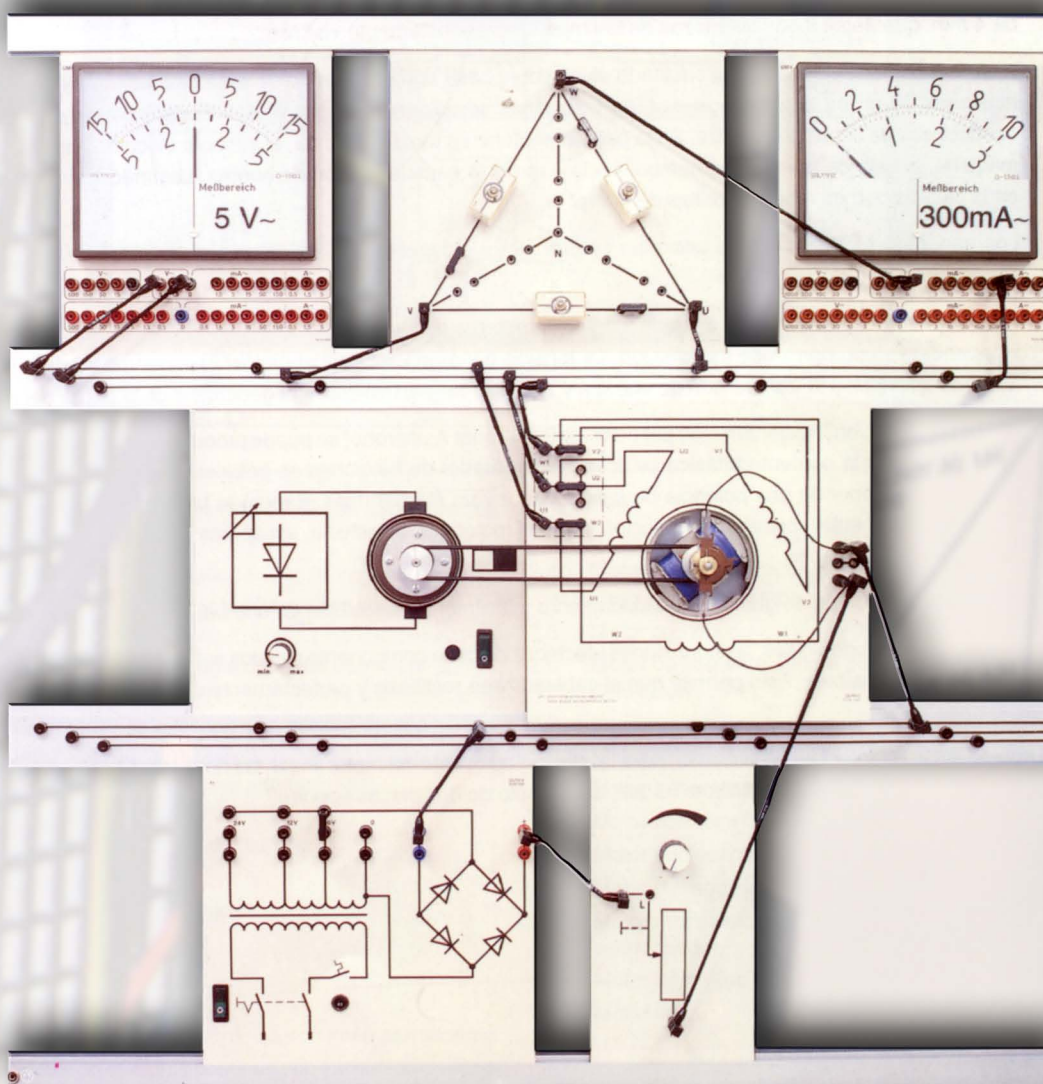


ELETRÔNICA BÁSICA



Eletrônica Básica

© SENAI-SP, 2004

Trabalho elaborado pela Escola Senai “Antonio de Souza Noschese” – Santos – SENAI-SP, a partir dos conteúdos extraídos das apostilas, **REE** do Departamento Regional de São Paulo.

Equipe responsável

Coordenação geral	Aurélio Ribeiro
Elaboração	Roberto Ferreira de Carvalho
Revisão técnica	Roberto Ferreira de Carvalho Moacir Ferreira de Souza Filho Daniel Divino Rodrigues da Silva

SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial Departamento Regional de São Paulo Avenida Paulista, 1313 - Cerqueira Cesar São Paulo - SP CEP 01311-923
Telefone	(0XX11) 3146-7000
Telefax	(0XX11) 3146-7230
SENAI on-line	0800-55-1000
E-mail	Senai@sp.senai.br
Home page	http:// www.sp.senai.br

Índice

Grandezas Elétricas – Tensão Elétrica	03
Corrente Elétrica	10
Resistência Elétrica	13
Potência Elétrica em CC	15
Resistores	18
Código de Cores para Resistores	23
Resistores Ajustáveis	28
Potenciômetros	30
Associação de Resistores	34
Resistência Equivalente de uma Associação Série	36
Resistência Equivalente de uma Associação Paralela	37
Resistência Equivalente de uma Associação Mista	41
Lei de Ohm	46
Primeira Lei de Kirchhoff	52
Segunda Lei de Kirchhoff	57
Leis de Kirchhoff e Ohm em Circuitos Mistos	62
Tensão Alternada Senoidal	66
Capacitores	72
Capacitância	82
Capacitores em CA	84
Magnetismo e Eletromagnetismo	88
Indução e Auto-Indução	98
Indutores em CA	104
Circuitos Resistivos Reativos	106
Transformadores	112
Materiais Semicondutores	122
Diodo Semicondutor	128
Retificação de Meia Onda	142
Retificação de Onda Completa	148

Filtros nas Fontes de Alimentação	157
Diodo Zener	166
Diodo Zener como Regulador de Tensão	172
Diodo Emissor de Luz	180
Transistor Bipolar – Estrutura Básica	184
Princípio de Funcionamento do Transistor	187
Dissipação de Potência no Transistor	195
Configurações de Ligação do Transistor	204
Ponto de Operação	215
Relação entre os Parâmetros I_b , I_c , V_{ce}	220
Métodos de Polarização do Transistor	223
Circuitos Reguladores	229
Amplificação de Sinais Elétricos	236
Amplificador Emissor Comum	240
Amplificador Base Comum	252
Amplificador Coletor Comum	257
Amplificadores em Cascata	265
Ondas Sonoras	270

Grandezas elétricas

Tensão

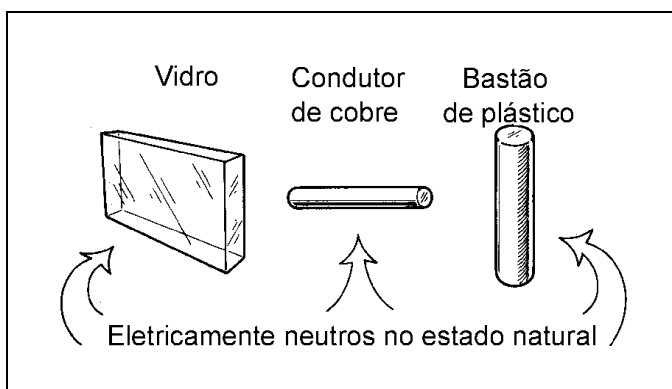
A expressão “grandezas elétricas” se aplica a todos os fenômenos de origem elétrica que podem ser medidos.

A tensão é uma grandeza elétrica, que pode ser medida, e que tem origem no desequilíbrio elétrico dos corpos.

É necessária a existência de uma tensão elétrica para que seja possível o funcionamento de qualquer equipamento elétrico (por exemplo: lâmpada, gravador, motor, etc.).

Eletrização de um corpo

No estado natural qualquer porção de matéria é eletricamente neutra. Isto significa que se nenhum agente externo atua sobre uma determinada porção de matéria, o número total de prótons e elétrons dos seus átomos será igual.



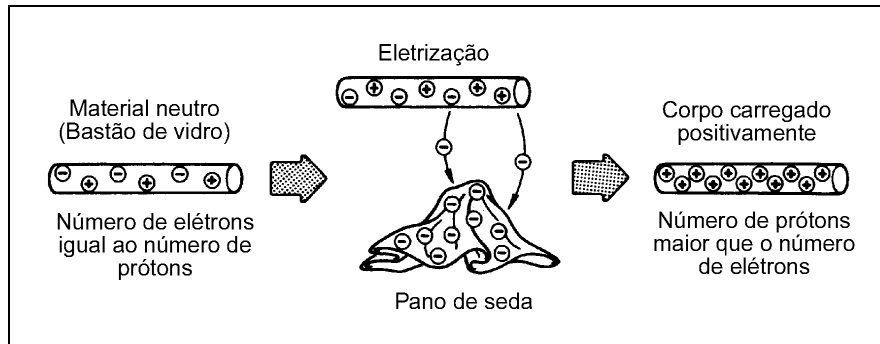
Esta condição de equilíbrio elétrico natural da matéria pode ser desfeita, de forma que um corpo deixe de ser neutro e fique carregado eletricamente.

O processo através do qual se faz com que um corpo eletricamente neutro fique carregado é denominado de **eletrização**.

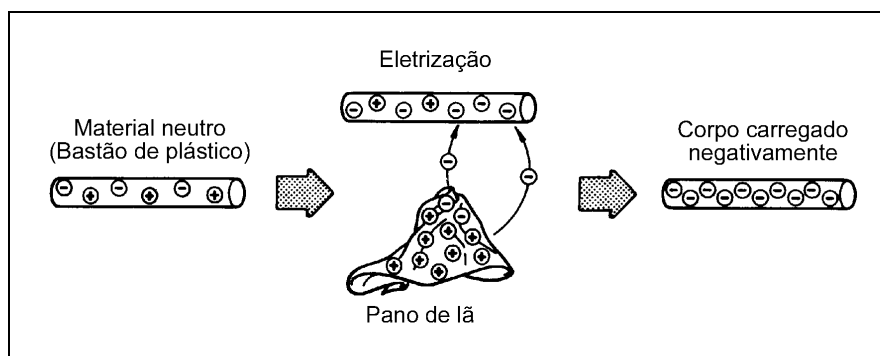
O tipo de carga elétrica (positiva ou negativa) que um corpo assume após sofrer um processo de eletrização depende do tipo de corpo e do processo utilizado.

Os processos de eletrização atuam sempre nos elétrons que estão na última camada dos átomos (camada de valência).

Quando um processo de eletrização **retira elétrons** da camada de valência dos átomos o material fica com o **número de prótons maior que o número de elétrons**. Nestas condições o corpo fica eletricamente positivo.



Quando um processo de eletrização **acrescenta elétrons** em um material, **o número de elétrons torna-se maior que o número de prótons** e o corpo fica carregado negativamente.



Eletrização por acréscimo de elétrons, corpo carregado negativamente.

A eletrização pode ser gerada por:

Atrito;

Indução;

Contato;

Impacto.

Em qualquer processo, contudo, o resultado são corpos carregados eletricamente. A carga elétrica de um corpo obtida por eletrização denomina-se **eletricidade estática**.

Atração e repulsão entre as cargas elétricas

Quando dois corpos eletrizados são aproximados um do outro se verifica que existe uma reação entre eles.

Através de experimentação se verifica que se um dos corpos está carregado positivamente e o outro negativamente existe uma tendência dos dois corpos em se atraírem mutuamente.

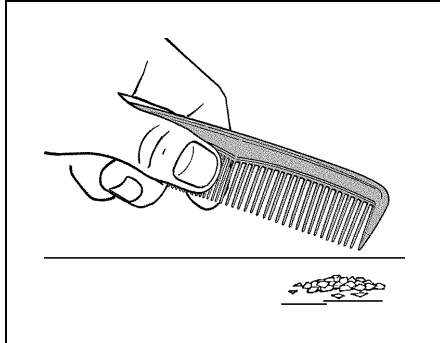
No entanto, se os dois corpos apresentam cargas de mesmo sinal, os corpos se repelem. A partir destas observações se concluiu:

Cargas opostas (+ e -) se atraem;

Cargas iguais (+ e + ou - e -) se repelem.

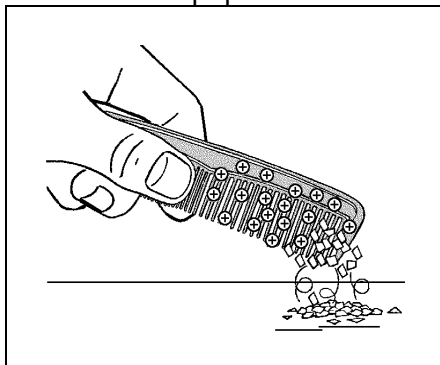
Potencial elétrico

Tomando-se um pente que não tenha sido atritado, ou seja, sem eletricidade estática, e, aproximando-o de pequenas partículas de papel, não ocorre nenhum fenômeno.



Entretanto, se o pente for eletrizado, ao aproximá-lo das partículas de papel estas serão atraídas pelo pente.

Isto significa que o pente carregado tem capacidade de realizar o trabalho de movimentar o papel.



Quando um corpo adquire capacidade de realizar um trabalho diz-se que este corpo tem um **potencial**.

Como no caso do pente a capacidade de realizar o trabalho se deve a um desequilíbrio elétrico do seu potencial. Esse desequilíbrio é denominado de **potencial elétrico**.

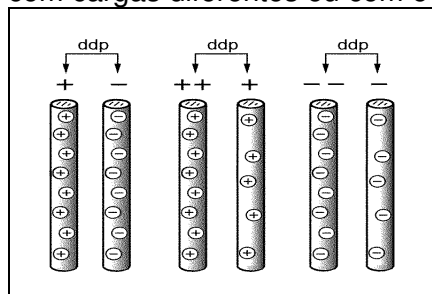
Diferença de potencial

Quando se comparam os trabalhos realizados por dois corpos eletrizados, automaticamente está se comparando os seus potenciais elétricos.

A diferença entre os trabalhos expressa diretamente a diferença de potencial elétrico entre os dois corpos.

A diferença de potencial, abreviada por d.d.p. é importantíssima nos estudos relacionados com eletricidade e eletrônica.

Assim, pode-se verificar a existência de diferença de potencial entre corpos eletrizados com cargas diferentes ou com o mesmo tipo de carga (veja figura a seguir).



A diferença de potencial é também denominada de tensão elétrica.

Observação

No campo da eletrônica e da eletricidade utiliza-se quase exclusivamente a expressão “tensão” para indicar a ddp ou tensão elétrica.

Unidade de medida de tensão

A tensão entre dois pontos pode ser medida através de instrumentos.

A unidade de medida de tensão é o VOLT.

A unidade VOLT é representada pelo símbolo V.

Em algumas situações a unidade de medida padrão se torna inconveniente.

A unidade de medida de comprimento, por exemplo, não é adequada para expressar o comprimento de um pequeno objeto, utilizando-se um submúltiplo, como o centímetro ou milímetro.

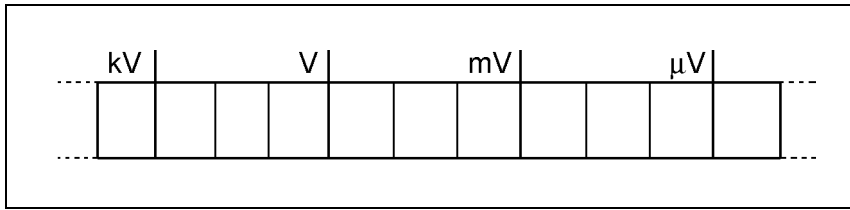
A unidade de medida de tensão (VOLT) também tem múltiplos ou submúltiplos, adequados a cada situação.

Denominação		Símbolo	Valor com relação ao volt
Múltiplos	megavolt	MV	$10^6 V$ ou 1000000V
	quilovolt	KV	$10^3 V$ ou 1000V
Unidade	volt	V	-
Submúltiplos	milivolt	mV	$10^{-3} V$ ou 0,001V
	microvolt	μV	$10^{-6} V$ ou 0,000001V

Observação

No campo da eletricidade usam-se normalmente o volt e o quilovolt. Na área da eletrônica usa-se normalmente o volt, milivolt e o microvolt.

A conversão de valores é feita de forma semelhante a outras unidades de medida.



Exemplos de conversão:

$$3,75 \text{ V} = \quad \text{mV}$$

V			mV
3	7	5	

△ posição da vírgula

V			mV
3	7	5	0

△ nova posição da vírgula

$$3,75 \text{ V} = 3750 \text{ mV}$$

$$0,6 \text{ V} = \quad \text{mV}$$

V			mV
0	6		

V			mV
0	6	0	0

$$0,6 \text{ V} = 600 \text{ mV}$$

$$200 \text{ mV} = \quad \text{V}$$

V			mV
	2	0	0

V			mV
0	2	0	0

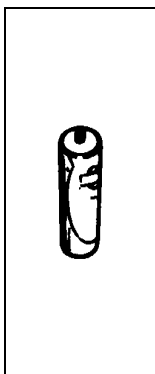
$$200 \text{ mV} = 0,2 \text{ V}$$

Fontes geradoras de tensão

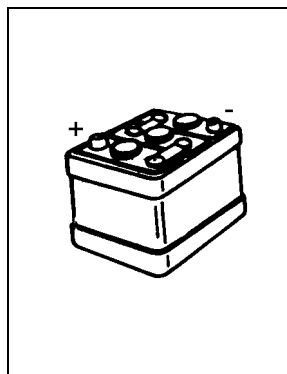
A existência de tensão é condição fundamental para o funcionamento de todos os aparelhos elétricos. A partir desta necessidade, foram desenvolvidos dispositivos que tem a capacidade de criar um desequilíbrio elétrico entre dois pontos, dando origem a uma tensão elétrica.

Estes dispositivos são denominados genericamente de **fontes geradoras de tensão**.

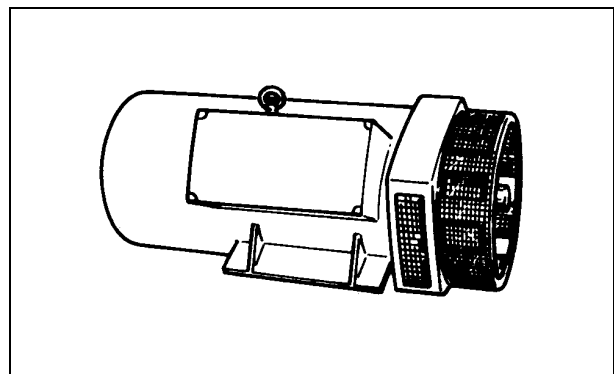
Existem vários tipos de fontes geradoras de tensão, entre os quais citam-se:



Pilhas



Baterias

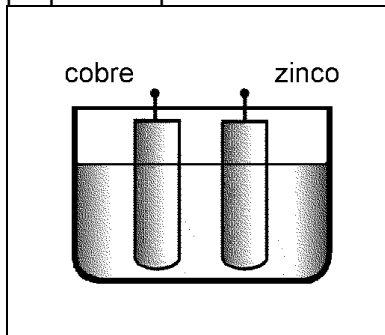


Geradores (máquinas que geram tensão)

Pilhas

As pilhas são fontes geradoras de tensão usadas em aparelhos portáteis.

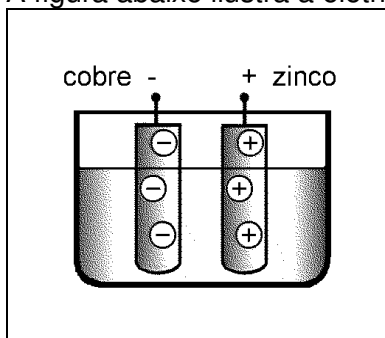
Basicamente as pilhas são constituídas por dois tipos de metais mergulhados em um preparado químico.



Este preparado químico reage com os metais, retirando elétrons de um e levando para o outro.

Um dos metais fica com potencial elétrico positivo e o outro fica com potencial elétrico negativo.

A figura abaixo ilustra a eletrização dos metais.



Entre os dois metais existe portanto uma ddp ou tensão elétrica.

Pela própria característica de funcionamento das pilhas, um dos metais torna-se positivo e o outro negativo. Cada um dos metais é denominado de pólo.

As pilhas dispõe de um pólo positivo e um pólo negativo.

Os pólos de uma pilha nunca se alteram. O pólo positivo sempre tem potencial positivo e o pólo negativo sempre tem potencial negativo. Normalmente se diz que as **polaridades** de uma pilha são fixas.

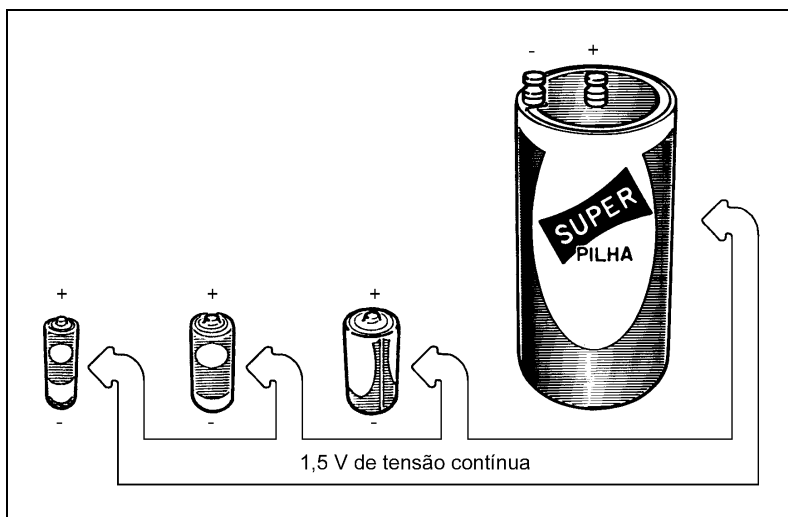
Tensão contínua ou tensão CC

Tensão elétrica entre dois pontos, cuja polaridade é invariável.

Todas as fontes geradoras de tensão que tem polaridade fixa são denominadas de fontes geradoras de tensão contínua.

Tensão fornecida por uma pilha

As pilhas utilizadas em gravadores, rádios e outros aparelhos fornecem uma tensão contínua de aproximadamente 1,5V, independente do seu tamanho físico.

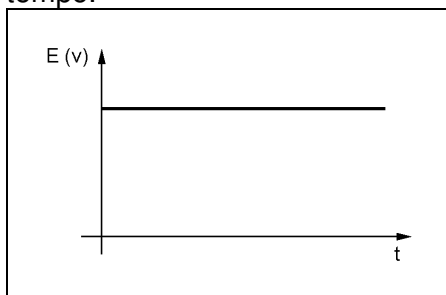


Pilhas (pequena, média, grande e pilha de telefone)

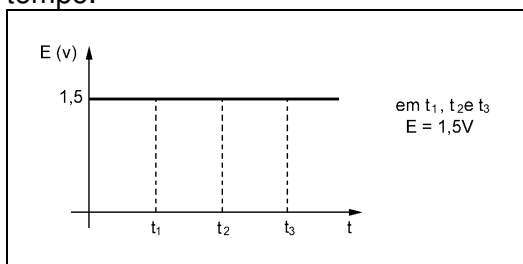
Gráfico Tensão CC Tempo

A tensão fornecida pelas pilhas e geradores de tensão contínua pode ser representada em um gráfico.

Este gráfico mostra o comportamento da tensão fornecida por uma pilha ao longo do tempo.

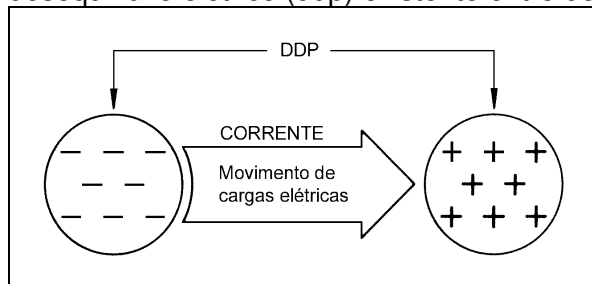


O gráfico mostra que a tensão fornecida por uma pilha comum é 1,5V em qualquer tempo.



Corrente elétrica

A corrente elétrica consiste em um movimento orientado de cargas, provocado pelo desequilíbrio elétrico (ddp) existente entre dois pontos.



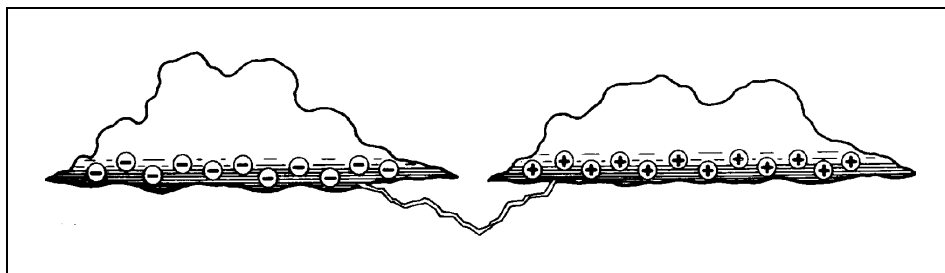
A corrente elétrica é a forma pela qual os corpos eletrizados procuram restabelecer novamente o equilíbrio elétrico.

Descargas elétricas

As descargas elétricas são fenômenos comuns na natureza. Os relâmpagos são exemplos característicos de descarga elétrica.

O atrito contra o ar faz com que as nuvens fiquem altamente eletrizadas, adquirindo um potencial elevado (tensão muito alta).

Quando duas nuvens com potencial elétrico diferente (com ddp) se aproximam ocorre uma descarga elétrica (relâmpago) entre elas.



O deslocamento de cargas elétricas entre dois pontos onde existe ddp é denominado de **corrente elétrica**.

Corrente elétrica é o deslocamento orientado de cargas elétricas entre dois pontos quando existe ddp entre estes pontos.

A partir da definição de corrente elétrica se pode concluir que o relâmpago é uma corrente elétrica que existe devido a tensão elétrica existente entre as nuvens. Durante o curto tempo de duração de um relâmpago um grande número de cargas elétricas flui de uma nuvem para outra. Dependendo da grandeza do desequilíbrio elétrico entre duas nuvens, a descarga (corrente elétrica) entre elas pode ter maior ou menor intensidade.

Ampère

Unidade de medida da intensidade da corrente elétrica.

A unidade Ampère é representada pelo símbolo A.

Uma intensidade de corrente de 1A significa que $6,25 \times 10^{18}$ cargas elétricas passam em 1s de um ponto a outro onde existe tensão elétrica.

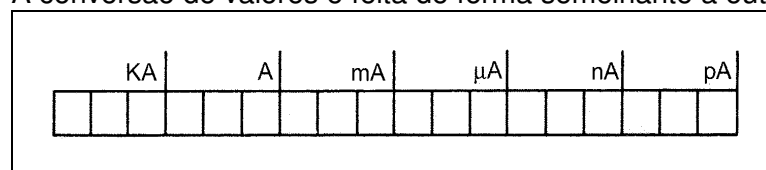
A unidade de intensidade de corrente Ampère também tem múltiplos e submúltiplos que são apresentados na tabela abaixo.

	Denominação	Símbolo	Valor em relação a unidade
Múltiplo	Quiloampère	kA	$10^3 A$ ou 1000^A
Unidade	Ampère	A	-
Submúltiplos	Miliampère	mA	10^{-3} ou $0,001^A$
	Microampère	μA	10^{-6} ou $0,000001^A$
	Nanoampère	nA	10^{-9} ou $0,000000001^A$
	Picoampère	pA	10^{-12} ou $0,000000000001^A$

Observação

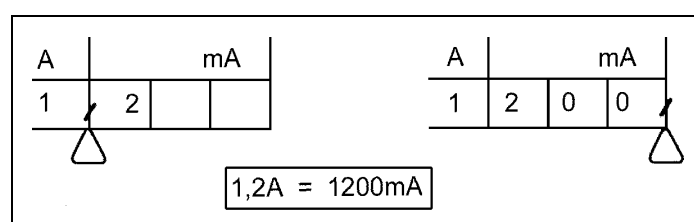
No campo da eletrônica são mais utilizados o ampère, miliampère e o microampère.

A conversão de valores é feita de forma semelhante a outras unidades de medida.

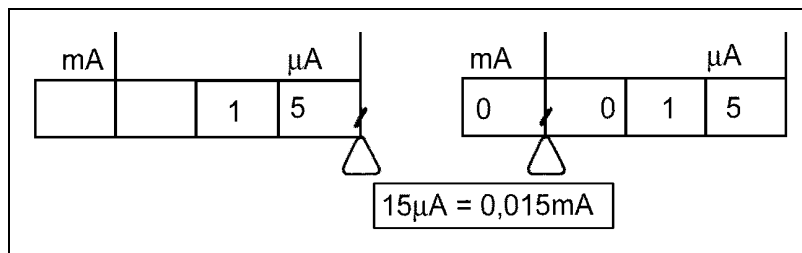


Exemplos de conversão:

$$1,2A = mA$$



$$15\mu A = \quad mA$$



O instrumento utilizado para medir a intensidade de corrente é o Amperímetro.

E existem ainda:

Miliamperímetros:

Para correntes da ordem de miliampères.

Microamperímetros:

Para correntes da ordem de microampères.

Nanoamperímetros:

Para correntes da ordem de nanoampères.

Picoamperímetros:

Para correntes da ordem de picoampères.

Corrente contínua

Quando o movimento de cargas elétricas (sejam elétrons ou íons) ocorre sempre em um sentido a corrente elétrica é denominada de **corrente contínua**.

Resistência elétrica

Resistência elétrica é a oposição que um material apresenta ao fluxo de corrente elétrica.

Todos os dispositivos elétricos e eletrônicos apresentam uma certa oposição a passagem da corrente elétrica.

Origem da resistência elétrica

A resistência que os materiais apresentam à passagem da corrente elétrica tem origem na sua estrutura atômica.

Para que a aplicação de uma ddp a um material origine uma corrente elétrica, é necessário que a estrutura deste material propicie a existência de cargas elétricas livres para movimentação.

Quando um material propicia a existência de um **grande número de cargas livres** a corrente elétrica flui com facilidade através do material.

A resistência elétrica destes materiais é pequena.

Por outro lado, nos materiais que propiciam a existência de um **pequeno número de cargas livres** a corrente elétrica flui com dificuldade.

A resistência elétrica destes materiais é grande.

Unidade de medida da resistência elétrica

A unidade de medida da resistência elétrica é o Ohm, representado pelo símbolo Ω .

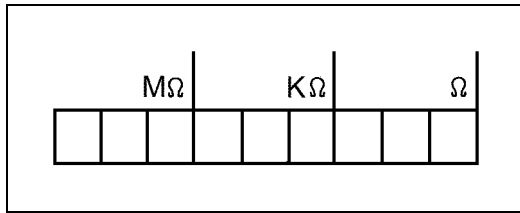
A unidade de resistência elétrica tem múltiplos e submúltiplos.

Entretanto, na prática, usa-se quase exclusivamente os múltiplos, que estão apresentados na tabela abaixo.

Unidade de medida da resistência elétrica e seus múltiplos

	Denominação	Símbolo	Valor em relação a unidade
Múltiplos	Megohm	$M\Omega$	$10^6 \Omega$ ou 1000000Ω
	Quilohm	$K\Omega$	$10^3 \Omega$ ou 1000Ω
Unidade	Ohm	Ω	-

A conversão de valores obedece o mesmo procedimento de outras unidades.



Exemplos de conversão

$$120\Omega = 0,12 \text{ k}\Omega$$

$$5,6\text{k}\Omega = 5600\Omega$$

$$2,7\text{M}\Omega = 2700\text{k}\Omega$$

$$390\text{k}\Omega = 0,39\text{M}\Omega$$

$$470\Omega = 0,00047\text{M}\Omega$$

$$680\text{k}\Omega = 0,68\text{M}\Omega$$

Instrumento de medida de resistência elétrica

O instrumento destinado à medida de resistência elétrica é denominado de ohmímetro. Raramente se encontra um instrumento que seja unicamente ohmímetro. Em geral, as medidas de resistência elétrica são realizadas através de um multímetro.

Aplicações da resistência elétrica

O efeito causado pela resistência elétrica, que pode parecer inconveniente, encontra muitas aplicações práticas em eletricidade e eletrônica.

