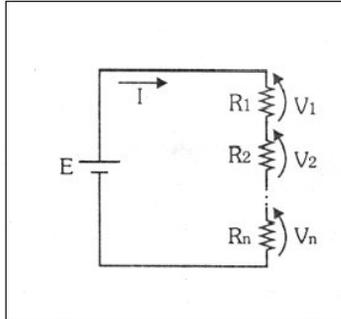
ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES

Num circuito elétrico, os resistores podem estar ligados em série e/ou paralelo, em função da necessidade de dividir uma tensão ou corrente, ou de obter uma resistência com valor diferente dos valores encontrados comercialmente.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Associação Série

Na *associação série*, os resistores estão ligados de forma que a corrente que passa por eles seja a mesma, e a tensão total aplicada aos resistores se subdivide entre eles proporcionalmente aos seus valores.



Pela Lei de Kirchhoff para Tensões, a soma das tensões nos resistores é igual à tensão total aplicada E : $E = V_1 + V_2 + \dots + V_n$

Substituindo as tensões nos resistores pela Primeira Lei de Ohm ($V_i = R_i \cdot I$), tem-se:

$$E = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + \dots + R_n \cdot I \Rightarrow E = I \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

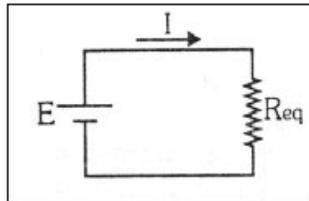
Dividindo a tensão E pela Corrente I , chega-se a: $\frac{E}{I} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

O resultado E/I corresponde à **resistência equivalente** R_{eq} da associação série, isto é, a resistência que a fonte de alimentação entende como sendo a sua carga.

Matematicamente: $R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

Se os n resistores da associação série forem iguais a R , a resistência equivalente pode ser calculada por: $R_{eq} = n \cdot R$

Isso significa que se todos os resistores dessa associação forem substituídos por uma única resistência de valor R_{eq} , a fonte de alimentação E fornecerá a mesma corrente I ao circuito.

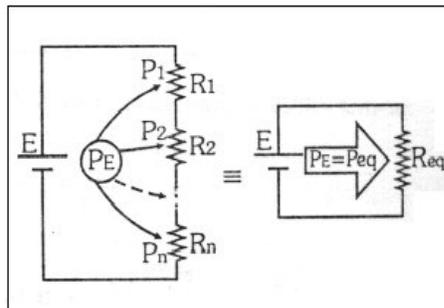


Nesse circuito, a potência total P_E fornecida pela fonte ao circuito é igual à soma das potências dissipadas pelos resistores ($P_1 + P_2 + \dots + P_n$).

Portanto, a potência total $P_E = E \cdot I$ fornecida pela fonte é igual à potência dissipada pela resistência equivalente $P_{eq} = R_{eq} \cdot I^2$.

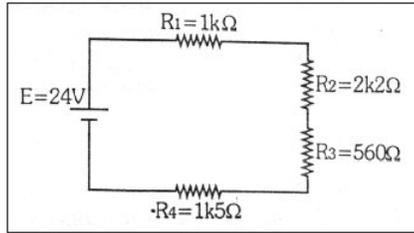
Matematicamente:

$$P_E = P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_{eq}$$



Exercícios

- 1) Considerando o circuito abaixo, formado por quatro resistores ligados em série, determine:



- a) A resistência equivalente do circuito série.
 b) A corrente I fornecida pela , fonte E ao circuito.
 c) A queda de tensão provocada por cada resistor.
- 2) Verifique pela Lei de Kirchhoff se os resultados do item lc estão corretos.
- 3) Mostre que:

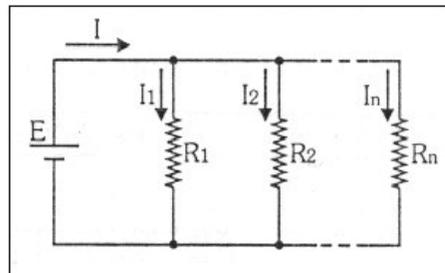
$$P_E = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = P_{eq}$$

Associação Paralela

Na *associação paralela*, os resistores estão ligados de forma que a tensão total E aplicada ao circuito seja a mesma em todos os resistores, e a corrente total do circuito se subdivida entre eles de forma inversamente proporcional aos seus valores.

Pela Lei de Kirchhoff para Correntes, a soma das correntes nos resistores é igual à corrente total I fornecida pela fonte:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$



Substituindo as correntes nos resistores pela Primeira Lei de Ohm ($I_i=E/R_i$)

$$I = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} + \dots + \frac{E}{R_n} \Rightarrow I = E \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$

Dividindo a corrente I pela tensão E , chega-se a: $\frac{I}{E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

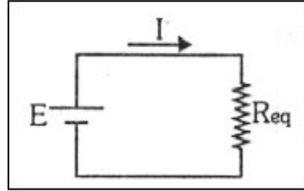
O resultado I/E corresponde à condutância equivalente G_{eq} da associação paralela. Invertendo esse valor, obtém-se, portanto, a *resistência equivalente* R_{eq} que a fonte de alimentação entende como sendo a sua carga.

Matematicamente:

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

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Isso significa que, se todos os resistores dessa associação forem substituídos por uma única resistência de valor R_{eq} , a fonte de alimentação E fornecerá a mesma corrente I ao circuito.



Assim, a relação entre as potências envolvidas é:

$$P_E = P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_{eq}$$

Se os n resistores da associação paralela forem iguais a R , a resistência equivalente pode ser calculada por:

$$R_{eq} = \frac{R}{n}$$

No caso específico de dois resistores ligados em paralelo, a resistência equivalente pode ser calculada por uma equação mais simples:

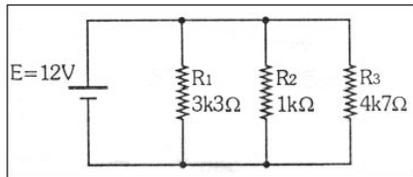
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \Rightarrow$$

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

Obs.: Num texto, podemos representar dois resistores em paralelo por: $R_1 // R_2$.

Exercícios

1) Considerando o circuito abaixo, formado por três resistores ligados em paralelo, determine:



a) A resistência equivalente do circuito paralelo.

b) A corrente I fornecida pela fonte E ao circuito.

c) A corrente que passa por cada resistor.

2) Verifique pela Lei de Kirchhoff se os resultados do item **1c** estão corretos.

3) Mostre que

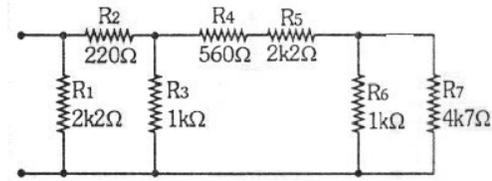
$$P_E = P_1 + P_2 + P_3 = P_{eq}$$

Associação Mista

A *associação mista* é formada por resistores ligados em série e em paralelo, não existindo na equação geral para a resistência equivalente, pois ela depende da configuração do circuito. Assim, o cálculo deve ser feito por etapas, conforme as ligações entre os resistores.

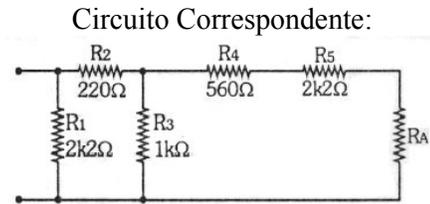
Exercícios

Considerando o circuito abaixo, formado por diversos resistores ligados em série e em paralelo, resolva os itens seguintes:



1) Determine $R_A = R_6 // R_7$

$$R_A = \frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} = \frac{1000 \times 4700}{1000 + 4700} = 824,56\Omega$$



2) Determine $R_B = R_4 + R_5 + R_A$:

Circuito Correspondente:

3) Determine $R_C = R_3 // R_B$:

Circuito Correspondente:

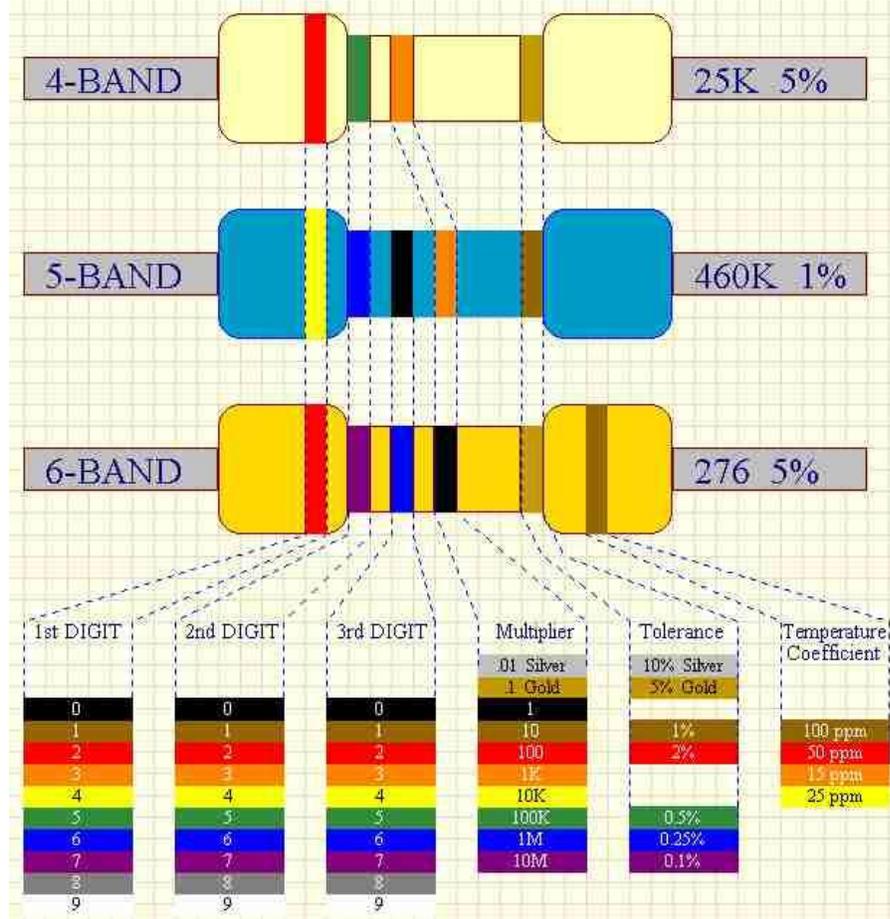
4) Determine $R_D = R_2 + R_C$:

Circuito Correspondente:

5) Determine $R_{eq} = R_1 // R_D$:

Circuito Correspondente:

CÓDIGO DE COR DE RESISTORES



DIVISORES DE TENSÃO E DE CORRENTE -PONTE DE WHEATSTONE

Após a análise do comportamento dos resistores associados em série e em paralelo, neste módulo veremos alguns circuitos aplicativos.

Divisor de Tensão

Na associação série de resistores, vimos que a tensão da fonte de alimentação se subdivide entre os resistores, formando um *divisor de tensão*.

Podemos deduzir uma equação geral para calcular a tensão V_i num determinado resistor R_i da associação em função da tensão E aplicada.

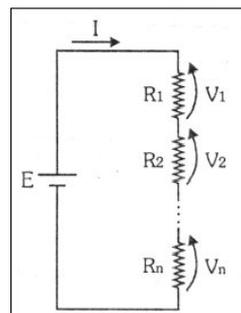
A tensão V_i no resistor R_i é dada por:

$$V_i = R_i \cdot I$$

(I)

Mas a corrente I que passa pelos resistores em série vale:

$$I = \frac{E}{R_{eq}} \quad (II)$$



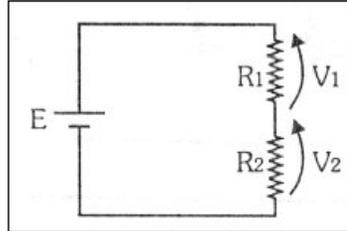
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Substituindo a equação (II) na equação (I), obtém-se a *equação geral do divisor de tensão*:

$$V_i = \frac{R_i}{R_{eq}} \cdot E$$

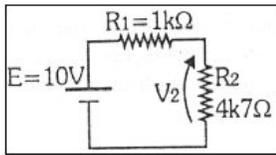
No caso de um divisor de tensão formado por dois resistores, as equações de V_1 e V_2 são:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot E \quad \text{e} \quad V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$$

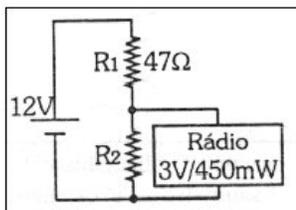


Exercícios

- 1) No divisor de tensão abaixo, determine a tensão V_2 no resistor de saída R_2 .



- 2) Um rádio AM/FM portátil funciona, em condições normais de operação, com as seguintes especificações: 3V/450mW.
Qual deve ser o valor do resistor R_2 para que esse rádio opere a partir de uma fonte de 12V, conforme a montagem abaixo?



Resp: O rádio, nas condições normais de operação, representa uma carga R_R para o divisor de tensão, que pode ser calculada a partir da sua tensão V_R e da sua potência P_R :

$$R_R = \frac{V_R^2}{P_R} = \frac{3^2}{0,45} \Rightarrow R_R = 20\Omega$$

Chamando de $R_{2R} = R_2 // R_R$ e aplicando a equação do divisor de tensão entre R_1 e R_{2R} , temos:

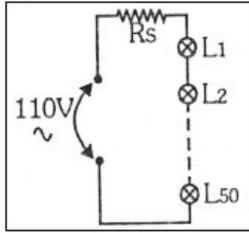
$$V_R = \frac{R_{2R}}{R_1 + R_{2R}} \cdot E \Rightarrow 3 = \frac{R_{2R}}{47 + R_{2R}} \cdot 12 \Rightarrow R_{2R} = 15,67\Omega$$

Aplicando a equação da resistência equivalente em $R_2 // R_R$, chega-se ao valor de R_2 :

$$R_{2R} = \frac{R_2 \cdot R_R}{R_2 + R_R} \Rightarrow 15,67 = \frac{R_2 \cdot 20}{R_2 + 20} \Rightarrow R_2 = 72,38\Omega$$

Comercialmente, pode-se utilizar um resistor de 75Ω .

- 3) Um enfeite de natal é formado por 50 lâmpadas coloridas em série. Cada lâmpada está especificada para 1,5V/6mW.



Determine o valor do resistor R_s para que o enfeite possa ser alimentado pela rede elétrica de 110V.

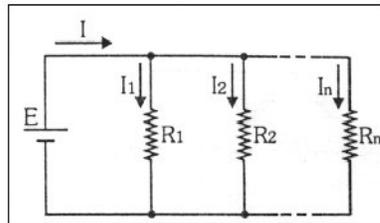
Divisor De Corrente

Na associação paralela de resistores, vimos que a corrente fornecida pela fonte de alimentação se subdivide entre os resistores, formando um *divisor de corrente*.

Podemos deduzir uma equação geral para calcular a corrente I_i num determinado resistor R_i da associação em função da corrente total I ou da tensão E aplicada.

Como os resistores estão em paralelo, a tensão E da fonte de alimentação é aplicada diretamente em cada resistor. Assim, *equação geral do divisor de corrente em função* de E é:

$$I_i = \frac{E}{R_i} \quad (I)$$



Mas a tensão E aplicada à associação paralela vale:

$$E = R_{eq} \cdot I \quad (II)$$

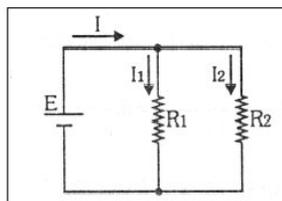
Substituindo a equação (II) na equação (I), obtém a *equação geral do divisor corrente*

em função de I:

$$I_i = \frac{R_{eq}}{R_i} \cdot I$$

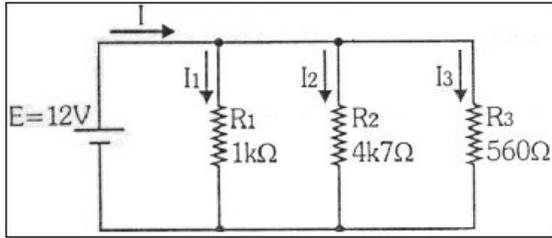
No caso de um divisor de corrente formado por dois resistores, podem -se deduzir facilmente as equações de I_1 e I_2 , que ficam como segue:

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$$

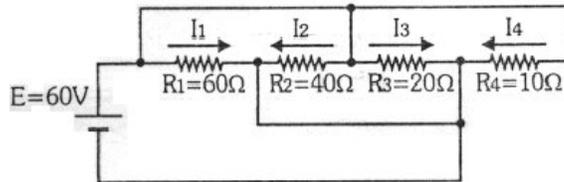


Exercícios

1) Considerando o divisor de corrente ao lado, determine I_2 a partir das suas duas equações gerais (em função de E e de I) compare os resultados obtidos.



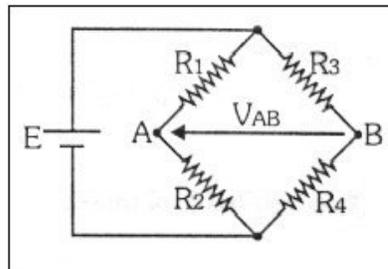
2) Considerando o divisor de corrente ao lado, determine $I_1, I_2, I_3,$ e I_4 .



Ponte de Wheatstone

A *Ponte de Wheatstone* é um circuito muito utilizado em instrumentação eletrônica, pois por meio dela é possível medir, além de resistência elétrica, diversas outras grandezas físicas como temperatura, força e pressão. Para isso, basta utilizar sensores ou transdutores que convertam as grandezas a serem medidas em resistência elétrica.

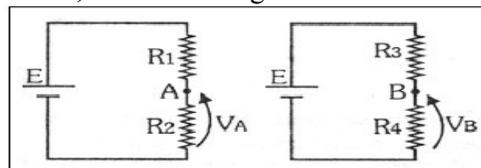
O circuito básico da Ponte de Wheatstone está mostrado abaixo.



Ele é formado por dois divisores de tensão ligados em paralelo.

Na ponte, o interesse recai sobre a tensão V_{AB} entre as extremidades que não estão ligadas à fonte de alimentação.

Para equacionar a Ponte de Wheatstone, podemos desmembrá-la em duas partes, cada uma formando um divisor de tensão, conforme a figura abaixo.



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

As tensões V_A e V_B de cada parte são dadas por: $V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$; $V_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot E$

Quando $V_{AB} = V_A - V_B = 0$, dizemos que a ponte encontra-se em *equilíbrio*.

Para que V_{AB} seja nulo, é necessário que $V_A = V_B$, ou seja:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot E \Rightarrow R_2 \cdot (R_3 + R_4) = R_4 \cdot (R_1 + R_2) \Rightarrow$$

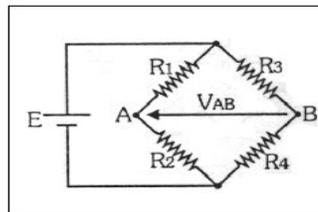
$$R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4 = R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_4 \Rightarrow \quad \mathbf{R_2 \cdot R_3 = R_1 \cdot R_4}$$

Portanto, a condição de equilíbrio da ponte é dada pela igualdade entre os produtos das resistências opostas.

Ohmímetro em Ponte

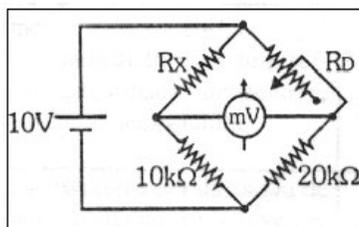
A Ponte de Wheatstone pode ser utilizada para medir, com razoável precisão, resistências desconhecidas, adotando o seguinte procedimento:

- 1) Liga-se um milivoltímetro de zero central entre os pontos A e B;
- 2) Substitui-se um dos resistores da ponte pela resistência desconhecida R_x como, por exemplo, o resistor R_1 ;
- 3) Substitui-se um outro resistor por uma década resistiva R_D como, por exemplo, o resistor R_3 ;
- 4) Ajusta-se a década resistiva até que a ponte entre em equilíbrio, isto é, até que o milivoltímetro indique tensão zero ($V_{AB} = 0$), anotando o valor de R_D ;
- 5) Calcula-se R_x pela expressão de equilíbrio da ponte, ou seja: $R_x = \frac{R_2 \cdot R_D}{R_4}$
- 6) Se $R_2 = R_4$, a expressão de R_x se resume a: $R_x = R_D$.



Exercícios

Na ponte de Wheatstone abaixo, qual é o valor de R_x , sabendo que no seu equilíbrio $R_D = 18k\Omega$?



Instrumento de Medida de uma Grandeza Qualquer

Nesse momento, você deve estar se perguntando se não seria mais simples medir a resistência desconhecida diretamente com um multímetro.

Pois é aqui que entra a grande aplicação da Ponte de Wheatstone.

Essa resistência desconhecida pode ser um sensor ou um transdutor, cujas resistências variam proporcionalmente a uma outra grandeza física.

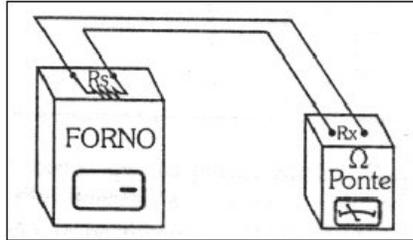
Para que essa outra grandeza possa ser medida, é necessário que o sensor esteja sob sua influência e, ao mesmo tempo, ligado ao circuito de medição (ponte).

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Exemplo: Medidor de Temperatura

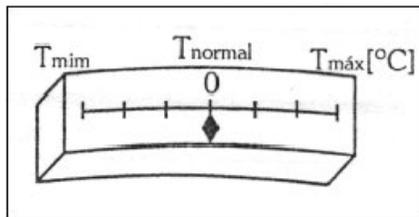
Para medir a temperatura de um forno, o sensor deve estar dentro do forno e, ao mesmo tempo, ligado ao circuito.

Essas duas condições impedem que a resistência do sensor possa ser medida diretamente por um multímetro.



Porém, por meio da ponte, podemos relacionar o desequilíbrio causado pela resistência do sensor, medindo-o pelo milivoltímetro.

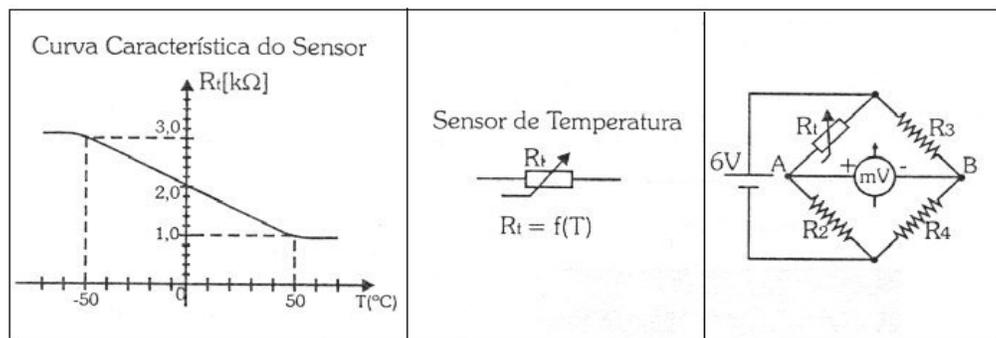
Para isso, basta converter a escala graduada do milivoltímetro de tensão para temperatura.



Um procedimento similar pode ser adotado, usando um milivoltímetro digital. Só que nesse caso, utiliza-se um circuito para alterar os valores numéricos mostrados no "display", de forma que eles correspondam aos valores de temperaturas medidos.