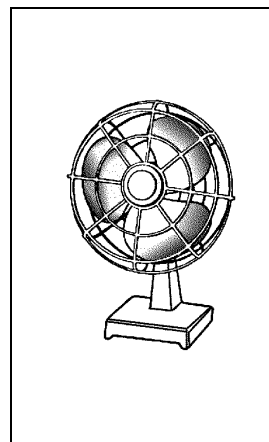
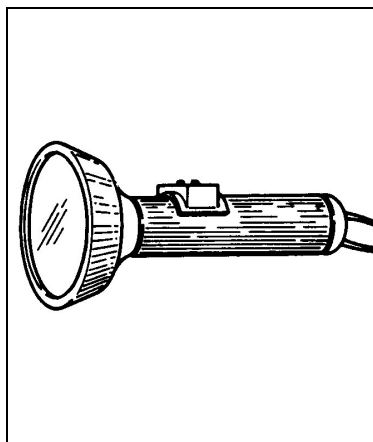
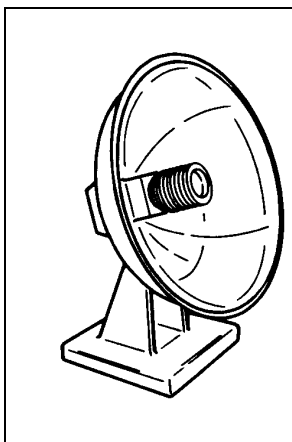
Alguns exemplos práticos de aplicação da resistência dos materiais são:

Aquecimento: em chuveiro, ferros de passar;

Iluminação: lâmpadas incandescentes.

Potência elétrica em CC

A passagem da corrente elétrica através de uma carga instalada em um circuito elétrico produz efeitos tais como calor, luz, movimento.



O calor, luz, movimento produzido pelo consumidor a partir da energia elétrica é denominado de **trabalho**.

A capacidade de cada consumidor de produzir trabalho em um determinado tempo a partir da energia elétrica é denominada de Potência Elétrica.

O conhecimento da potência elétrica de cada componente em um circuito é muito importante para que se possa dimensioná-lo corretamente.

Trabalho elétrico

Os circuitos elétricos são montados com objetivo de realizar um aproveitamento da energia elétrica.

Entre os efeitos que se pode obter a partir da energia elétrica citam-se.

Efeito calorífico

Nos fogões elétricos, chuveiros, aquecedores a energia elétrica é convertida em calor .

Efeito luminoso

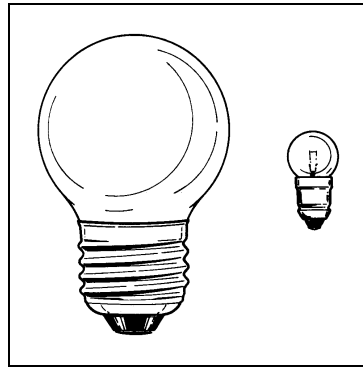
Nas lâmpadas a energia elétrica é convertida em luz (e também uma parcela em calor).

Efeito mecânico

Os motores convertem energia elétrica em força motriz (movimento).

Potência elétrica

Analisando particularmente um tipo de carga, como por exemplo, as lâmpadas, se verifica que nem todas produzem a mesma quantidade de luz.



Da mesma forma, existem aquecedores capazes de ferver um litro d'água em 10 minutos e outros que podem fazê-lo em 5 minutos.

Tanto um aquecedor como o outro realizam o mesmo trabalho elétrico de aquecer um litro d'água até a temperatura de 100°C . Entretanto, um deles é mais rápido, realizando o trabalho em menor tempo.

A partir desta afirmação se conclui que os dois aquecedores não são iguais.

Existe uma grandeza elétrica através da qual se relaciona o trabalho elétrico realizado e o tempo necessário para sua realização. Esta grandeza é denominada de **potência elétrica**.

Potência elétrica é a capacidade de realizar um trabalho na unidade de tempo, a partir da energia elétrica.

A partir disto se pode afirmar:

Lâmpadas que produzem quantidades de luz são de potências diferentes;

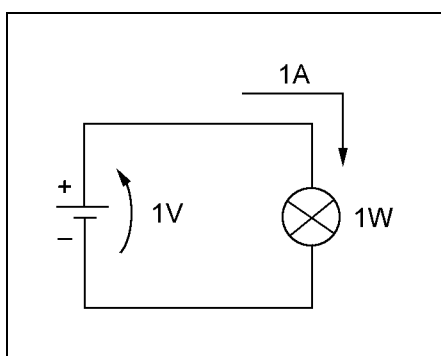
Aquecedores que levam tempos diferentes para ferver uma mesma quantidade de água são de potências diferentes.

O mesmo acontece em relação a outros tipos de consumidores tais como motores, aquecedores, etc.

Existem motores de grande potência (elevadores) e de pequena potência (gravadores).

A potência elétrica é uma grandeza e como tal pode ser medida. A unidade de medida da potência elétrica é o **Watt**, representado pelo símbolo **W**.

1 Watt é o trabalho realizado em um segundo por um consumidor alimentado por uma tensão de 1 Volt no qual circula uma corrente de 1A.



A unidade de medida da potência elétrica Watt tem múltiplos e submúltiplos. A tabela a seguir apresenta os múltiplos e submúltiplos usuais do Watt.

Denominação		Símbolo	Valor com relação ao watt
Múltiplo	quilowatt	Kw	10^3W ou 1000W
Unidade	watt	W	1W
Submúltiplos	miliwatt	MW	10^{-3}W ou 0,001W
	microwatt	μW	10^{-6}W ou 0,000001W

Para a conversão de valores usa-se o mesmo sistema de outras unidades.

kW		W		mW		μW

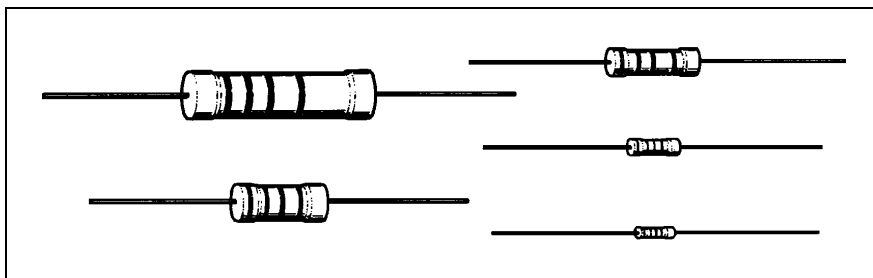
Exemplo de conversão:

$$\begin{array}{ll}
 1,3\text{W} = 1300\text{mW} & 350\text{W} = 0,35\text{KW} \\
 640\text{mW} = 0,64\text{W} & 2,1\text{KW} = 2100\text{W} \\
 0,007\text{W} = 7\text{mW} & 12\text{mW} = 12000\mu\text{W}
 \end{array}$$

Resistores

Os resistores são componentes utilizados nos circuitos com a finalidade de limitar a corrente elétrica.

A figura abaixo mostra alguns resistores.



Pelo controle da corrente é possível reduzir ou dividir tensões.

Características dos resistores

Os resistores possuem características elétricas importantes:

Resistência ôhmica;

Percentual de tolerância.

Resistência ôhmica

É o valor específico de resistência do componente. Os resistores são fabricados em valores padronizados, estabelecidos por norma.

Ex.: 120Ω , 560Ω , 1500Ω .

Percentual de tolerância

Os resistores estão sujeitos a diferenças no seu valor que decorrem do processo de fabricação.

Estas diferenças se situam em 5 faixas de percentual:

$\pm 20\%$; $\pm 10\%$; $\pm 5\%$; $\pm 2\%$ e 1% de tolerância.

Os resistores com 20% , 10% e 5% de tolerância são considerados resistores comuns e os de 2% e 1% são resistores de precisão. Os resistores de precisão são usados apenas em circuitos onde os valores de resistência são críticos.

A percentual de tolerância indica qual a variação de valor que o componente pode apresentar em relação ao valor padronizado. A diferença no valor pode ser para mais por exemplo (+20%) ou para menos (-20%) do valor correto.

A tabela abaixo apresenta alguns valores de resistor com o percentual de tolerância e os limites entre os quais deve se situar o valor real do componente.

Resistor	% Tolerância	Valor do componente
1000Ω	10%	-10% $1000 \times 0,9 = 900$
		+10% $1000 \times 1,1 = 1100$
		O valor real estará entre 900Ω e 1100Ω
560Ω	5%	-5% $560 \times 0,95 = 532$
		+5% $560 \times 1,05 = 588$
		Entre 532Ω e 588Ω
120Ω	1%	+1% $120 \times 0,99 = 118,8$
		-1% $120 \times 1,01 = 121,2$
		Entre 118,8Ω e 121,2Ω
330Ω	10%	Entre 297Ω e 363Ω
18KΩ	20%	Entre 14,4KΩ e 21,6KΩ

A tabela a seguir apresenta a padronização de valores para fabricação de resistores em tolerância de 5%.

Série de valores E-24

10	11	12	13	15	16	18	20
22	24	27	30	33	36	39	43
47	51	56	62	68	75	82	91

Encontram-se ainda resistores como os valores da tabela anterior multiplicados por 0,1; 10; 100; 1000; 10000; 100000. Exemplos: 1,1Ω; 180Ω; 2700Ω; 36kΩ; 56kΩ; 9,1MΩ.

Pela tabela observa-se que os valores padronizados acrescidos das tolerâncias permitem que se obtenha qualquer valor de resistência desejada. Tomando 3 valores consecutivos da tabela, têm-se:

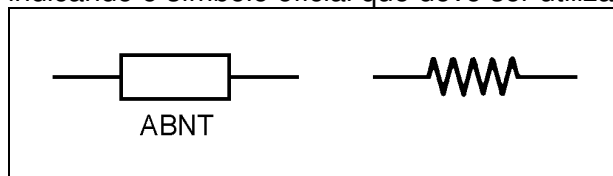
$$100\Omega \quad \begin{array}{l} -10\% = 90 \\ +10\% = 110 \end{array}$$

$$120\Omega \quad \begin{array}{l} -10\% = 108 \\ +10\% = 132 \end{array}$$

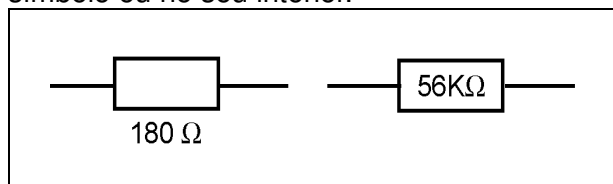
$$150\Omega \quad \begin{array}{l} -10\% = 135 \\ +10\% = 165 \end{array}$$

Simbologia

A figura abaixo mostra os símbolos utilizados para representação dos resistores indicando o símbolo oficial que deve ser utilizado no Brasil, segundo a norma ABNT.



As características específicas dos resistores em um diagrama aparecem ao lado do símbolo ou no seu interior.



Tipos de resistores

Existem três tipos de resistores quanto a constituição:

Resistores de filme de carbono; Resistores de carvão; Resistores de fio.

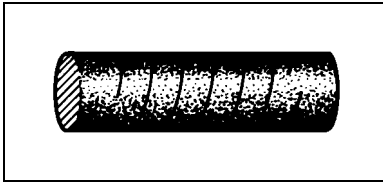
Cada um dos tipos tem, de acordo com sua constituição, características que os tornam mais adequados que os outros tipos em sua classe de aplicação.

A seguir, são apresentados os processos básicos de fabricação e a aplicação do componente.

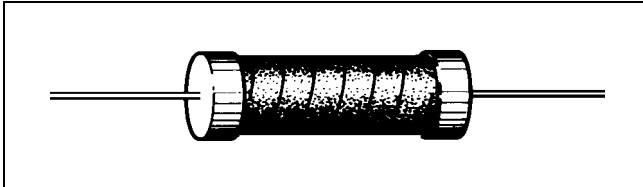
Resistor de filme de carbono

O resistor de filme de carbono, também conhecido como resistor de película, é constituído por um corpo cilíndrico de cerâmica que serve de base para a fabricação do componente.

Sobre o corpo é depositada uma fina camada em espiral, de material resistivo (filme de carbono) que determina o valor ôhmico do resistor.

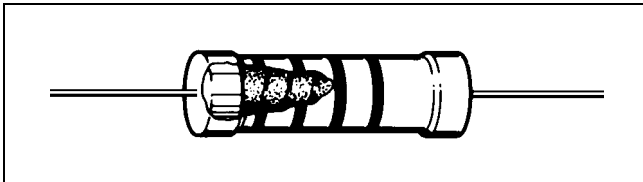


Os terminais (lides de conexão) são colocados nas extremidades do corpo em contato com a camada de carbono.



O corpo do resistor pronto recebe um revestimento que dá acabamento na fabricação e isola o filme de carbono da ação da umidade.

A figura a seguir apresenta um resistor pronto, em corte, aparecendo a conexão dos terminais e o filme resistivo.

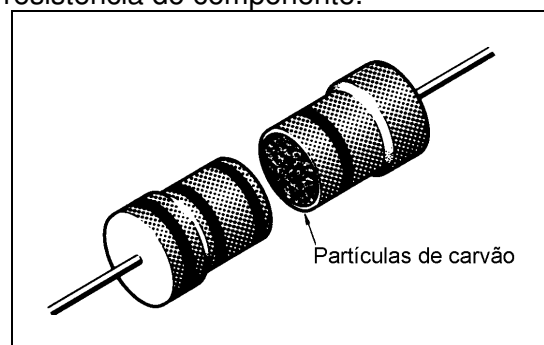


As características fundamentais do resistor de filme de carbono são a precisão e a estabilidade do valor resistivo.

Resistores de carvão

O resistor de carvão é constituído por um corpo cilíndrico de porcelana.

No interior da porcelana são comprimidas partículas de carvão que definem a resistência do componente.



Com maior concentração de partículas de carvão o valor resistivo do componente é reduzido.

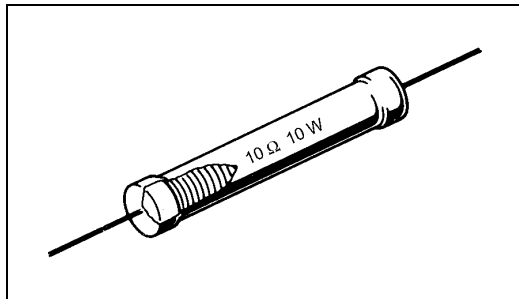
Apresentam tamanho físico reduzido. Os valores de dissipação e resistência não são precisos. Podem ser usados em qualquer tipo de circuito.

Resistores de fio

Constitui-se de um corpo de porcelana ou cerâmica que serve como base.

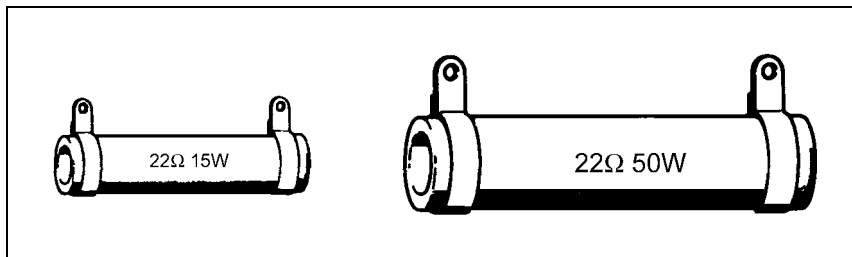
Sobre o corpo é enrolado um fio especial (por exemplo níquel-cromo) cujo comprimento e seção determinam o valor do resistor.

A figura abaixo apresenta um resistor de fio em corte. Nela aparecem os terminais, o fio enrolado e a camada externa de proteção do resistor.



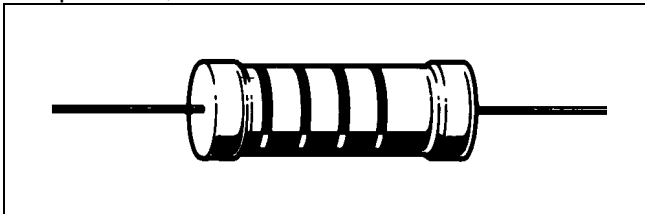
Os resistores de fio tem capacidade para trabalhar com maior valores de corrente. Este tipo de resistor produz, normalmente uma grande quantidade de calor quando em funcionamento.

Para facilitar o resfriamento nos resistores que produzem grandes quantidades de calor o corpo de porcelana maciço é substituído por um tubo de porcelana.



Código de cores para resistores

O valor ôhmico dos resistores e sua tolerância podem ser impressos no corpo do componente, através de anéis coloridos.



A cor de cada anel e sua posição com relação aos demais anéis, corretamente interpretada fornece dados sobre o valor do componente.

A disposição das cores em forma de anéis possibilita que o valor do componente possa ser lido de qualquer posição.

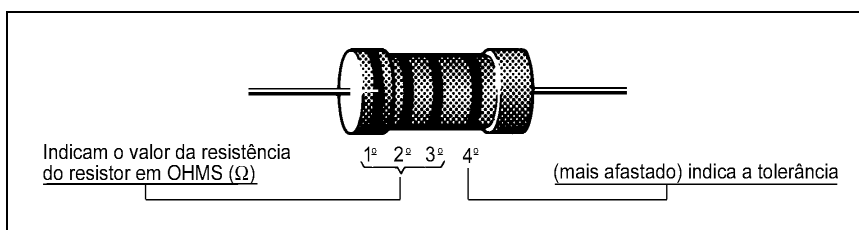
Interpretação do código

O código se compõe de três cores usadas para representar o valor ôhmico, e uma para representar o percentual de tolerância.

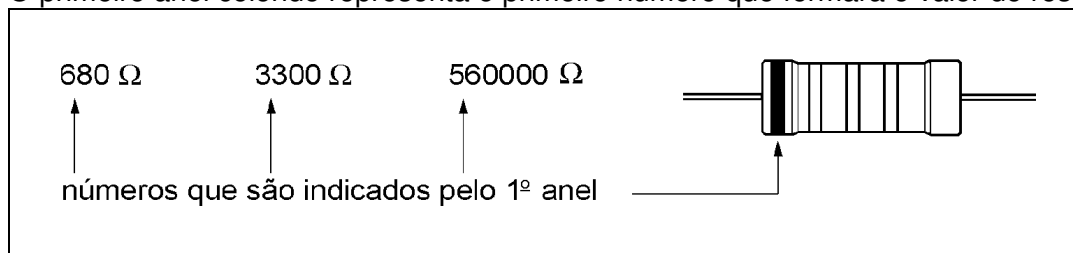
Para a interpretação correta dos valores de resistência e tolerância do resistor os anéis tem que ser lidos em uma sequência correta.

O primeiro anel colorido a ser lido é aquele que está mais próximo da extremidade do componente. Seguem na ordem - 1º, 2º e 3º anéis colorido, como mostra a figura a seguir.

Os três primeiros anéis coloridos (1º, 2º e 3º) representam o valor do resistor. O 4º anel representa o percentual de tolerância.



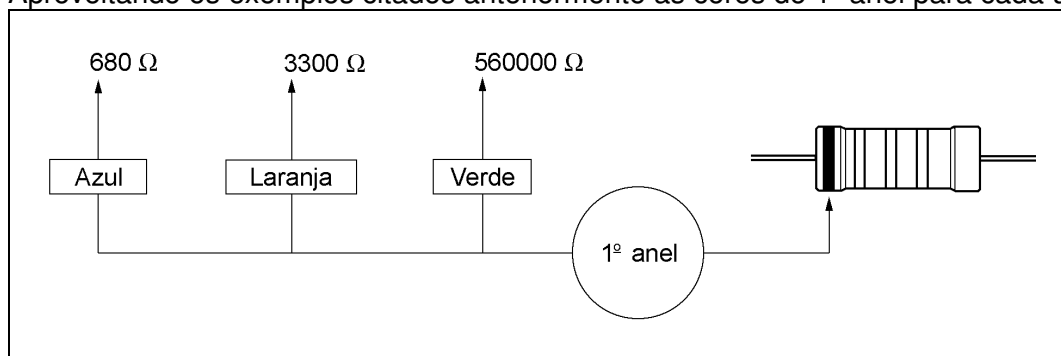
O primeiro anel colorido representa o primeiro número que formará o valor do resistor.



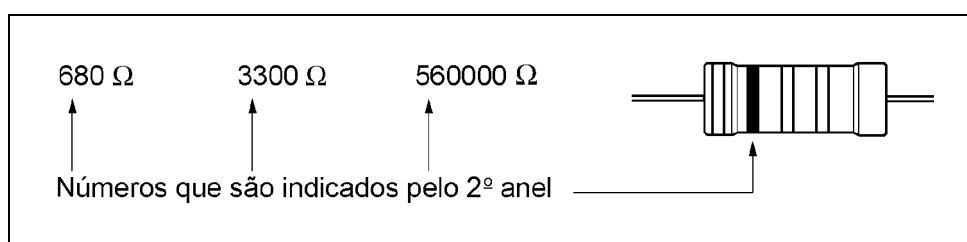
A cada número corresponde uma cor.

Preto – 0	amarelo - 4	cinza - 8
Marrom – 1	verde - 5	branco - 9
Vermelho - 2	azul - 6	
Laranja – 3	violeta - 7	

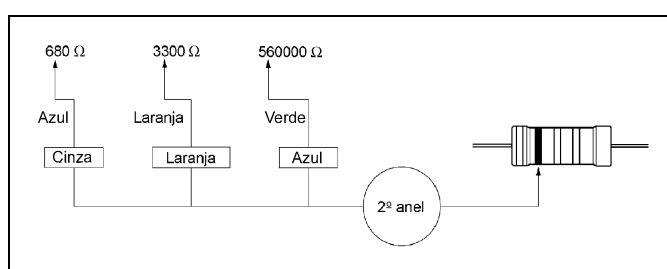
Aproveitando os exemplos citados anteriormente as cores do 1º anel para cada um é:



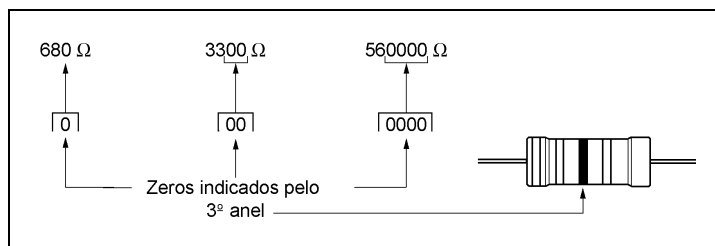
O segundo anel colorido representa o segundo número que forma o valor do resistor.



Para o segundo anel as cores tem o mesmo significado do 1º anel.



O terceiro anel representa o número de zeros que segue aos dois primeiros algarismos, sendo chamado de fator multiplicativo.



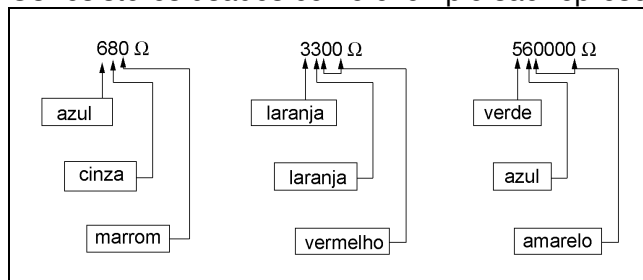
A cada número de zeros corresponde uma cor:

Preto - Nenhum zero	Amarelo - 4 zeros (0000)
Marrom - 1 zero (0)	Verde - 5 zeros (00000)
Vermelho - 2 zeros (00)	Azul - 6 zeros (000000)
Laranja - 3 zeros (000)	

Observação

As cores violeta, cinza e branco não são encontradas no 3º anel por que os resistores padronizados não alcançam valores que necessitem de 7, 8 ou 9 zeros.

Os resistores usados como exemplo são representados assim:



O quarto anel colorido representa a tolerância do resistor.

A cada percentual corresponde uma cor característica.

± 10% prateado

± 5% dourado

± 2% vermelho

± 1% marrom

Observação

A ausência do quarto anel indica a tolerância de 20%.

Acrescendo-se uma tolerância de 10% aos valores dos resistores usados como exemplo.

680 Ω \pm 10% Azul, cinza, marrom, prateado
 3300 Ω \pm 10% Laranja, laranja, vermelho, prateado
 560000 Ω \pm 10% Verde, azul, amarelo, prateado

Resistores de 1 Ω a 10 Ω

Para representar **resistores de 1 a 10 Ω** (exemplo: 2,7 Ω) o código estabelece o uso da cor **dourada no 3º anel**. O dourado neste anel indica a existência da vírgula entre os dois primeiros números.

Seguem alguns exemplos:

1,8 Ω \pm 5% Marrom, cinza, dourado, dourado
 4,7 Ω \pm 10% Amarelo, violeta, dourado, prateado
 8,2 Ω \pm 20% Cinza, vermelho, dourado, (não existe o 4º anel)

Resistores abaixo de 1 Ω

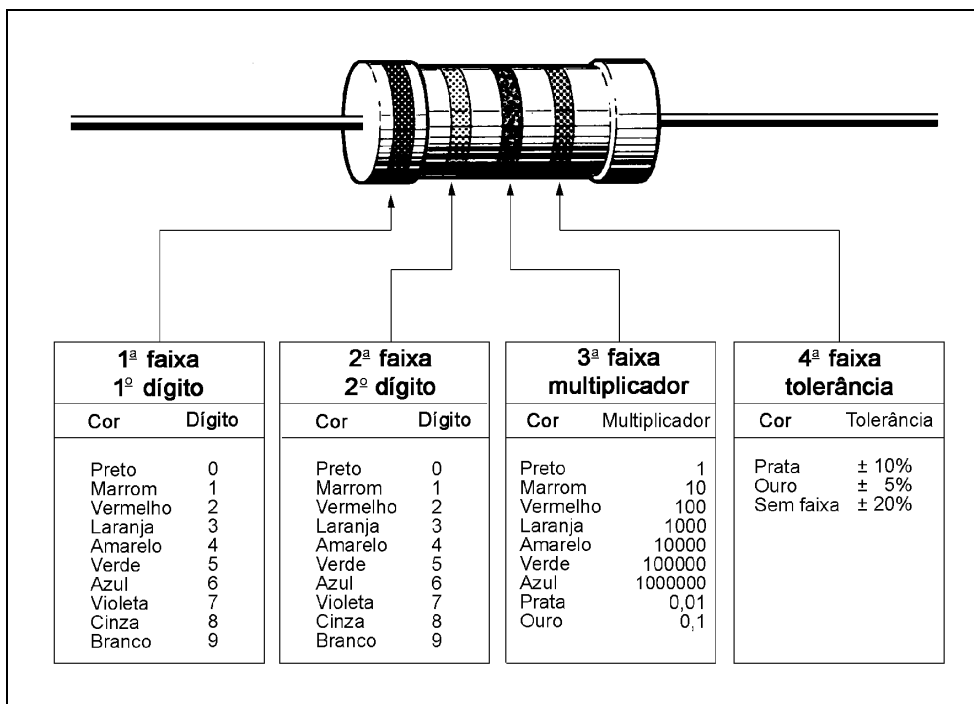
Para representar **resistores abaixo de 1 Ω** (exemplo: 0,27 Ω) o código determina o uso do **prateado no 3º anel**. O prateado no 3º anel significa a existência de 0, antes dos dois primeiros números.

Seguem alguns exemplos:

0,39 Ω \pm 20% Laranja, branco, prateado, sem cor
 0,15 Ω \pm 10% Marrom, verde, prateado, prateado

A tabela a seguir apresenta o código de cores completo:

Cor	Dígitos significativos	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	1 X	
Marrom	1	10 X	
Vermelho	2	100 X	
Laranja	3	1000 X	
Amarelo	4	10000 X	
Verde	5	100000 X	
Azul	6	1000000 X	
Violeta	7	-	
Cinza	8	-	
Branco	9	-	
Ouro		0,1 X	\pm 5%
Prata		0,01 X	\pm 10%
Sem cor			\pm 20%



Resistores de 5 anéis

Em algumas aplicações são necessários resistores com valores mais precisos, que se situam entre os valores padronizados.

Estes resistores tem o seu valor impresso no corpo através de cinco anéis coloridos.



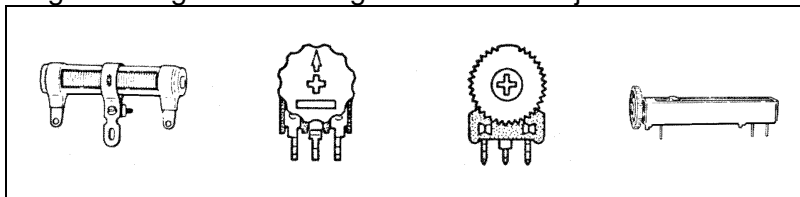
Nestes resistores, os três primeiros anéis são dígitos significativos, o quarto anel representa o número de zero (fator multiplicativo) e o quinto anel é a tolerância.

Cor	Dígitos significativos	Multiplicador	Tolerância
preto	0	1 X	
marrom	1	10 X	± 1%
vermelho	2	100 X	± 2%
laranja	3	1000 X	
amarelo	4	10000 X	
verde	5	100000 X	
azul	6	1000000 X	
violeta	7	-	
cinza	8	-	
branco	9	-	
ouro		-0,1 X	
prata		0,01 X	

Resistores ajustáveis

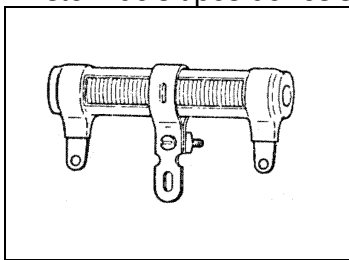
São resistores cujo valor de resistência pode ser ajustado, dentro de uma faixa pré-definida.

A figura a seguir mostra alguns resistores ajustáveis.

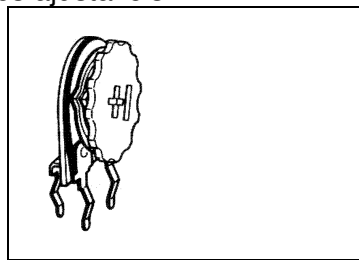


Estes tipos de resistores são utilizados em circuitos que exijam calibração.

Existem dois tipos de resistores ajustáveis:



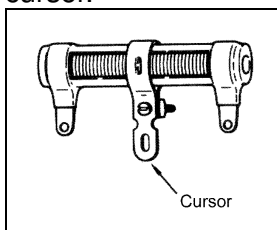
Resistor ajustável de fio



Trimpot

Resistores ajustáveis de fio

É um “resistor de fio” ao qual foi acrescentado um terceiro terminal, denominado de cursor.



Este terminal é móvel, deslizando em contato elétrico as espiras de fio que constituem o resistor, podendo ser fixado na posição desejada.

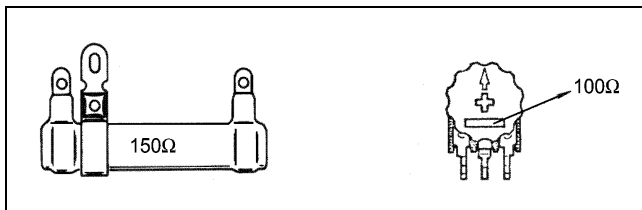
Trimpot

É um tipo de resistor ajustável utilizado em pontos de ajuste onde as correntes são pequenas (da ordem de miliampéres ou menos).

Existem trimpots verticais e horizontais, de forma a permitir uma opção para a montagem mais adequada a cada aplicação.

Características dos resistores ajustáveis

Os resistores ajustáveis apresentam impresso no corpo, o valor de resistência entre os dois terminais extremos.



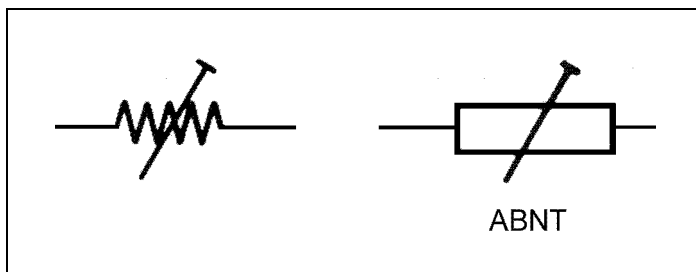
A resistência entre os terminais extremos de um resistor ajustável é a mesma, qualquer que seja a posição do cursor.

Para obter um valor de resistência menor do que o valor total de um resistor ajustável utiliza-se um dos terminais extremos e o cursor.

Simbologia

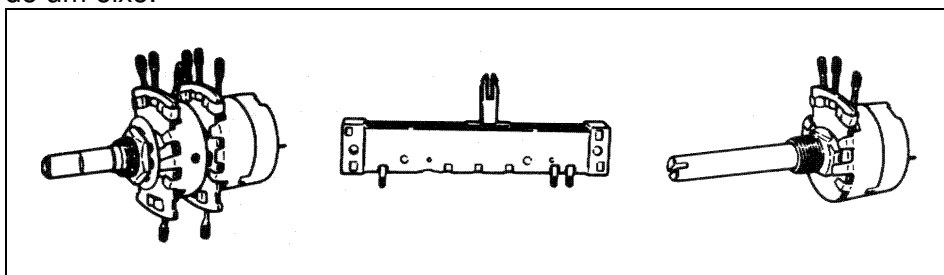
Os resistores ajustáveis são representados pelos símbolos apresentados na figura abaixo.

O símbolo normalizado está indicado (ABNT).



Potenciômetros

São resistores com derivação que permite a variação do valor resistivo pelo movimento de um eixo.