Exercícios

Projetar um termômetro eletrônico para medir temperaturas na faixa de -40°C e $+40^{\circ}\text{C}$. Para isso, dispõe-se de um sensor de temperatura R_1 e de um milivoltímetro de zero central, conforme mostram as figuras abaixo.



1) Adote valores para R_2 , R_3 e R_4 para que o milivoltímetro marque tensão nula à temperatura de 0°C .

$R_2 =$

$R_3 =$

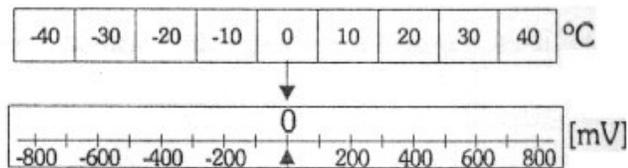
$R_4 =$

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

2) Calcule a tensão, em [mV], medida pelo milivoltímetro para cada temperatura da tabela abaixo:

Temperatura	Tensão
T [°C]	VAB [mV]
- 40	
- 30	
- 20	
- 10	
0	
10	
20	
30	
40	

3) Faça a conversão da escala do milivoltímetro de tensão para temperatura, indicando com uma seta as posições aproximadas do ponteiro para a cada valor de temperatura.



4) Qual é a característica da escala de temperatura resultante na conversão realizada no item 3?

5) O que aconteceria se R_t fosse colocada no lugar de R_3 ?

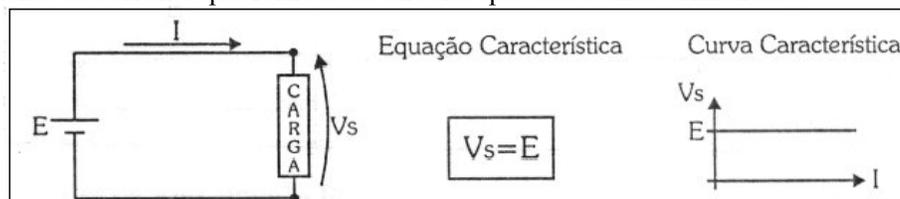
GERADORES DE TENSÃO E DE CORRENTE

Nesse módulo, faremos um estudo mais detalhado das fontes de alimentação, que aqui, serão denominadas geradores.

Até esse momento, utilizamos apenas os geradores de tensão. Porém, além desses, faremos uma breve análise dos geradores de corrente, pois eles poderão ser utilizados, futuramente, no estudo de outros dispositivos eletrônicos, particularmente os transistores.

Gerador de Tensão

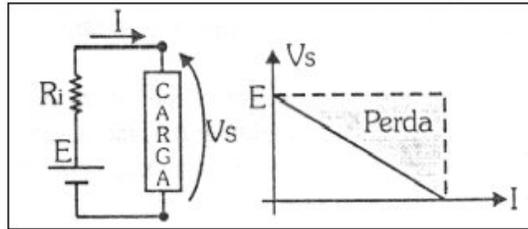
O *gerador de tensão ideal* é aquele que mantém a tensão na saída sempre constante, independente da corrente que fornece ao circuito que está sendo alimentado.



Porém, qualquer que seja o gerador (pilha química, fonte de tensão eletrônica, bateria de automóvel etc.), ele sempre apresenta *perdas internas*, fazendo com que, para cargas muito baixas ou correntes muito altas, a sua tensão de saída V_s caia.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Por isso, o estudo do *gerador de tensão real* pode ser feito representando-o por meio de um modelo, no qual as suas perdas internas correspondem a uma *resistência interna* R_i em série com o gerador de tensão E supostamente ideal, conforme mostra a ab abaixo.



A *equação característica do gerador de tensão real* leva em consideração essa perda sendo descrita matematicamente como:

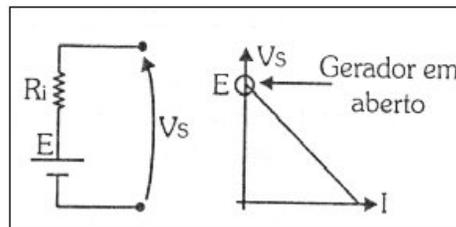
$$V_s = E - R_i \cdot I$$

Portanto, quanto *menor* a resistência interna do gerador de tensão, *melhor* é o seu desempenho.

Quando o gerador está em aberto, isto é, sem carga, a corrente de saída é zero e, conseqüentemente, não há perda de tensão interna.

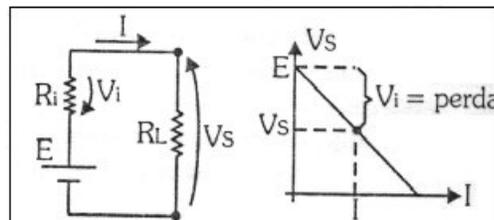
Nesse caso, toda a tensão E está presente na saída ($V_s = E$), pois:

$$V_s = E - R_i \cdot 0 \Rightarrow V_s = E$$



Quando uma carga R_L é ligada à saída do gerador, a corrente I fornecida à carga provoca uma queda de tensão na resistência interna ($V_i = R_i \cdot I$).

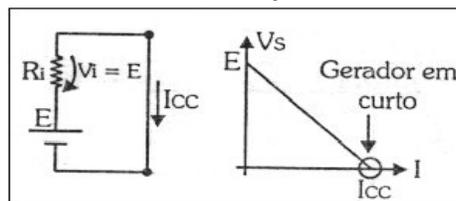
Nesse caso, a perda de tensão V_i faz com que a tensão de saída seja menor ($V_s = E - V_i$).



No caso limite, quando $R_L = 0$ (saída em curto), o gerador fornece a sua máxima corrente I_{CC} (corrente de curto-circuito), mas a tensão na saída é, obviamente, zero ($V_s = 0$).

A corrente de curto-circuito do gerador de tensão é determinada por:

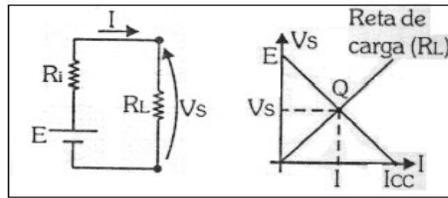
$$V_s = E - R_i \cdot I \Rightarrow 0 = E - R_i \cdot I_{CC} \Rightarrow I_{CC} = \frac{E}{R_i}$$



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Reta de Carga e Ponto Quiescente

Quando uma carga R_L é ligada à saída do gerador, a corrente I e a tensão V_S podem ser obtidas graficamente pela interseção da *reta de carga* com a curva característica do gerador. Esse ponto é denominado *ponto quiescente Q*.



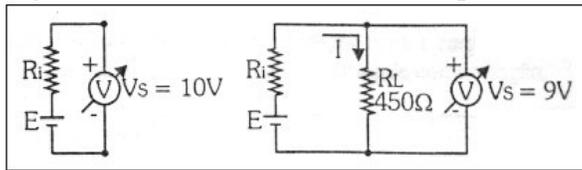
Rendimento

O rendimento do gerador de tensão mede o seu desempenho. Ele é simbolizado pela letra grega η (eta), e corresponde à relação entre a sua tensão de saída V_S e a sua tensão interna E . Matematicamente:

$$\eta = \frac{V_S}{E} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{V_S}{E} \cdot 100[\%]$$

Exercícios

Mediu-se a tensão em aberto de um gerador com um voltímetro, obtendo-se 10V. Com uma carga de 450Ω , a tensão na saída caiu para 9V. Determine:



1) A corrente na carga.

$$I = \frac{V_s}{R_L} = \frac{9}{450} \Rightarrow I = 20\text{mA}$$

2) A perda de tensão na resistência interna do gerador.

3) A resistência interna do gerador.

4) A corrente de curto-circuito do gerador.

5) O rendimento do gerador.

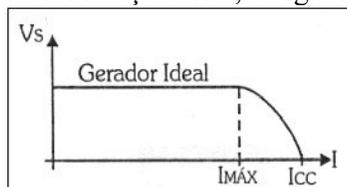
6) A equação característica do gerador válida para qualquer carga R_L .

Fontes de Alimentação Eletrônicas

As fontes de alimentação eletrônicas possuem, internamente, um circuito de *estabilização* de tensão, que garante uma *tensão de saída* constante até um limite de corrente.

Isso significa que essas fontes funcionam como se fossem geradores de tensão ideais até esse limite de corrente.

A partir desse limite, a tensão da fonte começa a cair, chegando a zero quando a sua



saída está curto-circuitada.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

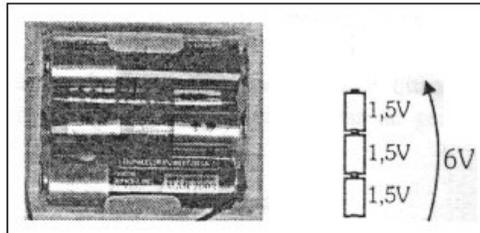
A maioria das fontes de alimentação eletrônicas atuais possuem, também, proteção contra sobrecarga, bloqueando a corrente de saída quando isso ocorrer, evitando danificá-las.

Exemplo: Especificações Técnicas de uma Fonte de Alimentação Eletrônica		
Alimentação	110/220V ac \pm 10%; 50/60Hz	Tensão de Saída: 0 a 30V, ajuste externo
Faixa de Temperatura:	0°C a +40°C	Corrente de Saída: 0 a 1 A, ajuste externo
Proteção contra Sobrecarga:	ajuste externo	Potência de Saída: 30W, máximo

Associação de Geradores de Tensão

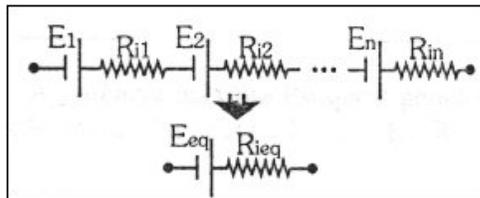
Os geradores de tensão podem ser *associados em série*, formando o que denominamos de *bateria*.

É isso que fazemos com as pilhas quando precisamos de uma tensão maior para alimentar um circuito.



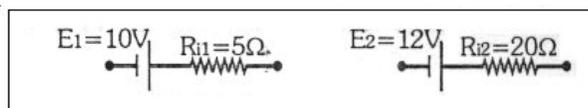
Nesse caso, o *gerador equivalente* pode ser representado por uma fonte interna equivalente E_{eq} e uma resistência interna equivalente R_{ieq} , sendo que esses valores podem ser calculados por:

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad \text{e} \quad R_{ieq} = R_{i1} + R_{i2} + \dots + R_{in}$$



Exercícios

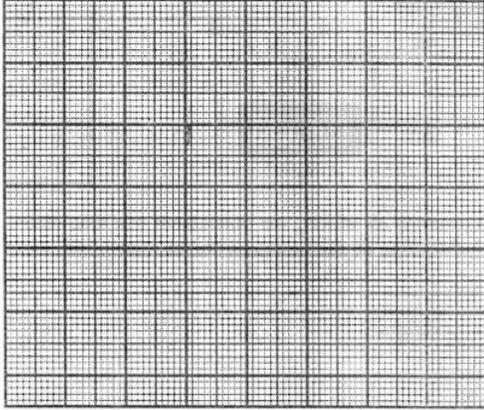
Considere os dois geradores de tensão abaixo:



- 1) Determine a corrente de curto-circuito de cada gerador.
- 2) Determine a equação característica do gerador série equivalente.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

3) Represente, no mesmo gráfico, as curvas características de cada gerador e do gerador série equivalente.



4) Compare as características do gerador equivalente com cada gerador individualmente:

Máxima Transferência de Potência

O conceito de *máxima transferência de potência* do gerador para a carga é muito útil, sendo vastamente aplicado no estudo dos amplificadores e em sistemas de comunicação.

Considere um gerador de tensão cuja equação característica é:
 $V_S = E - R_i \cdot I$.

Cada ponto da curva característica corresponde a uma coordenada (V_S , I) para uma determinada carga.

O produto dos valores de cada coordenada corresponde à potência em cada carga, isto é, $P = V_S \cdot I$.

Se levantarmos a curva de potência nas cargas em função de I , obteremos uma parábola, conforme mostra a figura ao lado.

O ponto de *máxima potência* P_M , transferida do gerador para a carga, coincide com as seguintes condições:

$$V_S = \frac{E}{2} \quad \text{e} \quad I = \frac{I_{CC}}{2}$$

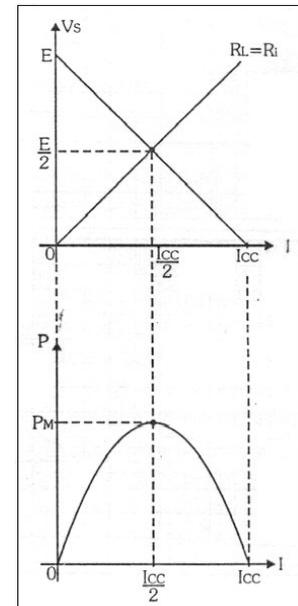
Dessa análise, conclui-se que a carga que propicia a *máxima transferência de potência* pode ser calculada por:

$$R_L = \frac{V_S}{I} = \frac{\frac{E}{2}}{\frac{I_{CC}}{2}} \Rightarrow \quad R_L = \frac{E}{I_{CC}}$$

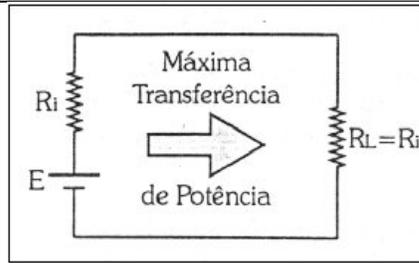
Mas, como vimos anteriormente, E/I_{CC} é a resistência interna R_i do gerador.

Isto significa que a máxima transferência de potência ocorre quando a carga é igual à resistência interna do gerador de tensão, ou seja:

$$R_L = R_i$$



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



A **potência máxima** P_M que o gerador pode fornecer a uma carga pode ser calculada em função apenas dos seus parâmetros E e R_i :

$$P_M = \frac{E}{2} \cdot \frac{I_{CC}}{2} = \frac{1}{4} \cdot E \cdot I_{CC} = \frac{1}{4} \cdot E \cdot \frac{E}{R_i} \Rightarrow P_M = \frac{E^2}{4 \cdot R_i}$$

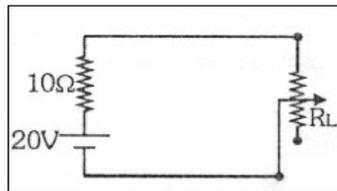
Essa expressão mostra que o gerador de tensão pode fornecer a uma carga, no máximo, **um quarto ou 25%** de sua potência total $P_T = E^2 / R_i$, dissipada com a saída curto-circuitada.

Na máxima transferência de potência, o rendimento do gerador é $\eta = 50\%$, pois:

$$\eta = \frac{V_s}{E} \cdot 100 = \frac{\frac{E}{2}}{E} \cdot 100 = \frac{1}{2} \cdot 100 \Rightarrow \eta = 50\%$$

Exercícios

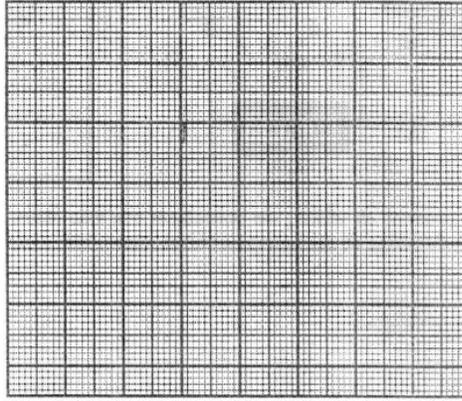
Considere o gerador de tensão abaixo:



A sua equação característica é: $V_s = 20 - 10 \cdot I$

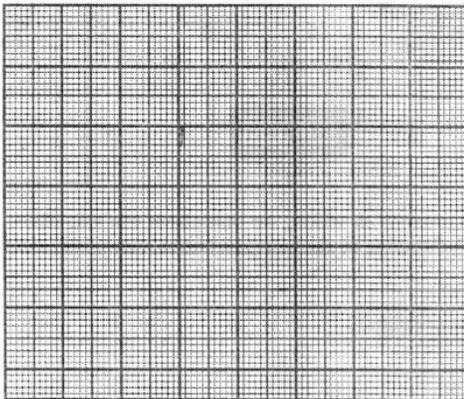
I (A)	Vs(V)	P(W)
0		
0,25		
0,50		
0,75		
1,00		
1,25		
1,50		
1,75		
2,00		

- 1) Determine a tensão de saída para cada valor de corrente da tabela, usando a equação característica do gerador, e levante o gráfico $V_s = f(I)$ na folha milimetrada abaixo.



2) Determine a potência na carga para cada valor de corrente, e levante o gráfico $P = f(I)$ na folha milimetrada ao lado.

Obs.: Use a mesma escala de corrente do gráfico anterior.



3) Determine, a partir dos gráficos, P_M , I , V_S e R_L , na máxima transferência de potência do gerador para a carga.

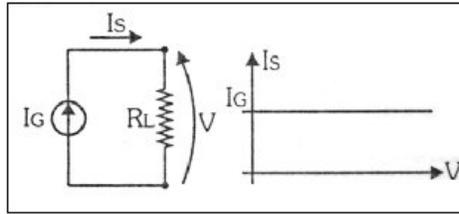
4) Determine, a partir das equações, P_M , R_L e η na máxima transferência de potência do gerador para a carga.

5) Que conclusões você tira dessa análise?

Gerador de Corrente

O *gerador de corrente*, ao contrário do gerador de tensão, não é um equipamento vastamente utilizado, mas seu estudo é importante para a compreensão futura de determinados dispositivos e circuitos eletrônicos.

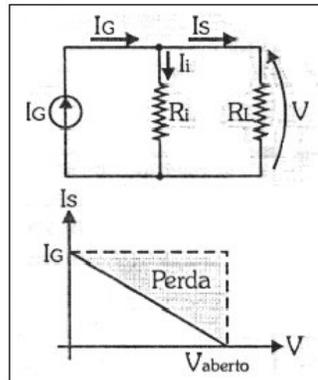
O *gerador de corrente ideal* é aquele que fornece uma corrente I_G sempre constante, independente da carga alimentada, isto é, para qualquer tensão V na saída.



Porém, no **gerador de corrente real**, a resistência interna consome parte da corrente gerada, fazendo com que $I_s < I_G$. Nesse caso, representa-se o gerador de corrente real por um gerador supostamente ideal em paralelo com uma resistência interna R_i .

Aplicando a equação do divisor de corrente, obtemos a corrente I_s na carga em função da corrente I_G do gerador:

$$I_s = \frac{R_i}{(R_L + R_i)} \cdot I_G$$



Portanto, quanto maior a resistência interna do gerador de corrente, melhor é o seu desempenho.

Rendimento

O **rendimento** η do gerador de corrente, que mede o seu desempenho, é a relação entre a sua corrente de saída I_s e a sua corrente interna I_G . Matematicamente:

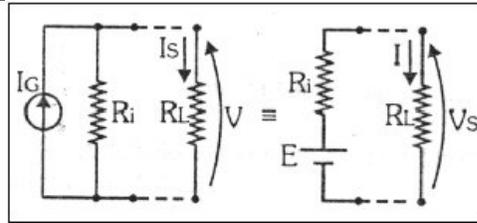
$$\eta = \frac{I_s}{I_G} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{I_s}{I_G} \cdot 100[\%]$$

Equivalência entre os Geradores de Tensão e de Corrente

Os geradores de tensão e de corrente são considerados equivalentes quando ambos possuem a **mesma resistência interna** e fornecem a **mesma tensão** ou a **mesma corrente** a uma mesma carga.

A condição de equivalência pode ser determinada, por exemplo, pelas correntes de saída dos geradores:

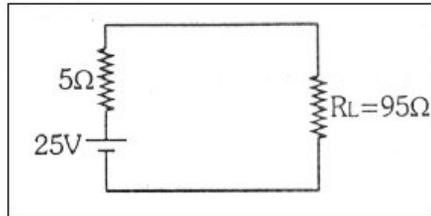
- Gerador de Corrente $I_s = \frac{R_i}{(R_L + R_i)} \cdot I_G$
- Gerador de Tensão: $I = \frac{E}{(R_L + R_i)}$
- Igualando $I = I_s$: $\frac{E}{(R_L + R_i)} = \frac{R_i}{(R_L + R_i)} \cdot I_G \Rightarrow E = R_i \cdot I_G$



A conversão de um gerador de tensão com alto rendimento em gerador de corrente, ou vice-versa, resulta num gerador com baixo rendimento, devido à necessidade de as resistências internas serem iguais.

Exercícios

Considere o gerador de tensão abaixo, alimentando uma carga de 95Ω .



- 1) Determine a corrente e a tensão na carga fornecidas pelo gerador de tensão, bem como o seu rendimento.
- 2) Converta esse gerador de tensão no seu gerador de corrente equivalente.
- 3) Determine a corrente e a tensão na carga fornecidas pelo gerador de corrente, bem como o seu rendimento.
- 4) Qual é a sua análise dos resultados obtidos nos itens 1 e 3 desse exercício?
- 5) Qual é a sua análise do valor de I_G para que o gerador de corrente equivalente possa funcionar como o gerador de tensão inicial, isto é, fornecendo a mesma tensão e corrente à carga?

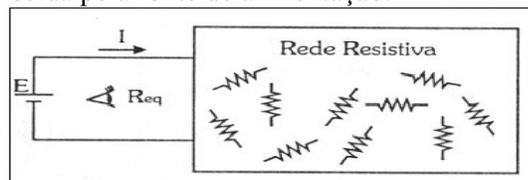
REDE RESISTIVA

Característica da Rede Resistiva

A rede resistiva é formada por diversos resistores ligados entre si em série e em paralelo (associação mista) e alimentados por uma única fonte de tensão:

As principais características da rede resistiva são:

- a) **resistência equivalente** vista pela fonte de alimentação;
- b) **corrente total** fornecida pela fonte de alimentação.



A rede resistiva pode, também, ser alimentada por uma fonte de corrente, o que não implica em nenhuma mudança no método de análise, apenas na forma de aplicação.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

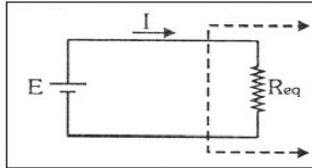
Porém, fazendo a conversão da fonte de corrente para fonte de tensão, a forma de análise passa a ser exatamente igual à que veremos em seguida.

Método de Análise

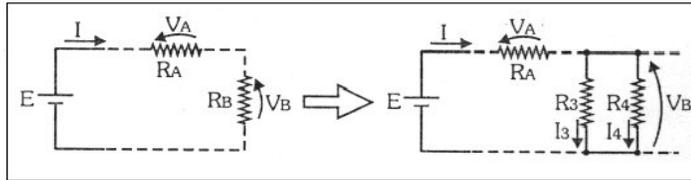
Numa rede resistiva, além da resistência equivalente e da corrente total fornecida pela fonte de alimentação, por esse método é possível calcular a corrente e a tensão em qualquer parte do circuito.

No caso de não se conhecer nenhuma tensão ou corrente interna do circuito, o método para sua análise completa é o seguinte:

- 1) Calcula-se a resistência equivalente R_{eq} do circuito;
- 2) Calcula-se a corrente I fornecida pela fonte de alimentação ao circuito;



- 3) Desmembra-se a resistência equivalente, passo a passo, calculando as tensões e/ou correntes em cada parte do circuito, conforme a necessidade, até obter as tensões e correntes desejadas.

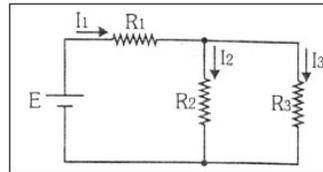


Caso alguma tensão ou corrente interna do circuito seja conhecida, a análise torna -se muito mais fácil, sendo, às vezes, desnecessário até o cálculo da resistência equivalente.

Exercícios

- 1) Determine a tensão, a corrente e a potência em cada resistor da rede resistiva ao abaixo:

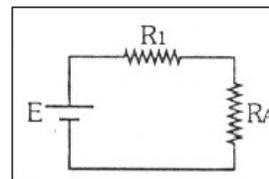
Dados: $E = 20V$
 $R_1 = 500 \Omega$
 $R_2 = 8k\Omega$
 $R_3 = 10k\Omega$



- a) Determinação de $R_A = R_2 // R_3$:

$$R_A = R_2 // R_3 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \Rightarrow$$

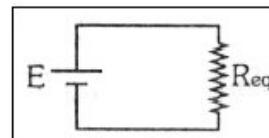
$$R_A = \frac{8,2 \times 10^3 \times 10 \times 10^3}{8,2 \times 10^3 + 10 \times 10^3} = 4505\Omega$$



- b) Determinação de $R_{eq} = R_1 + R_A$:

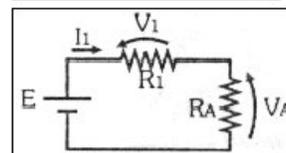
$$R_{eq} = R_1 + R_A \Rightarrow$$

$$R_{eq} = 500 + 4505 \Rightarrow R_{eq} = 5005 \Omega$$



- c) Determinação de I_1 e V_1 :

$$I_1 = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{20}{5005} = 4mA$$



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 = 500 \times 4 \times 10^{-3} = 2V$$

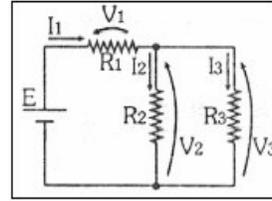
d) Determinação de V_2 , V_3 , I_2 e I_3 :

$$V_A = E - V_1 = 20 - 2 = 18V$$

$$V_2 = V_3 = V_A = 18V$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{18}{8200} = 2,20mA$$

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{18}{10000} = 1,80mA$$



e) Determinação de P_1 , P_2 e P_3

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 = 2 \times 4 \times 10^{-3} \Rightarrow P_1 = 8mW$$

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 = 18 \times 2,20 \times 10^{-3} \Rightarrow P_2 = 39,60mW$$

$$P_3 = V_3 \cdot I_3 = 18 \times 1,80 \times 10^{-3} \Rightarrow P_3 = 32,40mW.$$

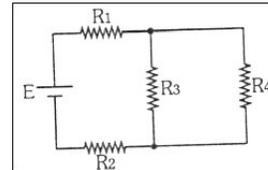
2) Determine a tensão e a corrente no resistor R_4 do circuito abaixo.

Dados: $E = 22V$

$$R_1 = 1 \Omega$$

$$R_2 = 2k\Omega$$

$$R_3 = R_4 = 2k\Omega$$

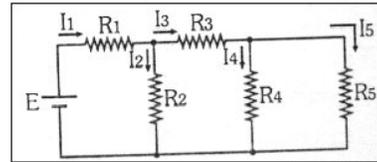


3) No circuito abaixo, determine a potência dissipada pelo resistor R_5 , sabendo-se que $I_2 = 120mA$.

Dados: $E = 40V$

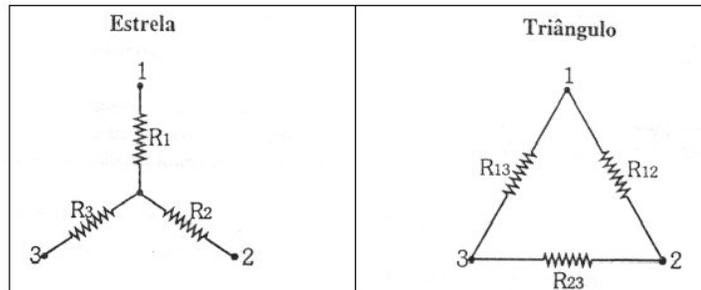
$$R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 100 \Omega$$

$$R_2 = 15k\Omega$$



Configurações Estrela e Triângulo

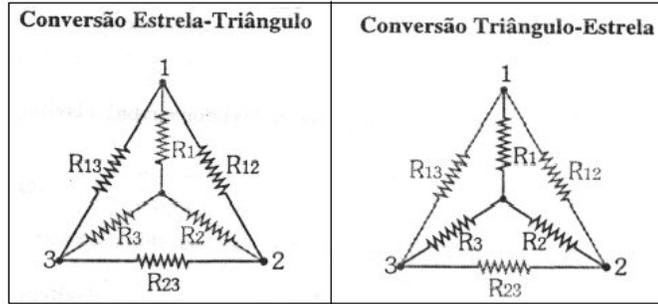
Num circuito, é comum os resistores estarem ligados conforme as configurações *estrela* ou *triângulo*.



Essas configurações não se caracterizam nem como série, nem como paralelo, dificultando o cálculo da resistência equivalente do circuito e, portanto, a sua análise.

Para resolver esse problema, é possível **converter** uma configuração na outra, fazendo com que os resistores mudem de posição sem, no entanto, mudarem as características elétricas do circuito.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



Conversão Estrela-Triângulo

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}{R_3}$$

$$R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}{R_2}$$

$$R_{23} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

Conversão Triângulo - Estrela

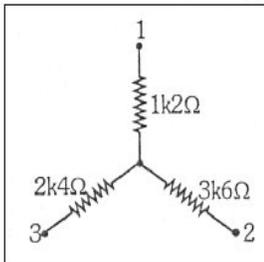
$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$$

$$R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$$

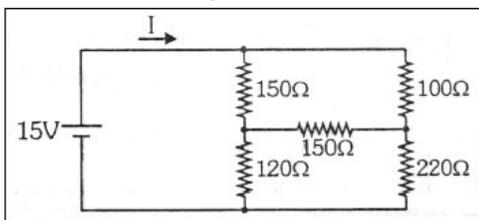
$$R_3 = \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$$

Exercícios

1) Converter a configuração abaixo de estrela para triângulo:



2) No circuito abaixo, determine a resistência equivalente e a corrente fornecida pela fonte de alimentação.

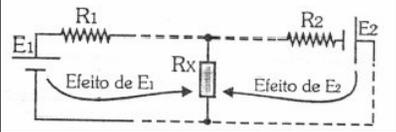


TEOREMAS DA SUPERPOSIÇÃO, THÉVENIN E NORTON

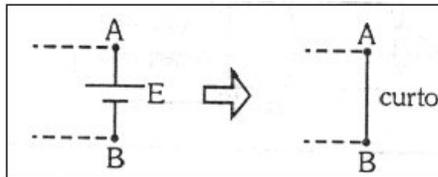
Os teoremas da *Superposição*, *Thévenin e Norton* são utilizados para analisar o comportamento elétrico (tensão e corrente) em determinados ramos ou bipolos de um circuito formado apenas por *bipolos lineares*, que podem ser receptores ou geradores de tensão e de corrente.

Teorema da Superposição

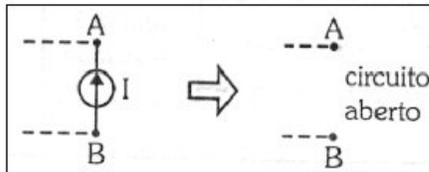
O *teorema da superposição* se aplica nos casos em que desejamos analisar o comportamento elétrico (tensão e corrente) num *único* dispositivo de um circuito, sem precisar determinar as tensões e correntes nos demais dispositivos.

<i>Teorema da Superposição de Efeitos</i>	
“Num circuito elétrico formado por vários geradores, o efeito causado por eles num determinado ramos ou bipolo é equivalente à soma algébrica dos efeitos causados por cada gerador individualmente, eliminados os efeitos dos demais”	

Para eliminar o efeito causado num circuito por um *gerador de tensão*, ele deve ser substituído por um *curto-circuito*.



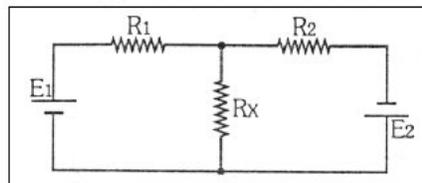
Para eliminar o efeito causado num circuito por um *gerador de corrente*, ele deve ser substituído por um *circuito aberto*.



Exercícios

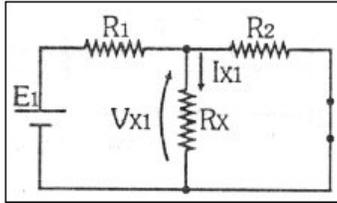
Dado o circuito abaixo, determine a corrente e a tensão no resistor R_X :

- Dados: $E_1 = 10V$
 $E_2 = 20V$
 $R_1 = 100\Omega$
 $R_2 = 220\Omega$
 $R_X = 100\Omega$



- 1) Elimine o efeito causado pelo gerador de tensão E_2 por meio da sua substituição por um curto-circuito e determine a tensão V_{X1} e a corrente I_{X1} em R_X , por efeito de E_1 .

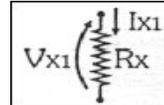
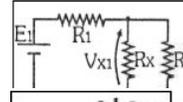
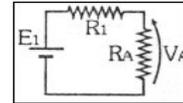
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



$$R_A = \frac{R_X \cdot R_2}{R_X + R_2} = \frac{100 \times 220}{100 + 220} = 68,75\Omega$$

$$V_{X1} = V_A = \frac{R_A}{R_1 + R_A} \cdot E_1 \Rightarrow V_{X1} = \frac{68,75}{100 + 68,75} \times 10 \Rightarrow V_{X1} = 4,07V$$

$$I_{X1} = \frac{V_{X1}}{R_X} = \frac{4,07}{100} \Rightarrow I_{X1} = 40,70mA$$



- 2) Elimine o efeito causado pelo gerador de tensão E_1 por meio da sua substituição por um curto-circuito e determine a tensão V_{X2} e a corrente I_{X2} em R_X , por efeito de E_2 .
- 3) Calcule a tensão V_X e a corrente I_X pela soma algébrica dos efeitos de E_1 e E_2 .

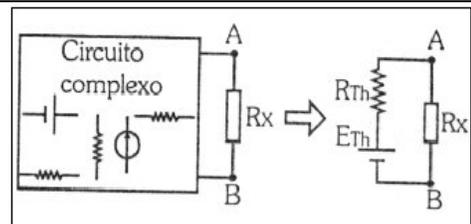
Teorema de Thévenin

O *teorema de Thévenin* se aplica nos casos em que desejamos simplificar um circuito complexo por um mais simples equivalente.

Esse procedimento é muito útil quando precisamos analisar, em detalhes, o comportamento de apenas uma parte de um circuito elétrico.

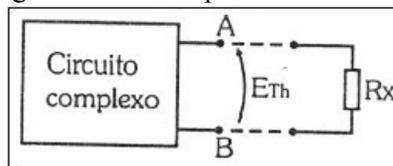
Teorema de Thévenin

"Num circuito formado apenas por bipolos lineares, todos os geradores e receptores do circuito que envolvem um determinado bipolo ou ramo de interesse podem ser substituídos por um *gerador de tensão Thévenin* formado por uma fonte de tensão equivalente Thévenin E_{Th} em série com uma resistência interna equivalente Thévenin R_{Th} ."

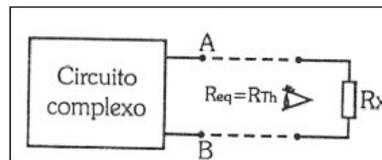


Os valores de E_{Th} e R_{Th} são calculados da seguinte forma:

E_{Th} : tensão em aberto entre os pontos em Circuito que está localizado o bipolo ou ramo de interesse, causada por todos os geradores e receptores do circuito.



R_{Th} : resistência equivalente vista pelo bipolo ou ramo de interesse, quando todos os geradores de tensão são substituídos por curto-circuito e todos os geradores de corrente são substituídos por circuitos abertos.

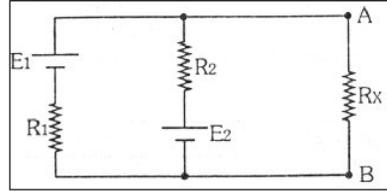


ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

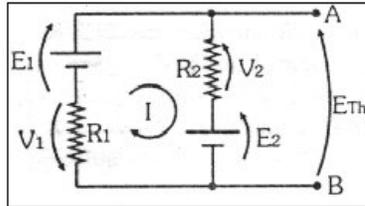
Exercícios

1) Dado o circuito abaixo, determine a corrente e a tensão no resistor R_X :

Dados: $E_1 = 15V$
 $E_2 = 10V$
 $R_1 = 150\ \Omega$
 $R_2 = 100\ \Omega$
 $R_X = 1k\ \Omega$



a) Retire R_X e calcule a tensão E_{Th} entre A e B.



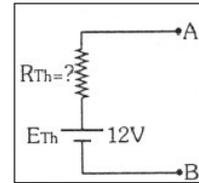
$$E_1 - V_2 - E_2 - V_1 = 0 \Rightarrow E_1 - R_2 \cdot I - E_2 - R_1 \cdot I = 0 \Rightarrow$$

$$15 - 100 \cdot I - 10 - 150 \cdot I = 0 \Rightarrow 250 \cdot I = 5 \Rightarrow I = \frac{5}{250} = 20\text{mA}$$

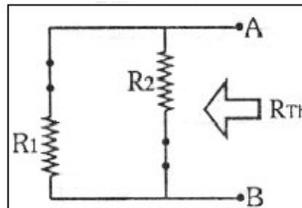
$$E_{Th} = E_2 + V_2 = E_2 + R_2 \cdot I \Rightarrow$$

$$E_{Th} = 10 + 100 \times 20 \times 10^{-3} \Rightarrow$$

$$E_{Th} = 12V$$



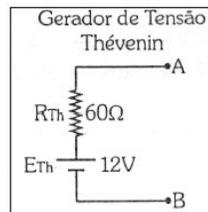
c) Substitua os geradores de tensão E_1 e E_2 por curto-circuitos e calcule a resistência R_{Th} entre A e B, vista pela resistência R_X .



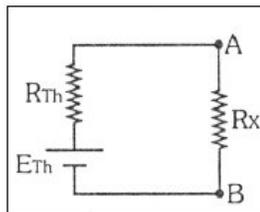
$$R_{Th} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow$$

$$R_{Th} = \frac{150 \times 100}{150 + 100} \Rightarrow$$

$$R_{Th} = 60\ \Omega$$



c) Com o gerador de tensão Thévenin determinado, ligue novamente R_X entre A e B e calcule a tensão V_X e a corrente I_X .



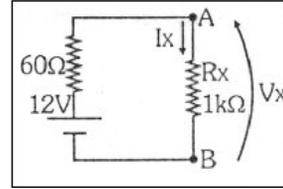
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

$$V_X = \frac{R_X}{R_{Th} + R_X} \cdot E_{Th} \Rightarrow$$

$$V_X = \frac{1000}{60 + 1000} \times 12 \Rightarrow$$

$$V_X = 11,32V$$

$$I_X = \frac{V_X}{R_X} = \frac{11,32}{1000} \Rightarrow I_X = 11,32mA$$



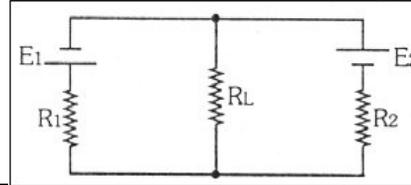
2) Dado o circuito abaixo, determine a corrente e a tensão na carga R_L , para cada um dos valores que ela pode assumir: $R_{L1}=100\ \Omega$; $R_{L2} = 500\ \Omega$; $R_{L3} =1k5\ \Omega$.

Dados: $E_1 = 20V$

$E_2 = 40V$

$R_1 = 1k\ \Omega$

$R_2 = 470\ \Omega$



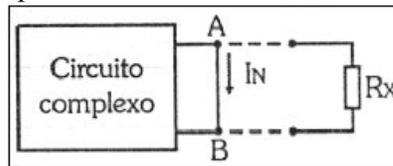
Teorema de Norton

O **teorema de Norton** é similar ao de Thévenin, isto é, se aplica nos casos em que desejamos simplificar um circuito complexo por um mais simples equivalente, com a diferença de que o circuito simplificado é formado por um gerador de corrente no lugar do gerador de tensão.

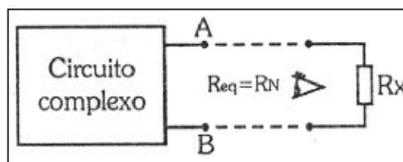
Teorema de Norton	
<p>"Num circuito formado apenas por bipolos lineares, todos os geradores e receptores do circuito que envolvem um determinado bipolo ou ramo de interesse podem ser substituídos por um gerador de corrente Norton formado por uma fonte de corrente equivalente Norton I_N em paralelo com uma resistência interna equivalente Norton R_N."</p>	

Os valores de I_N e R_N são calculados da seguinte forma:

I_N : corrente que passa pelos pontos em que está localizado o bipolo ou ramo de interesse, quando ele é substituído por um curto-circuito.



R_N : resistência equivalente vista pelo bipolo ou ramo de interesse, quando todos os geradores de tensão são substituídos por curto-circuitos e todos os geradores de corrente são substituídos por circuitos abertos.



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Exercícios

1) Dado o circuito abaixo, determine a corrente e a tensão no resistor R_X :

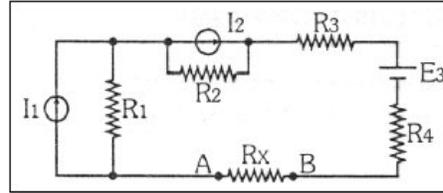
Dados: $I_1 = 200\text{mA}$; $I_2 = 15\text{mA}$

$E_3 = 300\text{V}$

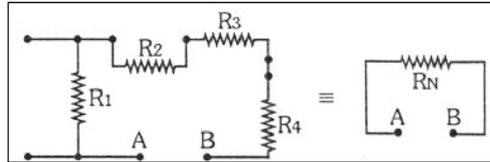
$R_1 = 10\text{k}\Omega$; $R_2 = 12\text{k}\Omega$

$R_3 = 20\text{k}\Omega$; $R_4 = 1\text{k}\Omega$

$R_X = 4\text{k}\Omega$



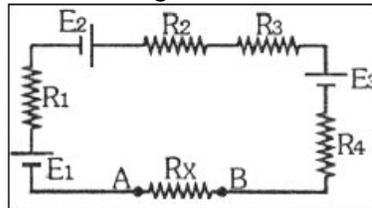
a) Substitua os geradores de corrente I_1 e I_2 por circuitos abertos e o gerador de tensão E_3 por um curto-circuito e calcule a resistência R_N entre A e B, vista pela resistência R_X .



$$R_N = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \Rightarrow$$

$$R_N = 10\text{k} + 12\text{k} + 2,2\text{k} + 1\text{k} \Rightarrow R_N = 25,2\text{k}\Omega$$

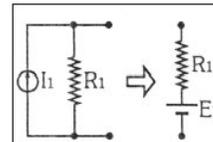
b) Converta os geradores de corrente em geradores de tensão.



Conversão de I_1, R_1 em E_1, R_1 :

$$E_1 = I_1 \cdot R_1 = 20 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3 \Rightarrow$$

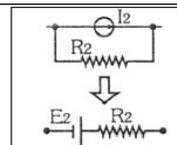
$$E_1 = 200\text{V}$$



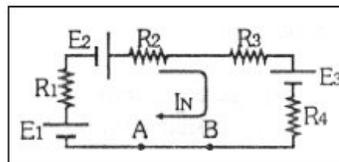
Conversão de I_2, R_2 em E_2, R_2 :

$$E_2 = I_2 \cdot R_2 = 15 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^3 \Rightarrow$$

$$E_2 = 180\text{V}$$



c) Substitua R_X por um curto entre A e B e calcule a corrente I_N .



$$E_1 - V_1 + E_2 - V_2 - V_3 - E_3 - V_4 = 0 \Rightarrow$$

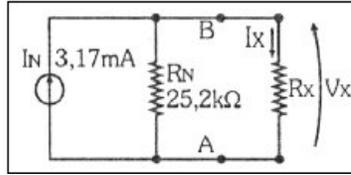
$$E_1 - R_1 \cdot I_N + E_2 - R_2 \cdot I_N - R_3 \cdot I_N - E_3 - R_4 \cdot I_N = 0 \Rightarrow$$

$$200 + 180 - 300 - (10000 + 12000 + 2200 + 1000) \cdot I_N = 0$$

$$25200 \cdot I_N = 80 \Rightarrow \frac{80}{25200} \Rightarrow I_N = 3,17\text{mA}$$

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

d) Com I_N e R_N determinados, calcule V_X e I_X em R_X .



$$I_X = \frac{R_N}{R_N + R_X} \cdot I_N \Rightarrow$$

$$I_X = \frac{25200}{25200 + 4700} \times 3,17 \times 10^{-3} \Rightarrow I_X = 2,67 \text{ mA}$$

$$V_X = R_X \cdot I_X = 4,7 \times 10^3 \times 2,67 \times 10^{-3} \Rightarrow V_X = 12,55 \text{ V}$$

2) Dado o circuito abaixo, determine a corrente no potenciômetro R_P , quando ele assume os seguintes valores: 0Ω ; 600Ω ; $1,2 \text{ k}\Omega$; $1,8 \text{ k}\Omega$ e $2,2 \text{ k}\Omega$.

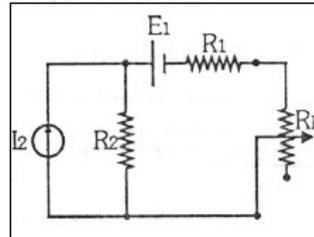
Dados: $E_1 = 24 \text{ V}$

$I_2 = 40 \text{ mA}$

$R_1 = 820 \text{ k}\Omega$;

$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$

$R_P = 2 \text{ k}\Omega$



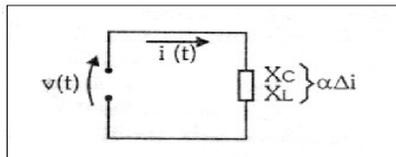
DISPOSITIVOS REATIVOS - CAPACITORES

Conceito de Dispositivos Reativos

Um dispositivo resistivo como, por exemplo, o resista r , é aquele que resiste à passagem de corrente, mantendo o seu valor ôhmico constante tanto para a corrente contínua como para a corrente alternada.

Já, o dispositivo *reativo* reage às *variações* de corrente, sendo que seu valor ôhmico, muda conforme a velocidade da variação da corrente nele aplicada.

Essa reação às variações de corrente é denominada *reatância capacitiva* X_C [Ω] ou *reatância indutiva* X_L [Ω].



Nesse apostila, trataremos do comportamento desse tipo de dispositivo apenas em corrente *contínua*, incluindo, porém, o *período de transição* entre a ligação do circuito reativo e a sua estabilização.

Representação de Grandezas Elétricas Variantes no Tempo

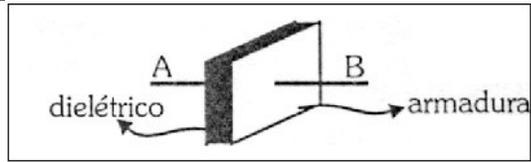
Em eletricidade e eletrônica, as grandezas: tensão, corrente e potência, quando analisadas em *corrente contínua*, são representadas por *letras maiúsculas*, respectivamente, V , I e P .

Porém, quando tais grandezas *variam no tempo*, suas representações são feitas com *letras minúsculas*, a saber: tensão = v ou $v(t)$; corrente = i ou $i(t)$; potência = p ou $p(t)$.