São usados nos equipamentos para permitir a mudança do regime de operação.

Exemplos:

Potenciômetro de volume - permite o aumento ou diminuição do nível de intensidade do som.

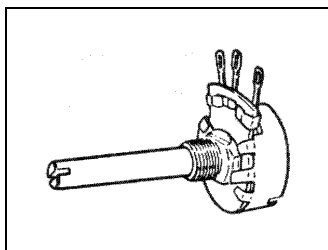
Potenciômetro de brilho - permite o controle da luminosidade das imagens.

Funcionamento

Entre os dois terminais extremos o potenciômetro é um resistor comum.

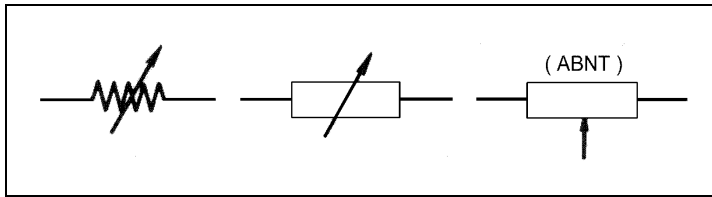
Sobre este resistor desliza um 3º terminal chamado de cursor que permite utilizar apenas uma parte da resistência total do componente (de um extremo até o cursor).

A figura abaixo mostra um potenciômetro, indicando o movimento do eixo para variação da resistência.



Simbologia

A figura a seguir mostra os símbolos utilizados para representar os potenciômetros, salientando o símbolo normalizado pela ABNT.



A diferença entre os símbolos dos resistores ajustáveis e potenciômetros aparece na ponta da diagonal.

Os componentes cujo o valor está sujeito a modificação constante (potenciômetros usados no controle de volume, por exemplo) são denominados de “variáveis”.

Tipos de potenciômetros

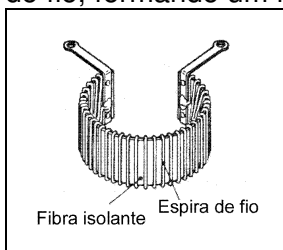
Existem dois tipos de potenciômetros:

De fio;

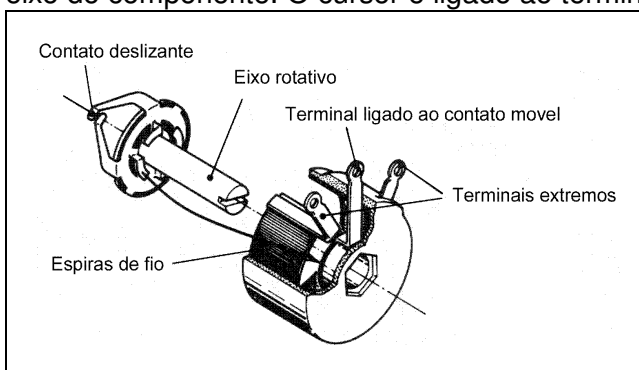
De carbono: linear; logarítmico.

Potenciômetro de fio

Sobre uma tira de fibra em forma de anel são enroladas várias espiras de fio especial (com resistividade elevada). Fixa-se terminais nas extremidades da fibra e as pontas do fio, formando um resistor.



Sobre o topo da fibra corre o contato móvel do cursor, que é ligado mecanicamente ao eixo do componente. O cursor é ligado ao terminal do potenciômetro.



Os potenciômetros de fio para circuito eletrônico são encontrados em valores de até 22K Ω de resistência em potências de dissipação de até 4W.

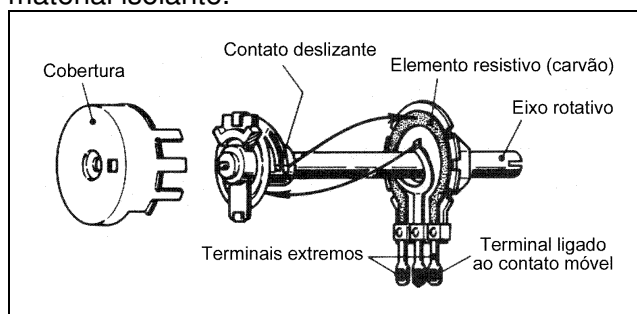
Nos potenciômetros de fio a resistência entre o cursor e os extremos varia uniformemente com o movimento do eixo.

Componentes com esta característica são chamados de **Lineares**. Portanto os potenciômetros de fio são sempre lineares.

Potenciômetro de carbono (carvão)

São semelhantes aos potenciômetros de fio na sua construção. Diferem apenas em um aspecto:

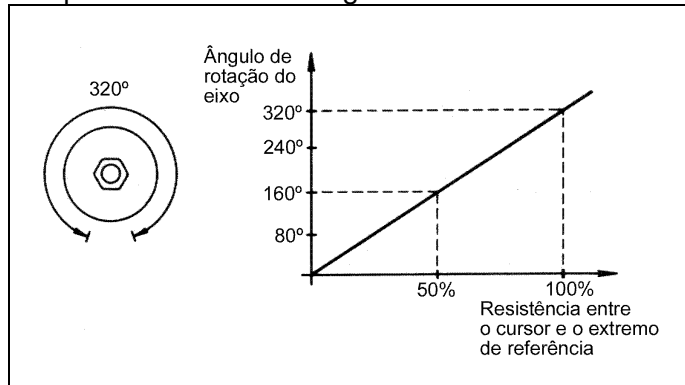
Nos potenciômetros de carvão as espirais de fio especial (do potenciômetro de fio) são substituídas por uma camada de carbono que é depositada sobre uma pista de material isolante.



Os potenciômetros de carbono podem ser lineares ou logarítmicos.

Os potenciômetros de carvão lineares são semelhantes aos de fio.

A variação da resistência dos potenciômetros lineares em relação a posição do cursor se apresenta conforme o gráfico abaixo.

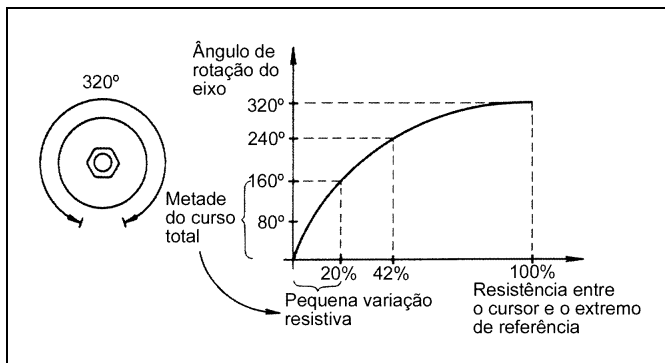


Os potenciômetros de carvão logarítmicos se comportam de forma diferente, com respeito a relação entre posição do cursor e resistência.

Quando se inicia o movimento do cursor a resistência sofre pequena variação. À medida que o cursor vai sendo movimentado, a variação na resistência torna-se cada vez maior.

A variação da resistência entre um extremo e o cursor é desproporcional ao movimento do eixo:

O gráfico a seguir mostra como a resistência varia com relação a posição do eixo nos potenciômetros logarítmicos.



Os potenciômetros logarítmicos são usados principalmente em controles de volume.

Potenciômetros com chave

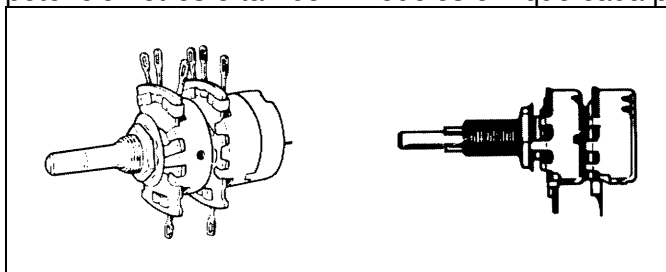
Em algumas ocasiões utiliza-se o potenciômetro para controle de volumes e ligação do aparelho.

Para cumprir esta finalidade são fabricados potenciômetros logarítmicos com uma chave presa ao eixo.

Potenciômetros duplos

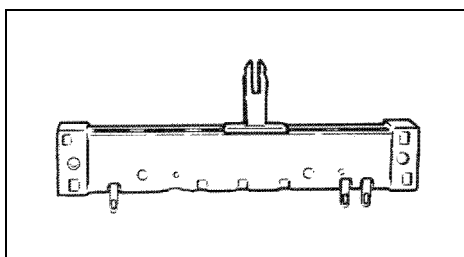
Os potenciômetros duplos são utilizados principalmente em aparelhos de som estereofônicos.

Existem modelos de potenciômetros duplos em que um único eixo comanda os dois potenciômetros e também modelos em que cada potenciômetro tem um eixo próprio.



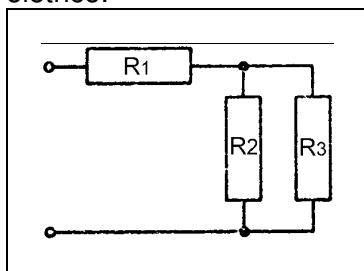
Potenciômetros deslizantes

Potenciômetros em que o movimento rotativo do eixo é substituído por um movimento linear do cursor.



Associação de resistores

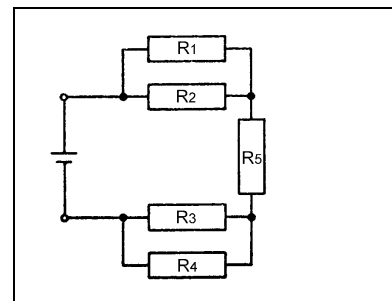
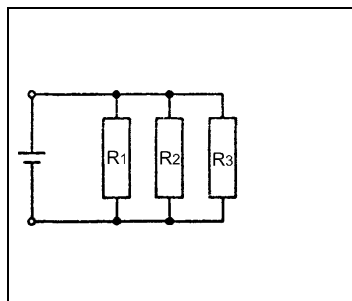
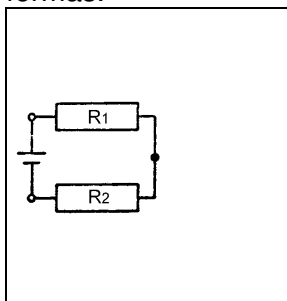
A associação de resistores é uma reunião de dois ou mais resistores em um circuito elétrico.



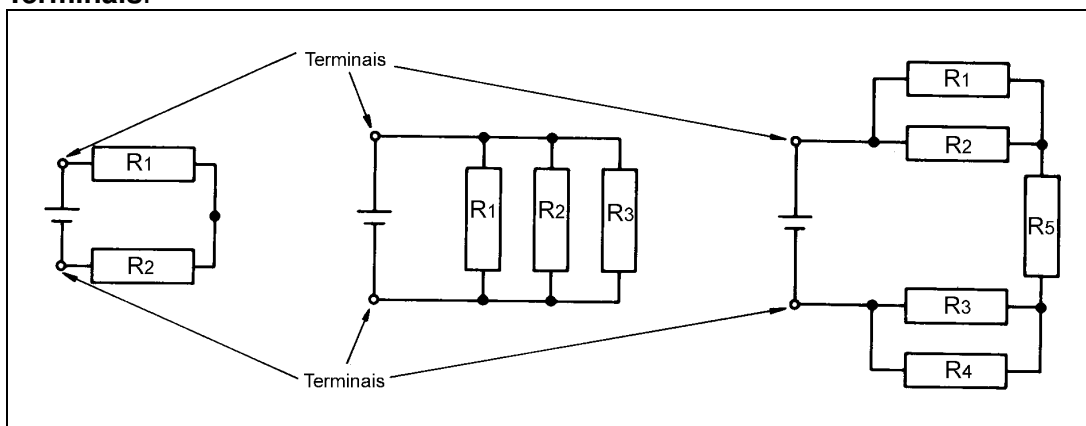
As associações de resistores são utilizadas na maioria dos circuitos eletrônicos.

Tipos de associação de resistores

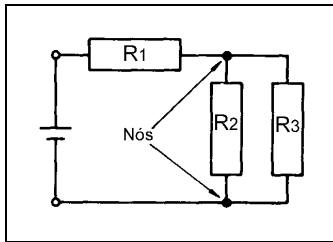
Os resistores podem ser associados originando circuitos elétricos das mais diversas formas.



Os pontos da associação que são conectados a fonte geradora são denominados de **Terminais**.



Os pontos onde existe a interligação entre dois ou mais resistores são denominados de **Nós**.



Apesar do ilimitado número de associações diferentes que se pode obter interligando resistores em um circuito elétrico, todas estas associações podem ser classificadas segundo três designações básicas:

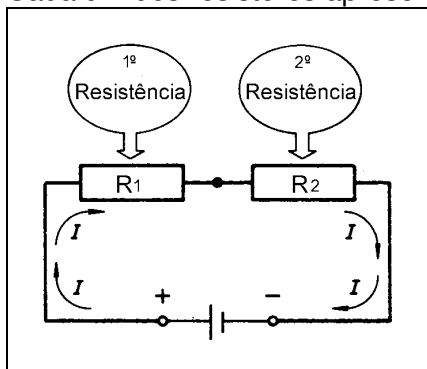
Associação série;
Associação paralela;
Associação mista.

Cada um dos tipos de associação apresenta características específicas de comportamento elétrico.

Resistência equivalente de uma associação série

Em uma associação série a mesma corrente elétrica flui através de todos os resistores, um após o outro.

Cada um dos resistores apresenta uma resistência a circulação da corrente no circuito.



Ao longo de todo o circuito, a resistência total é a soma das resistências parciais.

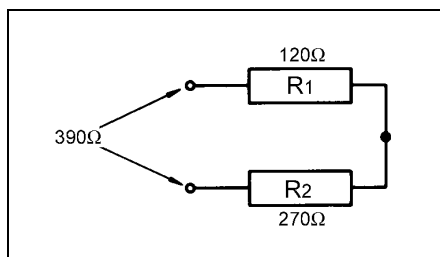
Matematicamente, a resistência total ou equivalente da associação série é dada por:

Associação série

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

Onde R_1 , R_2 , R_3 ,..... R_n são os valores ôhmicos dos resistores associados em série.

Assim, se os dois resistores (120Ω e 270Ω) são associados em série, a resistência equivalente entre os terminais da associação é:



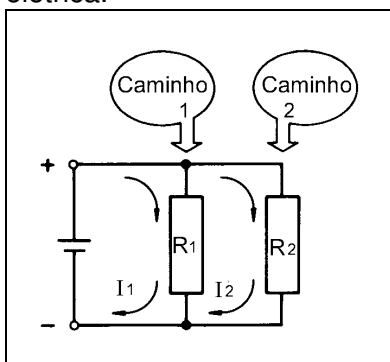
$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$R_{eq} = 120\Omega + 270\Omega$$

$$R_{eq} = 390\Omega$$

Resistência equivalente de uma associação paralela

Na associação paralela existe mais de um “caminho” para circulação da corrente elétrica.



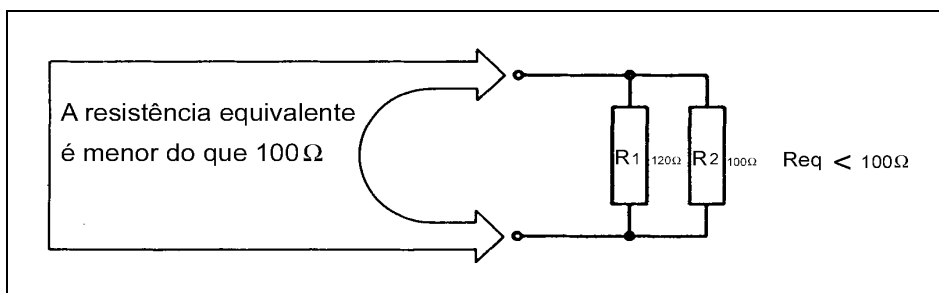
Dispondo de dois “caminhos” para circular a corrente flui com maior facilidade do que se houvesse apenas um caminho.

A partir desta maior facilidade ao circular em um maior número de caminhos do que em um único, verifica-se que a oposição a passagem da corrente em dois (ou mais) resistores em paralelo é menor do que em apenas um.

Como conclusão tem-se:

O valor da resistência equivalente de uma associação de resistores em paralelo é sempre menor que o resistor de menor valor.

Associando-se, por exemplo, um resistor de 120Ω em paralelo com um resistor de 100Ω a resistência equivalente da associação será, obrigatoriamente menor que 100Ω .

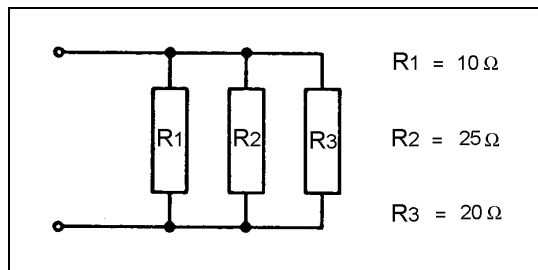


A resistência equivalente de uma associação paralela de resistores é dada pela equação:

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

Onde R_1, R_2, \dots, R_n são os valores ôhmicos dos resistores associados.

Tomando como exemplo a associação paralela apresentada na figura abaixo.



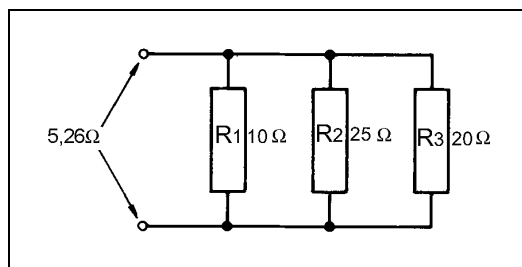
A resistência equivalente será

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

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{25} + \frac{1}{20}}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{0,1 + 0,04 + 0,05}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{0,19} \quad R_{eq} = 5,26 \Omega$$



O resultado encontrado comprova que a resistência equivalente da associação paralela (5,26Ω) é menor que o resistor de menor valor (10Ω).

Associação paralela de 2 resistores

Para associações paralelas com apenas dois resistores pode-se utilizar uma equação mais simples, deduzida da equação geral.

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

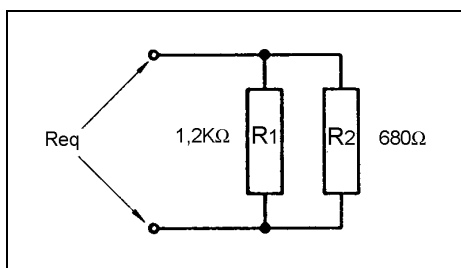
Onde R_1 e R_2 são os valores ôhmicos dos resistores associados.

A figura a seguir é um exemplo de associação paralela em que a fórmula para dois resistores pode ser empregada.

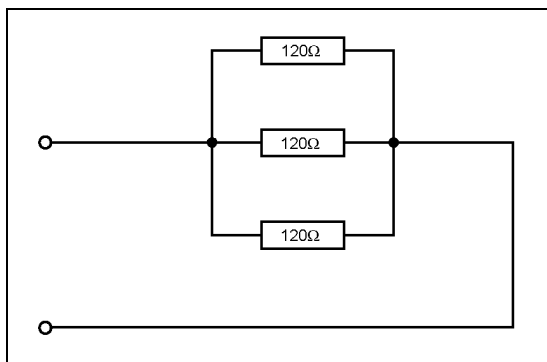
$$R_1 = 1,2K\Omega \quad R_2 = 680\Omega$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad R_{eq} = \frac{1200 \times 680}{1200 + 680}$$

$$R_{eq} = \frac{816000}{1880} \quad R_{eq} = 434\Omega$$



Ainda é possível associar em paralelo 2 ou mais resistores, todos de mesma resistência.



Nesta situação pode-se utilizar uma terceira equação, específica **para associações paralelas onde todos os resistores tem o mesmo valor**.

Esta equação também é deduzida da equação geral.

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

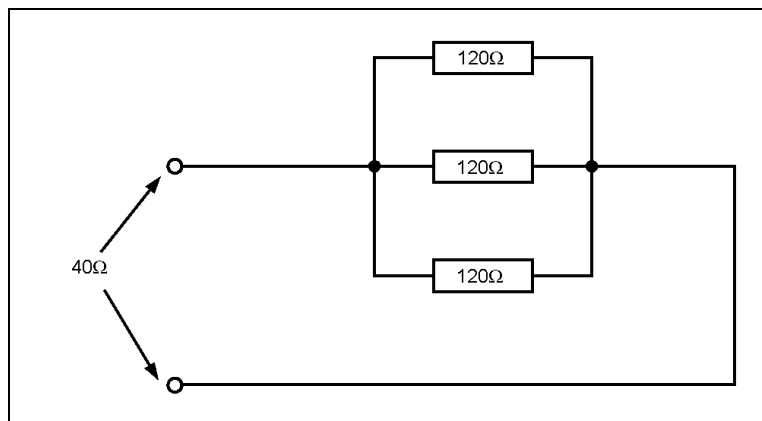
Onde:

$\left\{ \begin{array}{l} R \text{ é o valor de um resistor (todos tem o mesmo valor). } n \text{ é o número de resistores} \\ \text{de mesmo valor associados em paralelo.} \end{array} \right\}$

Os três resistores de 120Ω associados em paralelo tem uma resistência equivalente de:

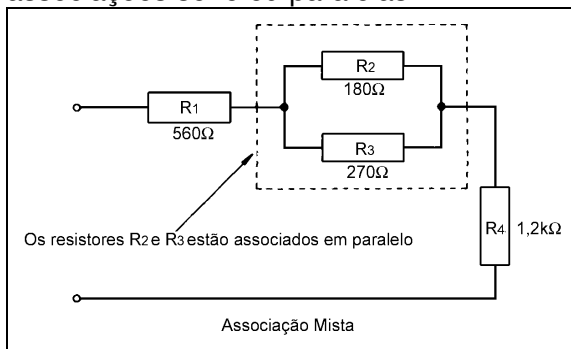
$$R_{eq} = \frac{R}{n} \quad R_{eq} = \frac{120}{3}$$

$$R_{eq} = 40\Omega$$

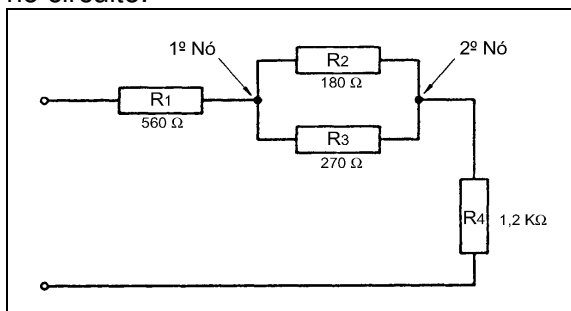


Resistência equivalente de uma associação mista

Para determinar a resistência equivalente de uma associação mista utiliza-se um recurso: dividir a associação em pequenas partes que possam ser calculadas como associações série ou paralelas.



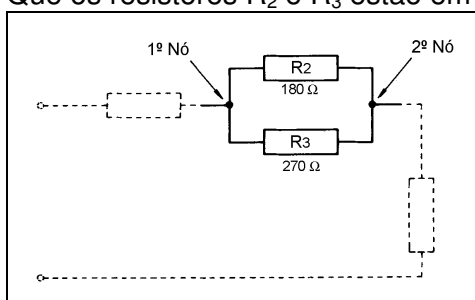
Para realizar corretamente a divisão da associação mista utilizam-se os nós formados no circuito.



A partir da identificação dos nós, procura-se analisar como estão ligados os resistores entre cada dois nós do circuito.

Analisando o trecho da associação entre o 1º nó e o 2º nó verifica-se:

Que os resistores R_2 e R_3 estão em paralelo.



Então, pode-se determinar qual a resistência equivalente destes dois resistores associados em paralelo.

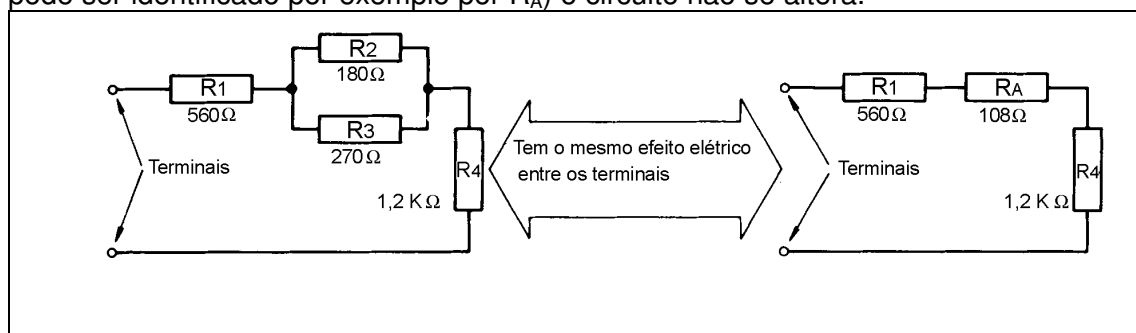
$$R_{eq} \text{ (entre 1º e 2º nós)} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R_{eq} = \frac{180 \times 270}{180 + 270} = R_{eq} = \frac{48600}{450} = 108\Omega$$

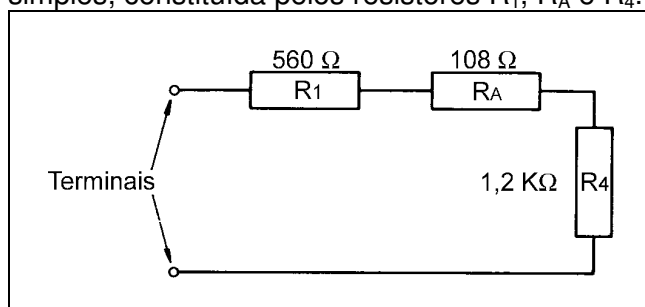
$$R_{eq} \text{ (entre 1º e 2º nós)} = 108\Omega$$

Os dois resistores associados (R_2 e R_3) apresentam 108Ω de resistência a passagem da corrente no circuito.

Se os resistores R_2 e R_3 em paralelo forem substituídos por um resistor de 108Ω (que pode ser identificado por exemplo por R_A) o circuito não se altera.



Ao executar a substituição a associação mista original tornar-se uma associação série simples, constituída pelos resistores R_1 , R_A e R_4 .



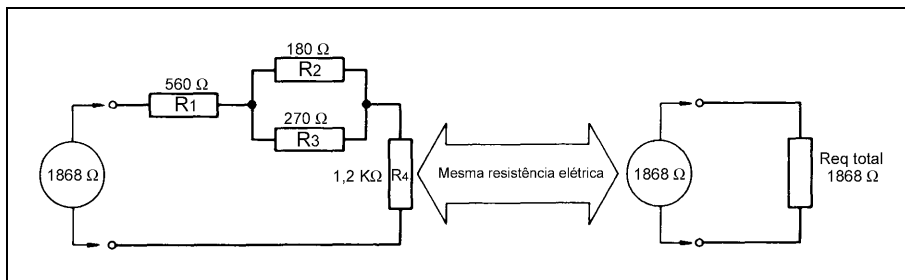
A resistência equivalente de toda a associação é determinada através da equação da associação série: $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

Usando os valores do circuito tem-se:

$$R_{eq} \text{ (TOTAL)} = R_1 + R_A + R_4$$

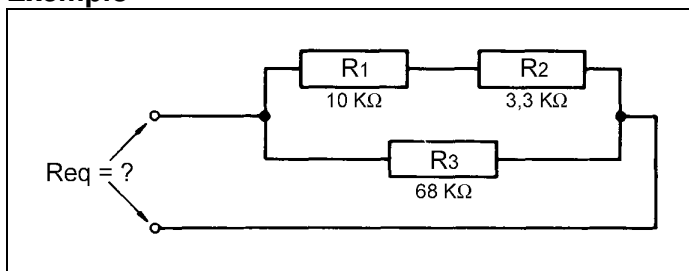
$$R_{eq} \text{ (TOTAL)} = 560\Omega + 108\Omega + 1200\Omega \quad R_{eq} = 1868\Omega$$

O resultado significa que toda a associação mista original tem o mesmo efeito para a corrente elétrica do que um único resistor de 1868Ω .

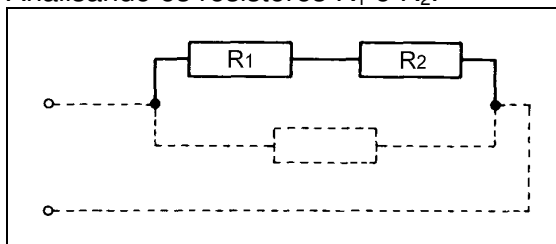


A seguir, são apresentados exemplos de circuitos mistos, com a seqüência de procedimentos para determinar a resistência equivalente.

Exemplo



Analisando os resistores R_1 e R_2 .



R_1 e R_2 estão em série

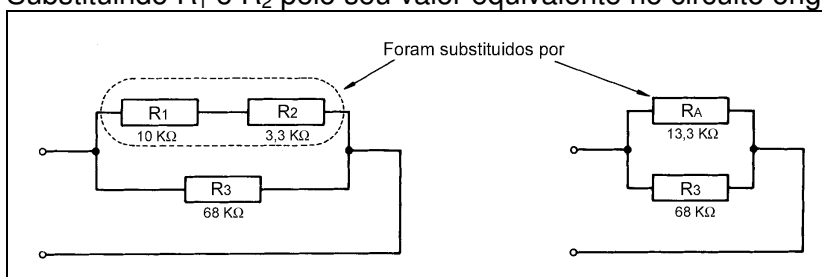
R_1 e R_2 podem ser substituídos por um único resistor R_A que tenha o mesmo efeito resultante.

Fórmula $\rightarrow R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots$ associação série

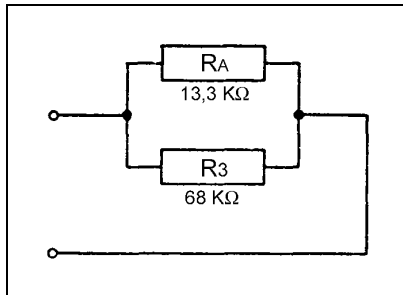
$$R_A = R_1 + R_2$$

$$R_A = 10000 + 3300 \quad R_A = 13300\Omega$$

Substituindo R_1 e R_2 pelo seu valor equivalente no circuito original tem-se:



Analisando o circuito formado por R_A e R_3 :



R_A e R_3 estão em paralelo

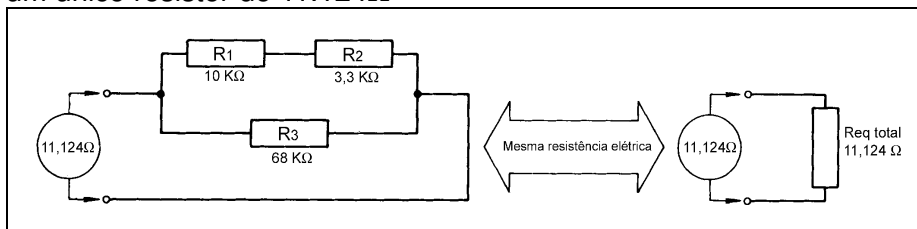
Os resistores R_A e R_3 em paralelo podem ser substituídos por um único resistor com o mesmo efeito resultante.

Fórmula $Req = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$ Associação paralela de dois resistores

$$Req(Total) = \frac{R_A \times R_3}{R_A + R_3}$$

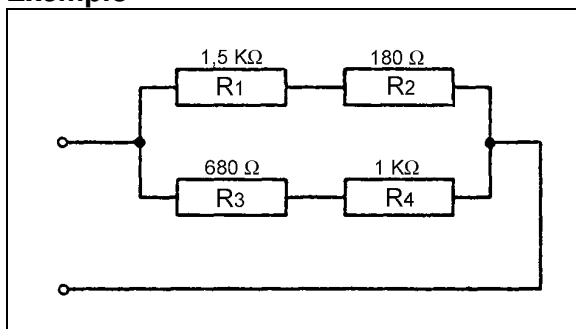
$$Req(Total) = \frac{13.300 \times 68.000}{13.300 + 68.000} \quad Req(Total) = 11.124\Omega$$

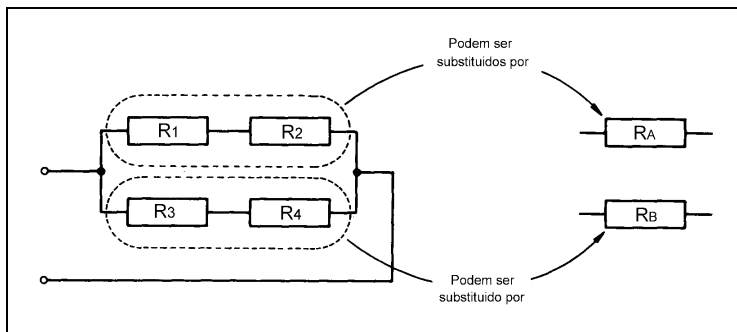
A partir do resultado conclui-se que toda a associação mista pode ser substituída por um único resistor de 11.124Ω



Aplicando-se toda a associação de resistores ou um único resistor de 11.124Ω a uma fonte de alimentação o resultado em termos de corrente é o mesmo.

Exemplo





Determinando R_A

R_A substituindo R_1 e R_2 que estão em série.

Fórmula $R_A = R_1 + R_2$ Associação série

$$R_A = 1500\Omega + 180\Omega \quad R_A = 1680\Omega$$

Determinando R_B

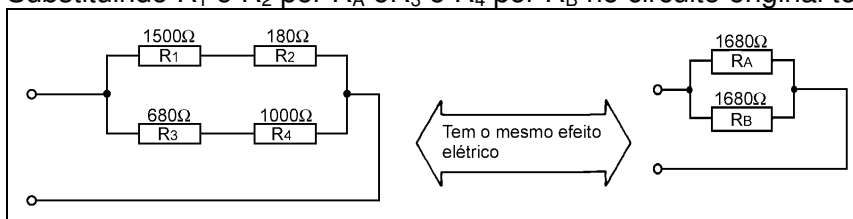
R_B substitui R_3 e R_4 que estão em série

Fórmula $R_B = R_3 + R_4$ Associação série

$$R_B = 680\Omega + 1000\Omega = 1680\Omega$$

$$R_B = 1680\Omega$$

Substituindo R_1 e R_2 por R_A e R_3 e R_4 por R_B no circuito original tem-se

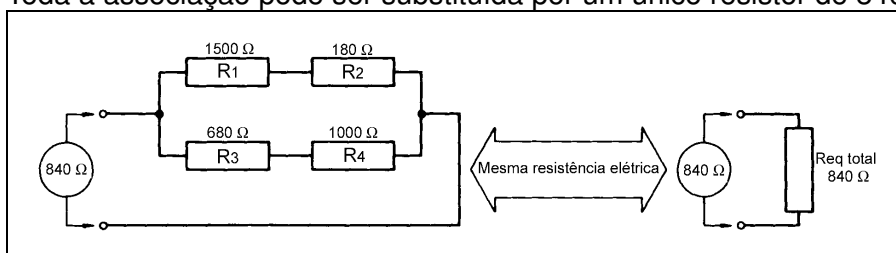


Para determinar a resistência equivalente total da associação usa-se R_A em paralelo com R_B .

Fórmula $R_{eq} = \frac{R}{n}$ associação em paralelo de resistores de mesmo valor

$$R_{eq}(\text{Total}) = \frac{1680}{2} \quad R_{eq}(\text{Total}) = 840\Omega$$

Toda a associação pode ser substituída por um único resistor de 840Ω .



Lei de Ohm

A Lei de Ohm estabelece uma relação entre as grandezas elétricas tensão, corrente e resistência em um circuito.

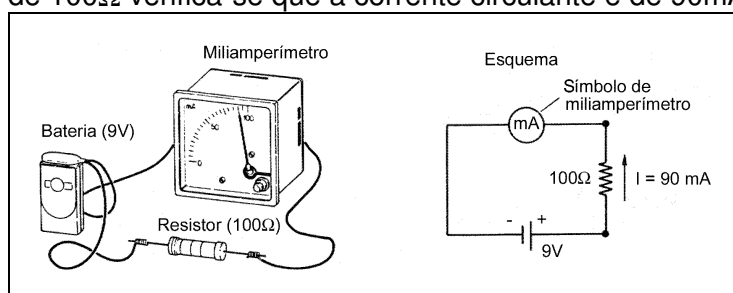
Lei de Ohm

A Lei de Ohm é a lei básica da eletricidade e eletrônica. Seu conhecimento é fundamental para o estudo e compreensão dos circuitos elétricos.

Determinação experimental da Lei de Ohm

A Lei de Ohm pode ser obtida a partir de medidas de tensão, corrente e resistência realizadas em circuitos elétricos simples, compostos por uma fonte geradora e um resistor.

Montando-se um circuito elétrico composto por uma fonte geradora de 9V e um resistor de 100Ω verifica-se que a corrente circulante é de 90mA.



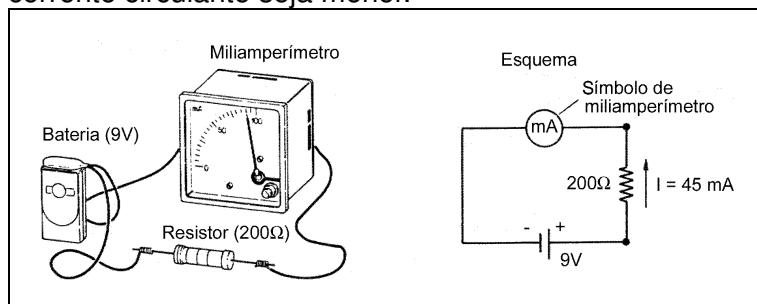
Onde:

$$V_{\text{Entrada}} = 9V$$

$$R = 100\Omega$$

$$I = 90\text{mA}$$

Substituindo-se o resistor de 100Ω por outro de 200Ω a resistência do circuito torna-se maior. O circuito impõe maior oposição a passagem da corrente, fazendo com que a corrente circulante seja menor.



Onde:

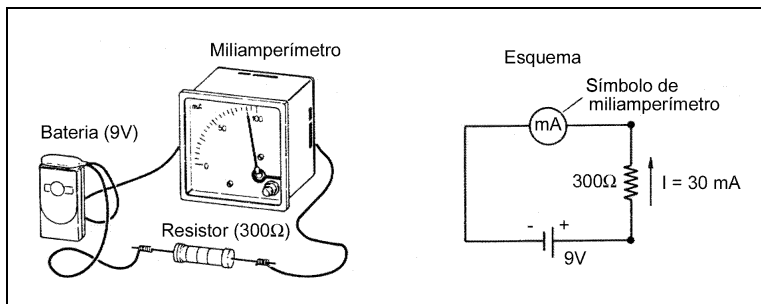
$$V_{\text{Entrada}} = 9V$$

$$R = 200\Omega$$

$$I = 45mA$$

A resistência do circuito **aumentou**, a corrente do circuito **diminuiu**.

Aumentando-se sucessivamente o valor do resistor, a oposição a passagem da corrente é cada vez maior e a corrente, cada vez menor.

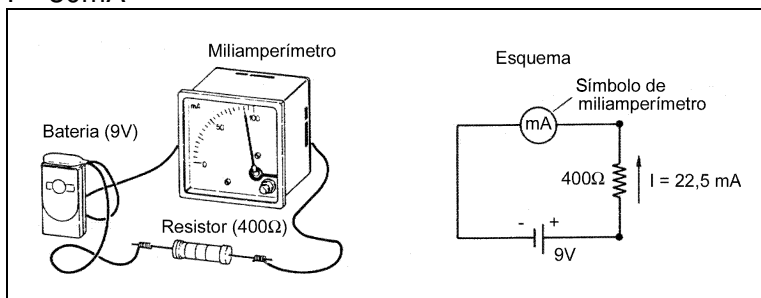


Onde:

$$V_{\text{Entrada}} = 9V$$

$$R = 300\Omega$$

$$I = 30mA$$



Onde:

$$V_{\text{Entrada}} = 9V$$

$$R = 400\Omega$$

$$I = 22,5mA$$

Colocando em uma tabela os valores obtidos nas diversas situações tem-se:

Situação	Tensão (V)	Resistência (R)	Corrente (I)
1	9V	100Ω	90mA
2	9V	200Ω	45mA
3	9V	300Ω	30mA
4	9V	400Ω	22,5mA

Observando-se a tabela de valores verifica-se:

A tensão aplicada ao circuito é sempre a mesma, portanto as variações da corrente são provocadas pela mudança de resistência do circuito. A resistência do circuito **aumenta**. A corrente no circuito **diminui**.

Dividindo-se o valor de tensão aplicada pela resistência do circuito se obtém o valor da intensidade de corrente:

		Resistência		Corrente
Tensão aplicada				
9V	÷	100Ω	=	90mA
9V	÷	200Ω	=	45mA
9V	÷	300Ω	=	30mA
9V	÷	400Ω	=	22,5mA

A partir destas observações se concluiu:

O valor de corrente que circula em um circuito pode ser encontrado dividindo-se o valor de tensão aplicada pela sua resistência.

Transformando em equação matemática esta afirmação tem-se:

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

Esta equação é conhecida como equação matemática da Lei de Ohm.

Equação matemática da Lei de Ohm $I = \frac{V}{R}$

Com base nesta equação pode-se determinar o enunciado da Lei de Ohm:

Lei de Ohm

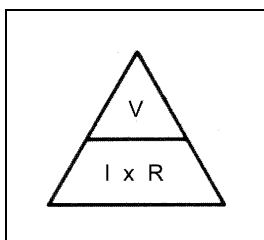
A intensidade da corrente elétrica em um circuito é diretamente proporcional a tensão aplicada e inversamente proporcional a sua resistência.

Aplicações da Lei de Ohm

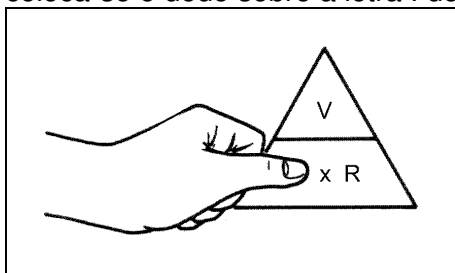
A Lei de Ohm pode ser utilizada, através da sua equação, para determinar os valores de Tensão (V), Corrente (I) ou Resistência (R) em um circuito.

Sempre que se conhecem dois valores em um circuito (V e I; e R ou V e R) o terceiro valor desconhecido pode ser determinado pela Lei de Ohm.

Para tornar mais simples o uso da equação da Lei de Ohm costuma-se usar um “triângulo”.



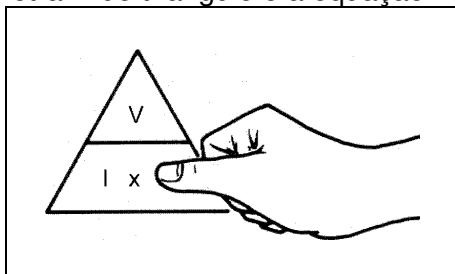
Quando se deseja determinar a intensidade da corrente (I) que flui em um circuito, coloca-se o dedo sobre a letra I do triângulo.



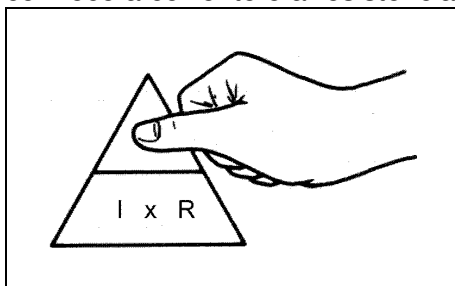
Com a letra I (Corrente) coberta, o triângulo fornece a equação que deve ser usada para calcular a corrente do circuito.

$$I = \frac{V}{R} \rightarrow \text{Cálculo de I quando são conhecidos E e R}$$

Quando for necessário determinar a resistência (R) de um circuito deve-se cobrir a letra R do triângulo e a equação necessária será encontrada.



Da mesma forma, pode-se determinar a tensão aplicada em um circuito quando se conhece a corrente e a resistência.



Para que as equações decorrentes da Lei de Ohm sejam utilizadas as grandezas elétricas devem ter seus valores expressos nas unidades fundamentais Volt, Ampère e Ohm.

Quando os valores de um circuito estiverem expressos em múltiplos ou submúltiplos das unidades devem ser convertidos para as unidades fundamentais antes de serem usados nas equações.

Exemplos de aplicação da Lei de Ohm

Uma lâmpada utiliza uma alimentação de 6V e tem 36Ω de resistência. Qual a corrente consumida pela lâmpada quando ligada?

Dados obtidos do enunciado.

$$V = 6V \quad I = ?$$

$$R = 36\Omega$$

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

Como os valores de V e R já estão nas unidades fundamentais Volt e Ohm aplica-se os valores na equação:

$$I = \frac{V}{R} \quad I = \frac{6V}{36\Omega} \quad I = 0,166A$$

O resultado é dado também na unidade fundamental de intensidade de corrente. A resposta indica que circulam 0,166A ou 166mA quando a lanterna é ligada.

O motor de um carrinho de autorama atinge a rotação máxima quando recebe 9V da fonte de alimentação. Nesta situação a corrente do motor é de 230mA. Qual é a resistência do motor?

Dados:

$$V = 9V$$

$$I = 230mA \text{ ou } 0,23A$$

$$R = ?$$

$$R = \frac{V}{I} \quad R = \frac{9V}{0,23A} \quad R = 39,1\Omega$$

Um resistor de $22K\Omega$ foi conectado a uma fonte cuja tensão de saída é desconhecida. Um miliamperímetro colocado em série no circuito indicou uma corrente de 0,75mA. Qual a tensão na saída da fonte?

Dados:

$$I = 0,75\text{mA ou } 0,00075\text{A}$$

$$R = 22\text{k}\Omega \text{ ou } 22.000\Omega$$

$$V = ?$$

$$V = R \times I \quad V = 22.000 \times 0,00075 \quad V = 16,5\text{V}$$

Dados dois valores de um circuito, determinar o terceiro:

$$V = 10\text{v}$$

$$R = 330\Omega$$

$$I = \underline{\hspace{2cm}}\text{A}$$

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

$$I = \frac{10\text{V}}{330\Omega}$$

$$I = 0,0303\text{A ou}$$

$$I = 30,3\text{mA}$$

$$R = 12\text{K}\Omega$$

$$I = 18\text{mA}$$

$$V = \underline{\hspace{2cm}}\text{V}$$

$$V = RI \quad V = 12000\Omega \times 0,018\text{A} \quad V = 216\text{V}$$

$$V = 30\text{V}$$

$$I = 0,37\text{A}$$

$$R = \underline{\hspace{2cm}}\Omega$$

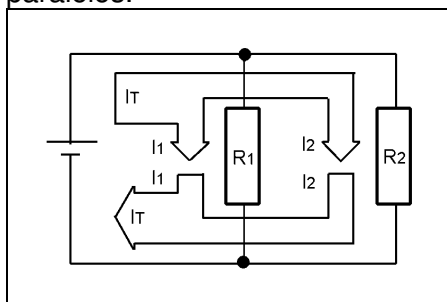
$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{30\text{V}}{0,37\text{A}}$$

$$R = 81\Omega$$

Primeira lei de Kirchhoff

A primeira Lei de Kirchhoff se refere a forma como a corrente se distribui nos circuitos paralelos.



Através da primeira lei de Kirchhoff e da lei de Ohm pode-se determinar a corrente em cada um dos componentes associados em paralelo.

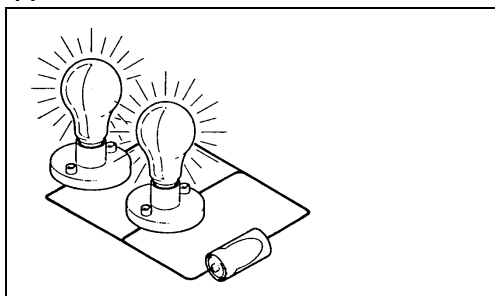
O conhecimento e compreensão da primeira lei de Kirchhoff é indispensável para a manutenção e projeto de circuitos eletrônicos.

Características do circuito paralelo

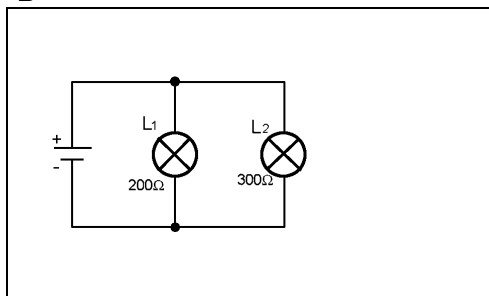
Os circuitos paralelos apresentam algumas características particulares, cujo conhecimento é indispensável para a compreensão das Leis de Kirchhoff.

Estas características podem ser constatadas, tomando como ponto de partida o circuito da figura A (representada em diagrama na figura B).

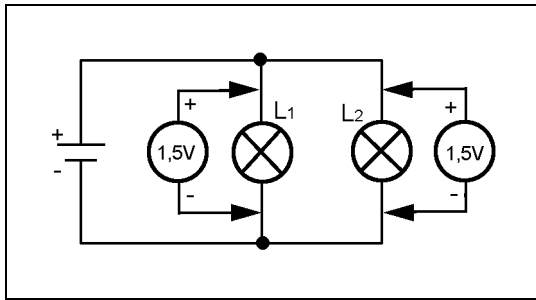
A



B



Observando o circuito se verifica que tanto a lâmpada 1 como a lâmpada 2 tem um dos terminais ligado diretamente ao pólo positivo da pilha e o outro ligado ao pólo negativo. Ligados desta forma cada uma das lâmpadas está diretamente conectada com a pilha, recebendo 1.5 Vcc nos seus terminais.



As duas lâmpadas, ligadas em paralelo, recebem a mesma tensão. Esta é uma das características dos circuitos paralelos.

Resumindo

O circuito paralelo apresenta duas características fundamentais:

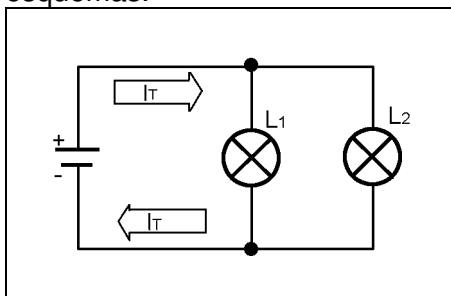
Fornecer mais de um caminho para a circulação da corrente elétrica.

A tensão em todos os componentes associados é a mesma.

As correntes na associação paralela

A função da fonte de alimentação nos circuitos é fornecer a corrente elétrica necessária para o funcionamento dos consumidores.

Quando um circuito possui apenas uma fonte de alimentação, a corrente fornecida por esta fonte é denominada de **corrente total**, representada pela notação I_T nos esquemas.

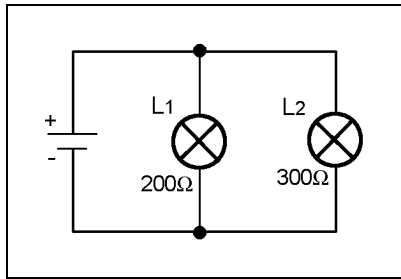


Para a fonte de alimentação (pilha) não é importante se os consumidores são lâmpada, resistores ou aquecedores. A corrente que a fonte fornece (I_T) depende apenas da sua tensão e da resistência total que os consumidores apresentam.

Pela Lei de Ohm têm-se: $I = \frac{V}{R}$. Aplicando a Lei de Ohm ao circuito têm-se:

$$I_T = \frac{V_T}{R_T} \text{ (a corrente total é dada pela divisão entre tensão total e resistência total).}$$

No exemplo da figura abaixo, a corrente total depende da tensão de alimentação (1,5V) e da resistência total que as lâmpadas apresentam (L_1 e L_2 em paralelo).

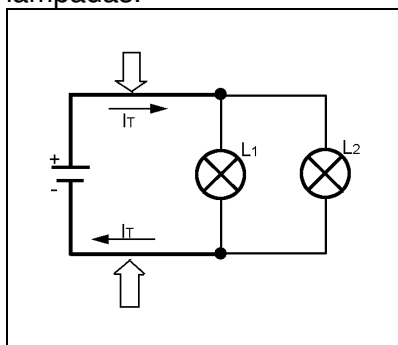


$$R_t = \frac{R_{L1} \times R_{L2}}{R_{L1} + R_{L2}} \quad R_t = \frac{200 \times 300}{200 + 300} = \frac{60000}{500} = 120\Omega$$

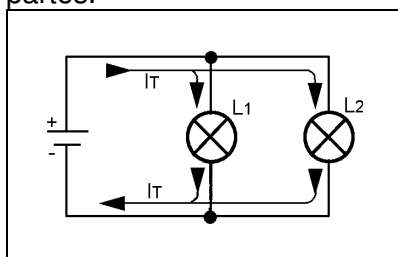
A corrente total será:

$$I_t = \frac{V}{R_t} \quad I_T = \frac{1,5V}{120\Omega} \quad I_T = 0,0125A \text{ ou } 12,5mA$$

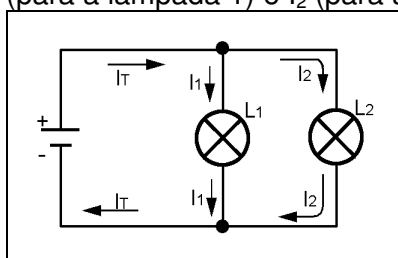
Este valor de corrente circula em toda a parte do circuito que é comum as duas lâmpadas.



A partir do nó (no terminal positivo da pilha) a corrente total I_T se divide em duas partes.

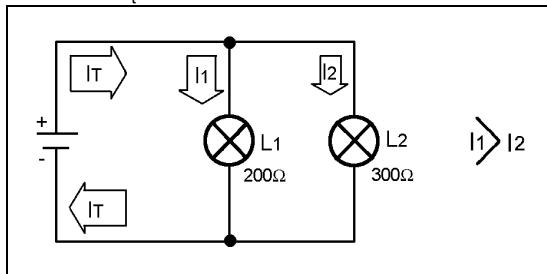


Estas correntes são chamadas de **correntes parciais** e podem ser denominadas de I_1 (para a lâmpada 1) e I_2 (para a lâmpada 2).



A forma como a corrente I_T se divide a partir do nó depende unicamente da resistência das lâmpadas.

A lâmpada de menor resistência permitirá a passagem de uma maior parcela da corrente I_T .



O valor da corrente que circula em cada ramal pode ser calculado através da Lei de Ohm, uma vez que se conhece a tensão aplicada e a resistência de cada lâmpada.

Lâmpada 1

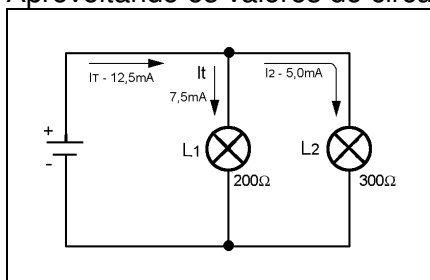
$$I_1 = \frac{V_{L_1}}{R_{L_1}} \quad I_1 = \frac{1,5V}{200\Omega} \quad I_1 = 0,0075A \quad \boxed{I_1 = 7,5mA}$$

Lâmpada 2

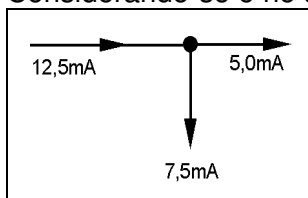
$$I_2 = \frac{V_{L_2}}{R_{L_2}} \quad I_2 = \frac{1,5V}{300\Omega} \quad I_2 = 0,005A \quad \boxed{I_2 = 5mA}$$

1ª Lei de Kirchhoff

Aproveitando os valores do circuito paralelo já calculado.



Considerando-se o nó superior têm-se:



Observando-se os valores de corrente no nó verifica-se que *as correntes que saem, somadas, originam um valor igual a corrente que entra.*

$$\boxed{I_1 + I_2 = I_T}$$

Esta afirmativa é válida para qualquer nó de um circuito elétrico, sendo conhecida como 1ª Lei de Kirchhoff.

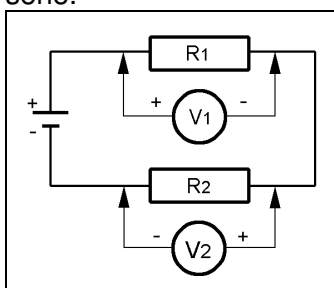
Primeira Lei de Kirchhoff

A soma das correntes que chegam a um nó é igual a soma das que dele saem.

A primeira Lei de Kirchhoff é muito útil para determinar um valor de corrente desconhecida quando se dispõe dos demais valores de corrente que chegam ou saem de um nó.

Segunda lei de Kirchhoff

A segunda Lei de Kirchhoff se refere a forma como a tensão se distribui nos circuitos série.

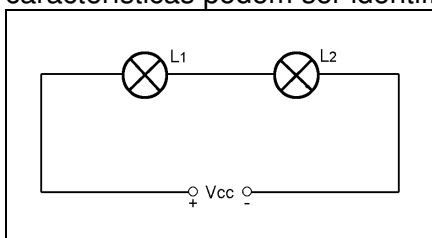


O conhecimento e compreensão da segunda Lei de Kirchhoff é importante porque se aplicada a todos os circuitos que tiverem componentes associados em série.

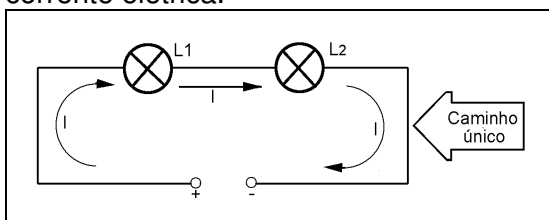
Características dos circuitos série

Os circuitos série tem características particulares, cujo conhecimento é indispensável para a compreensão da segunda Lei de Kirchhoff.

Tomando como referência um circuito simples, com duas cargas ligadas em série estas características podem ser identificadas. A figura abaixo mostra este circuito.

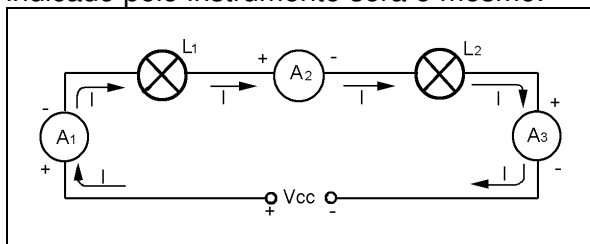


O circuito série se caracteriza por possibilitar um caminho único para a circulação da corrente elétrica.



Como existe um único caminho a mesma corrente que sai do pólo positivo da fonte passa através da lâmpada L₁, da lâmpada L₂ e retorna a fonte pelo pólo negativo.

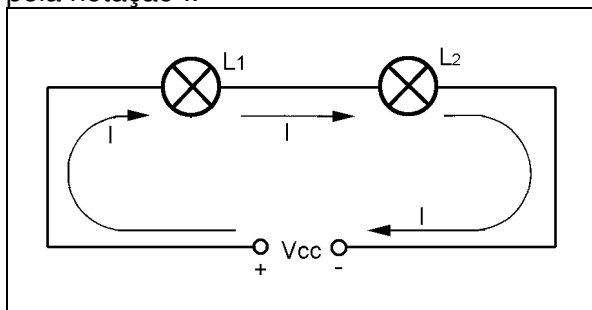
Isto significa que um medidor de corrente (amperímetro, miliamperímetro,...) pode ser colocado em qualquer parte do circuito. Em qualquer uma das posições o valor indicado pelo instrumento será o mesmo.



Esta é uma das características do circuito série:

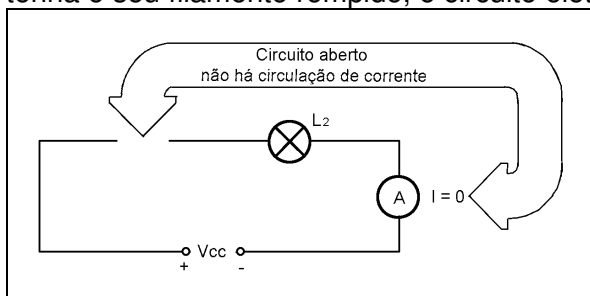
A intensidade da corrente é a mesma ao longo de todo o circuito série.

Por esta razão, a corrente que circula em um circuito série é designada simplesmente pela notação I .



A forma de ligação das cargas, uma após a outra, dá ao circuito outra características importante:

Caso uma das lâmpadas (ou qualquer outro tipo de carga) seja retirada do circuito, ou tenha o seu filamento rompido, o circuito elétrico fica aberta e a corrente cessa.



Pode-se dizer:

Num circuito série o funcionamento de cada um dos componentes depende dos restantes.

Resumindo

O circuito série apresenta três características importantes:

Fornece apenas um caminho para a circulação da corrente elétrica.

A corrente tem o mesmo valor em qualquer ponto do circuito.

O funcionamento dos consumidores é dependente.

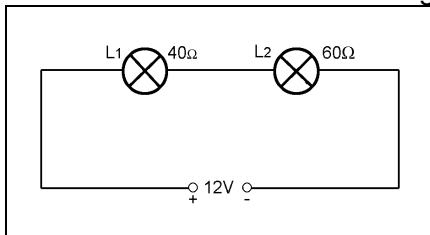
A corrente na associação série

A corrente que circula em circuito série, cujo valor é único ao longo de todo o circuito, pode ser determinada com o auxílio da Lei de Ohm.

Para determinar a corrente no circuito série da Lei de Ohm deve-se usar a tensão nos terminais da associação e a sua resistência total:

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

Considerando-se o circuito da figura abaixo como exemplo.

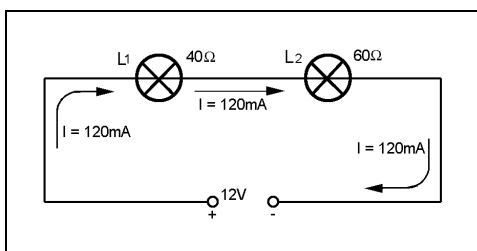


A corrente no circuito é: $I = V/R_T$

$$R_T = 40\Omega + 60\Omega = 100\Omega$$

$$V = 12V$$

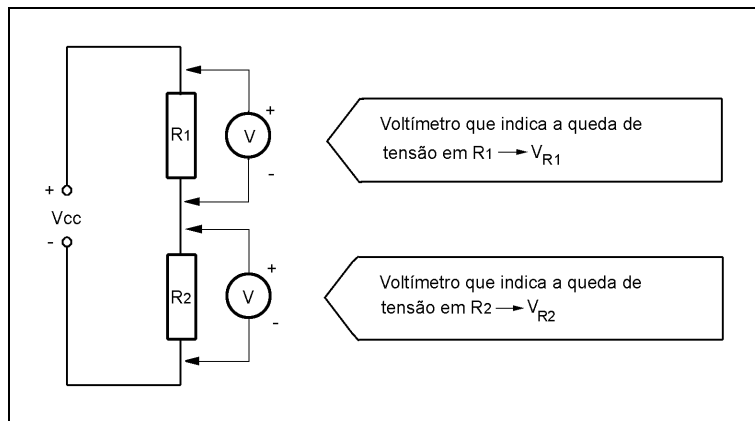
$$I = \frac{12V}{100\Omega} = 0,12A \text{ ou } \boxed{120mA}$$



As tensões no circuito série

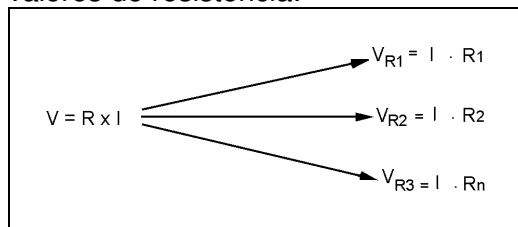
Pelo fato de não estarem com os dois terminais ligados diretamente à fonte, a tensão nos componentes de um circuito série é diferente da tensão da fonte de alimentação. O valor de tensão em cada um dos componentes é sempre menor do que a tensão de alimentação.

Esta parcela de tensão que fica sobre cada componente do circuito é denominada de **queda de tensão** no componente. A queda de tensão é representada pela notação "V".

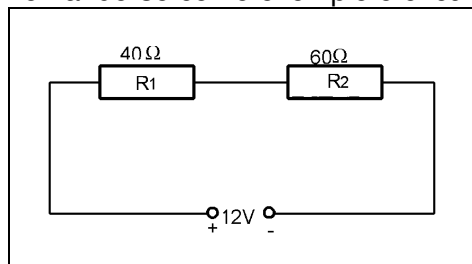


Determinação da queda de tensão

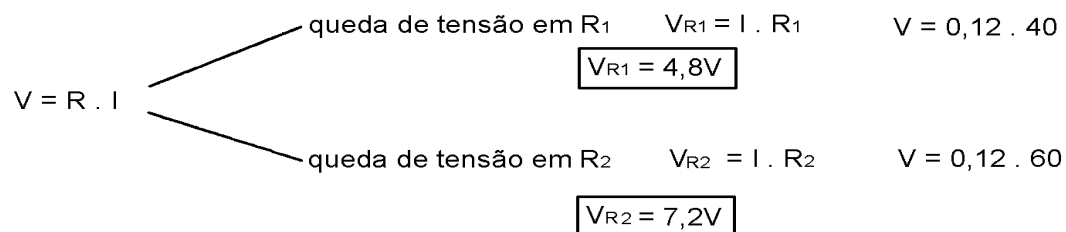
A queda de tensão em cada componente de uma associação série pode ser determinada pela Lei de Ohm, quando se dispõe da corrente no circuito e dos seus valores de resistência:



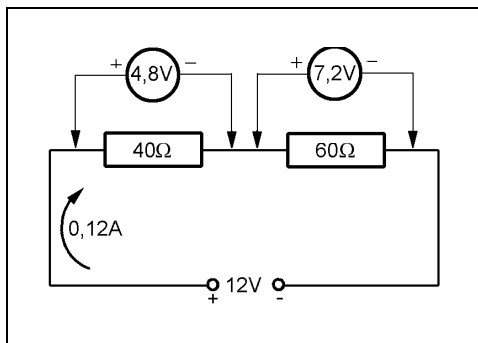
Tomando-se como exemplo o circuito apresentado na figura abaixo.