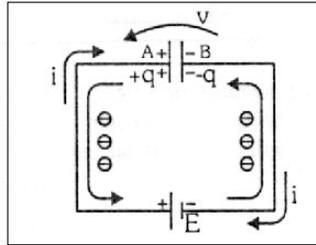
Capacitor e Conceito de Capacitância

Considere duas placas condutoras paralelas A e B , denominadas *armaduras*, separadas por um material isolante dielétrico armadura denominado dielétrico.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



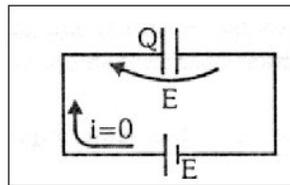
Aplicando uma diferença de potencial (tensão) entre as placas, com potencial positivo na placa **A** e potencial negativo na placa **B**, a placa **A** começa a ceder elétrons para o pólo positivo da fonte, carregando-se positivamente, e a placa **B**, simultaneamente, começa a atrair elétrons do pólo negativo da fonte, carregando-se negativamente, formando um fluxo de elétrons (corrente i).



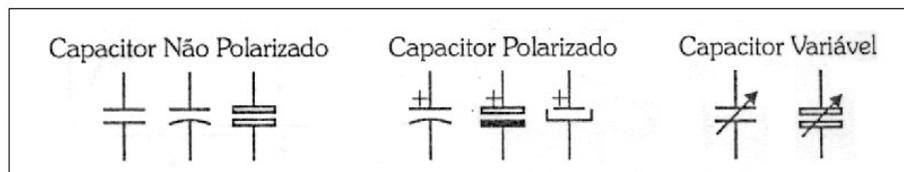
Porém, como entre as placas existe um material isolante, esse fluxo de elétrons não o atravessa, fazendo com que as cargas fiquem armazenadas nas placas.

Conforme aumenta a carga q armazenada nas placas, aumenta a diferença de potencial v entre elas, fazendo com que o fluxo de elétrons diminua.

Após um determinado tempo, a carga armazenada atinge o seu valor máximo Q . Isso ocorre quando a diferença de potencial entre as placas se iguala à tensão da fonte ($v = E$), cessando o fluxo de elétrons ($i = 0$).



Esse dispositivo, com capacidade de armazenar cargas elétricas (energia eletrostática), é chamado de **capacitor** ou **condensador**, cujos símbolos mais comuns estão representados abaixo.



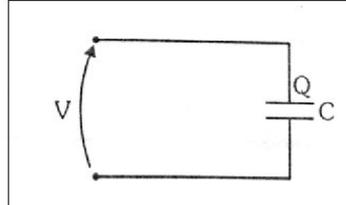
Em geral, nos capacitores fabricados com placas condutoras separadas por um dielétrico, a tensão pode ser aplicada aos seus terminais com qualquer polaridade.

Porém, em alguns capacitores, como os **eletrolíticos** de alumínio ou de tântalo, as placas devem ser **polarizadas** corretamente; caso contrário, eles podem se danificar. Para isso, o fabricante identifica o terminal positivo ou negativo no próprio encapsulamento, por meio dos sinais + ou -.

Capacitância x Características Elétricas

A capacidade de armazenamento de cargas elétricas é chamada de *capacitância*, simbolizada pela letra **C**. A capacitância é a medida da carga elétrica **Q** que o capacitor pode armazenar por unidade de tensão **V**. Matematicamente:

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

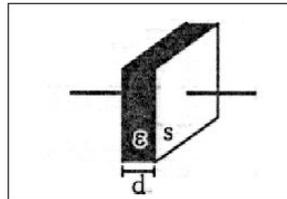


Pela expressão, a unidade de capacitância é coulomb/volt [C/V] ou, simplesmente, farad [F].

Capacitância x Características Físicas

A capacitância de um capacitor de placas paralelas depende da área **S [m²]** das placas, da distância **d [m]** entre elas e do material dielétrico, que é caracterizado por sua *permissividade absoluta*, representada pela letra grega **ε** (epsilon), cuja unidade de medida é *farad/metro* [F/m]. Matematicamente:

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$



No vácuo, $\epsilon_0 = 8,9 \times 10^{-12}$ F/m. Para os demais materiais, essa característica pode ser dada em relação à permissividade do vácuo, conforme a tabela seguinte:

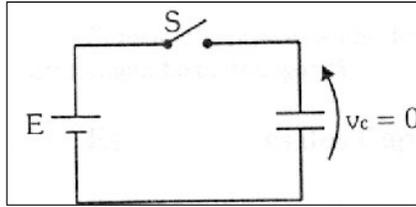
Dielétrico	Permissividade - ϵ [F/]
ar	ϵ_0
polietileno	$2,3 \cdot \epsilon_0$
papel	$3,5 \cdot \epsilon_0$
Baquelite	$4,8 \cdot \epsilon_0$
mica	$6 \cdot \epsilon_0$
porcelana	$6,5 \cdot \epsilon_0$

Comportamento Elétrico do Capacitor

Vamos analisar, em detalhes, o comportamento da tensão e da corrente no capacitor.

Considere o circuito abaixo, com a chave S aberta e com o capacitor inicialmente descarregado, isto é $v_c = 0$.

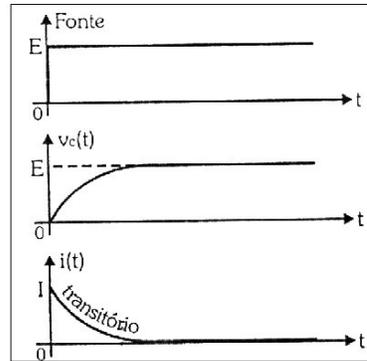
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



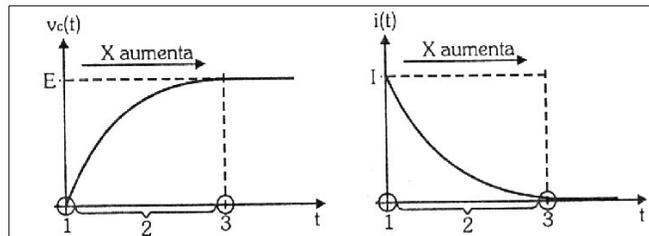
Fechando a chave no instante $t = 0$, a tensão entre as placas do capacitor *crece*, exponencialmente, até atingir o valor máximo, isto é, $v_c = E$.

Com a corrente acontece o contrário. Inicialmente, com as placas do capacitor descarregadas, a corrente não encontra qualquer resistência para fluir, tendo um valor máximo $i = I$, caindo, exponencialmente, até cessar, $i = 0$.

O período entre o fechamento da chave e a estabilização da tensão é rápido, mas não instantâneo, sendo denominado *transitório*.



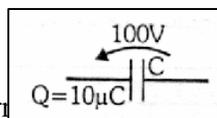
Esse comportamento do capacitor leva -nos às seguintes conclusões:



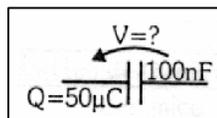
- 1) Quando o capacitor está totalmente descarregado, a fonte "enxerga" como um curto-circuito ($X_c = 0$). Por isso, $v_c = 0$ e $i = I$.
- 2) Conforme as placas se carregam e a tensão v_c aumenta, a fonte "enxerga" o capacitor como se ele fosse uma *reatância X_C crescente*, fazendo com que a corrente i diminua.
- 3) Quando o capacitor está totalmente carregado, a tensão entre as placas se iguala à da fonte $v_c = E$, que o "enxerga" como um circuito aberto ($X_c = \infty$). Por isso, $i = 0$.

Exercícios

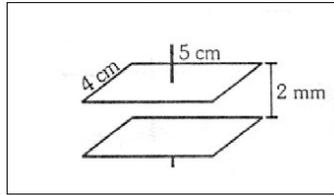
1. Qual é o valor do capacitor que, submetido a uma tensão de 100V, armazena $10 \mu C$ de carga?



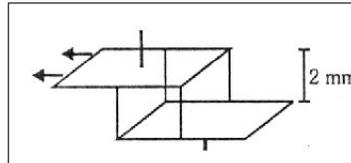
2. Um capacitor de 100 nF está carregado com $Q = 50 \mu C$. Qual é a tensão entre os seus terminais?



3. Um capacitor de placas paralelas tem as dimensões indicadas na figura abaixo:



- Qual é a sua capacitância se o dielétrico for de ar?
- Qual é a sua capacitância se o dielétrico for de mica?
- Qual é a sua capacitância se o dielétrico for de ar e a distância d diminuir para a metade?
- Qual é a sua capacitância se o dielétrico for de ar e uma das placas se deslocar, de modo que a área útil seja a metade?



Capacitores Fixos e Variáveis

Comercialmente, existem diversos tipos de capacitores fixos e variáveis, que abrangem uma ampla faixa de capacitâncias, des de alguns picofarads [pF] até alguns milifarads [mF].

Especificações dos Capacitores

Os fabricantes de capacitores, além de seus valores nominais, fornecem várias outras especificações em seus catálogos e manuais, das quais destacamos as seguintes:

Tolerância

Dependendo da tecnologia de fabricação e do material dielétrico empregado, a tolerância dos capacitores pode variar. Em geral, ela está entre $\pm 1\%$ e $\pm 20\%$.

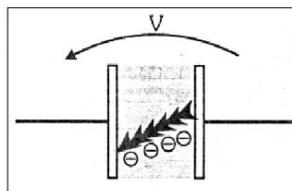
Tensão de Isolação

É a máxima tensão que pode ser aplicada *continuamente* ao capacitor, indo desde alguns volts [V] até alguns quilovolts [KV].

A máxima tensão de isolamento está relacionada, principalmente, com o dielétrico utilizado na fabricação do capacitor.

Isso se justifica pelo fato de que uma tensão muito elevada pode gerar um campo elétrico entre as placas suficiente para romper o dielétrico, abrindo um caminho de baixa resistência para a corrente.

Quando isso ocorre, dizemos que o capacitor possui uma *resistência de fuga*, podendo, inclusive, entrar em curto-circuito.



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Nos capacitores cerâmicos e plásticos (poliéster, poliestireno e polipropileno), a tensão de isolamento está na faixa de algumas dezenas de volts até alguns quilovolts.

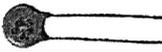
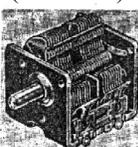
Nos capacitores eletrolíticos (de alumínio e de tântalo), a tensão de isolamento é limitada a algumas dezenas de volts.

Capacitores Comerciais

Os valores comerciais de capacitores são diversos, porém, os mais comuns são de múltiplos e submúltiplos das décadas mostradas na tabela seguinte:

Décadas de Valores Comerciais de Capacitores												
10	12	15	18	22	27	33	47	56	68	75	82	91

A tabela seguinte mostra alguns tipos de capacitores fixos e variáveis, bem como alguma de suas características.

Tipo de Capacitor	Valor Nominal	Tensão de Isolação	Polaridade
Cerâmico 	pF - nF	V - KV	não
Plástico Metalizado 	nF - μ F	V - KV	não
Eletrolítico (alumínio) 	μ F - mF	V	sim
Eletrolítico (tântalo) 	nF - μ F	V	sim
SMD 	pF - μ F	V	sim e não
Trimmer (variável) 	pF - nF	V	não
Placas Paralelas (variáveis) 	pF - nF	V	não

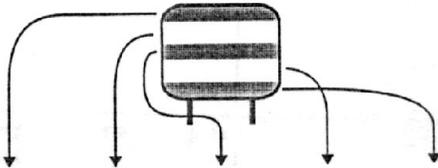
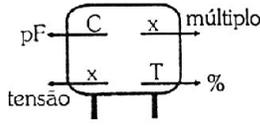
Obs. : Essas características podem variar em função do fabricante de capacitores.

Códigos de Especificação de Capacitores

Em geral, os capacitores não trazem as suas especificações no próprio encapsulamento. Por isso, existem três códigos para expressá-las: o **código literal** (tolerância) é usado em diversos tipos de capacitores, o **código de cores** (capacitância nominal, tolerância e tensão de isolamento) é usado principalmente nos capacitores de poliéster metalizado e o **código numérico** (capacitância nominal e tensão de isolamento) é usado principalmente nos capacitores cerâmicos.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

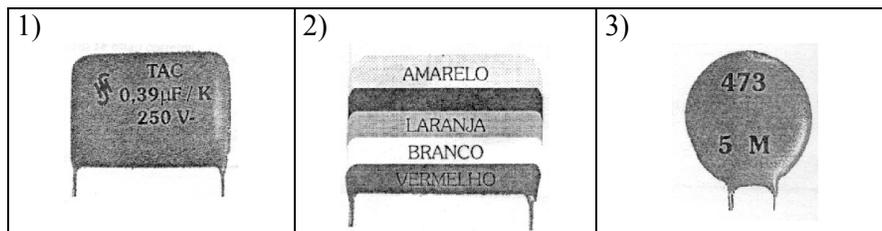
Código Literal para Tolerância de Capacitores						
C	D	F	G	J	K	M
± 0,25 pF	± 0,5 pF	± 1%/± 1pF	± 2%	± 5%	± 10%	± 20%

Código de Cores						Código Numérico		
								
Cores	1ª Dígito	2ª Dígito	Múltiplo	Tolerância	Tensão	Nº (x)	Múltiplo	Tensão
Preto		0			± 20%	0		
Marron	1	1	x 10 ¹ pF			1	x 10 ¹ pF	100V
Vermelho	2	2	x 10 ² pF			2	x 10 ² pF	25V
Laranja	3	3	x 10 ³ pF			3	x 10 ³ pF	
Amarelo	4	4	x 10 ⁴ pF			4	x 10 ⁴ pF	
Verde	5	5	x 10 ⁵ pF			5	x 10 ⁵ pF	50V
Azul	6	6				6	x 10 ⁶ pF	
Violeta	7	7				7	x 10 ⁷ pF	
Cinza	8	8	x 10 ⁻² pF			8	x 10 ⁻² pF	
Branco	9	9	x 10 ⁻¹ pF		± 10%	9	x 10 ⁻¹ pF	

Obs. : O logotipo do fabricante pode ser usado para representar a tensão de isolamento, cujo valor depende de código específico.

Exercícios

Especifique os capacitores abaixo, conforme dos dados dos seus encapsulamentos:

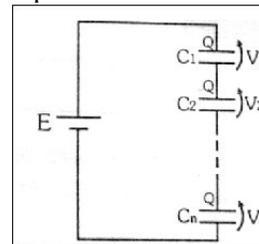


Associação de Capacitores

Num circuito, os capacitores podem estar ligados em série e/ou em paralelo, em função da necessidade de dividir a tensão ou obter uma capacitância diferente dos valores comerciais.

Associação Série

Na associação série, os capacitores estão ligados de forma que a carga **Q** armazenada em cada um deles seja a mesma, e a tensão **E** total aplicada aos capacitores se subdivide entre



eles de forma inversamente proporcional aos seus valores.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

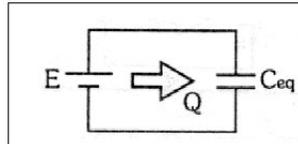
Pela Lei de Kirchhoff para Tensões, a soma das tensões nos capacitores é igual à tensão total E aplicada: $E = V_1 + V_2 + \dots + V_n$

$$\text{Como } V_i = \frac{Q}{C_i}, \text{ tem-se } E = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots + \frac{Q}{C_n} \Rightarrow \frac{E}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

Q termo E/Q corresponde ao inverso da capacitância equivalente vista pela fonte de alimentação. Assim:

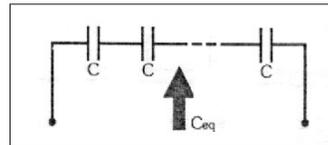
$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Isso significa que, se todos os capacitores dessa associação forem substituídos por uma única capacitância de valor C_{eq} , a fonte de alimentação E fornecerá a mesma carga Q ao circuito.



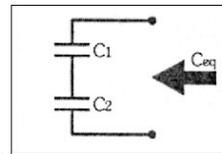
No caso de n capacitores iguais a C em série, tem-se:

$$C_{eq} = \frac{C}{n}$$



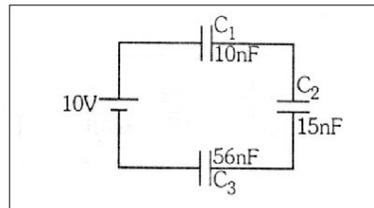
Para dois capacitores em série, tem-se:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$



Exercícios

1. Considerando o circuito abaixo, formado por três capacitores ligados em série, determine:

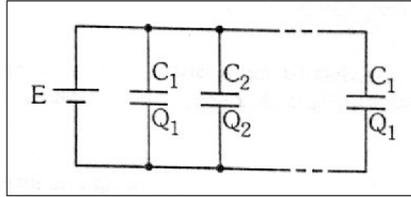


- a) A capacitância equivalente do circuito série.
- b) A carga Q fornecida pela fonte E ao circuito.
- c) A tensão em cada capacitor.

2. Verifique, pela Lei de Kirchhoff, se os resultados do item **1c** estão corretos.

Associação Paralela

Na **associação paralela**, os capacitores estão ligados de forma que a tensão total **E** aplicada ao circuito seja a mesma em todos os capacitores, e a carga total do circuito se subdivide entre eles proporcionalmente aos seus valores.



Adaptando a Lei de Kirchhoff para a distribuição das cargas, a soma das cargas nos capacitores é igual à carga total Q fornecida pela fonte: $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$.

Substituindo as cargas dos capacitores por $Q_i = E \cdot C_i$, tem-se:

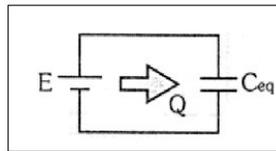
$$Q = C_1 \cdot E + C_2 \cdot E + \dots + C_n \cdot E \Rightarrow Q = E \cdot (C_1 + C_2 + \dots + C_n)$$

Dividindo a carga Q pela tensão E, chega-se a: $\frac{Q}{E} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$.

O resultado Q/E corresponde à capacitância equivalente C_{eq} da associação paralela, isto é, a capacitância que a fonte de alimentação entende como sendo a sua carga. Assim:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

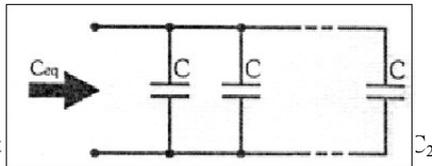
Isso significa que se todos os capacitores dessa associação forem substituídos por uma única capacitância de valor C_{eq} , a fonte de alimentação E fornecerá a mesma carga Q ao circuito.



No caso de **n** capacitores **iguais** a C em paralelo, tem-se:

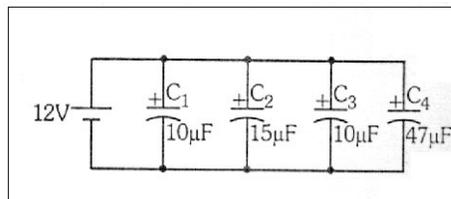
$$C_{eq} = n \cdot C$$

Obs.: Num texto, podemos represent



Exercícios

1. Considerando o circuito abaixo, formado por quatro capacitores ligados em paralelo, determine:



- a) A capacitância equivalente do circuito paralelo.
- b) A carga Q fornecida pela fonte E ao circuito.
- c) A carga armazenada em capacitor.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

2. Verifique, pela Lei de Kirchoff para Cargas, se os resultados do item 1c estão corretos.

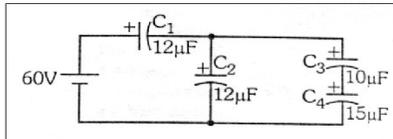
Associação Mista

A associação mista é formada por capacitores ligados em série e em paralelo, não existindo uma equação geral para a capacitância equivalente, pois ela depende da configuração do circuito.

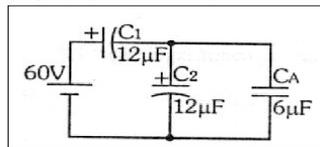
Assim, o cálculo deve ser feito por etapas, conforme as ligações entre os capacitores.

Exercícios

Considerando o circuito abaixo, formado por diversos capacitores ligados em série e em paralelo, resolva os itens seguintes:



- 1) Determine $C_A = C_3$ série C_4 :



$$C_A = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} \Rightarrow C_A = \frac{10 \times 10^{-6} \times 15 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6} + 15 \times 10^{-6}} = 6 \mu\text{F}$$

- 2) Determine $C_B = C_2 // C_A$:
3) Determine $C_{eq} = C_1$ série C^B :
4) Determine a carga Q que a fonte de alimentação fornece ao circuito:
5) Determine a carga Q_1 e a tensão V_1 no capacitor C_1 :
6) Determine a carga Q_2 e a tensão V_2 no capacitor C_2 :

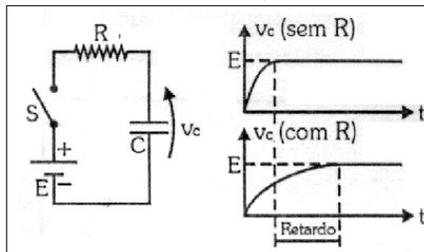
DISPOSITIVOS REATIVOS - CIRCUITO RC DE TEMPORIZAÇÃO

Um *circuito temporizador* é aquele que executa uma ação após um intervalo de tempo preestabelecido.

Constante de Tempo

Como vimos no módulo anterior, o tempo de carga de um capacitor alimentado diretamente por uma fonte de tensão não é instantâneo embora se a muito pequeno.

Ligando um resistor em série com o capacitor, pode-se *retardar* o tempo de carga, fazendo com que a tensão entre os seus terminais cresça mais lentamente.



Vamos analisar dimensionamento o produto entre resistência e capacitância $[R.C]$, considerando as seguintes unidades de medida das grandezas envolvidas:

$$[R] = \Omega \text{ (ohm)} = \text{V/A (volt/ampère)}$$

$$[C] = \text{F (farad)} \text{ r } \text{ÇN (coulomb/volt)}$$

$$[I] = \text{A (ampère)} = \text{C/s (coulomb/segundo)}$$

$$[R \cdot C] \Omega \cdot F = \frac{V}{A} \cdot \frac{C}{V} = \frac{C}{A} = \frac{1}{\frac{C}{C \cdot s}} = \frac{C \cdot s}{C} \Rightarrow [R \cdot C] = s = \text{segundo}$$

Portanto, o produto $R \cdot C$ resulta na grandeza tempo [segundo]. Esse produto é denominado **constante de tempo**, representado pela letra grega τ (tau).

Matematicamente: $\tau = R \cdot C$

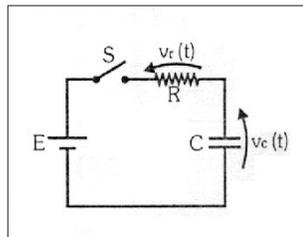
Num circuito RC, quanto maior a constante de tempo, maior é o tempo necessário para que o capacitor se carregue.

Carga do Capacitor

Considere um circuito RC série ligado a uma fonte de tensão contínua E e a uma chave S aberta, com o capacitor completamente descarregado.

Pela Lei de Kirchhoff para Tensões, a equação geral desse circuito é (S fechada):

$$v_c(t) + v_r(t) = E$$



A corrente que flui no circuito durante a carga do capacitor pode ser determinada aplicando-se a Primeira Lei de Ohm no resistor R : $i(t) = \frac{v_r(t)}{R}$

Ligando a chave S no instante $t = 0$, observa-se que as tensões e a corrente do circuito resultam nos seguintes gráficos e expressões:

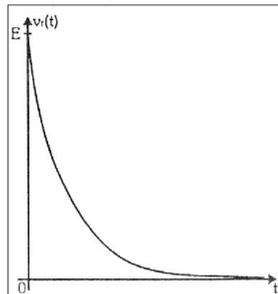
Tensão no Resistor

A tensão v_r cai exponencialmente de E até **zero**, pois o capacitor descarregado comporta-se como um curto-circuito e totalmente carregado comporta-se como um circuito aberto.

Matematicamente: $v_r(t) = E \cdot e^{-t/\tau}$

Em que: $e \cong 2,72 =$ algarismo neperiano

Observe que o termo $e^{-t/\tau}$ diminui com o aumento do instante t .



Tensão no Capacitor

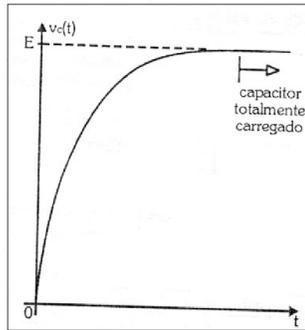
A tensão v_c no capacitor cresce exponencialmente desde zero até a tensão E , quando a sua carga é total. Portanto, a tensão no capacitor é uma exponencial crescente, que pode ser deduzida a partir da equação geral do circuito e da expressão de v_r :

$$v_c(t) + v_r(t) = E \Rightarrow v_c(t) = E - E \cdot e^{-t/\tau} \Rightarrow$$

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

$$v_c(t) = E \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Observe que o termo $(1 - e^{-t/\tau})$ aumenta com o aumento do instante t .

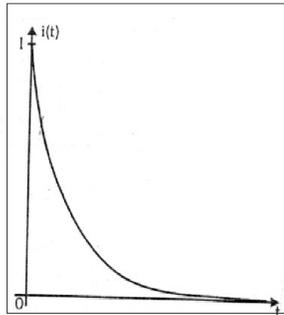


Corrente no Circuito

A corrente i inicia com um valor máximo $I = E/R$ quando o capacitor está descarregado (curto-circuito), caindo até zero quando o capacitor está totalmente carregado (circuito aberto). Matematicamente:

$$i(t) = \frac{v_r(t)}{R} \Rightarrow i(t) = I \cdot e^{-t/\tau}$$

Observe que o termo $e^{-t/\tau}$ diminui com o aumento do instante t .



Análise do circuito durante a carga do capacitor:

$v_c(t)$	$V_r(t)$	$i(t)$
<p style="text-align: center;">$v_c(t) = E \cdot (1 - e^{-t/\tau})$</p>	<p style="text-align: center;">$v_r(t) = E \cdot e^{-t/\tau}$</p>	<p style="text-align: center;">$i(t) = I \cdot e^{-t/\tau}$</p>
t = 0		
$v_c(0) = E \cdot (1 - e^{-0/\tau}) \Rightarrow$ $v_c(0) = E \cdot (2 - e^0) = E \cdot (1 - 1) \Rightarrow$ $v_c(0) = 0$	$v_r(0) = E \cdot e^{0/\tau} \Rightarrow$ $v_r(0) = E \cdot e^0 = E \cdot 1 \Rightarrow$ $v_r(0) = E$	$i(0) = I \cdot e^{0/\tau} \Rightarrow$ $i(0) = I \cdot e^0 = I \cdot 1 \Rightarrow$ $i(0) = I$

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Análise: Em $t = 0$, a tensão no capacitor é nula, a tensão no resistor é máxima e a corrente no circuito é máxima.

$$t = \tau$$

$$v_c(\tau) = E \cdot (1 - e^{-\tau/\tau}) \Rightarrow$$

$$v_c(\tau) = E \cdot (1 - e^{-1}) = E \cdot (1 - 0,37) \Rightarrow$$

$$v_c(\tau) = 0,63 \cdot E$$

$$v_r(\tau) = E \cdot e^{-\tau/\tau} \Rightarrow$$

$$v_r(\tau) = E \cdot e^{-1} \Rightarrow$$

$$v_r(\tau) = 0,37 \cdot E$$

$$i(\tau) = I \cdot e^{-\tau/\tau} \Rightarrow$$

$$i(\tau) = I \cdot e^{-1} \Rightarrow$$

$$i(\tau) = 0,37 \cdot I$$

Análise: Em $t = \tau$, a tensão no capacitor cresce até 63% da tensão da fonte ($v_c = 0,63 \cdot E$), a tensão no resistor cai 63% ($v_r = 0,37 \cdot E$) e a corrente no circuito cai 63% ($i = 0,37 \cdot I$).

$$t = 5 \cdot \tau$$

$$v_c(5 \cdot \tau) = E \cdot (1 - e^{-5\tau/\tau}) \Rightarrow$$

$$v_c(5 \cdot \tau) = E \cdot (1 - e^{-5}) = E \cdot (1 - 0,01) \Rightarrow$$

$$v_c(5 \cdot \tau) = 0,99 \cdot E$$

$$v_r(5 \cdot \tau) = E \cdot e^{-5\tau/\tau} \Rightarrow$$

$$v_r(5 \cdot \tau) = E \cdot e^{-5} \Rightarrow$$

$$v_r(5 \cdot \tau) = 0,01 \cdot E$$

$$i(5 \cdot \tau) = I \cdot e^{-5\tau/\tau} \Rightarrow$$

$$i(5 \cdot \tau) = I \cdot e^{-5} \Rightarrow$$

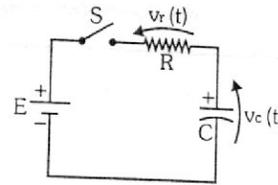
$$i(5 \cdot \tau) = 0,01 \cdot I$$

Análise: Em $t = 5 \cdot \tau$, a tensão no capacitor cresce até 99% da tensão da fonte ($v_c = 0,99 \cdot E$), a tensão no resistor cai 99% ($v_r = 0,01 \cdot E$) e a corrente no circuito cai 99% ($i = 0,01 \cdot I$). Nesse caso, podemos considerar que o capacitor já se encontra totalmente carregado.

Exercícios

Considere circuito RC abaixo, no qual o capacitor encontra-se totalmente descarregado.

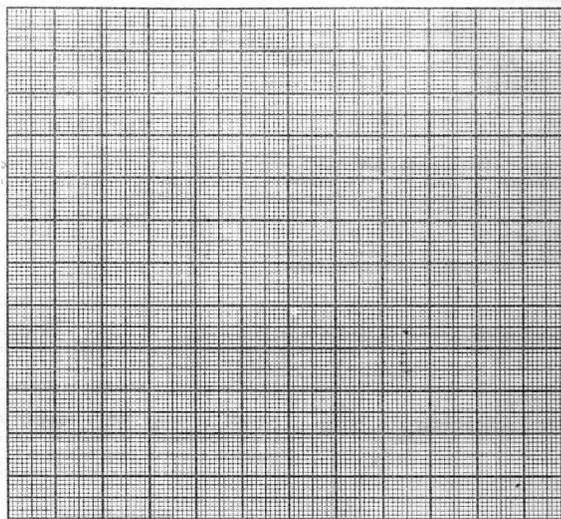
Dados $R = 100 \text{ k}\Omega$
 $C = 10 \mu\text{F}$
 $E = 10\text{V}$



- Determine a constante de tempo τ do circuito.
- A partir do fechamento da chave S, determine v_c , v_r e i para cada instante t da tabela.

t [s]	v_c [V]	v_r [V]	i [μA]
0			
0,4			
0,6			
1,0			
1,5			
2,0			
3,0			
4,0			
5,0			
6,0			
8,0			

- Desenhe na folha milimetrada os gráficos de $v_c(t)$, $v_r(t)$ e $i(t)$.



4. Análise os gráficos e tire suas conclusões sobre o comportamento do circuito nos instantes:

$t = 0:$

$t = \tau :$

$t = 5. \tau :$

5. Determine matematicamente o instante em que a tensão no capacitor atinge metade de seu valor máximo, isto é, 5V.

A constante de tempo do circuito vale $\tau = 1s$

Substituindo $v_c(t) = 5V$ e $\tau = 1s$ na expressão da carga do capacitor, tem-se:

$$v_c(t) = E (1 - e^{-t/\tau}) \Rightarrow 5 = 10.(1 - e^{-t/\tau}) \Rightarrow$$

$$\frac{5}{10} = 1 - e^{-t} \Rightarrow 0,5 = 1 - e^{-t} \Rightarrow$$

$$0,5 - 1 = -e^{-t} \Rightarrow -0,5 = -e^{-t} \Rightarrow$$

$$e^{-t} = 0,5 \Rightarrow -t = \ln 0,5 \Rightarrow -t = -0,69 \Rightarrow$$

$$t = 0,69 s$$

6. Determine graficamente o instante t do item anterior.

Entretanto com a tensão $v_c = 5V$ no gráfico, tem-se o instante correspondente:

$t =$ _____

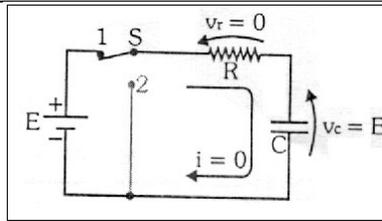
7. Compare os resultados dos itens 5 a 6 desse exercício:

Descarga do Capacitor

Considere um circuito **RC** série ligado a uma fonte de tensão E e a uma chave S inicialmente na posição **1**, com o capacitor já completamente carregado.

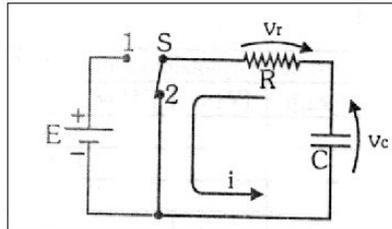
Dessa forma, tem-se:

$$i = 0 ; v_c = E ; v_r = 0$$



Ao mudar a chave **S** para a posição **2** no instante $t = 0$, a fonte de alimentação é desligada, ficando o circuito **RC** em curto.

Assim, o capacitor se descarrega sobre o resistor, de forma que sua tensão descreve uma curva exponencial decrescente.

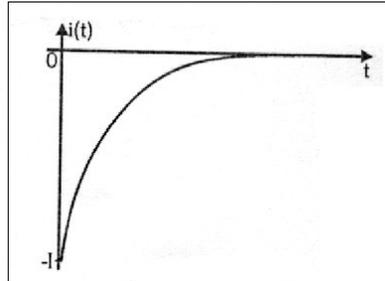


Nesse caso, o capacitor comporta-se como uma *fonte de tensão*, cuja capacidade de fornecimento de corrente é limitada pelo tempo de descarga.

Corrente no Circuito

A corrente i flui agora no sentido contrário, decrescendo exponencialmente desde $-I = E/R$ até *zero*, devido à descarga do capacitor. Assim, a sua expressão é dada por:

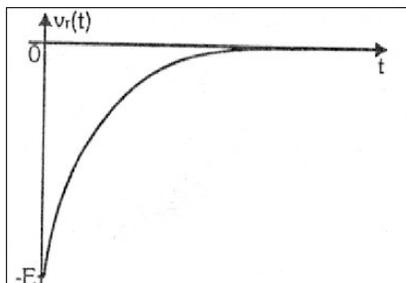
$$i(t) = -I \cdot e^{-t/\tau}$$



Tensão no Resistor

A tensão v_r no resistor acompanha a corrente, de forma que a sua expressão é dada por:

$$v_r(t) = -E \cdot e^{-t/\tau}$$

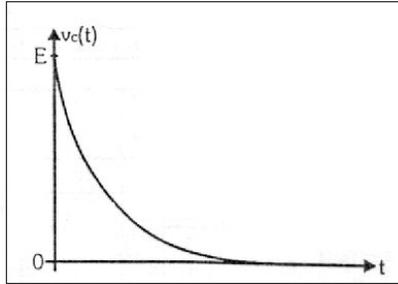


ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Tensão no Capacitor

A expressão da descarga do capacitor é dada por:

$$v_c(t) = -E \cdot e^{-t/\tau}$$

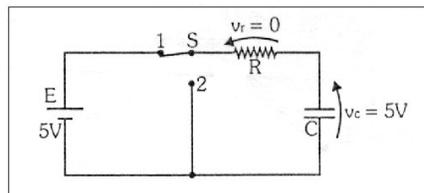


Análise do circuito durante a carga do capacitor:		
v _c (t)	v _r (t)	i(t)
<p style="text-align: center;">$v_c(t) = E \cdot e^{-t/\tau}$</p>	<p style="text-align: center;">$v_r(t) = -E \cdot e^{-t/\tau}$</p>	<p style="text-align: center;">$i(t) = -I \cdot e^{-t/\tau}$</p>
t = 0		
$v_c(0) = E \cdot e^{0/\tau} \Rightarrow v_c(0) = E$	$v_r(0) = -E \cdot e^{0/\tau} \Rightarrow v_r(0) = -E$	$i(0) = -I \cdot e^{0/\tau} \Rightarrow i(0) = -I$
Análise: Em t = 0, a tensão no capacitor e no resistor e a corrente no circuito são máximas.		
t = τ		
$v_c(\tau) = E \cdot e^{-\tau/\tau} \Rightarrow v_c(\tau) = 0,37.E$	$v_r(\tau) = -E \cdot e^{-\tau/\tau} \Rightarrow v_r(\tau) = -0,37 \cdot E$	$i(\tau) = -I \cdot e^{-\tau/\tau} \Rightarrow i(\tau) = 0,37.I$
Análise: Em t = τ , a tensão no capacitor cresce até 63% da tensão da fonte ($v_c = 0,63.E$), a tensão no resistor cai 63% ($v_r = -0,37.E$) e a corrente no circuito cai 63% ($i = 0,37.I$)		
t = 5 · τ		
$v_c(5 \cdot \tau) = E \cdot e^{-5\tau/\tau} \Rightarrow v_c(5 \cdot \tau) = 0,01.E$	$v_r(5 \cdot \tau) = -E \cdot e^{-5\tau/\tau} \Rightarrow v_r(5 \cdot \tau) = -0,01.E$	$i(5 \cdot \tau) = -I \cdot e^{-5\tau/\tau} \Rightarrow i(5 \cdot \tau) = -0,01.I$
Análise: Em t = 5 · τ, a tensão no capacitor cresce até 99% da tensão da fonte ($v_c = 0,01.E$), a tensão no resistor cai 99% ($v_r = 0,01.E$) e a corrente no circuito cai 99% ($i = 0,01.I$). Nesse caso, podemos considerar que o capacitor já se encontra totalmente descarregado.		

Exercícios

Considere o circuito RC abaixo, no qual o capacitor encontra-se totalmente carregado com tensão $E = 5V$.

Dados : $R = 10k\Omega$
 $C = 47nF$

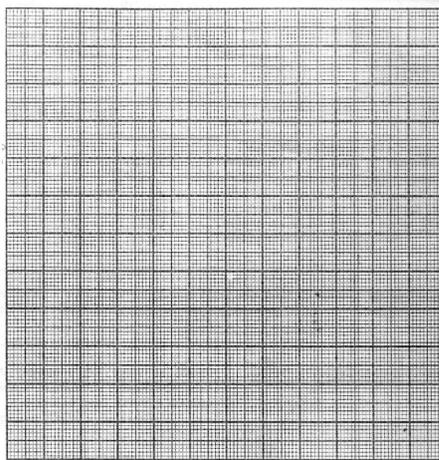


ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

1. Determine a constante de tempo τ do circuito.
2. A partir da mudança da chave S para 2, determine v_c , v_r e i para cada instante t da tabela:

t [s]	v_c [V]	v_r [V]	i [μ A]
0			
0,2			
0,3			
0,5			
0,8			
1,0			
1,4			
1,8			
2,0			
2,5			
3,0			

3. Desenhe na folha milimetrada os gráficos de $v_c(t)$, $v_r(t)$ e $i(t)$.



4. Análise os gráficos e tire suas conclusões sobre o comportamento do circuito nos instantes:

$$t = 0:$$

$$t = \tau :$$

$$t = 5 \cdot \tau :$$

5. Determine matematicamente o instante em que a tensão no capacitor atinge metade de seu valor máximo, isto é, 2,5V.
6. Determine graficamente o instante t do item anterior.
7. Compare os resultados dos itens 5 a 6 desse exercício:

Aplicações do Circuito RC

Nesse tópico, analisaremos duas aplicações práticas do circuito RC: um circuito gerador de onda quadrada e um circuito de inicialização automática e manual para computador.

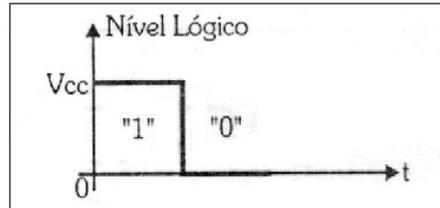
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Porém, esses dois circuitos utilizam dois dispositivos que não foram objetos de estudo desse apostila: a porta lógica inversora e o diodo semiconductor. Caso você não os conheça, não há problema, pois iniciaremos esse tópico com uma rápida análise desses dispositivos.

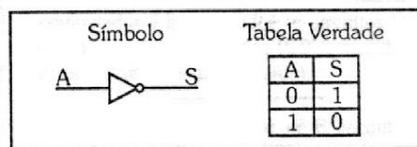
Porta Lógica Inversora

A *eletrônica digital* trabalha com apenas dois níveis de tensão, caracterizando, assim, o nível lógico de um "bit".

O *nível lógico "0"* corresponde a uma *tensão baixa* ou **0V**. O *nível lógico "1"* corresponde a uma *tensão alta* cujo valor depende da tensão de alimentação V_{CC} do circuito integrado considerado, sendo V_{CC} igual a 5V se a família for TTL e entre 3V e 18V se a família for CMOS.



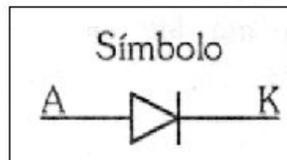
A porta lógica *inversora*, também denominada porta NÃO (NOT), caracteriza-se por complementar o nível lógico presente em sua entrada, isto é, $S = \overline{A}$, conforme mostra a sua tabela-verdade abaixo.



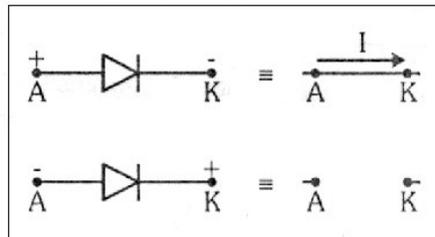
Diodo Semiconductor

O diodo é um dispositivo fabricado com material semiconductor, sendo que sua principal característica é permitir a condução da corrente elétrica num *único sentido*.

O comportamento do diodo depende de Símbolo como os seus terminais **anodo** (A) e **catodo** (K) estão polarizados.



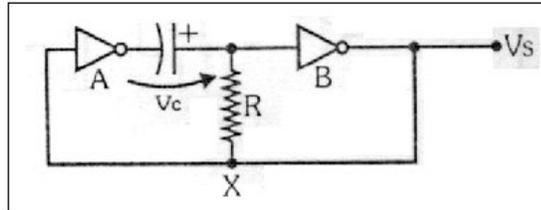
Quando o *anodo é positivo* em relação ao catodo, ele fica polarizado diretamente e comporta-se como um curto-circuito, conduzindo corrente elétrica; caso contrário, ele fica polarizado reversamente e comporta-se como um *circuito aberto*, não permitindo a condução da corrente elétrica.



ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Aplicação I - Gerador de Onda Quadrada

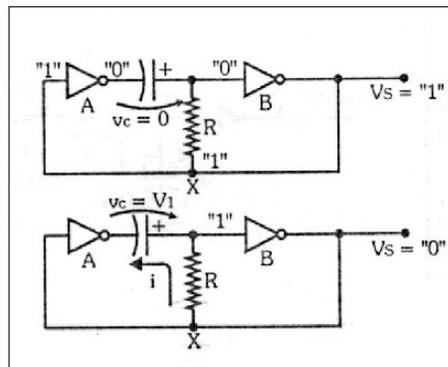
O circuito abaixo é muito utilizado para gerar uma onda quadrada de alta frequência (MHz), servindo como sinal de relógio ("clock") em sistemas digitais seqüenciais e microprocessados.



Considerando inicialmente o capacitor descarregado, a entrada da porta **B** encontra-se com nível lógico "0", de forma que a saída do circuito apresenta nível lógico "1".

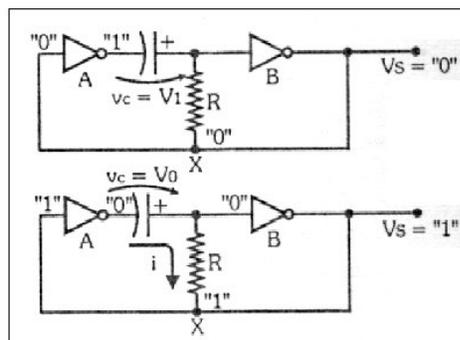
O nível lógico "1" da saída é realimentado simultaneamente para a entrada da porta A (impondo nível lógico "0" em sua saída) e para a extremidade de **X** do resistor **R**.

Assim, o capacitor **C** começa a carregar por meio de **R**. Quando v_c atinge um nível V_1 suficientemente alto, a porta **B** complementa a saída, que passa a ter nível lógico "0".

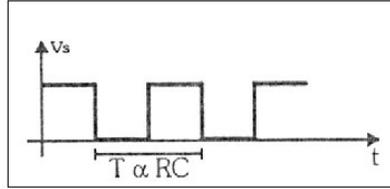


O nível lógico "0" da saída é agora realimentado simultaneamente para a entrada da porta A (impondo nível lógico "1" em sua saída) e para a extremidade **X** do resistor **R**.

Assim, o capacitor **C** começa a se descarregar por meio de **R**. Quando v_c atinge um nível V_0 suficientemente baixo, a porta **B** atua, de forma que a saída do circuito é novamente complementada, voltando a apresentar nível lógico "1".



Esse processo cíclico repete-se continuamente, fazendo com que o sinal de saída tenha a forma de *onda quadrada*, cujo período **T**, em [s], é diretamente proporcional à constante de tempo **R.C**, sendo a frequência **f**, em [Hz], dada por: $f = 1/T$.



Aplicação II - Circuito de Inicialização do Computador

Todo computador, ao ser ligado, passa por um processo de inicialização que consiste em: testar a memória, preparar os periféricos da CPU e carregar o sistema operacional (DOS ou WINDOWS). Esse processo denomina-se "**boot**".

Para isso, o computador precisa receber um nível lógico determinado no instante em que é ligado, para posicionar a memória ROM no endereço em que se encontra o comando de inicialização.

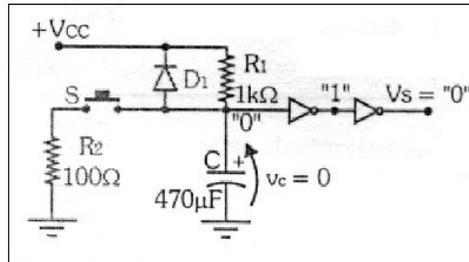
Esse nível lógico pode ser "0" ou "1", dependendo do tipo de microprocessador da CPU, e deve ser dado automaticamente por um *circuito de inicialização* ("reset").

Além disso, todo computador possui um botão de "*reset*" em seu painel frontal, permitindo que a inicialização possa ser executada manualmente.

Inicialização Automática

O *circuito de inicialização* ("reset") abaixo pode ser utilizado em diversos sistemas microprocessados, como o computador.

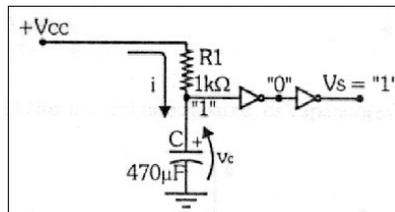
No instante em que a alimentação do computador é ligada, todos os circuitos que o compõem são alimentados (CPU, memórias e dispositivos de entrada e saída).



Porém, como o capacitor C encontra-se descarregado, a saída V_s do circuito envia um nível lógico "0" para a CPU, posicionando a memória no endereço em que se encontra o comando de inicialização.