$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{12}{100\Omega} = 0,12A$$



A figura a seguir mostra o circuito com os valores de tensão e corrente.



Observando os valores de resistência e queda de tensão se verifica:

O resistor de maior valor fica com uma parcela maior de tensão.

O resistor de menor valor fica com a menor parcela de tensão.

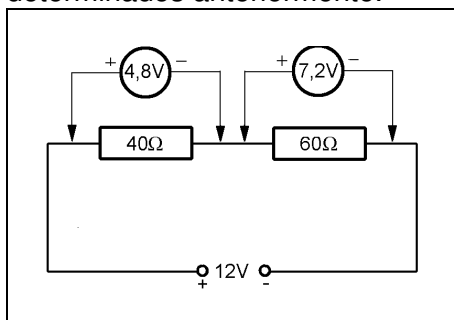
Pode-se dizer que, em um circuito série a queda de tensão é proporcional ao valor do resistor:

Maior valor → maior queda de tensão

Menor valor → menor queda de tensão

2ª Lei de Kirchhoff

Tomando como referência os valores de tensão nos resistores do circuito determinados anteriormente.



Somando-se as quedas de tensão nos dois resistores ($VR_1 + VR_2$) têm-se:

$$4,8V + 7,2V = 12V$$

Verifica-se que o resultado da soma é a tensão de alimentação.

A segunda Lei de Kirchhoff é baseada nesta conclusão.

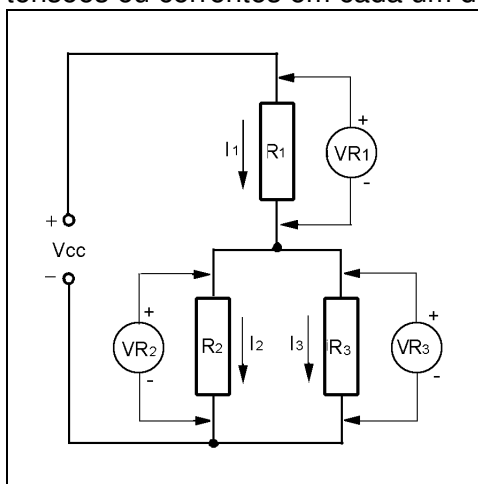
Segunda lei de Kirchhoff

A soma das quedas de tensão nos componentes de uma associação série é igual a tensão aplicada nos seus terminais extremos.

A segunda Lei de Kirchhoff é utilizada com muita frequência como “ferramenta” para determinar quedas de tensão desconhecidas em circuitos eletrônicos.

Leis de Kirchhoff e Ohm em circuitos mistos

As Leis de Kirchhoff, juntamente com a Lei de Ohm, permitem que se determine as tensões ou correntes em cada um dos componentes de um circuito misto.



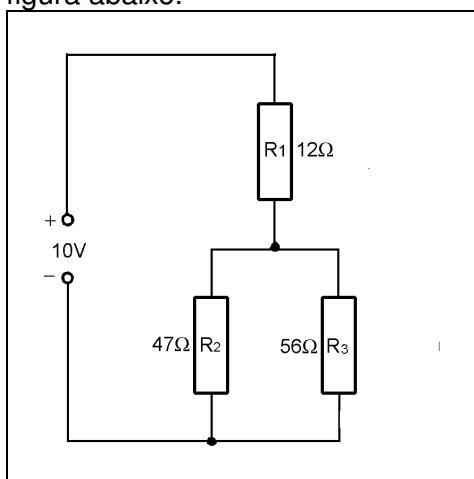
Os valores elétricos de cada componente do circuito podem ser determinados a partir da execução da seqüência de procedimentos a seguir:

Determinação da resistência equivalente.

Determinação da corrente total.

Determinação das tensões ou correntes nos elementos do circuito.

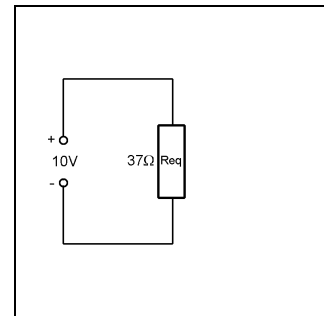
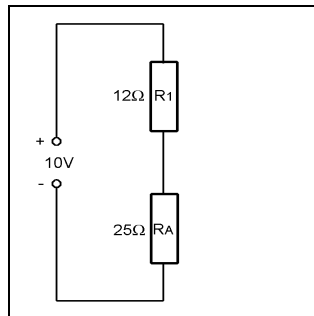
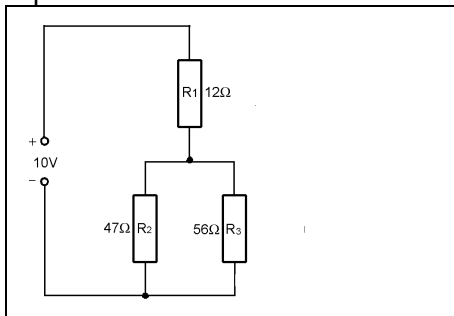
A utilização da seqüência de procedimentos será demonstrada a partir do circuito da figura abaixo.



Determinação da resistência equivalente

Para determinar a resistência equivalente do circuito empregam-se “circuitos parciais” através dos quais o circuito original é reduzido e simplificado até a forma de um único resistor (R_{EQ}).

As figuras abaixo mostram os circuitos utilizados para determinação da resistência equivalente.



Determinação da corrente total

A corrente total pode ser determinada aplicando a Lei de Ohm no circuito equivalente final.

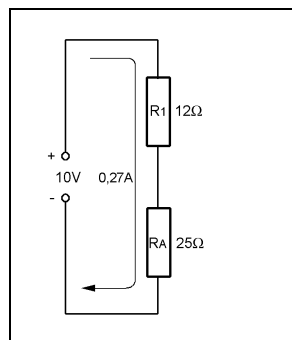
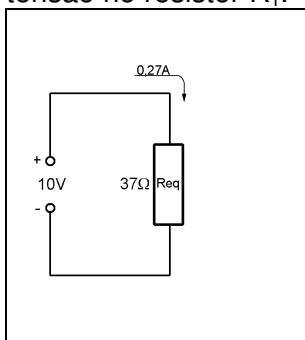
$$I_T = \frac{E}{R_T} \quad I_T = \frac{10V}{37\Omega} = 0,2703A$$

Arredondando

$$I_T = 0,27A$$

Determinação das tensões e correntes individuais

A corrente total, aplicada ao “circuito parcial” permite que se determine a queda de tensão no resistor R_1 .

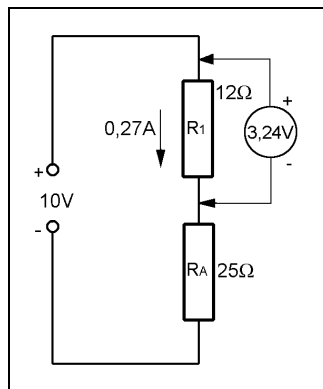


$$V_{R1} = I_{R1} \cdot R_1 \text{ como } I_{R1} \text{ é a mesma } I$$

$$V_{R1} = 0,27A \cdot 12\Omega$$

$$V_{R1} = 3,24V$$

A queda de tensão em R_A pode ser determinada pela 2ª Lei de Kirchhoff: a soma das quedas de tensão num circuito série é igual a tensão de alimentação.



$$V = V_{R1} + V_{RA}$$

$$V_{RA} = V - V_{R1}$$

$$V_{RA} = 10V - 3,24V$$

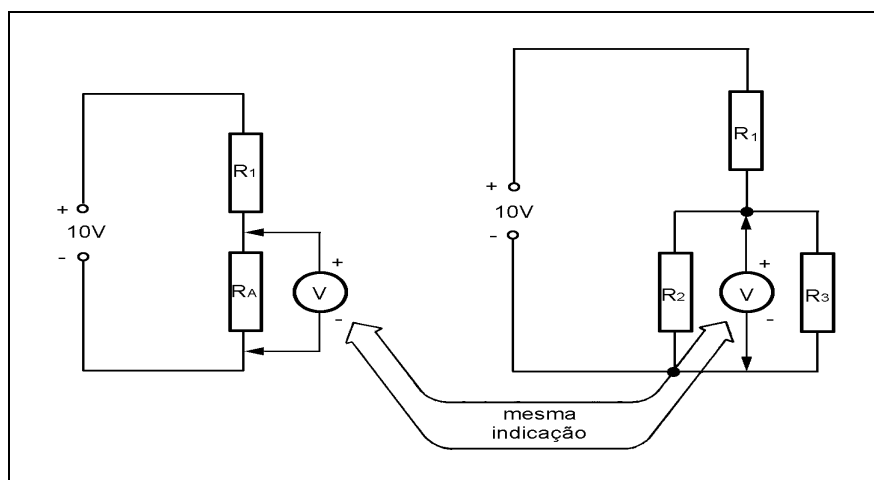
$V_{RA} = 6,76V$

Observação

A queda de tensão em R_A pode também ser determinada pela Lei de Ohm: $V_{RA} = I \cdot R_A$, porque os valores de I (0,27A) e R_A (25Ω) são conhecidos.

$$V_{RA} = 0,27 \times 25 = 6,75V$$

Calculando a queda de tensão em R_A se calcula em realidade, a queda de tensão na associação paralela $R_2 R_3$.

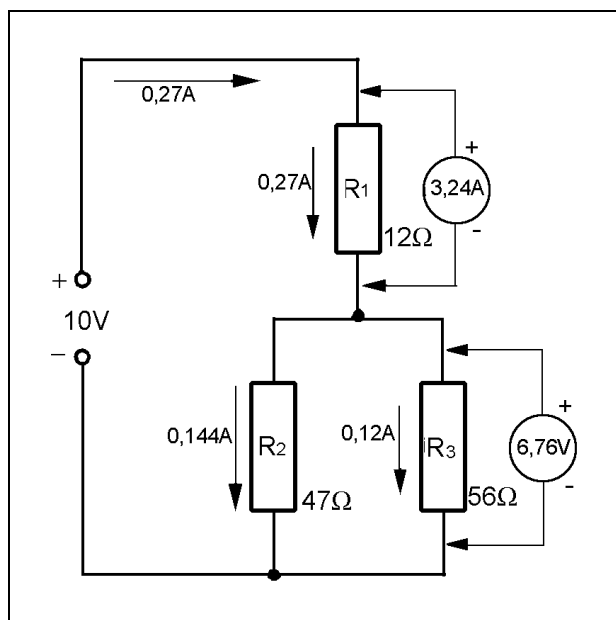


Os últimos dados que ainda faltam determinar são as correntes em R_2 (I_{R2}) e R_3 (I_{R3}). Estas correntes podem ser calculadas pela Lei de Ohm: $I = V/R$.

$$I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R_2} \quad I_{R2} = \frac{6,76V}{47\Omega} \quad \boxed{I_{R2} = 0,144A}$$

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R_3} \quad I_{R3} = \frac{6,76V}{56\Omega} \quad \boxed{I_{R3} = 0,12A}$$

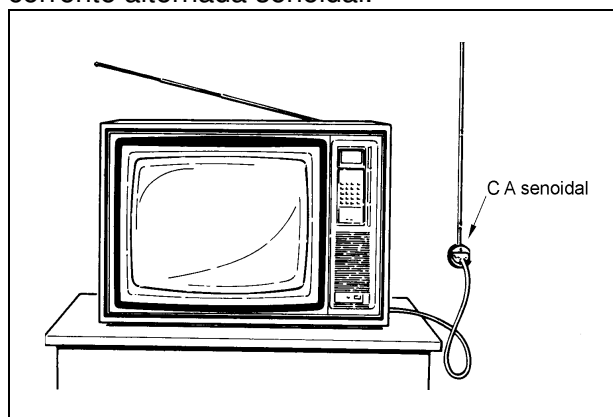
A figura abaixo mostra o circuito original com todos os valores de tensão e corrente.



Tensão alternada senoidal

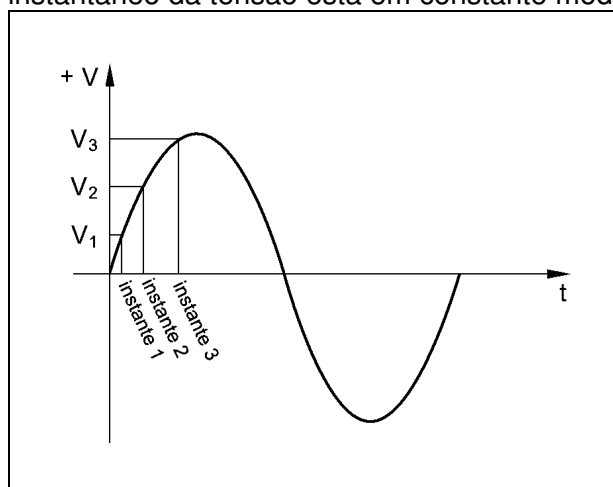
A tensão alternada senoidal é a mais importante das tensões CA, tendo em vista que toda a distribuição de energia elétrica para os consumidores (residências, indústrias, comércio, etc...) é feita através deste tipo de corrente alternada.

Isto significa que todos os aparelhos ligados à rede elétrica são alimentados por corrente alternada senoidal.

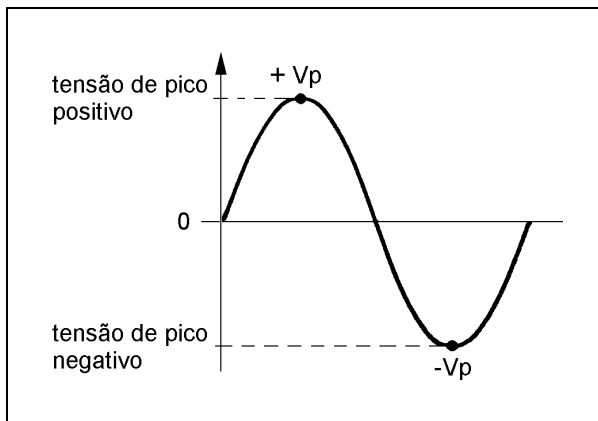


Valores de pico da tensão alternada senoidal

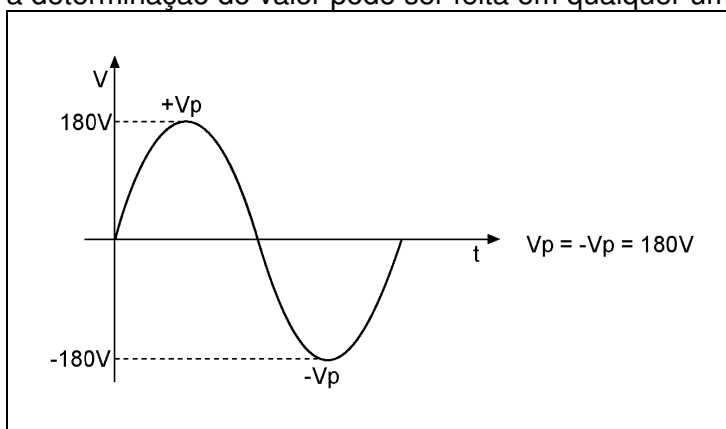
Analisando-se um ciclo completo da tensão alternada senoidal verifica-se que o valor instantâneo da tensão está em constante modificação.



O valor máximo de tensão que a CA atinge em cada semiciclo é denominado de tensão de pico, indicada pela notação V_p .

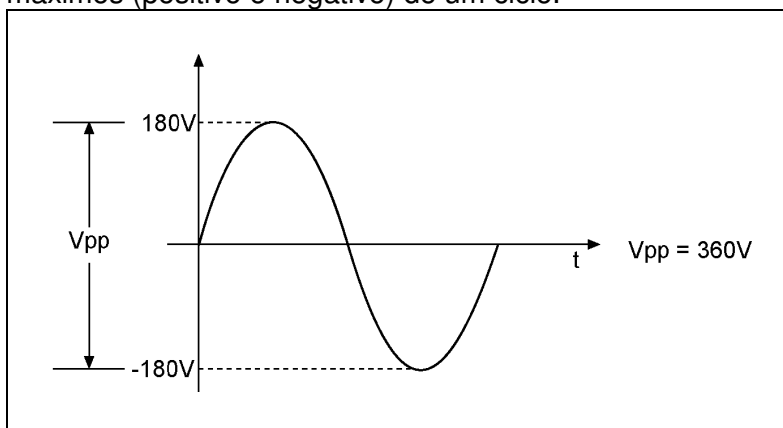


O valor de pico negativo é numericamente igual ao valor de pico positivo, de forma que a determinação do valor pode ser feita em qualquer um dos semiciclos.



Valor da tensão de pico a pico da CA senoidal

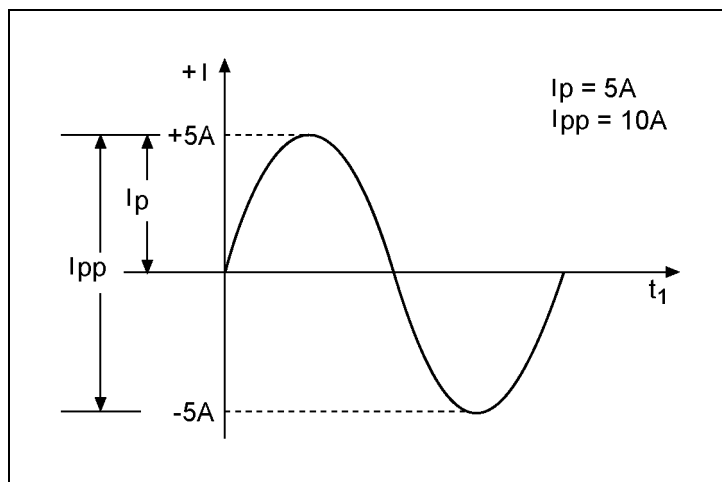
A tensão de pico a pico (V_{pp}) de uma CA senoidal é medida entre os dois picos máximos (positivo e negativo) de um ciclo.



Considerando-se que os dois semiciclos da CA são iguais pode-se afirmar:

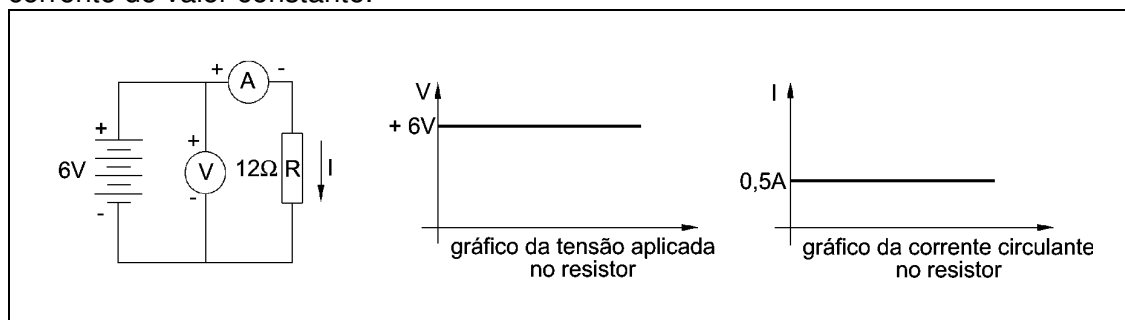
Relação V_p/V_{pp} da CA senoidal $\rightarrow V_{pp} = 2V_p$.

Da mesma forma que as medidas de **pico** e **de pico a pico** se aplicam a tensão alternada senoidal, aplicam-se a corrente alternada senoidal.

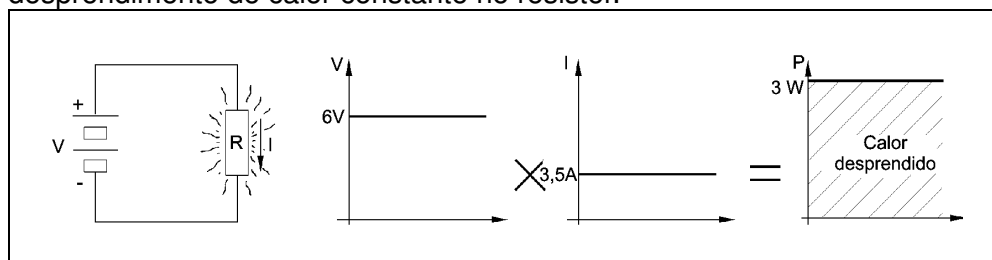


Correspondência entre CA e CC

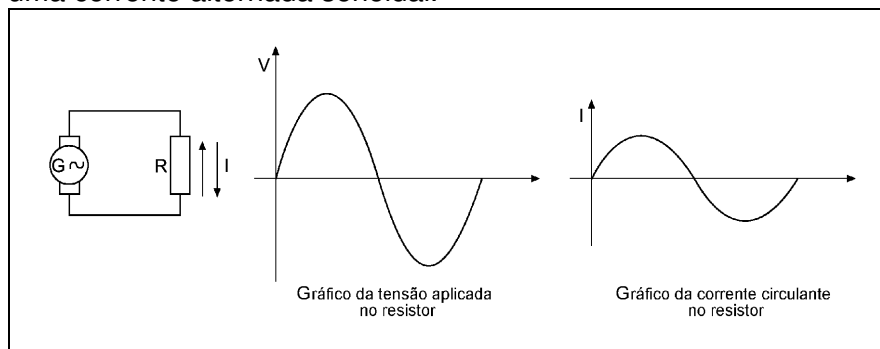
Quando se aplica uma tensão contínua sobre um resistor verifica-se a circulação de corrente de valor constante.



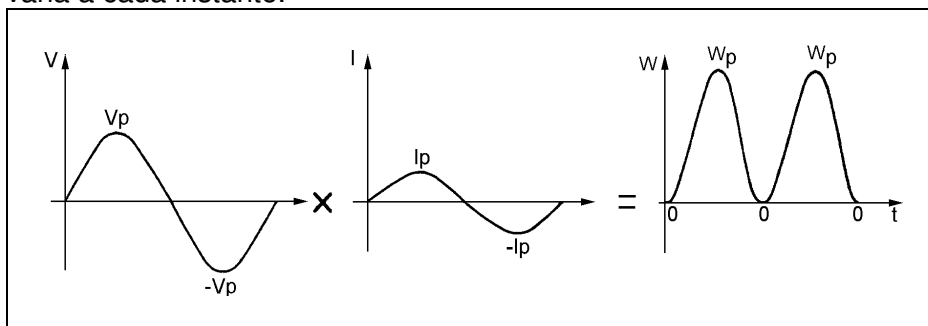
Com efeito resultante se estabelece uma dissipação de potência no resistor ($P = E \cdot I$). Esta potência é dissipada em regime contínuo, fazendo com que haja um desprendimento de calor constante no resistor.



Aplicando-se um tensão alternada senoidal a um resistor se estabelece a circulação de uma corrente alternada senoidal.



Como a tensão e a corrente são variáveis, a quantidade de calor produzida no resistor varia a cada instante.

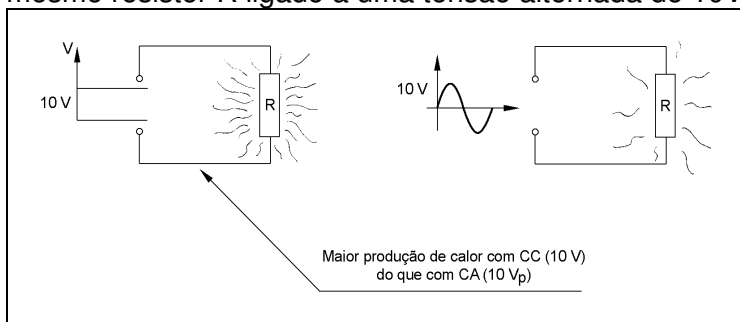


Nos momentos em que a tensão é “zero” não há corrente e também não há produção de calor ($P = 0 \times 0V$).

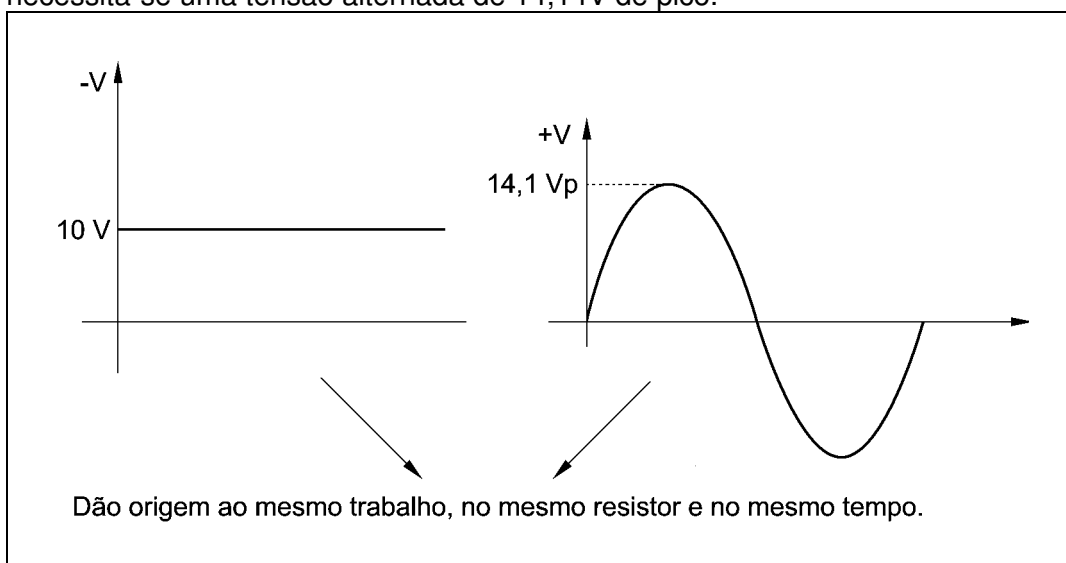
Nos momentos em que a tensão atinge o valor máximo (V_p) a corrente também atinge o valor máximo (I_p) e a potência dissipada é o produto máximo ($P_p = V_p \cdot I_p$).

Em consequência desta produção variável de “trabalho” em CA verifica-se:

Um resistor de valor R ligado a uma tensão contínua de 10V produz mais calor que o mesmo resistor R ligado a uma tensão alternada de 10V de pico.



Para obter no resistor R em CA a mesma quantidade de calor, no mesmo tempo, necessita-se uma tensão alternada de 14,14V de pico.



Isto significa que uma tensão alternada de 14,14V de pico é tão “eficaz” quanto uma tensão contínua de 10V na produção de trabalho.

Por esta razão diz-se que uma tensão CA de 14,1Vp corresponde a uma tensão eficaz de 10V.

$$14,1V_p = 10V_{ef} \quad V_{ef} \rightarrow \text{Volts eficazes}$$

Pode-se então definir:

Que tensão eficaz (ou corrente eficaz) de uma CA senoidal é um valor que indica a que tensão contínua (ou corrente contínua) está CA corresponde, em termos de produção de trabalho.

Existe uma relação constante entre o valor eficaz de uma CA senoidal e seu valor de pico. Esta relação é:

$$\text{Tensão Eficaz} \quad V_{EF} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Corrente Eficaz} \quad I_{EF} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

Aplicando-se a equação da tensão eficaz à tensão alternada senoidal de 14,14 Volts de pico verifica-se a correção da equação:

$$V_{EF} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad V_{EF} = \frac{14,14V}{1,414} \quad V_{EF} = 10V$$

Observação:

As equações da corrente eficaz e tensão eficaz podem ser encontradas através de processos matemáticos empregando cálculo integral.

Medidores de CA

Os instrumentos utilizados para medição em circuitos de corrente alternada sempre indicam valores eficazes (de corrente e tensão).

Isto significa que voltímetro conectado a um circuito de CA indica uma tensão de 110V, esta tensão é eficaz (produz trabalho).

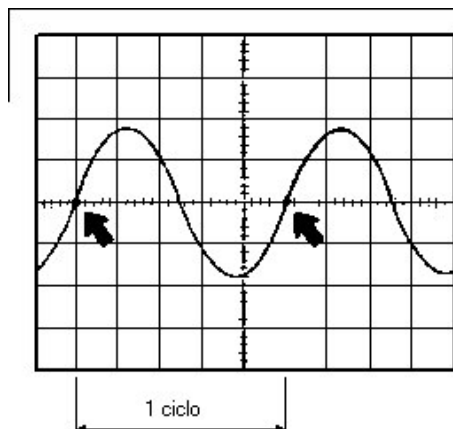
Para determinar o valor de pico da CA que originou 110V eficazes utilizam-se as mesmas equações:

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_p = 110V \cdot 1,414 \quad V_p = 155V$$

Relação entre período e frequência

Frequência (f) é o número de ciclos completos de um fenômeno repetitivo que ocorrem na unidade de tempo (1 s). A unidade da frequência é o Hertz (H). O Hertz está sujeito aos múltiplos e submúltiplos da mesma forma que o Volt, o Ampere e o Ohm,



Período (T) é o tempo necessário para que ocorra um ciclo completo de um fenômeno repetitivo.

A frequência e o período de um fenômeno estão intimamente relacionados. O relacionamento entre as duas grandezas é expresso pela equação:

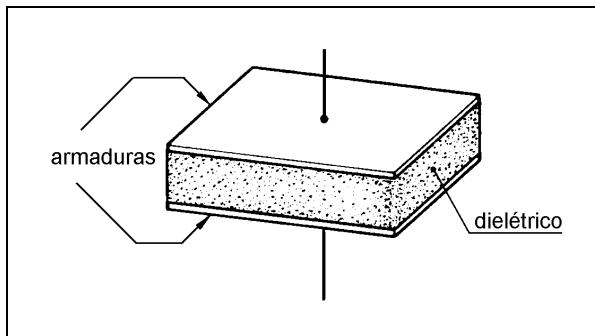
$$F = \frac{1}{T} \quad \text{Relação Período-Frequência}$$

A equação mostra que quando a frequência aumenta o período diminui e vice-versa. Uma vez conhecido o período de um sinal a equação permite que se determine sua frequência.

Capacitores

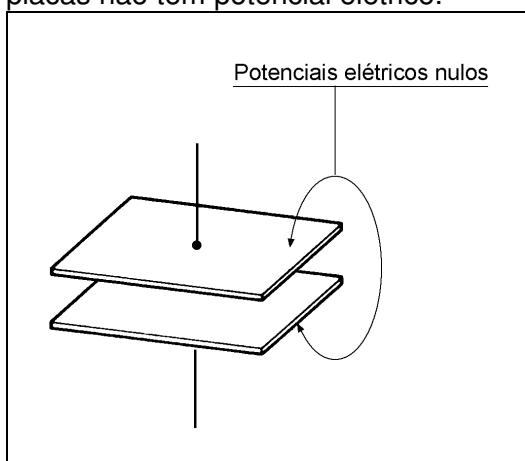
O capacitor é um componente capaz de armazenar cargas elétricas, sendo largamente empregado nos circuitos eletrônicos.

Um capacitor se compõe basicamente de duas placas de material condutor, denominadas de armaduras, isoladas eletricamente entre si por um material isolante chamado dielétrico.



O material condutor que compõe as armaduras de um capacitor é eletricamente neutro no seu estado natural.

Em cada uma das armaduras o número total de prótons e elétrons é igual, portanto as placas não tem potencial elétrico.



Não existindo potencial elétrico em cada uma das armaduras, não há diferença de potencial ou tensão entre elas.

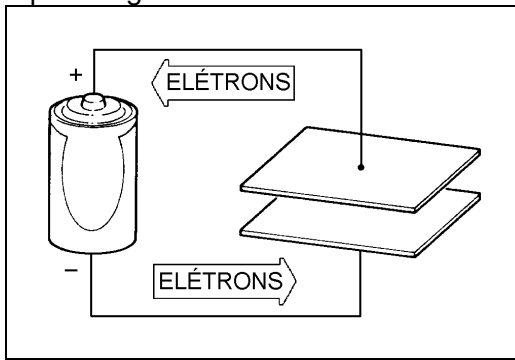
Observação

O fenômeno de armazenamento de cargas pelo capacitor pode ser compreendido mais facilmente analisando o movimento de elétrons no circuito.