A CPU aguarda, então, o capacitor se carregar por meio de R_1 até um nível de tensão suficiente para complementar as portas inversoras.

Quando isso ocorre, o nível lógico "1" na saída V_s libera a CPU para que a inicialização seja processada, terminando com o sistema operacional já disponível para o usuário.

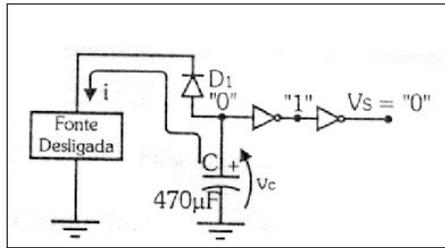


Portanto, a função do capacitor é atrasar o comando de inicialização, dando tempo para que a memória se posicione no endereço correto, e m que esse comando se encontra.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Como o capacitor não tem por onde se descarregar, ele assim permanece até que a alimentação do computador seja desligada.

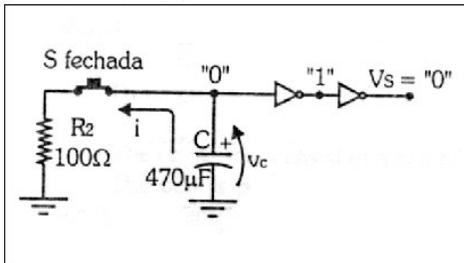
Nesse caso, como o diodo encontra-se diretamente polarizado, o capacitor descarrega-se rapidamente por ele e pela fonte de alimentação.



Inicialização Manual

Outra forma de inicializar o computador quando ele se encontra em operação, é por meio da chave S que fica no seu painel frontal.

O acionamento manual dessa chave provoca a descarga rápida do capacitor por meio de R_2 , de forma que a saída V_s envia novamente o nível lógico "0" para a CPU reiniciando o computador.



DISPOSITIVOS REATIVOS: INDUTORES, CIRCUITO RL E RELÉS

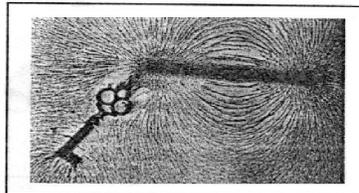
Princípios do Eletromagnetismo

Este tópico tem como objetivo analisar apenas os conceitos de eletromagnetismo necessários para compreendermos os dispositivos reativos denominados indutor e relé.

Campo Magnético

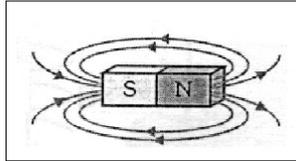
O *ímã natural* é um minério de ferro chamado magnetita, pois foi descoberto na região de Magnésia, ainda na Antigüidade.

Esse material tem a propriedade de atrair pedaços de ferro, sendo que essa força de atração surge devido ao *campo magnético* que ele cria ao seu redor.



O ímã possui *dois pólos* inseparáveis, denominados *norte* e *sul*, devido à relação com o campo magnético terrestre.

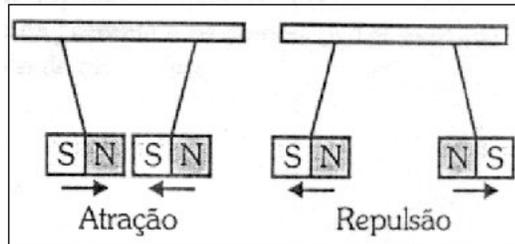
O campo magnético é representado por *linhas de campo* orientadas no sentido do *pólo norte para o sul*.



A **força de interação** entre dois ímãs pode ser de **atração** ou **repulsão**, dependendo dos pólos que encontram-se próximos, podendo ser observada experimentalmente. A lei da força de interação magnética é:

"Pólos magnéticos diferentes se atraem e pólos magnéticos iguais se repelem."

Do estudo dos fenômenos causados pelo campo magnético, surgiram duas grandezas básicas: **fluxo magnético** e **indução magnética**.

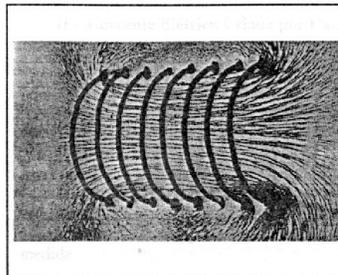


Fluxo Magnético

O conjunto das linhas de campo que saem do pólo norte ou chegam ao pólo sul de um ímã é denominado **fluxo magnético**, representado pela letra grega ϕ (fi), cuja unidade de medida é o weber [Wb].

A medida do fluxo magnético tem referência a seguinte relação:

$$1\text{Wb} = 10^8 \text{ linhas de campo}$$



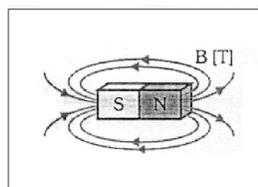
Indução Magnética

A **indução magnética** B é a medida da densidade de fluxo magnético, isto é, da quantidade de linhas de campo que atravessam uma área perpendicular a elas.

Como as linhas de campo são orientadas, a indução magnética é uma grandeza vetorial

A unidade de medida da indução magnética é weber/metro quadrado [Wb/m²] ou, simplesmente, tesla [T], e a sua expressão é:

$$B = \frac{\phi}{S}$$



Eletromagnetismo

Os fenômenos magnéticos levaram diversos cientistas a se aprofundarem no seu estudo por meio de experimentos. Com isso, várias descobertas foram feitas. A descoberta mais notável foi a de que **os fenômenos elétricos e magnéticos atuam sempre juntos**, dando início ao estudo denominado **eletromagnetismo**.

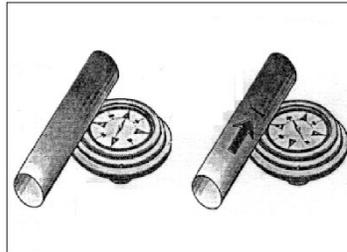
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

As relações entre os fenômenos elétricos e magnéticos podem ser verificadas experimentalmente, conforme segue:

I - Campo Magnético Criado por Corrente Elétrica

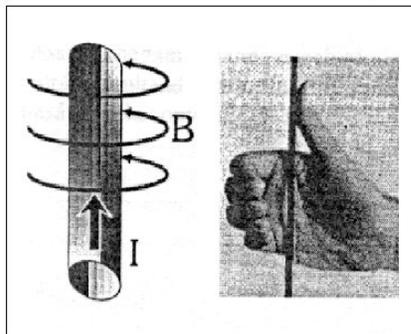
Quando uma bússola é colocada nas proximidades de um condutor percorrido por uma corrente elétrica, o seu ponteiro, que inicialmente estava orientado para o norte magnético terrestre, muda de direção, mostrando que **a corrente elétrica cria um campo magnético**.

A interação desses dois campos gera um campo magnético resultante em uma nova direção, alterando a orientação do ponteiro da bússola.



O campo magnético gerado ao redor do condutor percorrido por uma corrente elétrica tem o **sentido horário**, observando a corrente elétrica convencional entrando no condutor.

Dessa observação, estabeleceu-se uma regra prática para conhecer o sentido desse campo magnético, denominada **regra da mão direita**, segundo a qual o "dedão" indica o sentido da corrente e os demais dedos indicam o sentido de campo magnético.

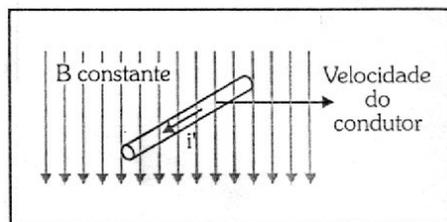


II - Corrente Elétrica Criada por Campo Magnético

Um condutor parado, imerso num campo magnético **B** constante, não sofre nenhum efeito.

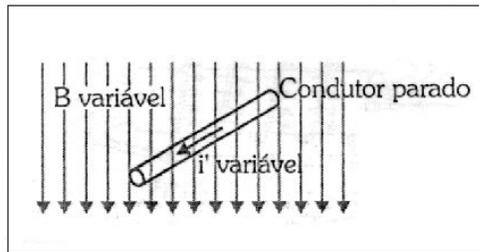
Porém, se o **condutor se movimentar** dentro desse campo magnético **B**, surge nele uma corrente **i'** e uma tensão **e'** induzidas.

A corrente e a tensão induzidas são proporcionais à velocidade do condutor, podendo ser detectadas por um instrumento de medida.



Se o condutor estiver parado, mas o **campo magnético B for variável**, o mesmo fenômeno pode ser observado, isto é, surge nele uma corrente **i'** e uma tensão **e'** induzidas.

Nesse caso, a corrente e a tensão induzidas são proporcionais à variação do campo magnético, podendo ser detectadas por um instrumento de medida.

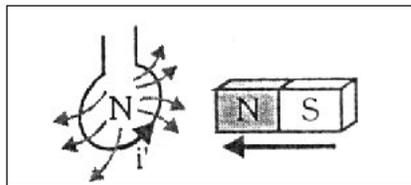


O **sentido** da corrente elétrica induzida obedece à seguinte **Lei de Lenz**:

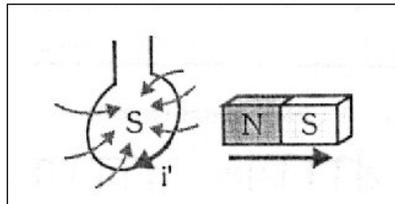
"A corrente elétrica induzida tem um sentido tal que cria um outro campo á magnético que se opõe à variação do campo magnético que a produziu."

A verificação experimental da Lei de Lenz pode ser feita da seguinte forma:

Se o pólo norte de um ímã estiver se **aproximando** de uma das faces de uma espira circular, a corrente induzida i' terá um sentido tal que cria também um pólo norte nessa mesma face, de forma a **repelir** o ímã.



Se o pólo norte desse ímã estiver se **afastando** dessa face da espira circular, a corrente induzida i' terá um sentido tal que cria um pólo sul nessa mesma face, de forma **atrair** o ímã.



Portanto, a corrente induzida cria um campo que tende, no primeiro caso, a repelir o ímã que se aproxima e, no segundo caso, a atrair o ímã que se afasta.

Onda Eletromagnética

Já vimos, nesta apostila, que corrente é carga elétrica em movimento, e que as cargas criam um campo elétrico ao seu redor. Portanto, corrente elétrica variável cria campo elétrico variável.

Nesse último módulo, vimos que a corrente elétrica cria um campo magnético ao redor do condutor. Portanto, **variações de campo elétrico criam variações de campo magnético**.

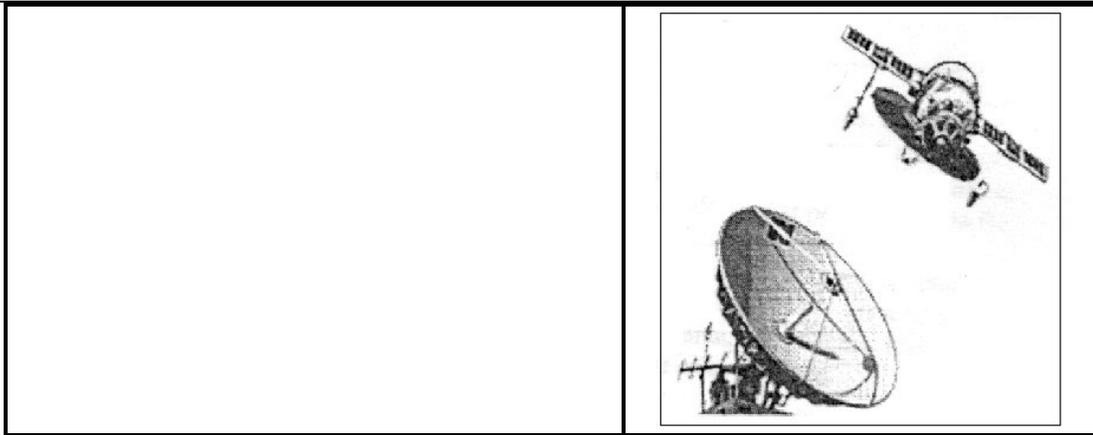
Por fim, vimos que variações de campo magnético induzem variações de corrente condutor. Portanto, **variações de campo magnético criam variações de campo elétrico**.

Conclusão

Campo elétrico variável cria campo magnético variável e campo magnético variável cria campo elétrico variável, constituindo o **campo eletromagnético**.

Por causa dessa conversão seqüencial de um campo no outro, o campo eletromagnético tem a propriedade de se **propagar** pelo espaço em forma de **onda eletromagnética**, propiciando as transmissões e recepções a distância sem a utilização de fio.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



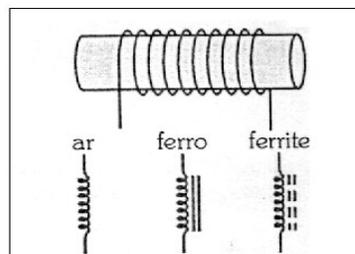
Assim, chegamos a uma conclusão igual à que vários cientistas chegaram há mais de cem anos atrás, resultando na invenção do telégrafo sem fio e do rádio, sendo a antena o elemento responsável pela conversão de sinais elétricos em onda eletromagnética e vice-versa.

Indutor e Conceito de Indutância

Indutor ou Bobina

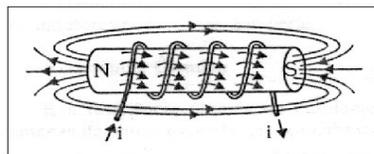
O *indutor ou bobina* é um dispositivo formado por um fio esmaltado enrolado em torno de um núcleo.

O *símbolo* do indutor depende do material usado como núcleo, conforme mostra a figura abaixo.



Ao passar uma corrente elétrica pelas espiras, cada uma delas cria ao seu redor um campo magnético, cujo sentido é dado pela regra da mão direita.

No interior do indutor, as linhas de campo se somam, criando uma *concentração do fluxo magnético*.



Os núcleos de *ferro e ferrite* têm como objetivo reduzir a dispersão das linhas de campo, pois esses materiais apresentam baixa resistência à passagem do fluxo magnético.

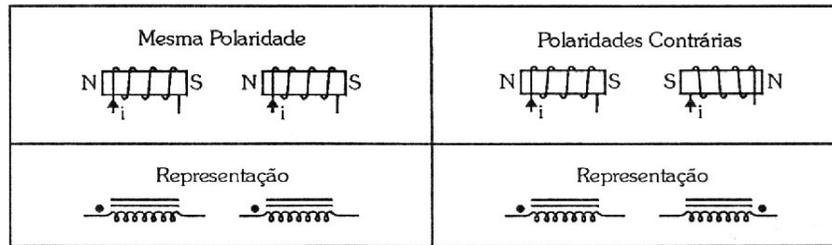
Pelo sentido das linhas de campo, o indutor fica *polarizado magneticamente*, isto é, cria um pólo norte por onde sai o fluxo magnético e um pólo sul por onde entra o fluxo magnético, comportando-se como um ímã artificial, denominado *eletroímã*.

Polaridade Magnética do Indutor

É necessário conhecer a polaridade magnética de um indutor quando ele se encontra próximo a outro indutor, aspecto esse que será destacado mais adiante.

Dois indutores têm a mesma polaridade quando os seus fluxos magnéticos têm sentidos iguais, e polaridades contrárias quando os seus fluxos magnéticos têm sentidos diferentes. Num circuito, essa polaridade é representada por um ponto (•) sobre uma de suas extremidades.

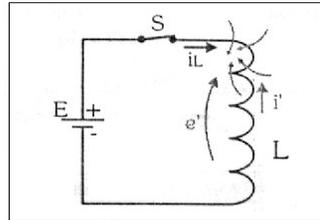
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



Indutância

Considere um indutor alimentado por uma fonte de tensão constante.

Fechando a chave S , em $t = 0$, surge uma corrente i_L crescente. Ao passar por uma espira, essa corrente cria um campo magnético ao seu redor. Essas linhas de campo cortam as espiras seguintes, induzindo uma corrente i' que, segundo a Lei de Lenz, irá se opor à causa

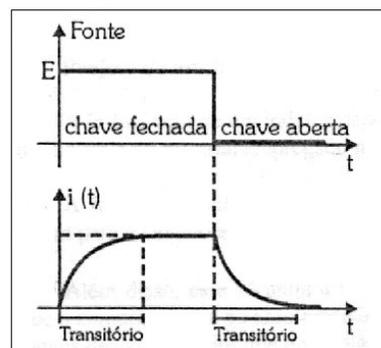


que a originou

Por causa dessa oposição, a corrente i_L leva um certo tempo, denominado *transitório*, para atingir o seu valor máximo $i_L = I$, que é limitado apenas pela resistência ôhmica do fio.

Quando a corrente estabiliza em I , o campo magnético armazenado passa a ser constante, não havendo mais corrente induzida para criar oposição.

Desligando a chave S , a corrente i_L decrescente cria uma nova oposição, de forma a evitar a sua diminuição, aparecendo um novo transitório, até que ela chega a *zero*.



Portanto pode-se dizer que o indutor *armazena energia magnética*, pois, mesmo sem alimentação, ainda existe corrente.

A *indutância* L , é a capacidade do indutor em armazenar energia magnética criada por uma corrente. Sua unidade de medida é a *henry* [H].

A oposição às variações de corrente no indutor é denominada *reatância indutiva* X_L [Ω], que, em corrente contínua, comporta-se da seguinte forma:

- 1) Quando o indutor está totalmente desenergizado, a corrente $i_L = 0$, isto é, a fonte o "enxerga" como um *circuito aberto* ($X_L = \infty$).
- 2) Quando o indutor está totalmente energizado, a corrente atinge o seu valor máximo I , estabilizando-se. Assim, não havendo mais variação nessa corrente, deixa de existir a corrente induzida i' , de forma que a fonte "enxerga" o indutor como uma resistência baixa (resistência do fio), isto é, praticamente um curto circuito ($X_L = 0$).

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Indutores Fixos e Variáveis

Comercialmente, existem diversos tipos de indutores fixos e variáveis, que abrangem uma ampla faixa de indutâncias, desde alguns nanohenrys [nH] até alguns henrys [H].

Especificações dos Indutores

Os fabricantes de indutores, além de seus valores nominais, fornecem várias outras especificações em seus catálogos e manuais, das quais destacamos as seguintes:

□ Tolerância

Dependendo da tecnologia de fabricação e do material empregado no núcleo, a tolerância dos indutores pode variar. Em geral, ela está entre $\pm 1\%$ e $\pm 20\%$.

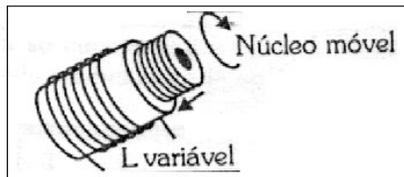
□ Resistência Ôhmica

É a resistência ôhmica do enrolamento do indutor, da ordem de unidade de ohms a centenas de ohms, especificada para alimentação em corrente contínua.

Indutores Comerciais

Os valores comerciais de indutores são diversos, não havendo uma norma rígida, já que, em geral, eles são fabricados para aplicações específicas, como em circuitos de áudio, radiofrequência (RF) e circuitos de acionamento e controle.

Os *indutores variáveis* são, geralmente, constituídos por um *núcleo móvel*, cuja posição pode ser ajustada externamente. Quanto mais o núcleo penetra no indutor, maior é a sua indutância.



A tabela seguinte mostra alguns tipos de indutores.

Tipo de Indutor	Características	Tipo de Indutor	Características
 Radial	<ul style="list-style-type: none">• Fixo• Núcleo de ferrite	 Encapsulado	<ul style="list-style-type: none">• Fixo• Núcleo de ferrite
 Toroidal	<ul style="list-style-type: none">• Fixo• Núcleo de ferrite	 Blindado	<ul style="list-style-type: none">• Variável• Núcleo de ferrite

Característica Magnética do Núcleo

A característica magnética de um material é determinada por sua *permeabilidade magnética* μ , cuja unidade de medida é *tesla.metro/ampère* [T.m/A].

A permeabilidade magnética do vácuo vale: $\mu_0 = 4. \pi \times 10^{-7}$ T.m/A. Para os demais materiais, essa característica pode ser dada em relação à permeabilidade magnética do vácuo, conforme a tabela seguinte:

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Núcleo	Permeabilidade - μ [T.m/A]
Ar	μ_0
Materiais diversos	μ_0
Ferro	$10. \mu_0$ a $8000. \mu_0$
Ferrite	$10. \mu_0$ a $5000. \mu_0$

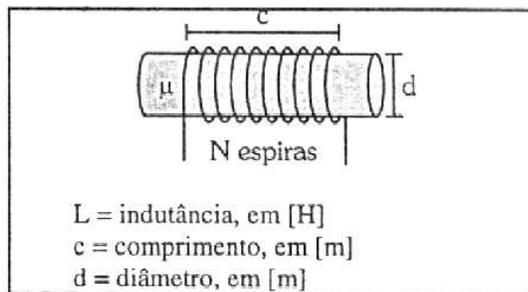
Projeto de um Indutor

A indutância de um indutor depende, basicamente, de suas dimensões físicas, do número de espiras e do material empregado no núcleo.

A fórmula seguinte é baseada em estudos mais detalhados do eletromagnetismo, sendo aceita para o cálculo aproximado de indutâncias com espiras enroladas numa única camada.

Além disso, essa fórmula é válida desde que o comprimento c do enrolamento seja pelo menos dez vezes maior que o seu diâmetro d .

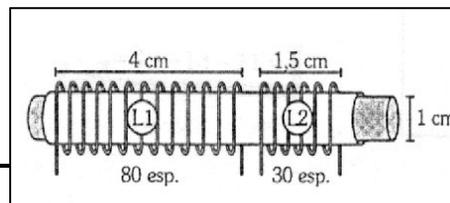
$$L = \frac{0,785 \cdot \mu \cdot N^2 \cdot d^2}{c}$$



Exercícios

A figura abaixo mostra uma bobina de antena de um receptor AM, formada por dois indutores. Determine L_1 e L_2 .

Dado: $\mu = 1000. \mu_0$



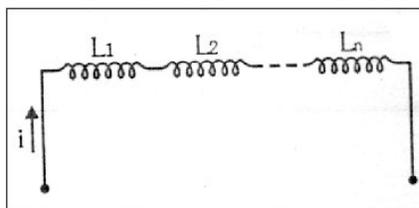
Associação de Indutores

Inicialmente, veremos as expressões das indutâncias equivalentes para indutores *afastados entre si*, de modo que o fluxo magnético de um indutor *não interfira* no outro.

Associação Série

Na associação série, os indutores estão ligados de forma que a corrente seja a mesma em todos eles, sendo a indutância equivalente dada por:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots L_n$$



Para n indutores iguais a L em série, a indutância equivalente vale:

$$L_{eq} = n \cdot L$$

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Associação Paralela

Na *associação paralela*, os indutores estão ligados de forma que a tensão total aplicada ao circuito seja a mesma em todos eles, sendo a indutância equivalente dada por:

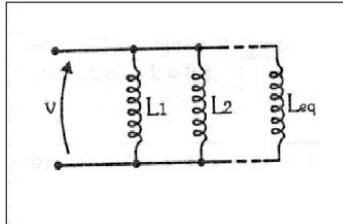
$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

Para **n** indutores **iguais a L** em paralelo:

$$L_{eq} = \frac{L}{n}$$

Para **dois** indutores em paralelo:

$$L_{eq} = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$



Associação Mista

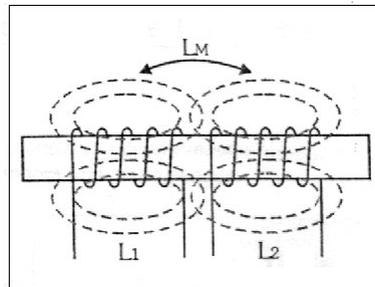
A *associação mista* é formada por indutores ligados em série e em paralelo, não existindo uma equação geral para a indutância equivalente, pois ela depende da configuração do circuito: Nesse caso, o cálculo deve ser feito por etapas, conforme as ligações entre os indutores.

Indutância Mútua

Quando dois indutores estão *próximos* um do outro ou são enrolados num *mesmo* núcleo, o fluxo magnético de um indutor interfere na indutância do outro e vice-versa, aparecendo uma *indutância mútua* L_M .

A indutância mútua L_M entre dois indutores L_1 e L_2 é dada por:

$$L_M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

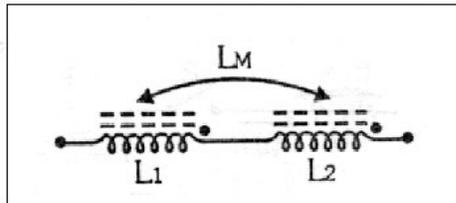


A constante **k** é o *coeficiente de acoplamento*, sendo $0 \leq k \leq 1$. Quanto mais influência um indutor exerce sobre o outro, mais próximo de **1** é valor de **k**.

A influência da indutância mútua L_M na indutância equivalente L_{eq} depende também polaridade dos indutores.

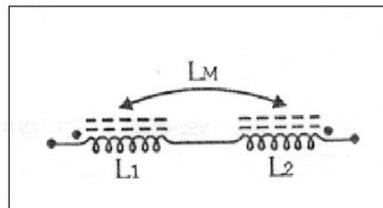
Se os indutores estiverem ligados em série com a *mesma polaridade* a indutância mútua aumentará o valor da indutância equivalente, cujo valor será de:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + 2 \cdot L_M$$



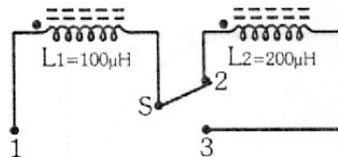
Se os indutores estiverem ligados em série com *polaridades contrárias*, a indutância mútua reduzirá o valor da indutância equivalente, cujo valor será de:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 - 2.L_M$$

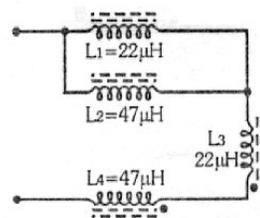


Exercícios

- O esquema abaixo mostra dois indutores L_1 e L_2 com as suas respectivas polaridades. Em função da posição da chave S e do acoplamento entre os indutores, determine a indutância equivalente do circuito.



- L_{eq} entre 1 e 3 com S na posição 2 e indutores alojados em núcleos de ferrite diferentes e afastados entre si.
 - L_{eq} entre 1 e 2 com S na posição 3 e indutores alojados em núcleos de ferrite diferentes e afastados entre si.
 - L_{eq} entre 1 e 3 com S na posição 2 e indutores alojados em núcleos iguais e próximos entre si, com $k = 0,8$.
 - L_{eq} entre 1 e 2 com S na posição 3 e indutores alojados em núcleos iguais e próximos entre si, com $k = 0,8$.
- Determine a indutância equivalente do circuito abaixo, estando L_3 e L_4 próximos entre si, com $k = 0,5$.



Circuito RL de Temporização

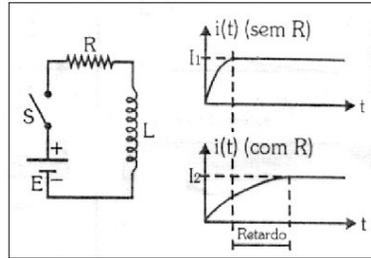
Constante de Tempo

No item anterior, vimos que o tempo de energização de um indutor alimentado diretamente por uma fonte de tensão não é instantâneo, embora seja muito pequeno.

Ligando um resistor em série com o indutor, pode -se *retardar* o tempo de energização, fazendo com que a corrente cresça mais lentamente.

A *constante de tempo* τ é dada por:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

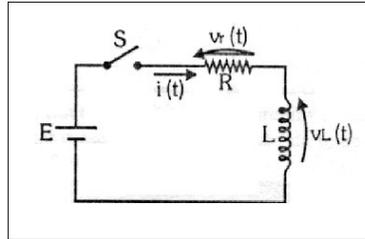


Energização do Indutor

Considere um circuito **RL** série ligado a uma fonte de tensão contínua **E** e a uma chave **S** aberta, com o indutor completamente desenergizado, sendo a resistência do fio do indutor desprezível em relação a **R**.

Pela Lei de Kirchhoff para Tensões, equação geral desse circuito é (S fechada):

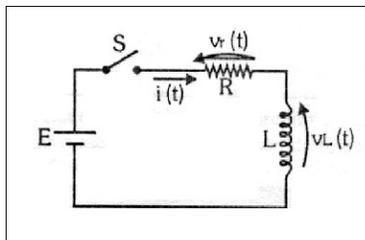
$$v_L(t) + v_r(t) = E$$



A corrente que flui no circuito durante a energização é dada por: $i(t) = \frac{v_r(t)}{R}$.

Ligando a chave **S** no instante $t = 0$, a corrente **i** cresce exponencialmente até o valor máximo $I = E/R$ e a tensão v_r no resistor, que acompanha a corrente, cresce até o valor máximo **E**. Assim, a tensão v_L no indutor decresce exponencialmente de **E** até **zero**.

Lembre-se que o retardo no crescimento da corrente **i** e da tensão v_r é provocado pela corrente **i'** e pela tensão e' induzidas em **L**.

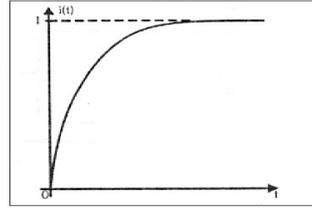


Esse comportamento é expresso matematicamente e graficamente conforme segue:

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

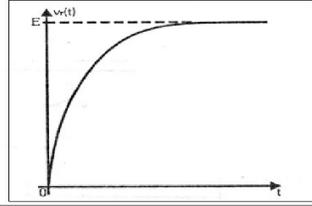
Corrente no Circuito

A expressão da corrente na energização do indutor é dada por: $i(t) = I.(1 - e^{-t/\tau})$



Tensão no Resistor

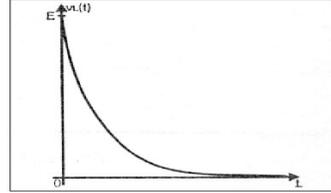
A tensão no resistor acompanha a corrente, de forma que a sua expressão é dada por: $v_r(t) = E.(1 - e^{-t/\tau})$



Tensão no Indutor

Pela Lei de Kirchhoff para Tensões, tem-se: $v_L + v_r = E$, portanto $v_L = E - v_r$.

Assim, a expressão da tensão no indutor é dada por: $v_L(t) = E. e^{-t/\tau}$

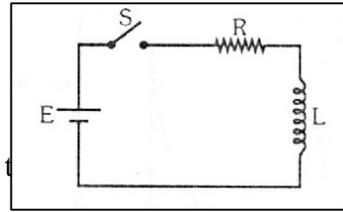


Análise do circuito durante a energização do indutor:		
$i(t)$	$v_r(t)$	$v_L(t)$
 $i(t) = I(1 - e^{-t/\tau})$	 $v_r(t) = E(1 - e^{-t/\tau})$	 $v_L(t) = E. e^{-t/\tau}$
t = 0		
$i(0) = 0$	$v_r(0) = 0$	$v_L(0) = E$
Análise: Em $t = 0$, a corrente no circuito é nula, a tensão no resistor é nula e a tensão no indutor é máxima.		
t = τ		
$i(\tau) = 0,63.I$	$v_r(\tau) = 0,63.E$	$v_L(\tau) = 0,37.E$
Análise: Em $t = \tau$, a corrente no circuito cresce até 63% do valor máximo ($i = 0,63.I$), a tensão no resistor cresce até 63% da tensão da fonte ($v_r = 0,63.E$) e a tensão no indutor cai 37% da tensão da fonte ($v_L = 0,37.E$).		
t = 5. τ		
Análise: Em $t = 5. \tau$, a corrente no circuito cresce até 99% do valor máximo ($i = 0,99.I$), a tensão no resistor cresce até 99% da tensão da fonte ($v_r = 0,99.E$) e a tensão no indutor cai 1% da tensão da fonte ($v_L = 0,01.E$). Nesse caso, podemos considerar que o indutor já se encontra totalmente energizado, pois a corrente de magnetização é praticamente a máxima.		

Exercícios

1. Considere o circuito RL série abaixo.

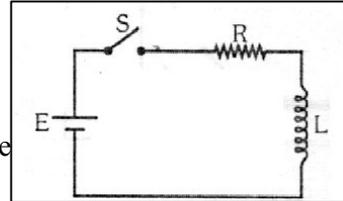
Dados: $R = 100 \Omega$
 $L = 100\text{mH}$
 $E = 10\text{V}$



- a) Ao ser fechada a chave, após quanto tempo a corrente atingiu o seu valor máximo?
 b) Qual é o valor máximo da corrente no circuito?

2. Considere o circuito RL série ao lado:

Dados: $R = 1\text{k}\Omega$
 $L = 47\text{mH}$
 $E = 5\text{V}$



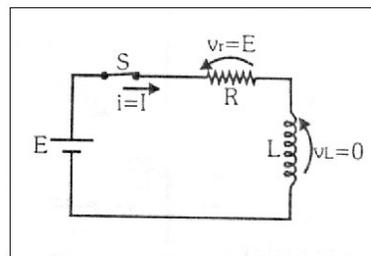
- a) Qual é o valor da corrente e das tensões após $10 \mu\text{s}$ do fechamento da chave?
 b) Em que instante a corrente no circuito atinge 80% de seu valor máximo?

Desenergização do Indutor

Considere um circuito RL série ligado a uma chave S fechada, com o indutor já completamente energizado, pelo qual passa uma corrente $i = I$, sendo a resistência do fio do indutor desprezível em relação a R .

Dessa forma, tem-se:

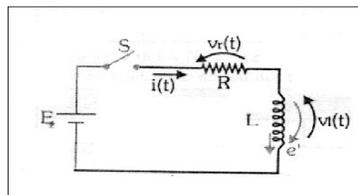
$$v_L = 0 \qquad e \qquad v_r = E$$



Ao abrir a chave S no instante $t = 0$, a fonte de alimentação é desligada do circuito.

Porém, a corrente i , ao invés de ser interrompida imediatamente, decresce exponencialmente devido à energia magnética armazenada no indutor e à constante de tempo τ do circuito.

Observe que surge agora uma corrente i' e uma tensão e' invertidas, tentando evitar a queda da corrente i .



Nesse caso, o indutor comporta-se como uma **fonte de corrente**, cuja capacidade de fornecimento de corrente é limitada pelo tempo de desenergização.

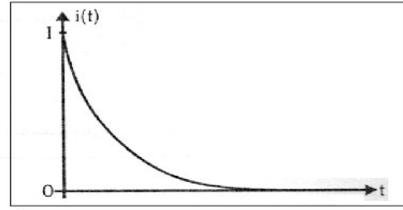
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Esse comportamento é expresso matematicamente e graficamente conforme segue:

Corrente no Circuito

A expressão da corrente na desenergização do indutor é dada por:

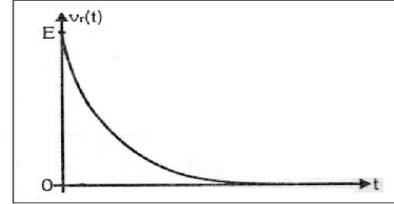
$$i(t) = I \cdot e^{-t/\tau}$$



Tensão no Resistor

A tensão no resistor acompanha a corrente, de forma que a sua expressão é dada por:

$$v_r(t) = E \cdot e^{-t/\tau}$$



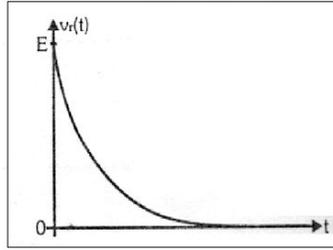
Tensão no Indutor

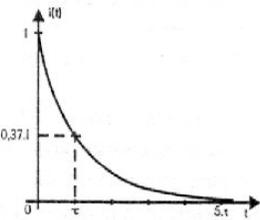
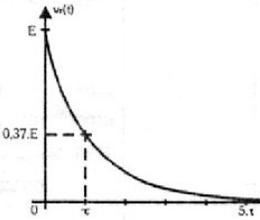
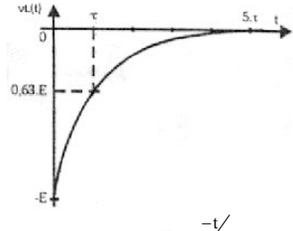
Pela Lei de Kirchhoff para tensões, no instante $t = 0$, tem-se: $v_L + v_r = 0$, logo $v_L = -v_r$.

Isso significa que no instante da abertura da chave, a tensão no indutor inverte a sua polaridade, iniciando com tensão $-E$ até atingir zero.

Nesse caso, a expressão da tensão no indutor é dada por:

$$V_L(t) = -E \cdot e^{-t/\tau}$$



Análise do circuito durante a desenergização do indutor:		
$i(t)$	$v_r(t)$	$v_L(t)$
 $i(t) = I(1 - e^{-t/\tau})$	 $v_r(t) = -E \cdot (1 - e^{-t/\tau})$	 $v_L(t) = -E \cdot e^{-t/\tau}$
t = 0		
$i(0) = 0$	$v_r(0) = E$	$v_L(0) = -E$
Análise: Em $t = 0$, a corrente no circuito é máxima ($i = I$), a tensão no resistor é máxima ($v_r = E$) e a tensão no indutor é máxima com polaridade invertida ($v_L = -E$).		
t = τ		
$i(\tau) = 0,37.I$	$v_r(\tau) = -0,37.E$	$v_L(\tau) = -0,37.E$
Análise: Em $t = \tau$, a corrente no circuito cresce até 63% do valor máximo ($i = 0,37.I$), a tensão no resistor cresce até 63% da tensão da fonte ($v_r = 0,37.E$) e a tensão no indutor cai 63% da tensão da fonte com polaridade invertida ($v_L = -0,37.E$).		
t = 5. τ		
$i(5.\tau) = -0,01.I$	$v_r(5.\tau) = -0,01.E$	$v_L(5.\tau) = -0,01.E$

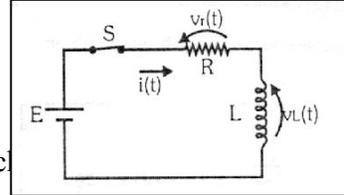
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

Análise: Em $t = 5 \cdot \tau$, a corrente no circuito cresce até 99% do valor máximo ($i = 0,01 \cdot I$), a tensão no resistor cai até 99% da tensão da fonte ($v_r = 0,01 \cdot E$) e a tensão no indutor cai 99% da tensão da fonte com polaridade invertida ($v_L = -0,01 \cdot E$). Nesse caso, podemos considerar que o indutor já se encontra totalmente desenergizado, pois a corrente de desmagnetização é praticamente a nula.

Exercícios

Considere o circuito RL série abaixo, no qual o indutor encontra-se completamente energizado.

Dados: $R = 20 \Omega$
 $L = 10H$
 $E = 12V$



1. Da forma como ele se encontra, com a chave fechada, qual é o valor da corrente i e das tensões v_L e v_r ?
2. No instante da abertura da chave ($t = 0$), quais são os novos valores de i , v_L e v_r ?
3. Qual é a constante de tempo τ do circuito?
4. Quais são os valores da corrente i e das tensões v_L e v_r após um tempo igual a τ ?
5. Após quanto tempo, a partir da abertura da chave, pode-se considerar que o indutor esteja desenergizado?

PERIGO !

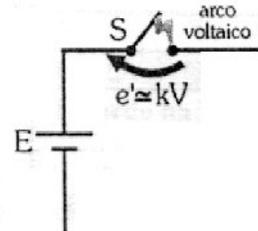
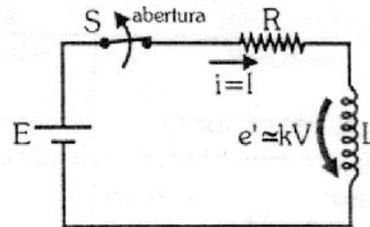
Ao analisar a desenergização do indutor após a abertura da chave, de propósito não enfocamos um fenômeno que ocorre e que pode ser fatal para o operador.

A chave aberta representa uma resistência infinita para o circuito, de forma que a sua constante de tempo τ muda de L/R para L/∞ , isto é, para praticamente zero.

Como no exato momento da abertura da chave a corrente no indutor é máxima ($i = I$), e sendo a constante de tempo $\tau = 0$, pela Lei de Lenz, a tensão induzida e' tem de ter um valor alto para se opor à queda da corrente num intervalo de tempo tão pequeno.

Portanto, ao abrir a chave de um circuito indutivo, poderá surgir uma tensão induzida e' tão elevada (da ordem de milhares de volts) que seria suficiente para produzir um arco-voltaico entre os terminais da chave, podendo até matar o seu operador.

Por isso, os sistemas elétricos altamente indutivos possuem circuitos de proteção que entram em ação durante o seu desligamento.



Comparação entre o Capacitor e o Indutor

Nesse momento, achamos por bem destacar algumas características do capacitor e do indutor que poderão ser muito úteis para a seqüência dos estudos dos circuitos elétricos e eletrônicos.

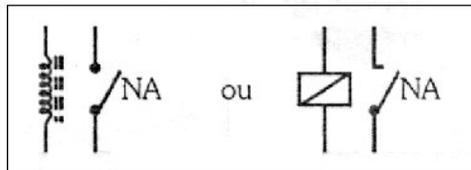
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DO CAPACITOR E DO INDUTOR		
Comportamento	Capacitor	Indutor
Energia	Armazena energia eletrostática (campo elétrico).	Armazena energia magnética (campo magnético)
Atraso	Provoca atraso na tensão.	Provoca atraso na corrente.
Reatância	Baixa reatância para variações bruscas de tensão ou de corrente.	Alta reatância para variações bruscas de tensão ou de corrente.
Constante de tempo	Ampla faixa de valores.	Baixos valores.

Relé Eletromecânico

O *relé eletromecânico*, como o próprio nome diz, é um dispositivo formado por uma parte elétrica e outra mecânica.

A figura abaixo mostra dois símbolos usuais de um relé que possui um único contato que, com o relé desenergizado, encontra-se normalmente aberto (NA).

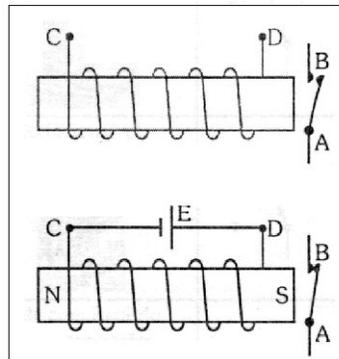


Funcionamento

Considere o relé esquematizado abaixo.

A parte mecânica é formada por uma chave, cujo terminal móvel **A** encontra-se desconectado do terminal fixo **B**.

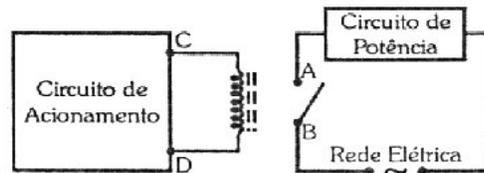
A parte elétrica é formada por um eletroímã, isto é, uma bobina com núcleo de ferro que, uma vez alimentada por uma tensão ou corrente (terminais **C** e **D**), fica polarizada magneticamente, atraindo o terminal móvel, fechando o contato (terminais **A** e **B**).



Quando a alimentação da bobina deixa de existir, esta se desmagnetiza, fazendo com que o terminal móvel retorne à sua posição de repouso.

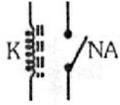
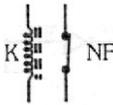
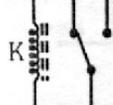
A grande vantagem do relé é poder acionar um circuito elétrico de potência (terminais **A** e **B**) por meio de um outro circuito elétrico, muitas vezes de menor potência (terminais **C** e **D**), estando ambos isolados eletricamente entre si, já que o acoplamento entre eles é apenas magnético.

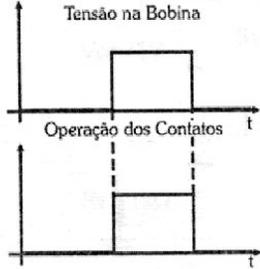
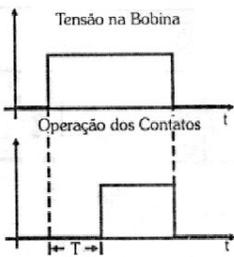
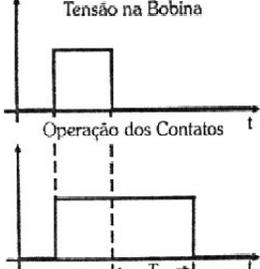
ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



Relés Comerciais

Primeiramente, veremos algumas características importantes dos relés comerciais:

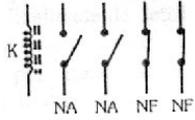
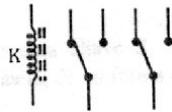
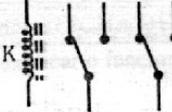
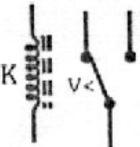
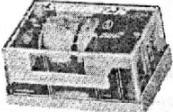
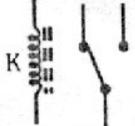
Tipos de Contatos		
<p>Normalmente Aberto (NA)</p> <p>O seu estado de repouso é aberto, fechando quando a bobina é alimentada.</p> 	<p>Normalmente Fechado (NF)</p> <p>O seu estado de repouso é fechado, abrindo quando a bobina é alimentada.</p> 	<p>Reversível</p> <p>O seu estado de repouso é fechado com um dos dois pólos da chave, comutando quando a bobina é alimentada.</p> 

Tempos de Fechamento e de Abertura dos Contatos		
<p>Normal</p> <p>Os tempos de fechamento e de abertura são quase instantâneos, impostos apenas pelas limitações elétricas e mecânicas do relé.</p> 	<p>Retardo na Energização</p> <p>O tempo de fechamento é controlado por um ajuste externo.</p> 	<p>Retardo na Desenergização</p> <p>O tempo de abertura é controlado por um ajuste externo.</p> 

Condição de Acionamento		
<p>Normal</p> <p>O acionamento ocorre quando é satisfeita a sua condição de operação (tensão, corrente ou potência).</p>	<p>Sbtensão</p> <p>O acionamento ocorre quando ele detecta uma variação de tensão abaixo de um valor de referência preestabelecido.</p>	<p>Sobretensão</p> <p>O acionamento ocorre quando ele detecta uma variação de tensão acima de um valor de referência preestabelecido.</p>

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

A seguir, mostramos alguns relés comerciais algumas de suas especificações:

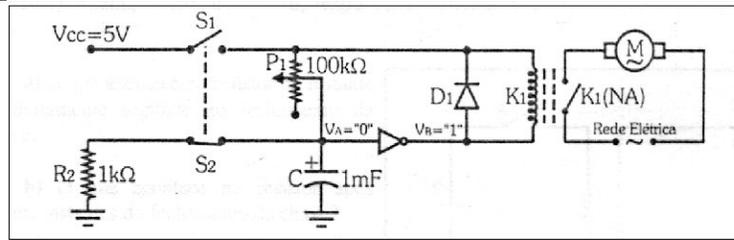
Tipo de Relé	Símbolo	Bobina	Contatos
Relé Reed 		<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal: 12 V_{cc} 	<ul style="list-style-type: none"> Arranjo: 2 NA + 2 NF Carga máxima: 0,5 A a 200 V_{CC}
Relé Miniatura 		<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal: 6 V_{cc} 	<ul style="list-style-type: none"> Arranjo: 2 reversíveis Carga máxima: 3 A a 200 V_{CA}
Relé Sensível 		<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal: 5,5 V_{cc} Potência mínima: 60 mW Resistência: 450 Ω 	<ul style="list-style-type: none"> Arranjo: 2 reversíveis Carga máxima: 2 A a 250 V_{CA}
Relé com Retardo na Energização 		<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal: 24V_{CA} Temporização: 5 segundos a 12 horas 	<ul style="list-style-type: none"> Arranjo: 2 reversíveis (1 temporizado e 1 instantâneo) Carga máxima: 3 A a 250 V_{CA}
Relé de Sobretensão 		<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal: 75 a 140 V_{CA} 	<ul style="list-style-type: none"> Arranjo: 1 reversíveis Carga máxima: 3 A a 200 V_{CA}
Relé de Circuito Impresso 		<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal: 6 V_{CC} Corrente mínima: 135 mA Resistência: 44,5 Ω 	<ul style="list-style-type: none"> Arranjo: 1 reversíveis Carga máxima: 6 A a 250 V_{CA}

Obs.: Essas características podem variar em função do modelo e do fabricante de relés.