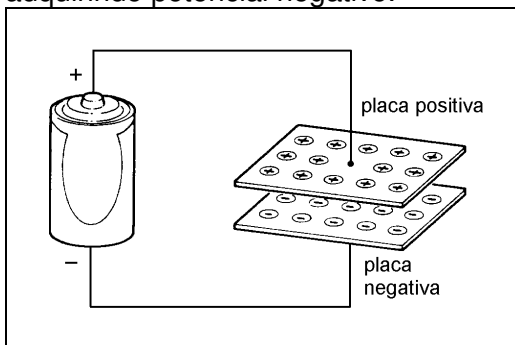
Por esta razão será utilizado o **sentido eletrônico** da corrente elétrica no desenvolvimento do assunto.

Conectando-se os terminais do capacitor a uma fonte de CC o capacitor fica sujeito à diferença de potencial dos pólos da fonte.

O potencial da bateria aplicado a cada uma das armaduras faz surgir entre elas uma força chamada de **Campo elétrico**, que nada mais é do que uma força de atração (cargas de sinal diferente) ou repulsão (cargas de mesmo sinal) entre cargas elétricas. O pólo positivo da fonte absorve elétrons da armadura a qual está conectada enquanto o polo negativo fornece elétrons à outra armadura



A armadura que fornece elétrons à fonte fica com íons positivos adquirindo um potencial positivo e a armadura que recebe elétrons da fonte fica com íons negativos adquirindo potencial negativo.

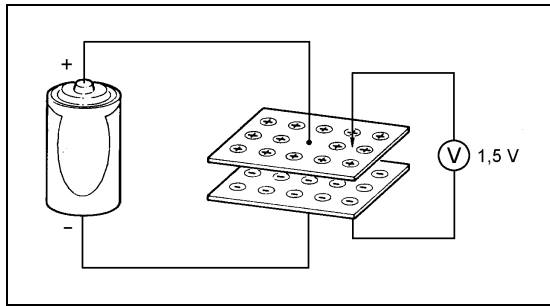


Isto significa que ao conectar o capacitor a uma fonte de CC surge uma diferença de potencial entre as suas armaduras.

A tensão presente nas armaduras do capacitor terá um valor tão próximo ao da tensão da fonte que, para efeitos práticos, pode-se considerar iguais.

Quando o capacitor assume a mesma tensão da fonte de alimentação diz-se que o capacitor está “carregado”.

Se após ter sido carregado o capacitor for desconectado da fonte de CC suas armaduras permanecem com os potenciais adquiridos.



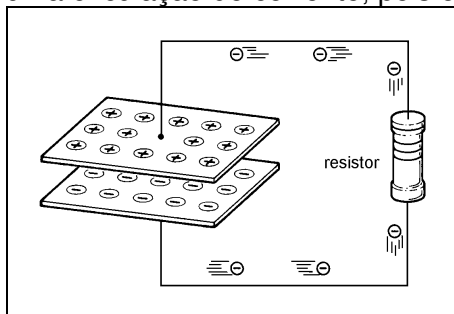
Resumindo pode-se dizer que: quando um capacitor é conectado a uma fonte de CC absorve energia desta fonte, armazenando cargas elétricas (íons positivos e negativos) nas suas armaduras.

Esta capacidade de absorver e manter a energia em suas armaduras na fonte de cargas elétricas é que define o capacitor como sendo um **armazenador de cargas elétricas**.

A energia armazenada no capacitor na forma de desequilíbrio elétrico entre suas armaduras pode ser reaproveitada.

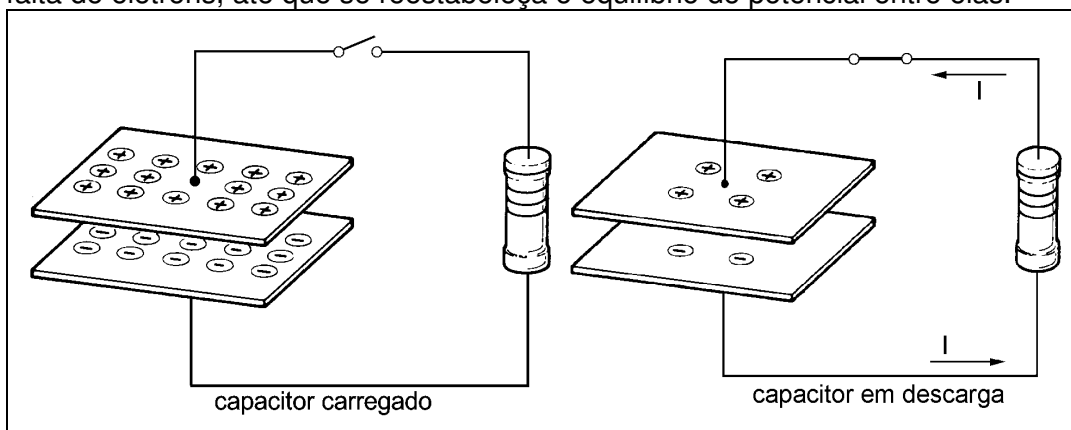
Descarga do capacitor

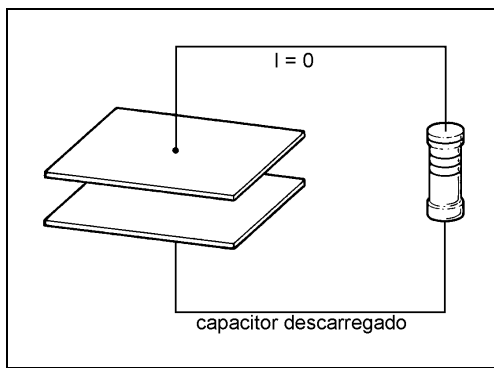
Tomando-se um capacitor carregado e conectado seus terminais a uma carga haverá uma circulação de corrente, pois o capacitor atua como fonte de tensão.



Isto se deve ao fato de que através do circuito fechado inicia-se o restabelecimento do equilíbrio elétrico entre as armaduras.

Os elétrons em excesso em uma das armaduras, se movimentam para a outra onde há falta de elétrons, até que se reestabeleça o equilíbrio de potencial entre elas.





Durante o tempo em que o capacitor se descarrega a tensão entre suas armaduras diminui, porque o número de íons restantes em cada armadura é cada vez menor. Ao fim de algum tempo a tensão entre as armaduras é tão pequena que pode ser considerada zero.

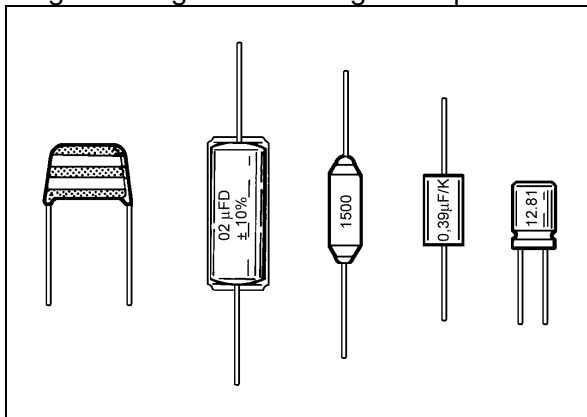
Tipos de capacitores

Atualmente encontra-se no mercado um grande número de tipos de capacitores, empregando os mais diversos materiais.

Estes capacitores podem ser resumidos em quatro tipos básicos:

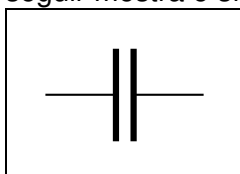
- Capacitores fixos despolarizados
- Capacitores ajustáveis
- Capacitores variáveis
- Capacitores eletrolíticos

A figura a seguir mostra alguns capacitores na sua forma real.

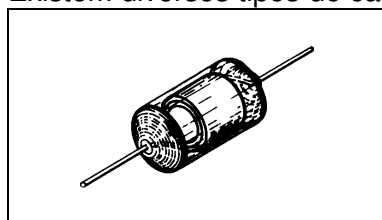


Capacitores fixos despolarizados

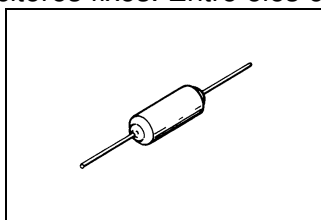
Apresentam um valor de capacitância específico, que não pode ser alterado. A figura a seguir mostra o símbolo usado para representar os capacitores fixos despolarizados.



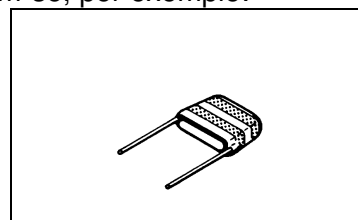
Existem diversos tipos de capacitores fixos. Entre eles citam-se, por exemplo:



Capacitor de stiroflex



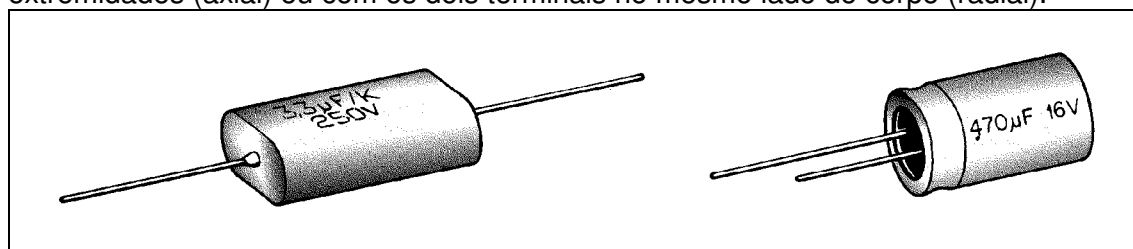
Capacitor de cerâmica



Capacitor de poliester

Estes capacitores se caracterizam por serem despolarizados, ou seja, qualquer uma das suas armaduras pode ser ligada tanto a potenciais positivos como negativos.

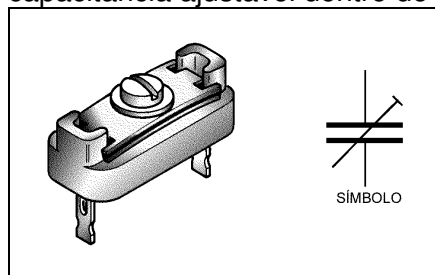
Alguns capacitores fixos podem apresentar-se em versão com os dois terminais nas extremidades (axial) ou com os dois terminais no mesmo lado do corpo (radial).



De acordo com a necessidade de montagem pode-se utilizar um ou outro tipo.

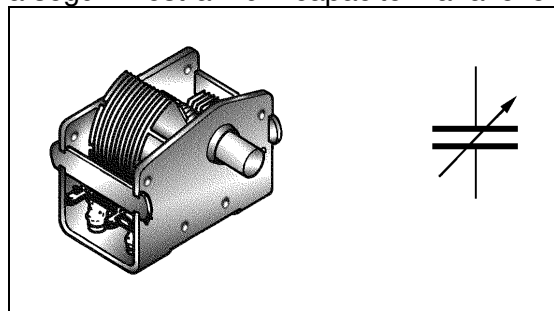
Capacitores ajustáveis

São utilizados nos pontos de calibração dos circuitos. Apresentam valor de capacitância ajustável dentro de certos limites, por exemplo 10pF a 30pF.

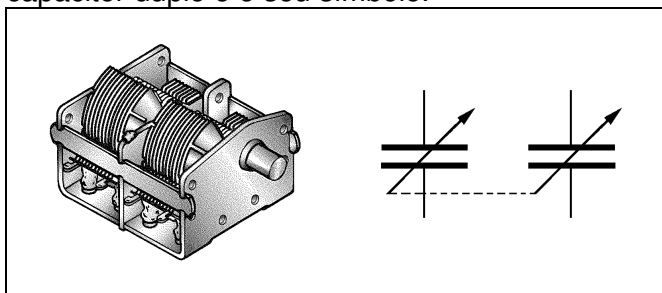


Capacitores variáveis

São utilizados em locais onde a capacitância é constantemente modificada. As figuras a seguir mostram um capacitor variável e o seu símbolo.



Encontram-se ainda capacitores variáveis múltiplos que se constituem de dois ou mais capacitores variáveis acionados pelo mesmo eixo. As figuras abaixo mostram um capacitor duplo e o seu símbolo.

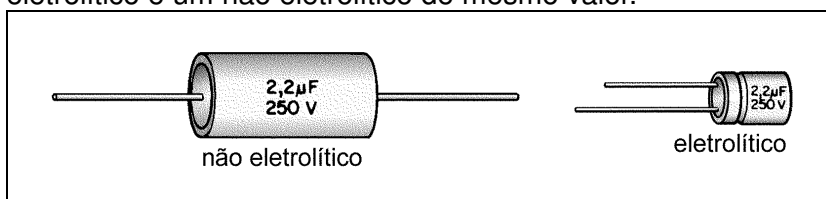


A linha pontilhada indica que os dois capacitores tem seu movimento controlados pelo mesmo eixo.

Capacitores eletrolíticos

Os capacitores eletrolíticos são capacitores fixos cujo processo de fabricação permite a obtenção de altos valores de capacitância com pequeno volume.

A figura a seguir permite uma comparação entre as dimensões de um capacitor eletrolítico e um não eletrolítico de mesmo valor.



O fator que diferencia os capacitores eletrolíticos dos demais capacitores fixos é o dielétrico.

Os capacitores fixos comuns o dielétrico é de papel, mica ou cerâmica.

O dielétrico dos capacitores eletrolíticos é um preparado químico chamado de eletrólito que oxida pela aplicação de tensão elétrica, isolando uma armadura da outra.

A utilização do eletrólito permite a redução da distância entre as armaduras a valores mínimos, o que possibilita a obtenção de maiores valores de capacitância (desde 1 μF até os valores maiores que 20000 μF).

O capacitor é selado em um invólucro de alumínio que isola as armaduras e o eletrólito da ação da umidade.

Desvantagens do capacitor eletrolítico

Os capacitores apresentam algumas desvantagens que são decorrentes do seu processo de fabricação:

- Polaridade
- Alteração de capacitância
- Tolerância

Polaridade

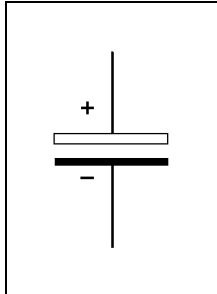
A utilização do dielétrico químico (eletrólito) nos capacitores eletrolíticos apresenta algumas desvantagens. A formação da camada de óxido entre as placas depende da aplicação de tensão nas armaduras, com polaridade correta.

A ligação de polaridades incorretas sobre as armaduras do capacitor provoca a destruição do eletrólito, permite a circulação de corrente entre as armaduras.

O capacitor sofre um processo de aquecimento que faz o eletrólito ferver, podendo inclusive provocar uma explosão do componente devido a formação de gases no seu interior.

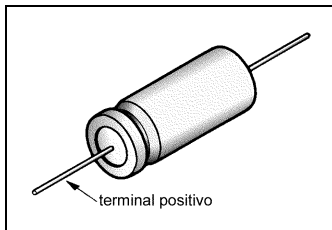
Os capacitores eletrolíticos polarizados são utilizados apenas em circuitos alimentados por corrente contínua. Nos circuitos de corrente alternada a troca de polaridade da tensão danifica o componente.

O símbolo dos capacitores eletrolíticos expressa a polaridade das armaduras

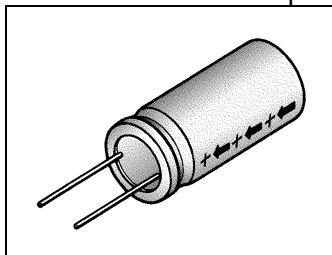


No componente a polaridade é expressa de duas formas:

- Por um chanfro na carcaça, que indica o terminal positivo



- Por sinais de + impressos no corpo



Alteração da capacitância

O capacitor eletrolítico sofre alteração de capacitância quando não está sendo utilizado. Esta alteração se deve ao fato de que a formação da camada de óxido entre as armaduras depende da aplicação de tensão no capacitor.

Quando o capacitor eletrolítico permanece durante um período sem utilização, o dielétrico sofre um processo de degeneração que afeta sensivelmente a sua capacitância.

Por esta razão, sempre que for necessário utilizar um capacitor que estava estocado durante algum tempo, deve-se conectá-lo a uma fonte de tensão contínua durante alguns minutos para permitir a reconstituição do dielétrico antes de aplicá-lo no circuito.

Tolerância

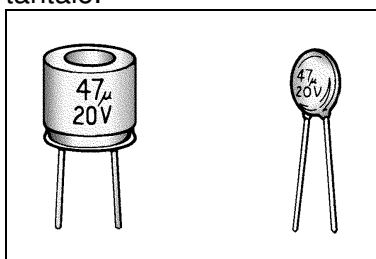
Os capacitores eletrolíticos estão sujeitos a uma tolerância elevada no valor real, com relação ao valor nominal. Esta tolerância pode atingir valores de 20 a 30% e até mesmo 50% em casos extremos.

Tipos de capacitores eletrolíticos

Existem dois tipos de capacitores eletrolíticos, que estão relacionados com o tipo de dielétrico empregado:

- Capacitores eletrolítico de óxido de alumínio.
- Capacitor eletrolítico de óxido de tântalo.

As figuras a seguir mostram um capacitor eletrolítico de óxido de alumínio e outro de tântalo.

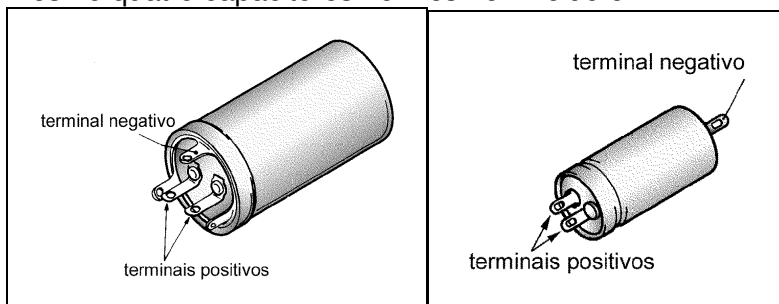


Os capacitores eletrolíticos de óxido de tântalo apresentam uma vantagem sobre os eletrolíticos de óxido de alumínio:

- A capacitância dos capacitores de óxido de tântalo sofre menor variação com o passar do tempo.

Capacitores eletrolíticos múltiplos

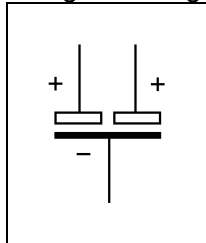
Existem ainda os capacitores eletrolíticos múltiplos, que consistem em dois, três ou até mesmo quatro capacitores no mesmo invólucro.



Em geral nestes capacitores o invólucro externo ou carcaça é comum a todos os capacitores.

Capacitores eletrolíticos como os da figura acima, são muito usados em fontes de alimentação.

Os capacitores eletrolíticos múltiplos podem ser representados pelo símbolo mostrado na figura a seguir.



Especificação técnica dos capacitores

Os capacitores são especificados tecnicamente por:

- Tipo;
- Capacitância;
- Tensão de trabalho.

Exemplos:

Capacitor de poliéster, 0,47 μ F 600V

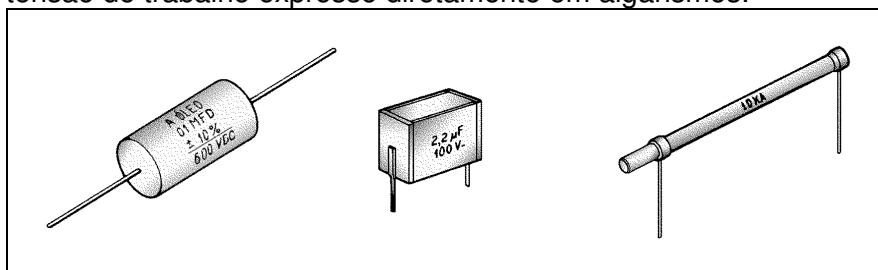
Capacitor eletrolítico 2200 μ F 63V

Apresentação das características nos capacitores

A capacitância e a tensão de trabalho dos capacitores é expressa no corpo do componente de duas formas:

- Diretamente em algarismos
- Através de um código de cores

A figura a seguir apresenta alguns capacitores com os valores de capacitância e a tensão de trabalho expresso diretamente em algarismos.



Os valores são apresentados normalmente em microfarads(μ F) ou picofarads(pF).

Observação

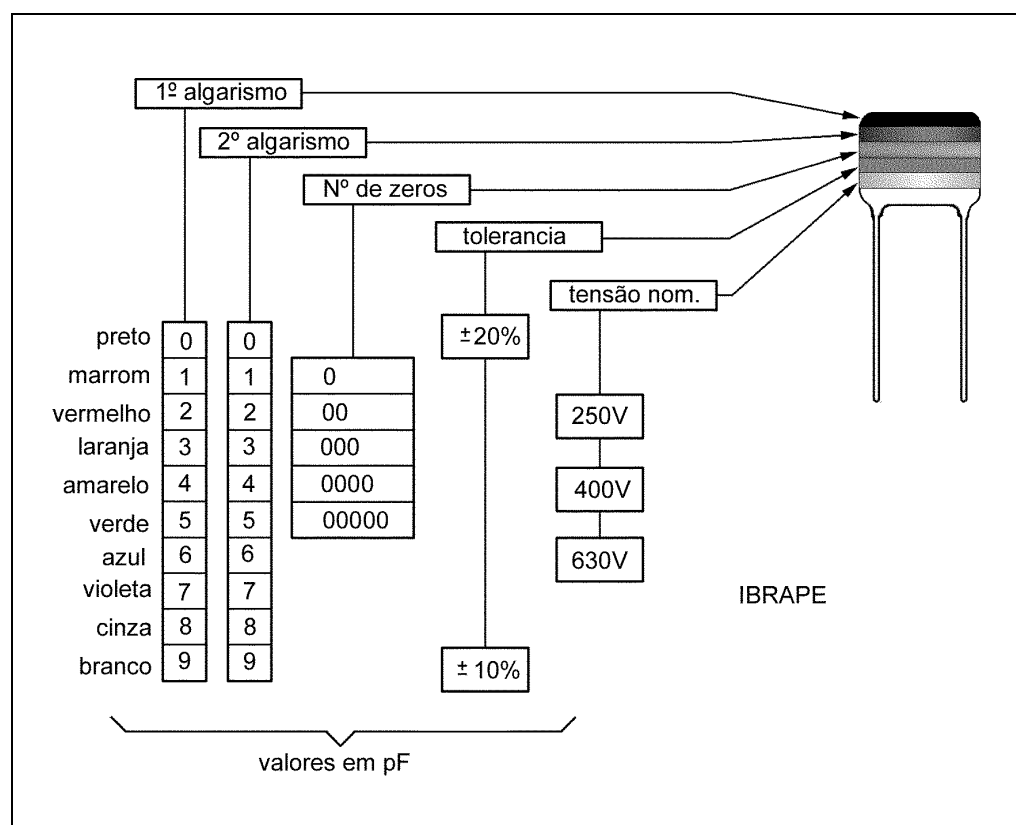
Quando os capacitores são menores que $1\mu\text{F}$ (Exemplos: $0,1\mu\text{F}$; $0,0047\mu\text{F}$; $0,012\mu\text{F}$) o zero que precede a vírgula não é impresso no corpo do componente. Aparece diretamente um ponto, que representa a vírgula.

Exemplos:

Valor do capacitor	Valor impresso no corpo
$0,1\mu\text{F}$	$.1\mu\text{F}$
$0,047\mu\text{F}$	$.047\mu\text{F}$
$0,012\mu\text{F}$	$.012\mu\text{F}$
$0,68\mu\text{F}$	$.68\mu\text{F}$

Código de cores para capacitores

A figura a seguir mostra o código de cores para capacitores e a ordem de interpretação dos algarismos.



Observação

O valor de capacitância expresso pelo código de cores é dado em picofarads(pF).

Exemplos

Amarelo - Violeta - Laranja - Branco - Azul
 47000 pF $\pm 10\%$ 630V 47nF

Laranja - Branco - Amarelo - Branco - Vermelho
 390000 pF $\pm 10\%$ 250V $0,39\mu\text{F}$

Capacitância

A capacidade de um capacitor de armazenar cargas é denominada de capacitância.

A capacitância em um capacitor depende de alguns fatores:

- **Da área das armaduras:**

Quanto maior a área das armaduras, maior a capacidade de armazenamento de um capacitor.

- **Da espessura do dielétrico:**

Quanto mais fino o dielétrico, mais próximas estão as armaduras. O campo elétrico formado entre as armaduras é maior e a capacidade de armazenamento também.

- **Da natureza do dielétrico:**

Quanto maior a capacidade de isolamento do dielétrico, maior a capacidade de armazenamento do capacitor.

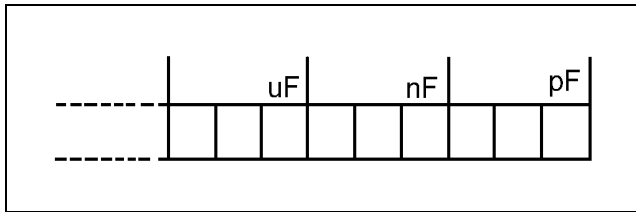
Maior capacitância = Maior capacidade de armazenamento de cargas.

A unidade de medida de capacitância é o FARAD representado pela letra “F”, entretanto, a unidade FARAD é extremamente grande, o que leva ao uso de submúltiplos dessa unidade.

A tabela a seguir apresenta os símbolos representativos de cada submúltiplo e o seu valor com relação a unidade.

Submúltiplo	Símbolo representativo do submúltiplo	Valor com relação ao FARAD
Microfarad	μF	$1 \cdot 10^{-6}$ FARAD 0,000001F
Nanofarad ⁴⁴	NF	$1 \cdot 10^{-9}$ FARAD 0,000000001F
Picofarad	PF	$10 \cdot 10^{-12}$ FARAD 0,000000000001F

A conversão de valores entre as subunidades é feita da mesma forma que as outras grandezas.



Exemplos de conversão:

$$1\mu\text{F} = 1000\text{nF}$$

$$820\text{nF} = 0,82\mu\text{F}$$

$$22\text{nF} = 22000\text{pF}$$

$$1200\text{pF} = 1,2\text{nF}$$

$$68\text{nF} = 0,068\mu\text{F}$$

$$47000\text{pF} = 47\text{nF}$$

$$150\text{pF} = 0,15\text{nF}$$

$$47000\text{pF} = 0,047\mu\text{F}$$

A capacitância é um dos fatores elétricos que identifica um capacitor.

Tensão de trabalho

Além da capacitância os capacitores tem ainda outra característica elétrica importante: a tensão de trabalho

A tensão de trabalho é a tensão máxima que o capacitor pode suportar entre as suas armaduras.

A aplicação de uma tensão no capacitor superior a sua tensão de trabalho máxima, pode provocar o rompimento do dielétrico fazendo com que o capacitor entre em curto, perdendo as suas características.

Na maioria dos capacitores o rompimento do dielétrico danifica permanentemente o componente.

Deve-se tomar o cuidado de utilizar sempre capacitores com tensão de trabalho superior ao valor que o componente irá trabalhar realmente.

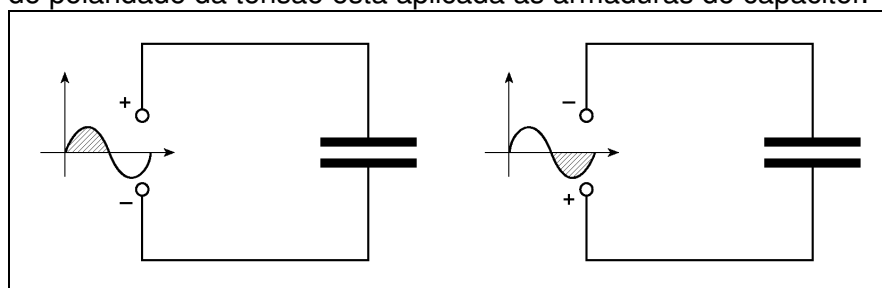
Capacitores em CA

Os capacitores despolarizados podem funcionar em corrente alternada, devido ao fato de que cada uma das suas armaduras pode receber tanto potencial positivo como negativo.

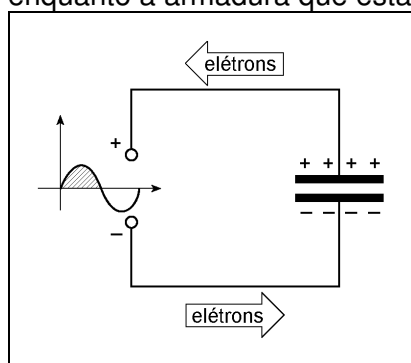
Os capacitores polarizados não podem ser conectados a CA porque a troca de polaridade provoca danos ao componente.

Funcionamento do capacitor em CA

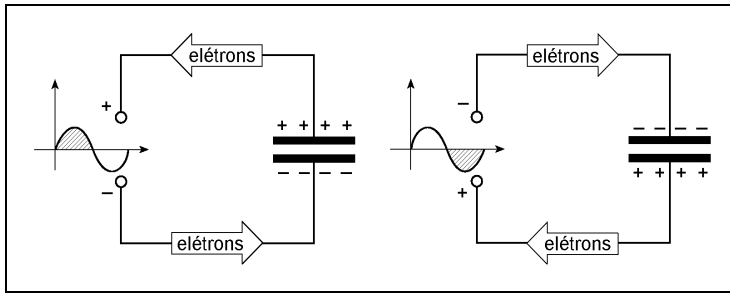
Quando um capacitor é conectado a uma fonte de corrente alternada a troca sucessiva de polaridade da tensão está aplicada às armaduras do capacitor.



A cada semiciclo, a armadura que recebe potencial positivo entrega elétrons a fonte, enquanto a armadura que está ligada ao potencial negativo recebe elétrons.



Com a troca sucessiva de polaridade, uma mesma armadura durante um semi ciclo recebe elétrons da fonte e no outro devolve elétrons para a fonte.



Existe, portanto, um movimento de elétrons ora entrando, ora saindo da armadura. Isso significa que circula uma corrente alternada no circuito, embora as cargas elétricas não passem de uma armadura do capacitor para a outra através do dielétrico. Um capacitor ligado a uma fonte CA permite a circulação da corrente no circuito.

Reatância capacitiva

Os processos de carga e descarga sucessivas de um capacitor ligado em CA dá origem a uma resistência a passagem de corrente no circuito. Esta “resistência” é denominada de **reatância capacitiva**.

Reatância capacitiva é a oposição que um capacitor apresenta a circulação de corrente em circuitos de CA.

A Reatância capacitiva é representada pela notação **X_c** e é expressa em **Ohms (Ω)**.

A reatância capacitiva X_c é expressa pela equação:

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

Onde:

X_c = Reatância capacitiva em Ω

2π = Constante (6,28)

f = Frequência da corrente alternada em Hz

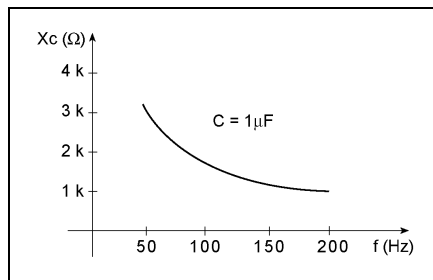
C = Capacitância do capacitor em F

Fatores que influenciam na reatância capacitiva

Verifica-se através da equação que:

A reatância capacitiva de um capacitor depende apenas da sua capacitância e da frequência da rede CA.

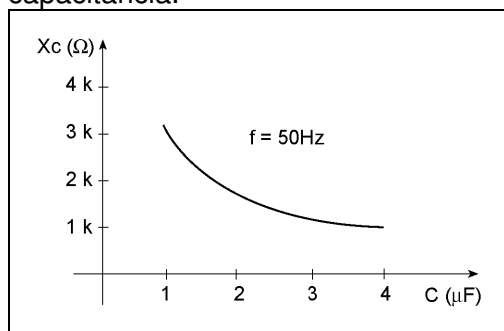
O gráfico a seguir mostra o comportamento da reatância capacitiva com a variação da frequência da CA



Pelo gráfico se verifica que a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência.

$$f \uparrow \quad X_C \downarrow$$

No gráfico abaixo têm-se o comportamento da reatância capacitiva com a variação da capacitância.



Se observa que a reatância capacitiva diminui com o aumento da capacitância.

$$C \uparrow \quad X_C \downarrow$$

Na equação da reatância não aparece o valor da tensão. Isto significa que a reatância capacitiva é independente do valor de tensão CA aplicada ao capacitor.

Portanto:

A reatância capacitiva não depende do valor de tensão CA aplicado aos terminais do capacitor.

A tensão aplicada ao capacitor irá influenciar apenas na corrente circulante no circuito.

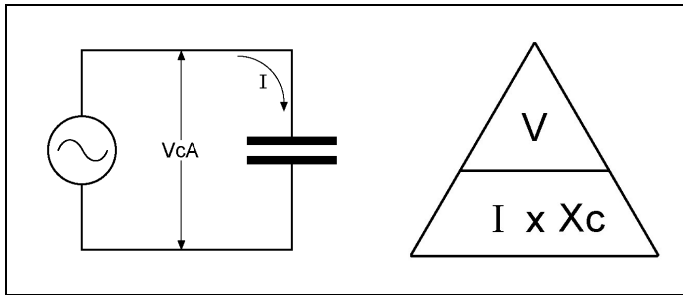
Relação entre tensão CA, corrente CA e reatância capacitiva

Quando um capacitor é conectado a uma fonte de CA se estabelece um circuito elétrico. Neste circuito estão em jogo três valores:

- Tensão aplicada
- Reatância capacitiva
- Corrente circulante

Estes três valores estão relacionados entre si nos circuitos de CA da mesma forma que nos circuitos de CC:

Através da Lei de Ohm.



Onde:

V_C = Tensão no capacitor em V

I = Corrente no circuito (eficaz) em A

X_C = Reatância capacitiva e Ω

Exemplo

Um capacitor de $1\mu F$ é conectado a uma rede CA 220V 60Hz. Qual é a corrente circulante no circuito?

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{10^6}{6,28 \cdot 60 \cdot 1} \quad \mathbf{X_C = 2653\Omega}$$

$$I = \frac{V_C}{X_C} = \frac{220V}{2653\Omega} = 0,0829A$$

$$\mathbf{I = 82,9mA}$$

Deve-se lembrar que os valores de V e I são eficazes, ou seja, são valores que serão indicados por um voltímetro e um milíamperímetro de CA conectados ao circuito.

Toda vez que se refere a tensão ou corrente em CA estes valores são eficazes, a menos que se especifique de forma diferente (V_p , V_{pp} ou I_p , I_{pp}).

Determinação experimental da capacitância de um capacitor

Quando a capacitância de um capacitor despolarizado é desconhecida, é possível determiná-la por um processo experimental.

Aplica-se o capacitor a uma fonte CA com tensão e frequência conhecidos e determina-se a corrente com um amperímetro de CA.

O valor de tensão de pico da CA aplicada deve ser inferior a tensão de trabalho do capacitor.

Conhecendo-se os valores da tensão e corrente no circuito determina-se a reatância capacitiva do capacitor:

Magnetismo e Eletromagnetismo

Magnetismo

O magnetismo é a propriedade que certos materiais possuem que faz com que estes materiais exerçam uma atração sobre materiais ferrosos.

As propriedades dos corpos magnéticos são grandemente utilizadas em eletricidade (motores, geradores) e eletrônica (instrumentos de medida, transmissão de sinais, etc.).

Magnetismo natural - ímãs

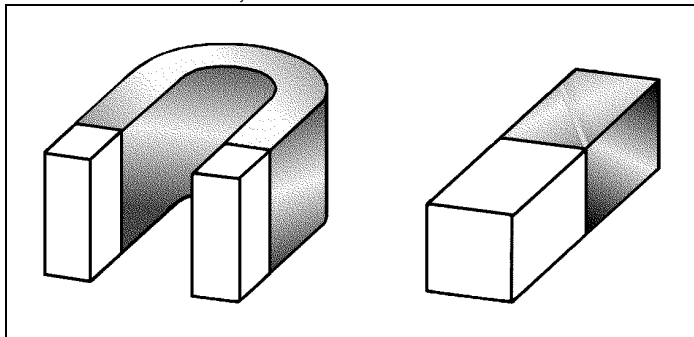
Alguns materiais encontrados na natureza apresentam propriedades magnéticas naturais. Estes materiais são denominados de **ímãs naturais**.

A magnetita é um minério de ferro que é naturalmente magnético, ou seja, é um ímã natural.

Ímãs artificiais

Os ímãs artificiais são barras de materiais ferrosos que o homem magnetiza por processos artificiais.

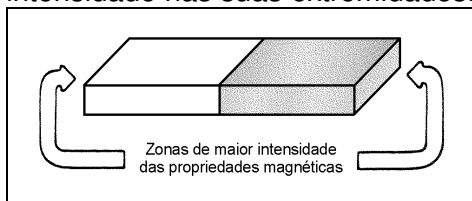
Os ímãs artificiais são muito empregados porque podem ser fabricados com os mais diversos formatos, de forma a atender as necessidades práticas.



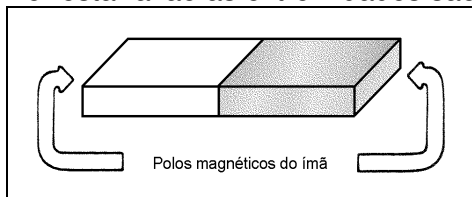
Os ímãs artificiais em geral tem propriedades magnéticas mais intensas que os naturais.

Pólos magnéticos de um ímã

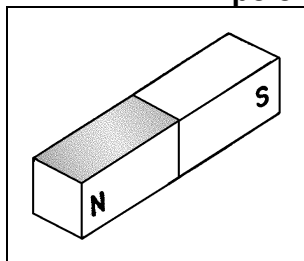
Externamente as forças de atrações magnéticas de um ímã se manifestam com maior intensidade nas suas extremidades.



Por esta razão as extremidades são denominadas de **pólos magnéticos do ímã**.



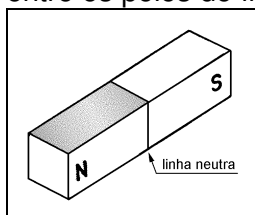
Cada um dos pólos apresenta propriedades magnéticas específicas, sendo denominados de **pólo sul** e **pólo norte**.



Uma vez que as forças de atração magnéticas dos ímãs são mais concentradas nos pólos, se conclui que a intensidade destas propriedades decresce para o centro do ímã.

Na região central do ímã se estabelece uma linha onde as forças de atração magnéticas do pólo sul e do pólo norte são iguais e se anulam.

Esta linha é denominada de **linha neutra**. A linha neutra é portanto, a linha divisória entre os pólos do ímã.

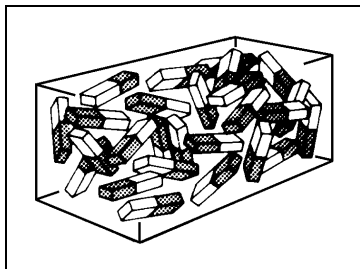


Origem do magnetismo

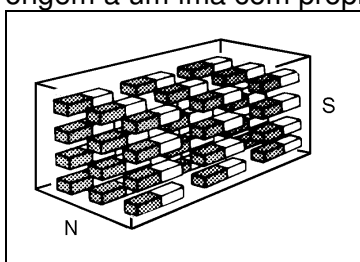
O magnetismo tem a sua origem na organização atômica dos materiais.

Cada molécula de um material é um pequeno ímã natural, denominado de ímã molecular ou domínio.

Quando durante a formação de um material as moléculas se orientam em sentidos diversos, os efeitos magnéticos dos ímãs moleculares se anulam no todo do material, resultando em um material sem magnetismo natural.



Se durante a formação do material as moléculas assumirem uma orientação única (ou predominante) os efeitos magnéticos de cada ímã molecular se somam dando a origem a um ímã com propriedades magnéticas naturais.



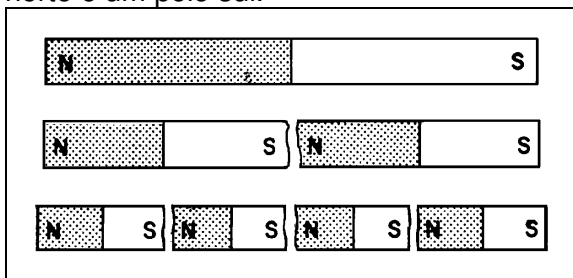
Observação

Na fabricação de ímãs artificiais as moléculas de um material (desordenadas) sofrem um processo de orientação a partir das forças externas.

Inseparabilidade dos pólos

Os ímãs tem uma propriedade característica:

Por mais que se divida um ímã em partes menores, as partes sempre terão um pólo norte e um pólo sul.

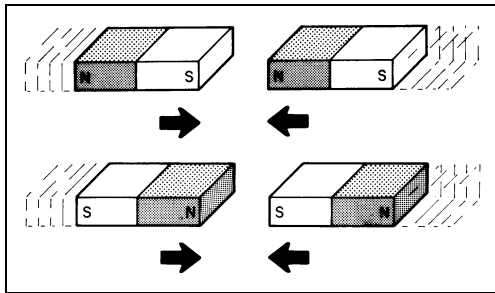


Esta propriedade é denominada de **inseparabilidade dos pólos**, que torna impossível isolar um pólo norte ou pólo sul

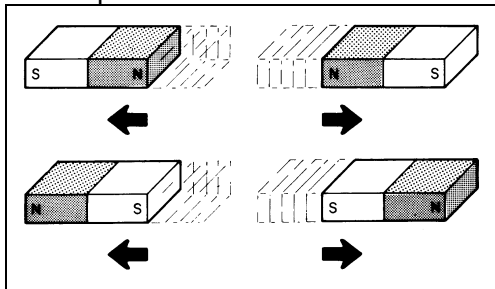
Interação entre ímãs

Quando os pólos magnéticos de dois ímãs estão próximos as forças magnéticas dos dois ímãs reagem entre si de forma singular.

Se os dois pólos magnéticos próximos forem diferentes (norte de um com sul de outro) há uma atração entre os dois ímãs.



Se os dois pólos próximos forem iguais (norte de um próximo ao norte do outro) há uma repulsão entre os dois ímãs.



Pode-se resumir a interação entre dois ímãs em duas regras:

- Pólos magnéticos iguais se repelem
- Pólos magnéticos diferentes se atraem

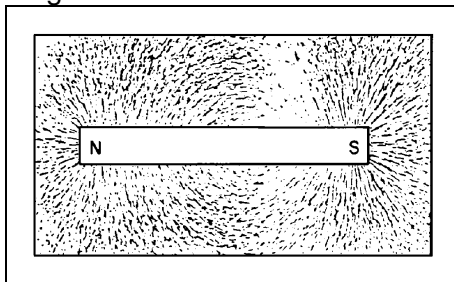
Campo magnético - Linhas de força

Os efeitos de atração ou repulsão entre dois ímãs ou de atração de um ímã sobre os materiais ferrosos se devem a existência de um campo magnético que provém do ímã. O espaço ao redor do ímã em que existe atuação das forças magnéticas é denominado de **campo magnético**.

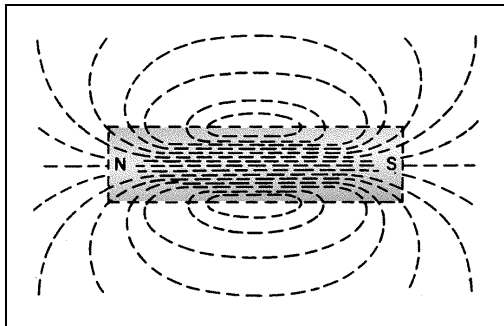
Como artifício para estudar este campo magnético se admite a existência de “linhas de força” magnéticas ao redor do ímã.

As linhas de força magnéticas de um ímã são invisíveis e somente podem ser visualizadas com o auxílio de um “recurso”.

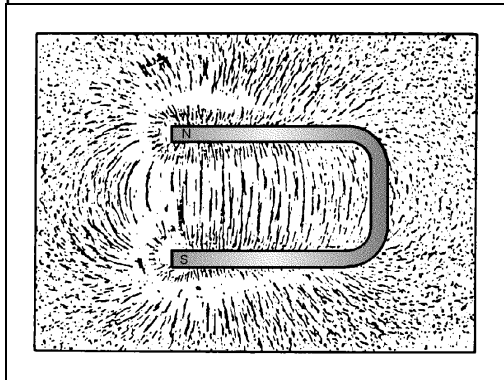
Colocando-se um ímã embaixo de uma lâmina de vidro e espalhando (borrifando) limalha de ferro sobre o vidro, as limalhas se orientam conforme as linhas de forma magnéticas.



O formato característico das limalhas sobre o vidro, denominado de espectro magnético, é apresentado na figura abaixo.

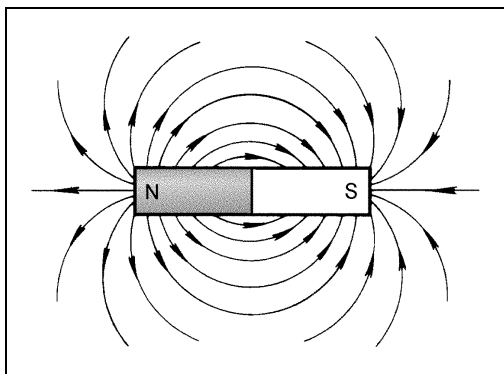


Esta experiência mostra também uma maior concentração de limalhas na região dos pólos do ímã devido a maior intensidade de magnetismo nas regiões polares.



Orientação das linhas de força

Com o objetivo de padronizar os estudos relativos ao magnetismo e as linhas de força se estabeleceu, como convenção, que as linhas de força de um campo magnético e dirigem do pólo norte em direção ao pólo sul.



Eletromagnetismo

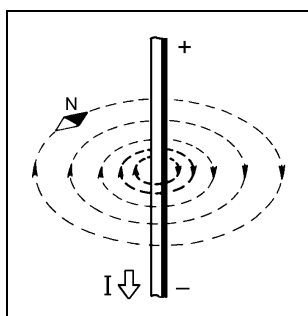
A denominação “eletromagnetismo” se aplica a todo o **fenômeno magnético que tenha origem em uma corrente elétrica**.

Campo magnético em um condutor

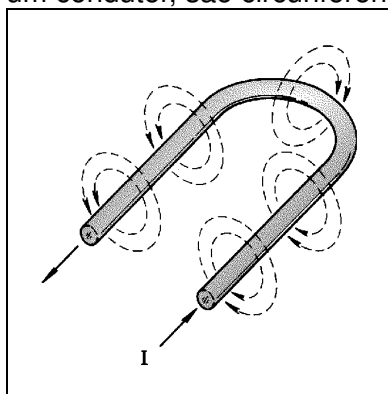
Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica ocorre uma orientação no movimento das partículas no seu interior.

Esta orientação do movimento das partículas tem efeito semelhante a orientação dos ímãs moleculares.

Como consequência desta orientação se verifica o surgimento de um campo magnético ao redor do condutor.



As linhas de força deste campo magnético, criado pela corrente elétrica que passa por um condutor, são circunferências concêntricas num plano perpendicular ao condutor.

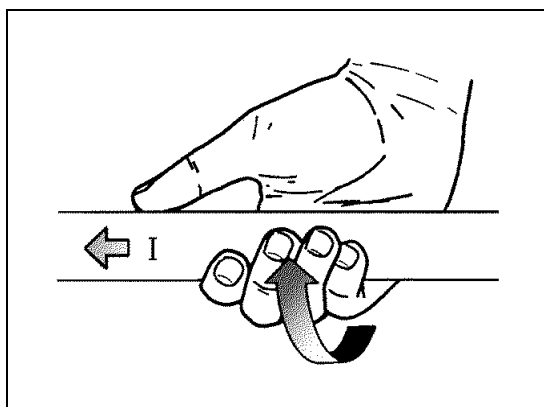


O sentido de deslocamento das linhas de força é dado pela **regra da mão direita**, para o **sentido convencional da corrente elétrica**.

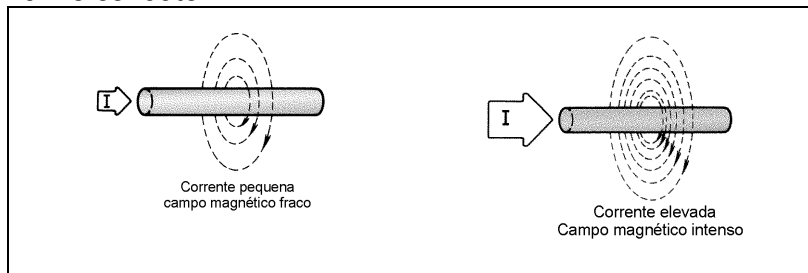
Regra da mão direita

Envolvendo o condutor com os quatro dedos da mão direita de forma que o dedo polegar indique o sentido da corrente (convencional).

O sentido das linhas de força será o mesmo dos dedos que envolvem o condutor.

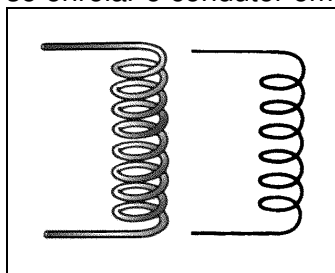


A intensidade do campo magnético ao redor depende da intensidade da corrente que flui no condutor.



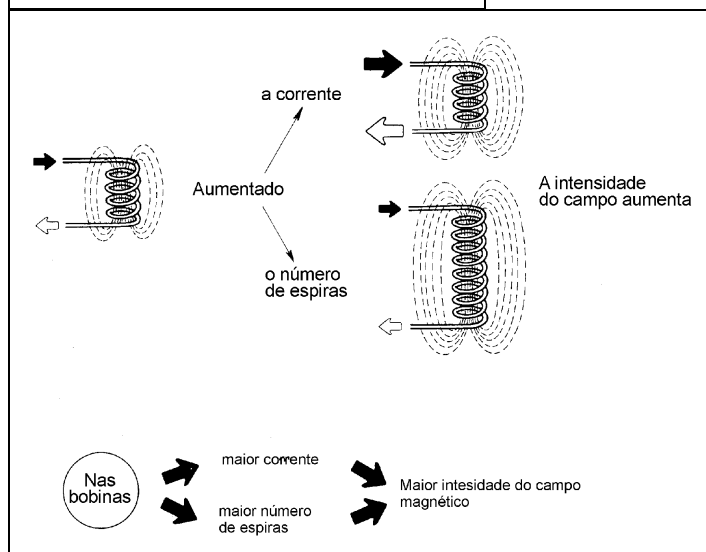
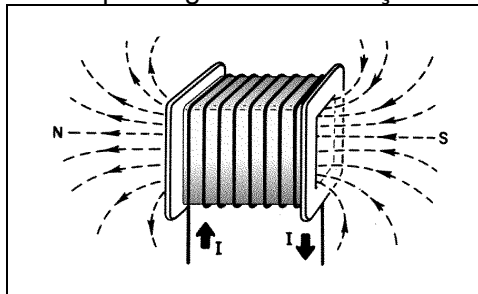
Campo magnético em uma bobina

Para obter campos magnéticos de maior intensidade a partir da corrente elétrica, usa-se enrolar o condutor em forma de espiras, constituindo uma bobina.



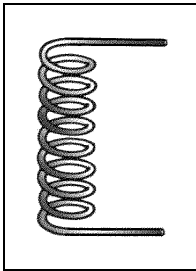
Bobina e seu respectivo símbolo

A figura abaixo mostra uma bobina constituída por várias espiras, ilustrando o efeito resultante da soma dos efeitos individuais. A segunda figura mostra o comportamento do campo magnético em função da corrente e número de espiras da bobina.



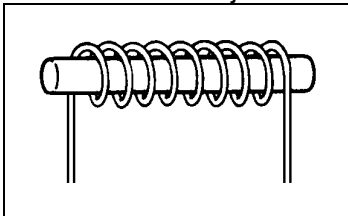
Bobinas com núcleo

O núcleo é a parte central das bobinas. Quando nenhum material é colocado no interior da bobina, diz-se que o núcleo é de ar.

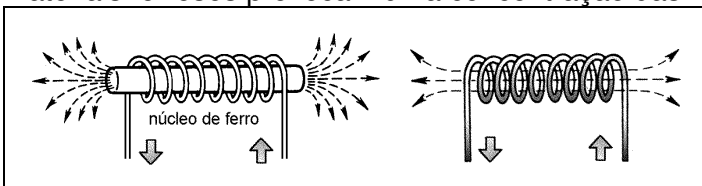


Para obter uma maior intensidade de campo magnético a partir de uma mesma bobina pode-se utilizar o recurso de colocar um material ferroso (ferro, aço, etc.) no interior da bobina.

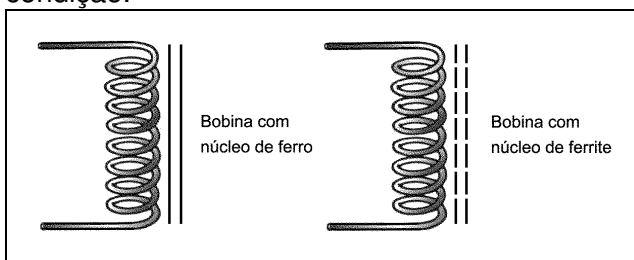
Neste caso o conjunto bobina-núcleo de ferro recebe a denominação de **eletroímã**



A maior intensidade do campo magnético nos eletroímãs se deve ao fato de que os materiais ferrosos provocam uma concentração das linhas de força.



Quando uma bobina tem um núcleo de material ferroso seu símbolo expressa esta condição.

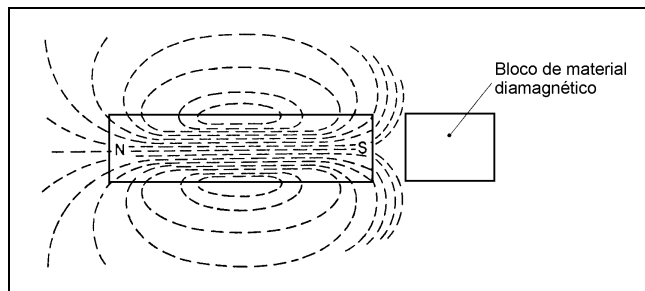


A capacidade de um material de concentrar as linhas de força é denominada de **permeabilidade magnética**.

A permeabilidade magnética é representada pela letra grega μ (mi).

De acordo com a permeabilidade magnética os materiais podem ser classificados como:

- **Diamagnéticos** - permeabilidade pequena (menor que 1) e negativa.
Os materiais diamagnéticos promovem uma dispersão do campo magnético.

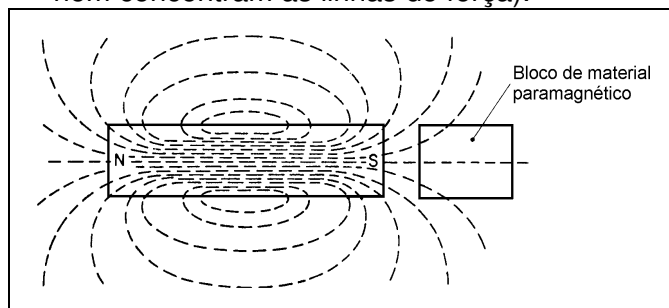


São exemplos de materiais diamagnéticos:

- Cobre
- Ouro

- **Paramagnéticos** - Permeabilidade em torno da unidade.

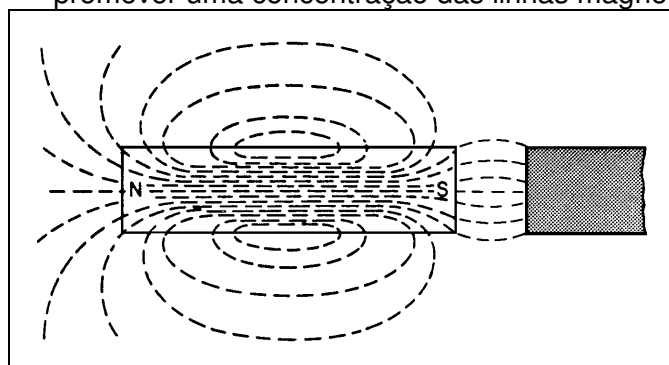
São materiais que praticamente não alteram o campo magnético (não dispersam nem concentram as linhas de força).



São exemplos de materiais paramagnéticos:

- Ar
- Alumínio

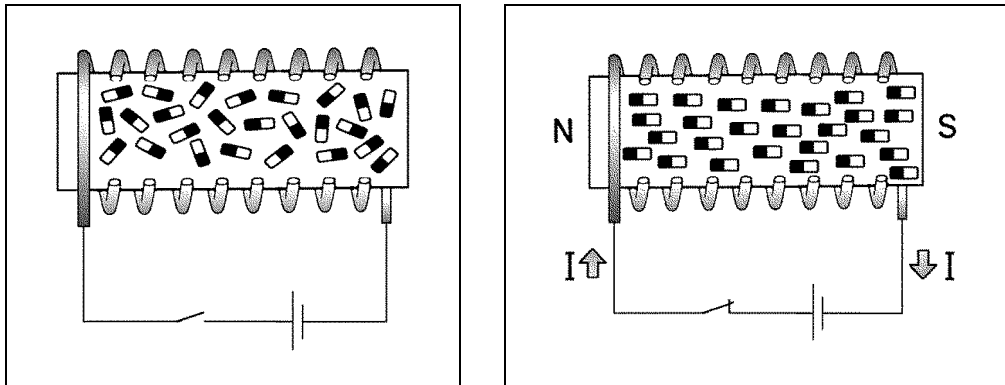
- **Ferromagnéticos** - são materiais com alta permeabilidade. Se caracterizam por promover uma concentração das linhas magnéticas.



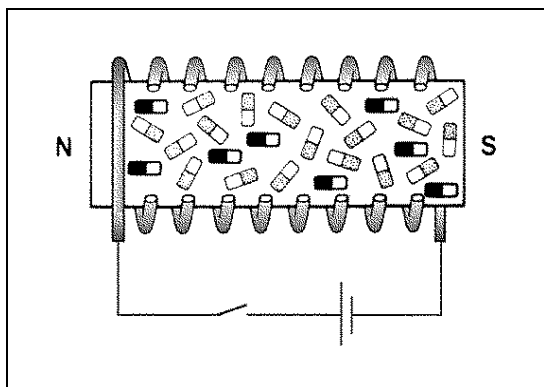
Os materiais ferromagnéticos são atraídos pelos campos magnéticos.

Magnetismo remanente

Quando se coloca um núcleo de ferro em uma bobina, na qual circula uma corrente elétrica, o núcleo se torna imantado, porque as suas moléculas se orientam conforme as linhas de força criadas pela bobina.



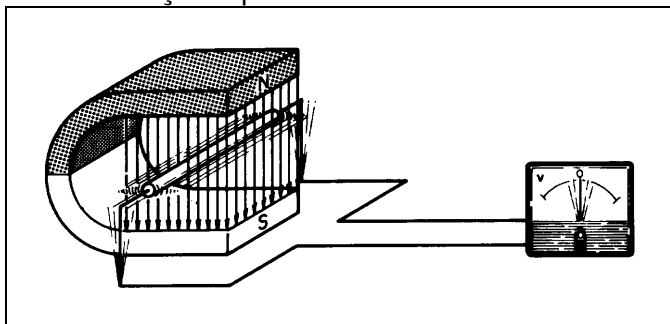
Cessada a passagem da corrente, alguns ímãs moleculares permanecem na posição de orientação anterior, fazendo com que o núcleo permaneça igualmente imantado.



Esta pequena imantação é denominada de **magnetismo remanente ou residual**. O magnetismo residual é importantíssimo, principalmente para os geradores de energia elétrica. Este tipo de ímã é denominado de **ímã temporário**.

Indução Auto Indução

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



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

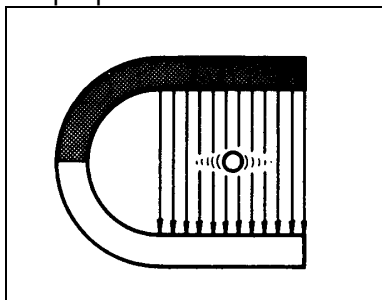
Foi o cientista inglês Michael Faraday, ao realizar estudos com o eletromagnetismo, que determinou as condições necessárias para que uma tensão seja induzida em um condutor.

As observações de Faraday podem ser resumidas em duas conclusões:

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

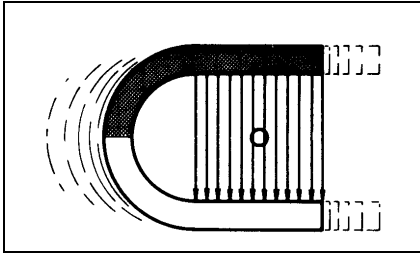
É importante notar que para ter um campo magnético variável no condutor pode-se:

1. Manter o campo magnético estacionário e movimentar o condutor perpendicularmente ao campo.



Movimento do condutor

2. Manter o condutor estacionário e movimentar o campo magnético.



Movimento do campo magnético

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

Isto significa:

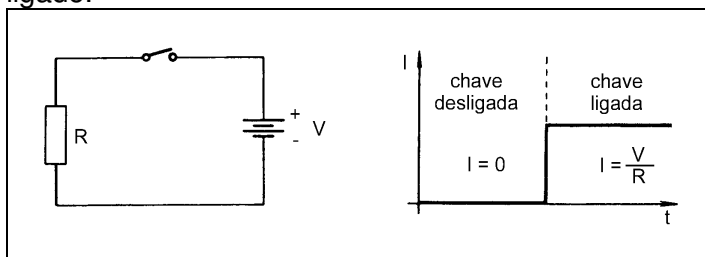
- Campo mais intenso
- Maior tensão induzida;
- Variação do campo mais rápida
- Maior tensão induzida.

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

Auto-indução

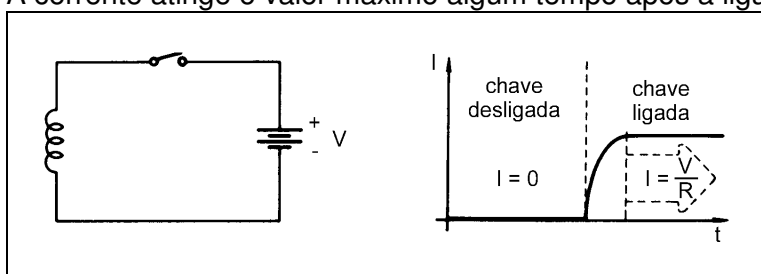
O fenômeno de indução faz com que o comportamento das bobinas em um circuito de CC seja diferente do comportamento dos resistores em um circuito de CA.

Em um circuito formado por uma fonte de CC, um resistor e uma chave a corrente atinge o seu valor máximo instantaneamente, no momento em que o interruptor é ligado.



Se neste mesmo circuito o resistor for substituído por uma bobina o comportamento será diferente.

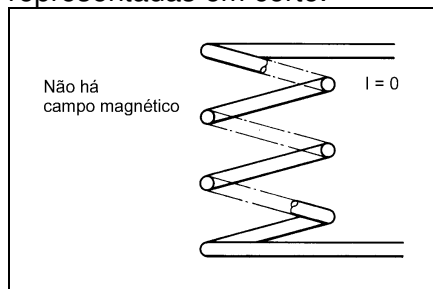
A corrente atinge o valor máximo algum tempo após a ligação do interruptor.



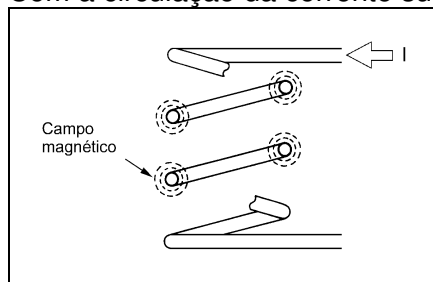
Este atraso para atingir a corrente máxima se deve a indução e pode ser melhor compreendido imaginando o comportamento do circuito passo a passo.

Supondo-se o circuito composto por uma bobina, uma fonte de CC e uma chave. Enquanto a chave está desligada não há campo magnético ao redor das espiras porque não há corrente circulante.

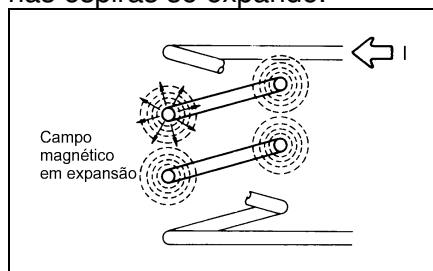
A figura a seguir mostra apenas a bobina em destaque, com algumas espiras representadas em corte.



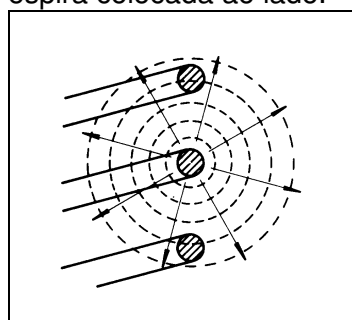
No momento em que a chave é fechada inicia-se a circulação de corrente na bobina. Com a circulação da corrente surge o campo magnético ao redor de suas espiras.



Na medida em que a corrente cresce em direção ao valor máximo o campo magnético nas espiras se expande.



Ao se expandir o campo magnético em movimento gerado em uma espira corta a espira colocada ao lado.



Conforme Faraday enunciou induz-se nesta espira cortada pelo campo em movimento uma determinada tensão.