Aplicação I - Temporizador para Acionamento de Cargas de Potência

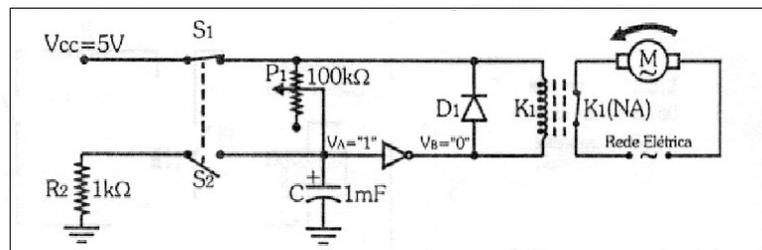
O circuito abaixo pode ligar uma carga qualquer após um certo tempo ajustado previamente. Neste exemplo, a carga será um motor de potência, alimentado pela rede elétrica. O circuito possui duas chaves S₁ e S₂ acopladas mecanicamente, de forma que o fechamento de S₁ abre S₂ e a abertura de S₁ fecha S₂.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS



Com S_1 aberta, S_2 encontra-se fechada, de modo que o capacitor C se descarrega rapidamente por R_2 ($\tau_2 = R_2 \cdot C = 1\text{s}$).

Assim, tem-se nível lógico "0" ($V_A = 0$) na entrada da porta inversora e, portanto, nível lógico "1" ($V_B = 5\text{V}$) em sua saída. Como a bobina do relé K_1 está ligada entre a *tensão da fonte* ($V_{cc} = 5\text{V}$) e a saída da porta inversora ($V_B = 5\text{V}$), a diferença de potencial entre os seus terminais é $V_{cc} - V_B = 0$, permanecendo desenergizada.



Fechando-se S_1 , abre-se S_2 , fazendo com que o capacitor se carregue par meio da potenciômetro P_1 , com uma constante de tempo τ que pode ser ajustada entre 0 e 100s.

Quando o capacitor atinge a tensão de nível lógico "1" suficiente para comutar a porta inversora, esta impõe nível lógico "0" ($V_B = 0\text{V}$) em sua saída. Assim, a bobina do relé se energiza, comutando a chave K_1 (NA), ligando o motor.

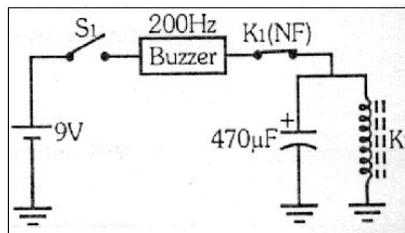
Abriundo novamente a chave S_1 , fecha-se S_2 , e o capacitor descarrega-se novamente por R_2 , desenergizando o relé e desligando o motor.

O diodo D_1 entre os terminais da bobina do relé tem a finalidade de curto-circuitá-la quando da sua desenergização, evitando que a tensão induzida e' danifique a porta lógica.

Aplicação II - Detector de Presença

Esse circuito tem a finalidade de detectar se uma pessoa está tentando entrar num determinado ambiente por meio de uma janela.

Quando a janela é aberta, o circuito soa um apoio de forma intermitente.



Para isso, utiliza-se uma chave S_1 que pode ser formada por duas pequenas placas metálicas instaladas na janela, de tal forma que a sua abertura feche os contatos da chave.

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

O dispositivo que emite o som é um "buzzer", o qual opera numa determinada frequência sempre que é alimentado por uma tensão especificada pelo fabricante.

Exercícios

Você seria capaz de explicar o funcionamento desse circuito?

CIRCUITOS RL

O circuito RL se caracteriza por possuir resistência (R) e indutância (L). No volume anterior, vimos às características de circuitos formados apenas por resistências ou apenas por indutâncias. Essas características se modificam quando ambos os elementos estão presentes, ou seja, são necessários métodos diferentes para resolver os problemas relativos aos circuitos RL. A diferença fundamental entre os circuitos RL e os circuitos puramente resistivos ou indutivos residem nas relações de fase existentes num circuito de RL. As diferentes relações de fase da parte resistiva e da parte indutiva afetam o desempenho do circuito e devem ser analisadas na resolução dos problemas envolvendo circuitos RL. As diferenças de fase existentes em circuitos RL, série e paralelo, bem como os métodos de análise destes circuitos, serão estudados a seguir.

CIRCUITOS RL SÉRIE

Quando os componentes resistivos e indutivos são ligados de tal maneira que a corrente total do circuito passa por eles, é formado um circuito RL série. É importante observar que a corrente é a mesma em todos os pontos do circuito.

IMPEDÂNCIA E CORRENTE

Conforme foi explicado, é conveniente em circuitos RL considerar a resistência e a reatância indutiva como vetores defasados e introduzir o termo impedância (Z) para representar a oposição total ao fluxo de corrente. Num circuito RL série, a corrente através do resistor e do indutor é a mesma; a queda de tensão no resistor está em fase com a corrente, enquanto que no indutor a queda de tensão está adiantada de 90° em relação à resistência. A soma vetorial da resistência e da indutância, ou seja, a impedância, é determinada pelo teorema de Pitágoras:

Como R e X_L são perpendiculares entre si, o vetor resultante, Z , terá um ângulo entre 0° e 90° , medido em relação a corrente do circuito. Esse ângulo depende do valor relativo entre R e X_L . Se R for grande, a fase de Z será próxima de 0° ; se X_L for grande, a fase tenderá a 90° , o ângulo é calculado da seguinte forma:

$$\text{Tg } \phi = \frac{X_L}{R} \text{ ou } \cos \phi = \frac{R}{Z}$$

Num circuito RL série a corrente é a mesma em todos os seus pontos, como acontece em qualquer circuito série. Conseqüentemente, a corrente através da resistência está em fase com a corrente através da indutância, uma vez que realmente a corrente é a mesma. Se conhecermos a tensão aplicada e a impedância de um circuito RL série, a corrente poderá ser calculada através da lei de Ohm: $I = E_{AP} / Z$, onde E_{AP} é a tensão aplicada e Z é o módulo do vetor soma resistência e da reatância indutiva.

Num circuito série, a corrente é tomada como referência (0°) uma vez que é comum a todos os pontos do circuito. O ângulo entre a corrente e a impedância determina o caráter resistivo ou indutivo da corrente. De acordo com o que foi visto, o ângulo de Z está compreendido entre 0° e 90° , dependendo da relação entre os valores da resistência e da reatância indutiva.

Quanto maior for a reatância indutiva em relação à resistência, maior será o ângulo de fase, ou seja, I tenderá a se comportar como uma corrente indutiva. Analogamente, quanto menor for a reatância indutiva comparada com a resistência, menor será o ângulo e I tenderá a se comportar como uma corrente resistiva. Quando Z e I estão exatamente em fase ($Z=R$), a corrente será puramente resistiva; e quando Z estiver 90° adiantada em relação a I ($Z=X_L$), a corrente será puramente indutiva. Os termos resistivos e indutivos, quando aplicados a corrente, se referem à relação de fase entre a corrente e a tensão aplicada. Quanto mais a corrente estiver em fase com a tensão aplicada, mais resistiva será a corrente; e quanto mais próxima de 90° for a fase entre a tensão e a corrente, mais indutiva será a corrente.

EFEITO DA FREQUÊNCIA

Vimos que a relação entre os valores de X_L e R determinam o ângulo de fase da impedância e da corrente, bem como o fator de potência do circuito. Quando X_L for muito maior do que R , o circuito será indutivo e o fator de potência estará próximo de zero. Quando R ou X_L diferirem de um fator igual ou maior do que dez, o circuito poderá ser considerado puramente resistivo ou puramente indutivo, e o fator de potência poderá ser considerado um ou zero. Entretanto, o valor de X_L aumenta com a frequência, ou seja, a relação entre X_L e R também variará; conseqüentemente, o mesmo circuito apresentará diferentes propriedades à medida que a frequência variar. Frequências muito baixas tendem a tornar o circuito puramente resistivo, enquanto frequências muito altas fazem com que o circuito se

torne quase que puramente indutivo. É lógico também que Z varie com o valor relativo de X_L e R .

CIRCUITO RL PARALELO

Um circuito RL paralelo é constituído por uma associação em paralelo de uma resistência, uma indutância e uma fonte de tensão. Um circuito deste tipo apresenta um ramo resistivo e um ramo indutivo. A corrente do circuito se divide entre estes ramos, sendo que uma parte flui através do ramo resistivo, enquanto que a parte restante circula o ramo indutivo. Portanto, as correntes nos ramos são diferentes. A análise dos circuitos RL paralelo e os métodos utilizados para estudá-los, são diferentes daqueles aplicados aos circuitos RL série. Portanto é importante saber distinguir os dois tipos de circuitos para que se possa usar a técnica e os métodos apropriados em cada caso.

CORRENTE DOS RAMOS

Como ocorre em qualquer circuito do tipo paralelo, a corrente em cada ramo de um circuito RL paralelo é independente das correntes dos outros ramos. Se um deles for desligado, os outros ramos não serão afetados. A corrente em cada ramo depende apenas da tensão sobre este ramo e da oposição que este oferece a passagem da corrente, na forma de uma resistência ou uma reatância indutiva. A tensão é a mesma para todos os ramos, ou seja, a intensidade da corrente em cada um deles será determinada pelo valor de sua resistência ou reatância indutiva. Cada ramo de um circuito RL paralelo pode ser considerado como um pequeno circuito série independente. Nesse caso, poderemos utilizar a lei de Ohm para determinar as correntes individuais de cada ramo. O valor da corrente é igual a tensão do ramo correspondente, ou seja, a tensão aplicada pela fonte, dividida pela resistência ou reatância indutiva, conforme o ramo seja resistivo ou indutivo. Portanto:

$$I_R = E / R$$

$$I_L = E / X_L$$

FORMAS DE ONDA DAS CORRENTES

As correntes através dos ramos de um circuito RL paralelo estão defasadas, por isso a corrente de linha é obtida a partir de uma soma vetorial e não através de uma simples soma algébrica. Esse problema é análogo a soma das quedas de tensão num circuito RL série. Adicionando-se as correntes na forma vetorial, estamos somando seus valores instantâneos, e assim calculamos o valor médio ou eficaz da corrente resultante.

IMPEDÂNCIA

A impedância, Z , de um circuito RL paralelo, representa a oposição total ao fluxo de corrente apresentada pela resistência do ramo resistivo e pela reatância indutiva do ramo indutivo. Num circuito RL paralelo, a impedância é calculada de maneira análoga ao de um circuito resistivo em paralelo. Entretanto, como X_L e R são grandezas vetoriais, devemos somá-las vetorialmente. Assim a equação de impedância de um circuito RL paralelo é dada por:

Onde o denominador é o módulo da soma vetorial da resistência e da reatância indutiva. Caso exista mais de um ramo resistivo ou indutivo, R e X_L devem ser iguais a resistência ou reatância total dos ramos em paralelo.

EFEITO DE FREQUÊNCIA

Vimos que a frequência da fonte de tensão é um fator importante para as características de um circuito RL série. Esse fato se repete também em relação aos circuitos RL paralelo, porém é importante observar que, nesse caso, os efeitos da variação da frequência são diferentes. No circuito série, o aumento da frequência implicava no aumento de X_L e Z , tornando o circuito mais indutivo. No caso do circuito paralelo, o aumento da frequência também provoca o acréscimo de X_L e Z . Porém, enquanto que no circuito série um aumento de X_L torna o circuito mais indutivo, no circuito paralelo um aumento de X_L torna o circuito mais resistivo. Por esta razão, no circuito paralelo quanto maior X_L , menor é a corrente no ramo indutivo, e, portanto maior o valor relativo da corrente do ramo resistivo.

Por outro lado, se a frequência decrescer, a situação será oposta. A diminuição de X_L provoca um aumento na corrente do ramo indutivo, ou seja, o circuito paralelo terá caráter mais indutivo. Em frequências muito baixas, o circuito RL paralelo atua como se fosse puramente indutivo. Por outro lado, em frequências elevadas o circuito se comporta próximo de um circuito puramente resistivo. Se o valor da frequência fizer com que X_L e R difiram de 10 vezes ou mais, o ramo contendo o maior dentre os dois poderá ser desprezado; assim; restará apenas um circuito série constituído pelo menor dos dois valores.

Impedância **CIRCUITO RC**

Um circuito que contém resistência (R) e capacitância (C) é chamado

A impedância, Z , de um circuito RL paralelo, representa a oposição total ao fluxo de corrente apresentada pela resistência do ramo resistivo e pela reatância indutiva do ramo indutivo.
Num circuito RL paralelo,

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

circuito RC. Os métodos utilizados na resolução de problemas relativos a esse tipo de circuito dependem se a resistência e a capacitância estão em série e em paralelo. Isto é análogo ao que foi estudado para circuitos RL. Efetivamente, as condições existentes num circuito RC e os métodos usados em sua análise são bem semelhantes aos de que, conforme estudamos no capítulo atrás, a relação de fase entre a corrente e a tensão num circuito capacitivo é diferente daquela de um circuito indutivo.

CIRCUITO RC SÉRIE

É formada pela associação série de uma ou mais resistências com um ou mais capacitores, de tal modo que a corrente total do circuito passe através de cada um dos componentes individuais. Nos tópicos seguintes analisaremos as variáveis dos circuitos RC, considerando sempre o caso de uma única resistência em série com uma capacitância, a menos que seja que seja afirmado o contrário. Sempre que houver mais de uma resistência ou capacitância, bastará calcular os valores equivalentes desses elementos para obtermos o circuito RC simples.

TENSÃO

Quanto a corrente flui num circuito RC série, a queda de tensão sobre a resistência (E_R) está em fase com a corrente, enquanto a queda de tensão sobre a capacitância (E_C) está atrasada de 90° em relação corrente. Uma vez que a corrente é comum aos dois elementos, concluímos que E_R está adiantada em relação à E_C . Os valores das quedas de tensão podem ser calculados pelas expressões:

$$E_R = RI \quad E_C = XCI$$

IMPEDÂNCIA

A impedância de um circuito RC série representa a oposição total ao fluxo de corrente, oferecida pela associação da resistência e da reatância capacitiva. Podemos calculá-la de maneira análoga ao caso de impedância de um circuito RL série, devendo se efetuar, porém, a substituição da reatância indutiva pela reatância capacitiva. A expressão da impedância de um circuito RC série é dada por:

A soma dos vetores leva em consideração a defasagem de 90° , entre as quedas de tensão sobre a resistência e sobre a capacitância.

CIRCUITO RC PARALELO

É formado pela associação de uma ou mais cargas resistivas e uma ou

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

mais cargas capacitivas ligadas em paralelo com uma fonte de tensão. Portanto, existem ramos resistivos que contém apenas resistências e ramos capacitivos formados apenas por capacitâncias. A corrente parte da fonte de tensão e se divide entre os ramos; portanto nos ramos as correntes são diferentes. Num circuito RC paralelo a corrente não é uma grandeza comum, como no caso dos circuitos RC série.

TENSÃO

Num circuito RC paralelo, como em qualquer circuito em paralelo, a tensão da fonte é aplicada diretamente sobre cada ramo. Portanto, se conhecermos qualquer uma das tensões do circuito, todas as outras tensões estão determinadas. Como a tensão é comum aos ramos e a fonte, podemos torná-la como referência para outras grandezas. Portanto, no diagrama vetorial, o vetor de referência tem a mesma fase da tensão do circuito. Os vetores cujas fases são nulas, ou seja, estão em fase com a tensão, são as resistências do circuito e a corrente do ramo resistivo.

CORRENTES DOS RAMOS

A corrente do ramo resistivo está em fase com a tensão do ramo, enquanto no ramo capacitivo a corrente está adiantada de 90° em relação à tensão do ramo. Como as tensões dos ramos são iguais, ou seja, tem a mesma fase, a corrente no ramo capacitivo (I_C) deve estar adiantada de 90° em relação a corrente no ramo resistivo (I_R)

CIRCUITOS RLC

Estudamos, até este ponto, as propriedades fundamentais de circuitos resistivos, indutivos e capacitivos, bem como circuitos compostos pela associação de resistência e indutância, e resistência e capacitância. Passaremos, agora, ao estudo de circuitos formados pelos três elementos básicos, ou seja, indutância (L), capacitância (C) e resistência (R). A associação desses três elementos, através de ligações em série ou paralelo constitui um circuito RLC. Conforme veremos, a análise dos circuitos RLC engloba todas as propriedades dos circuitos vistos até agora. Além disso, surgirão propriedades e características inteiramente novas.

O estudo dos circuitos RLC será dividido em duas partes: uma delas consiste na análise dos circuitos do tipo série e a outra engloba os circuitos do tipo paralelo. Veremos, inicialmente, o caso dos circuitos LC puros; tais circuitos não apresentam resistência e são compostos por indutâncias e capacitâncias ligadas em série ou paralelo. Em seguida incluiremos a resistência e analisaremos os circuitos RLC completos.

CIRCUITOS LC SÉRIE

Um circuito LC série consiste na ligação em série de uma indutância e uma capacitância com uma fonte de tensão. Portanto, não há resistência no circuito. E videntemente, na prática isso é impossível porque todo o circuito contém alguma resistência. Entretanto, uma vez que a resistência da fiação do circuito, a resistência do enrolamento da bobina e a resistência da fonte de tensão são geralmente pequenas, o efeito das resistências é muito pequeno, não afetando o funcionamento do circuito.

A corrente através de um circuito LC série é a mesma em todos os pontos, como ocorre em todos os circuitos do tipo série. Portanto, as correntes que passam pela indutância e pela capacitância são iguais, ou seja, apresentam a mesma fase. Por isso, o diagrama vetorial de um circuito LC série toma como referência de fase o vetor da corrente; todas as grandezas, tais como a tensão aplicada e as quedas de tensão no circuito, são expressas, em termos de fase, em relação a corrente. A escolha da referência, analogamente ao que foi feito nos circuitos RC e RL, recai sobre a corrente por conveniência. Isso não significa que o ângulo de fase da corrente é constante; ele depende das propriedades do circuito, e, portanto, pode variar. Devemos observar que é indiferente a escolha da corrente ou da tensão como referência; o importante é a diferença de fase entre a corrente do circuito e a tensão aplicada.

TENSÃO

Quando uma corrente AC flui num circuito LC série, as quedas de tensão sobre a indutância e a capacitância dependerão do valor da corrente e dos valores de X_L e X_C . As tensões podem ser calculadas da seguinte forma:

$$E_L = X_L I \text{ e } E_C = X_C I$$

CIRCUITOS RLC SÉRIE

Na prática, qualquer circuito LC apresenta alguma resistência. Quando a resistência é muito pequena em relação às reatâncias do circuito, seu efeito é muito pequeno no circuito e podemos considerá-lo nulo, tal como fizemos nas páginas anteriores. Entretanto, quando a resistência for apreciável afetará o funcionamento do circuito e deverá ser considerada em sua análise. Não faz diferença se a resistência é proveniente da fiação do circuito ou do enrolamento do indutor ou de um resistor ligado ao circuito. Como regra geral, estabelecemos que se a reatância total do circuito não for pelo menos dez vezes maior do que a resistência, esta afetará o comportamento do circuito.

TENSÃO

Um circuito RLC série é formado por três elementos, ou seja, existem três quedas de tensão envolvidas: sobre a indutância, sobre a capacitância e sobre a resistência. A corrente através dos três elementos é a mesma, portanto, as relações de fase entre as quedas de tensão são iguais às existentes nos circuitos LC, RL e RC. As tensões sobre a indutância e a capacitância estão defasadas de 180°, sendo que a tensão indutiva (E_L) está a 90° adiantada em relação à tensão resistiva (E_R), enquanto a tensão capacitiva (E_C) está a 90° atrasada em relação à tensão resistiva (E_R).

CIRCUITOS LC PARALELO

Um circuito LC paralelo é formado por uma indutância e uma capacitância ligadas em paralelo com uma fonte de tensão. Portanto, o circuito possui dois ramos, um indutivo e outro capacitivo. Um circuito LC paralelo ideal, tal como será estudado nas páginas seguintes, não apresenta resistência em nenhum dos ramos. Tal circuito não existe, mas, na prática, a resistência pode ser diminuída em um valor desprezível.

TENSÃO

As tensões sobre os ramos de um circuito LC paralelo são iguais a tensão aplicada, como em qualquer circuito do tipo paralelo. Como as tensões dos ramos e da fonte são iguais, possuem a mesma fase. Por isso, a tensão é tomada como referência de fase (zero grau) e os ângulos de fase das outras grandezas do circuito são tomados em relação à tensão. A tensão, num circuito LC paralelo está relacionada com a impedância e com a corrente de linha, através de Ohm:

$$E = I_{Linha} Z$$

CORRENTE

As correntes nos ramos de um circuito LC paralelo estão defasadas da tensão. A corrente através do ramo indutivo (I_L) está atrasada de 90° em relação à tensão; enquanto que no ramo capacitivo, a corrente (I_C) está 90° adiantada em relação a tensão. Como a tensão é a mesma nos dois ramos, as correntes I_L e I_C estão defasadas de 180°.

CIRCUITOS RLC PARALELOS

Um circuito RLC paralelo basicamente é formado pela ligação em paralelo de uma resistência com um circuito LC paralelo. Portanto, o circuito é composto por três ramos: um ramo

ELETRICIDADE BÁSICA E CIRCUITOS ELÉTRICOS

puramente indutivo, um ramo puramente capacitivo e um ramo puramente resistivo. A análise e a solução de circuitos em paralelo que contém qualquer desses dois ramos já foi

Os circuitos nos quais a indutância, a capacitância e a resistência são ligadas em série são chamados de circuitos RLC série. Conforme veremos, as propriedades fundamentais e os métodos de análise desses circuitos são semelhantes aos de um circuito LC série já estudados. As diferenças são devidas aos efeitos

estudada.

TENSÃO

A distribuição da tensão num circuito RLC paralelo é análoga a de qualquer circuito em paralelo. As tensões dos ramos são todas iguais e estão em fase, uma vez que são iguais a tensão aplicada. A resistência constitui, simplesmente, um ramo adicional ligada a mesma tensão aplicada. As tensões de um circuito RLC paralelo são iguais entre si e iguais a tensão aplicada, que é tomada como referência de fase (zero grau), da mesma forma que um circuito LC paralelo. Portanto, os ângulos de fase das grandezas do circuito são relativos a tensão aplicada. O valor da tensão aplicada é dado em função da impedância, através da lei de Ohm:

$$E_{AP} = Z I_{Linha}$$