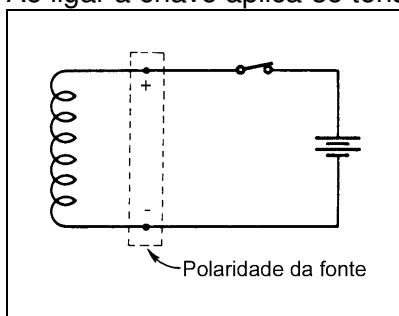
Cada espira da bobina induz nas espiras vizinhas uma tensão elétrica.

O que significa é que a aplicação de tensão em uma bobina provoca o aparecimento de um campo magnético em expansão que gera na própria bobina uma tensão induzida. Este fenômeno que consiste em uma bobina induzir sobre si mesma uma tensão é denominado de **auto-indução**.

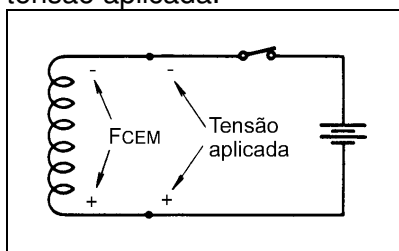
A tensão gerada na bobina por auto-indução tem uma característica importante: tem **polaridade oposta** a tensão que é aplicada aos seus terminais, razão pela qual é denominada de **força contra eletromotriz (F_{CEM})**.

Voltando ao circuito:

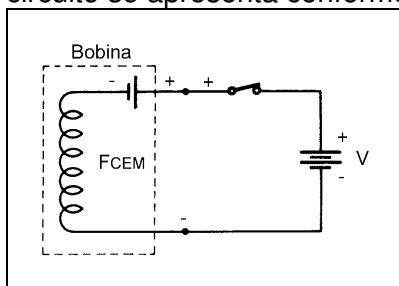
Ao ligar a chave aplica-se tensão, com uma determinada polaridade à bobina.



A auto-indução gera, na bobina uma tensão induzida (F_{CEM}) de polaridade oposta a da tensão aplicada.



Representando F_{CEM} como uma “bateria” existente no interior da própria bobina o circuito se apresenta conforme mostrado na figura abaixo.



Como a F_{CEM} atua contra a tensão da fonte, a tensão aplicada a bobina é, na realidade:

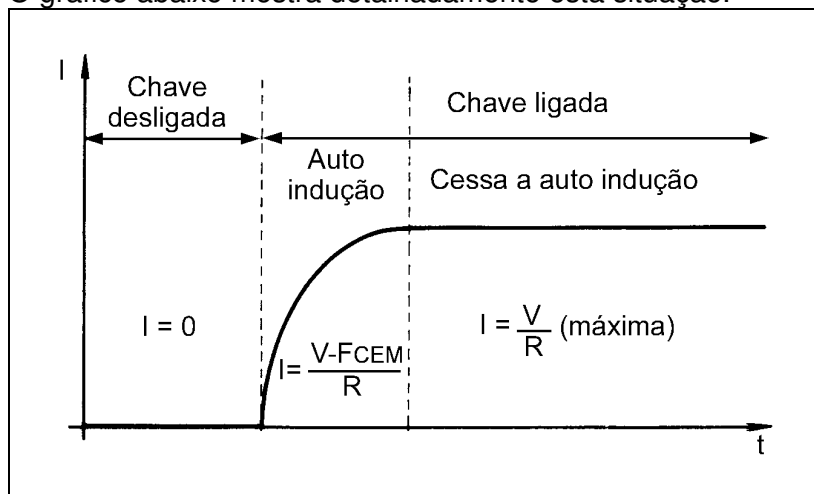
$$V_{\text{resultante}} = V_{\text{fonte}} - F_{CEM}$$

A corrente no circuito é causada por esta tensão resultante:

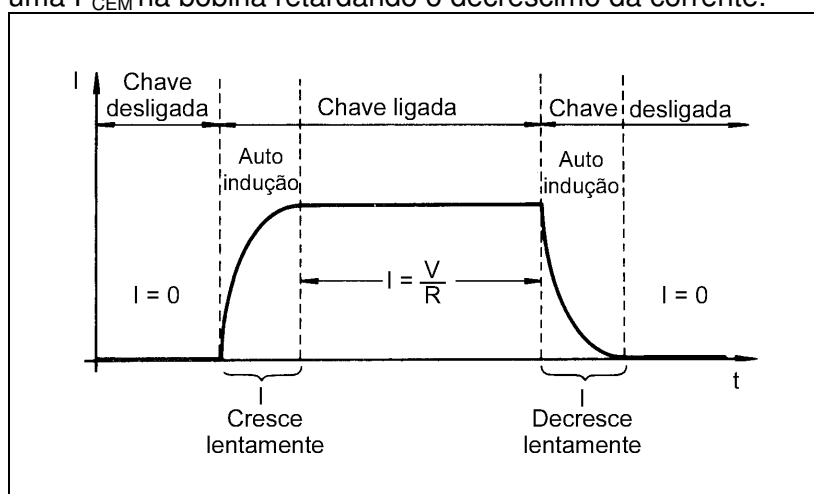
$$I = \frac{(V - F_{CEM})}{R} \leftarrow \text{tensão resultante}$$

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

O gráfico abaixo mostra detalhadamente esta situação.



O mesmo fenômeno ocorre quando a chave é desligada. A contração do campo induz uma F_{CEM} na bobina retardando o decréscimo da corrente.



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

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

A unidade de medida da indutância é o Henry, representado pela letra H.

Capacidade de se opor as variações de corrente \rightarrow Indutância (L) \rightarrow Medida em Henrys (H)

A unidade de medida de indutância **Henry** tem submúltiplos muito utilizados em eletrônica. A tabela abaixo mostra a relação entre os submúltiplos e a unidade.

Sub Unidade	Valor com relação ao Henry
miliHenry (mH)	10^{-3}H ou 0,001H
microHenry (µH)	10^{-6}H ou 0,000001H

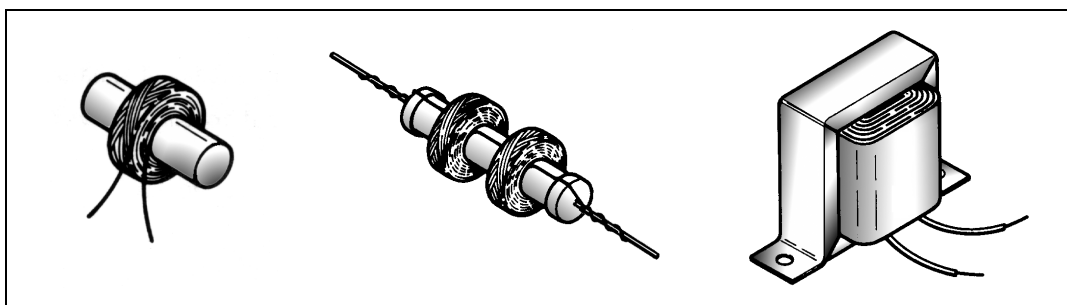
A indutância de uma bobina depende de diversos fatores:

- Do núcleo {
 - material
 - seção
 - formato
- Do número de espiras
- Do espaçamento entre as espiras
- Do condutor {
 - tipo
 - seção

Em função de apresentar uma indutância as bobinas são também denominadas de indutores.

Os indutores podem ter as mais diversas formas, podendo inclusive serem parecidos com um transformador.

A figura a seguir mostra alguns tipos característicos de indutores.



Indutores em CA

Quando se aplica um indutor em um circuito de CC a sua indutância se manifesta apenas nos momentos em que existe variação de corrente.

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

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

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

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

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

onde:

X_L = reatância indutiva em Ω

2π = é constante (6,28)

f = frequência da corrente alternada

L = indutância do indutor em Henrys

Por exemplo:

A reatância de um indutor de 600mH aplicado a uma rede de CA de 60Hz é:

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

$$X_L = 6,28 \cdot 60 \cdot 0,6$$

$$X_L = 226,08 \Omega$$

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

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

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

onde:

I_L = corrente eficaz no indutor em A

V = tensão eficaz em V

X_L = reatância indutiva em Ω

O indutor de 600mH aplicado a uma rede de CA 60Hz, 110V permitiria a circulação de uma corrente de:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L = 6,28 \cdot 60 \cdot 0,6 = 226,08 \Omega$$

$$I_L = \frac{V}{X_L} \quad I = \frac{110V}{226,08} = 0,486A$$

$I_L = 486mA$

Determinação experimental da indutância de um condutor

Quando se deseja utilizar um indutor e sua indutância é desconhecida, é possível determiná-la aproximadamente por processo experimental.

O valor encontrado não será exato porque é necessário considerar que o indutor é puro ($R = 0$).

Aplica-se ao indutor uma corrente alternada com frequência e tensão conhecidas.

Determina-se a corrente do circuito com um amperímetro de corrente alternada.

Conhecidos os valores de tensão e corrente do circuito, determina-se a reatância indutiva do indutor.

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

onde:

V = tensão do indutor

I_L = corrente do indutor

Aplica-se o valor encontrado na equação da reatância indutiva e determina-se a indutância:

$$X_L = 2\pi fL \quad \rightarrow \quad \text{isolando } L \quad L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

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

Circuitos resistivos reativos

Impedância

Quando se aplica um circuito composto apenas por resistores a uma fonte de CC ou CA a oposição total que este circuito apresenta à passagem da corrente é denominada de resistência total.

Entretanto, em circuitos de CA que apresentam resistências e reatâncias associadas, a expressão “resistência total” não é aplicada.

A oposição total que os circuitos compostos por resistências e reatâncias apresentam a passagem da corrente elétrica é denominada de **impedância**.

A impedância é representada pela letra Z e é expressa em ohms.

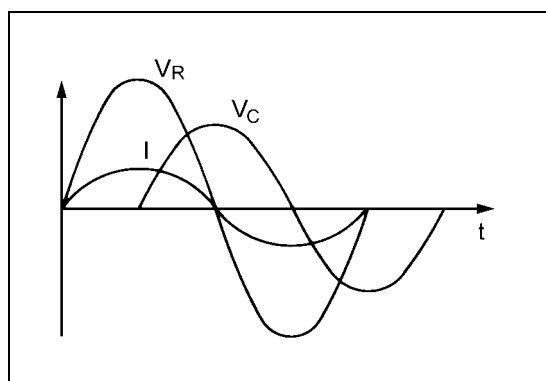
A impedância de um circuito não pode ser calculada da mesma forma que uma resistência total de um circuito composto apenas por resistores.

A existência de **componentes reativos**, que defasam correntes ou tensões, torna necessário o uso de formas particulares para o cálculo da impedância de cada tipo de circuito.

Circuito RC série em CA

O circuito RC série em CA é muito aplicado em equipamentos industriais como forma de obter tensões CA defasadas. Por esta razão este circuito é também denominado de rede de defasagem ou defasadores de tensão.

A figura abaixo mostra o gráfico senoidal de um circuito RC série.



Através do gráfico anterior, podemos notar que as tensões sobre o resistor e sobre o capacitor não estão em fase, ou seja, não surgem no mesmo espaço de tempo. Isso ocorre porque em um circuito série a corrente é a mesma em todos os componentes, sendo que, no resistor a tensão e a corrente sempre estão em fase (quando existe tensão, existe corrente) e no capacitor a corrente surge sempre 90° antes da tensão (isso é uma característica do componente).

O ângulo de defasagem entre as tensões no circuito série depende:

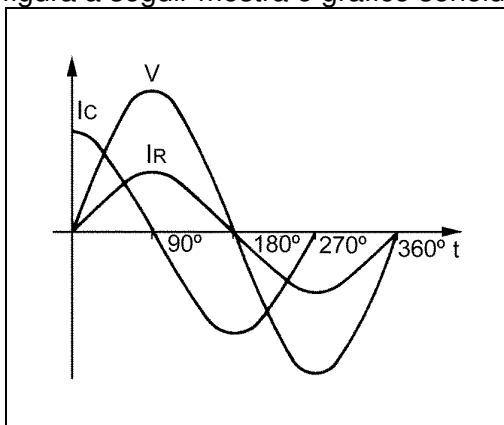
- Da frequência da CA;
- Da resistência do resistor;
- Da capacitância do capacitor.

Esta defasagem **não depende da tensão aplicada** ao circuito RC série.

Circuito RC paralelo em CA

Os circuitos RC paralelos se caracterizam por serem defasadores de corrente.

A figura a seguir mostra o gráfico senoidal de um circuito RC paralelo.

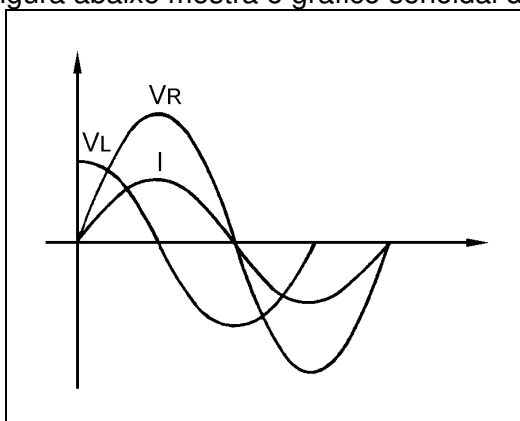


O ângulo de defasagem entre as correntes depende da frequência da CA e dos valores de resistência e capacitância do circuito e é independente da tensão aplicada.

Circuito RL série em CA

O circuito RL série em CA constitui uma rede de defasagem de tensões.

A figura abaixo mostra o gráfico senoidal do circuito RL série.



Através do gráfico anterior, podemos notar que as tensões sobre o resistor e sobre o indutor não estão em fase, ou seja, não surgem no mesmo espaço de tempo. Isso ocorre porque em um circuito série a corrente é a mesma em todos os componentes, sendo que, no resistor a tensão e a corrente sempre estão em fase (quando existe tensão, existe corrente) e no indutor a tensão surge sempre 90° antes da corrente (isso é uma característica do componente).

A defasagem entre as tensões depende:

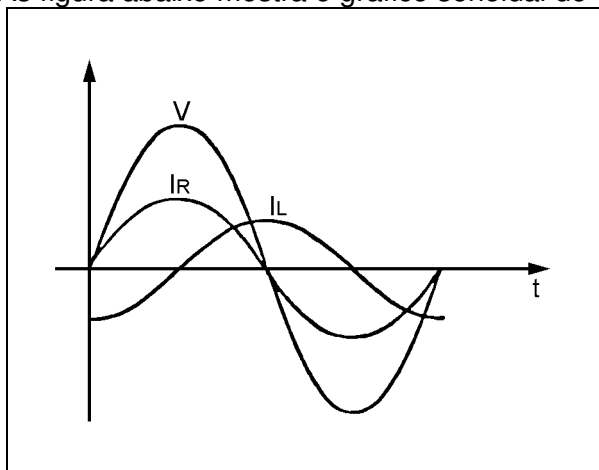
- Da resistência do resistor.
- Da capacitância do capacitor.
- Da frequência da CA aplicada.

A defasagem não depende da tensão aplicada à rede de CA.

Circuito RL paralelo em CA

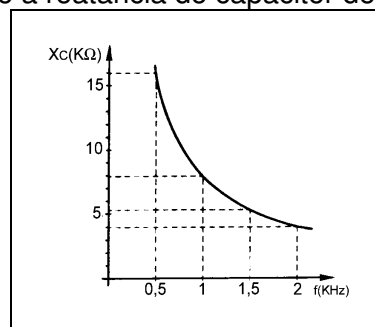
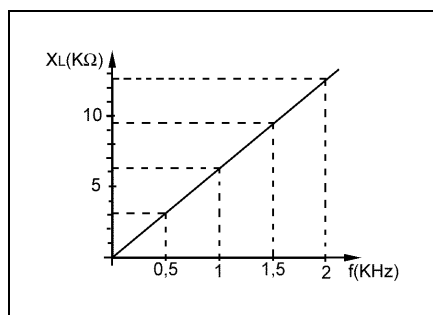
O circuito RL paralelo se caracteriza por ser defasador de correntes. A defasagem entre as correntes depende dos valores de resistência, indutância e frequência e é independente da tensão CA aplicada.

As figura abaixo mostra o gráfico senoidal do circuito RL paralelo em CA.

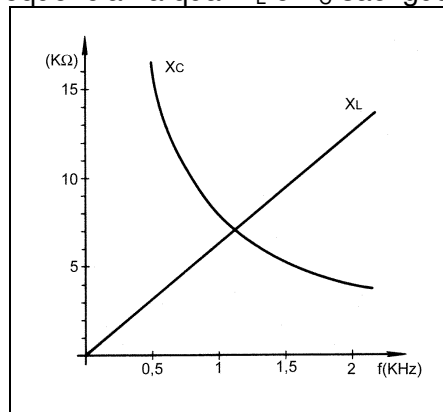


Frequência de ressonância

Analisando os gráficos abaixo, observa-se que a reatância de um indutor cresce linearmente com o aumento da frequência enquanto a reatância do capacitor decresce.



Sobrepondo os gráficos de reatância capacitiva e reatância indutiva, se verifica que existe uma determinada frequência na qual X_L e X_C são iguais.



Esta frequência onde $X_L = X_C$, é denominada de **frequência de ressonância**, representada pela notação Fr .

Qualquer circuito que contenha um capacitor e um indutor (em série ou em paralelo) tem uma frequência de ressonância.

A equação para determinar a frequência de ressonância de um circuito L_C pode ser deduzida a partir do fato de que $X_L = X_C$.

$$X_L = X_C$$

$$2\pi \cdot fR \cdot L = \frac{1}{2\pi \cdot fR \cdot C}$$

Desenvolvendo-se a proporção têm-se

$$\frac{2\pi \cdot fR \cdot L}{1} = \frac{1}{2\pi \cdot fR \cdot C} \quad \text{Isolando fr}$$

$$fr^2 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot L \cdot C} \quad Fr = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \cdot L \cdot C}}$$

Frequência de ressonância →

$$Fr = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

Onde:

fr = frequência de ressonância em Hertz

L = indutância em Henry

C = capacitância em Farad

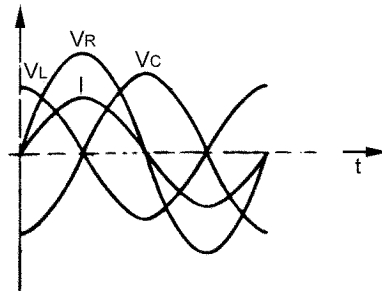
O circuito RLC série em CA

O circuito RLC é utilizado principalmente para a seleção de frequências.

A seleção de frequências baseia-se fundamentalmente na ressonância e na faixa de passagem do circuito RLC.

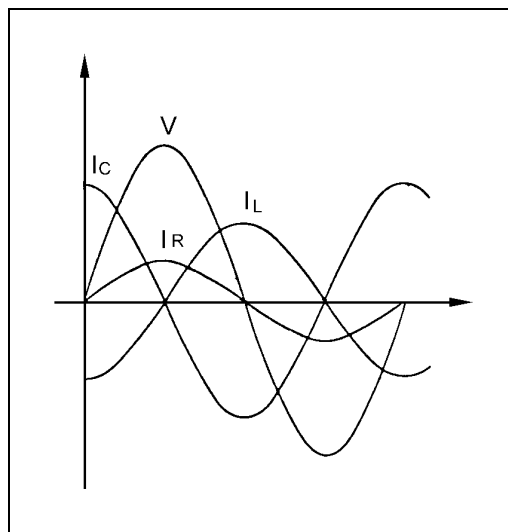
Para frequências dentro da faixa de passagem o circuito apresenta as menores impedâncias. A medida em que a frequência se afasta da faixa de passagem a impedância do circuito aumenta.

A figura abaixo mostra o gráfico senoidal do circuito RLC série em CA.



O circuito RLC paralelo em CA

O circuito RLC paralelo é um defasador de correntes, adiantando I_C e atrasando I_L em relação a I_R .



As características mais importantes do circuito RLC paralelo ocorrem na ressonância. Na ressonância, devido ao “jogo de energia” entre capacitor e indutor, o circuito RLC paralelo absorve a corrente mínima da fonte de CA (I_T mínima) apresentando impedância máxima.

Esta característica é utilizada como forma de selecionar frequências em aparelhos de rádio e televisão.

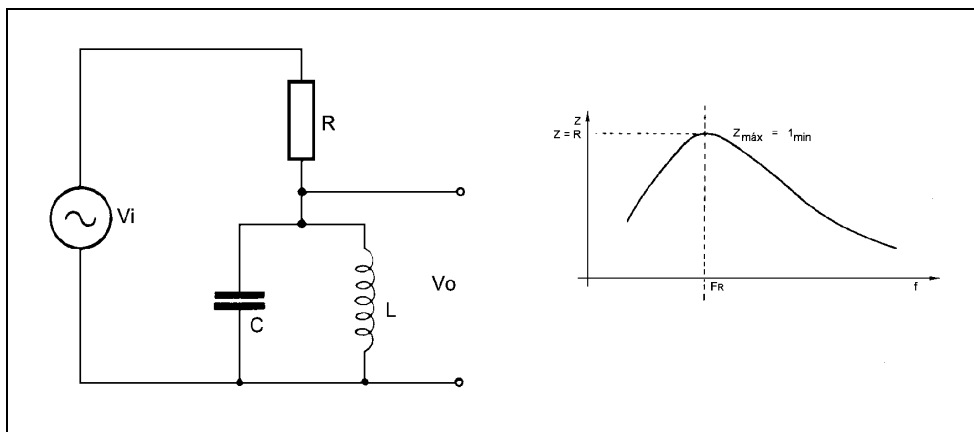
Impedância dos circuitos RLC série e paralelo

Os circuitos LC e RLC série e paralelo se distinguem fundamentalmente no que diz respeito a impedância na frequência de ressonância:

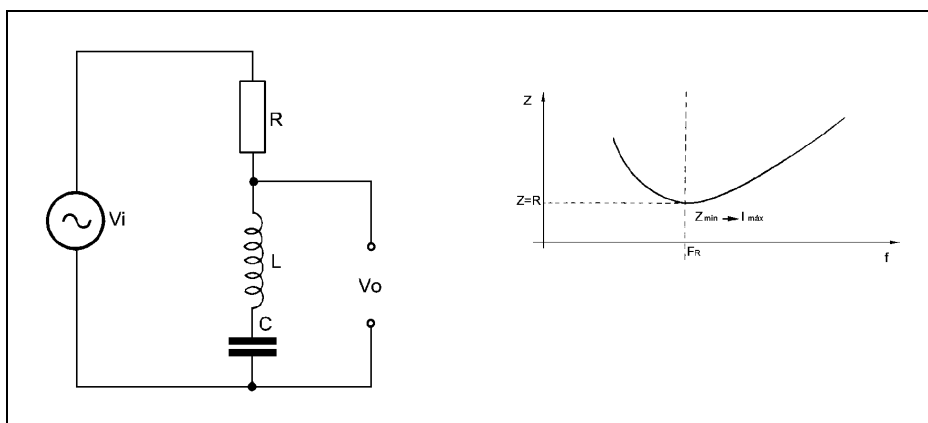
- RLC ou LC série: impedância mínima na frequência de ressonância.
- RLC ou LC paralelo: impedância máxima na frequência de ressonância.

Esta característica permite que este tipo de circuito seja utilizado para a eliminação ou separação de frequências.

A configuração paralela é utilizada para separar uma frequência porque a tensão sobre o conjunto LC paralelo é máxima na ressonância.

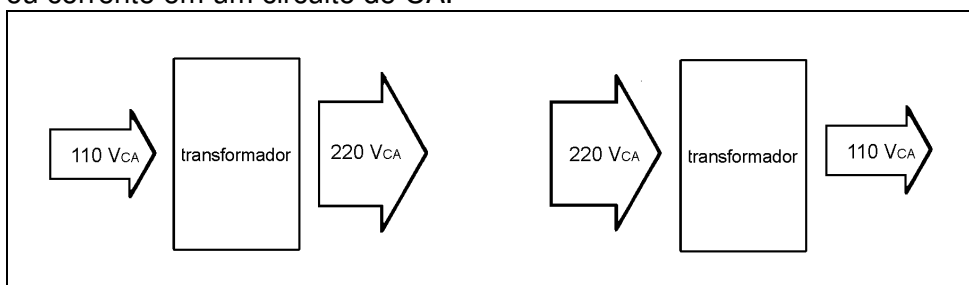


A configuração série é utilizada para eliminar uma frequência de um conjunto (armadilha), devido ao fato de que na frequência de ressonância a impedância do conjunto LC é nula.



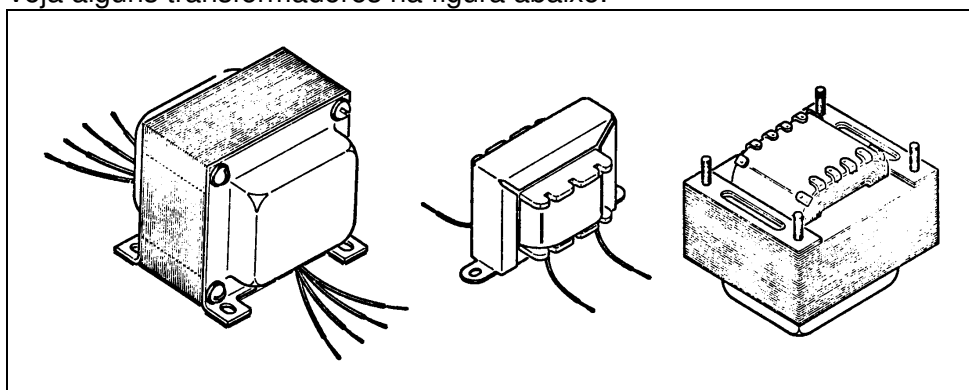
Transformadores

O transformador é um dispositivo que permite elevar ou rebaixar os valores da tensão ou corrente em um circuito de CA.



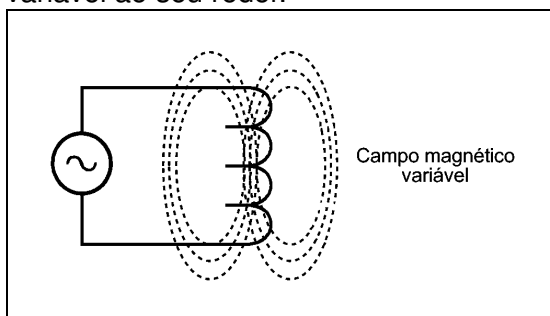
A grande maioria dos equipamentos eletrônicos empregam transformadores, seja como elevador ou rebaixador de tensões.

Veja alguns transformadores na figura abaixo.

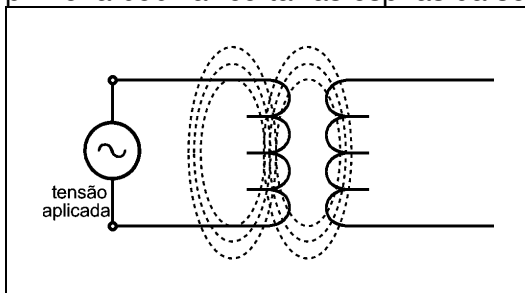


Princípio de funcionamento

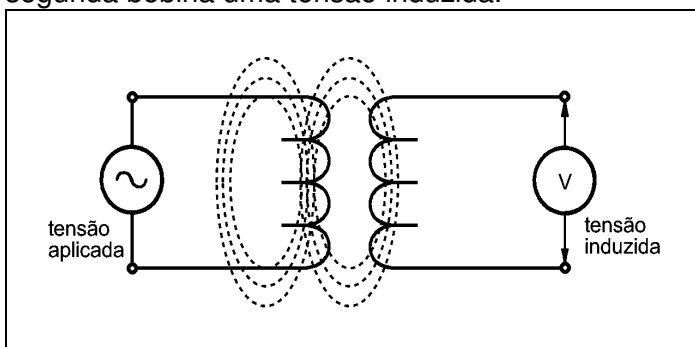
Quando uma bobina é conectada a uma fonte de CA surge um campo magnético variável ao seu redor.



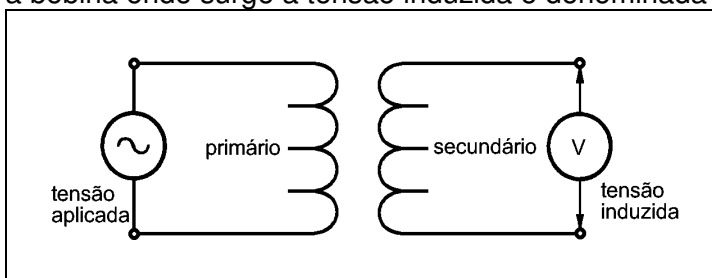
Aproximando-se outra bobina à primeira o campo magnético variável gerado na primeira bobina “corta” as espiras da segunda bobina.



Como consequência da variação de campo magnético sobre suas espiras surge na segunda bobina uma tensão induzida.



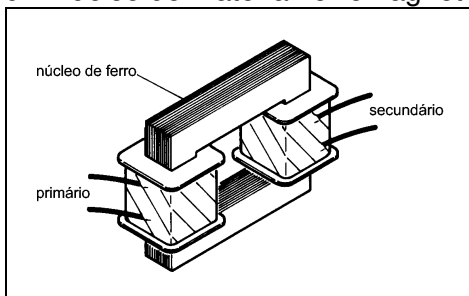
A bobina na qual se aplica a tensão CA é denominada de primário do transformador e a bobina onde surge a tensão induzida é denominada de secundário do transformador.



É importante observar que as bobinas primária e secundária são eletricamente isoladas entre si. A transferência de energia de uma para a outra se dá exclusivamente através das linhas de força magnéticas.

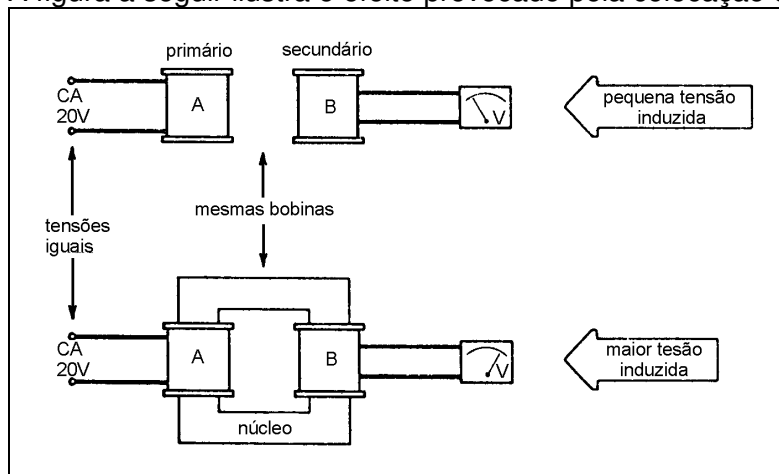
A tensão induzida no secundário de um transformador é proporcional ao número de linhas magnéticas que corta a bobina secundária.

Por esta razão, o primário e o secundário de um transformador são montados sobre um núcleo de material ferromagnético.



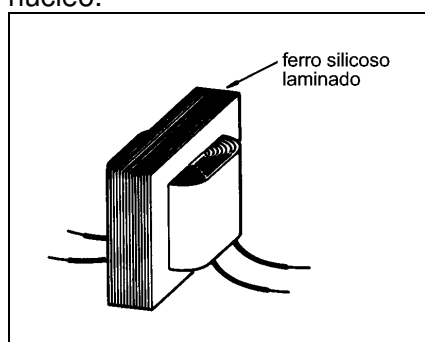
O núcleo diminui a dispersão do campo magnético, fazendo com que o secundário seja cortado pelo maior número de linhas magnéticas possível, obtendo uma melhor transferência de energia entre o primário e o secundário.

A figura a seguir ilustra o efeito provocado pela colocação do núcleo no transformador.



Com a inclusão do núcleo o aproveitamento do fluxo magnético gerado no primário é maior. Entretanto, surge um inconveniente: o ferro maciço sofre grande aquecimento com a passagem do fluxo magnético.

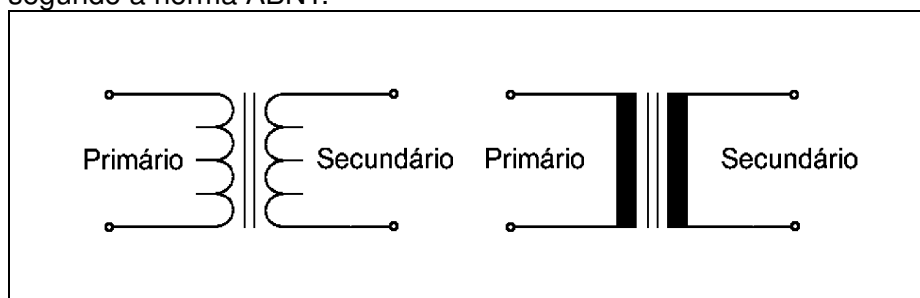
Para diminuir este aquecimento utiliza-se ferro silicoso laminado para a construção do núcleo.



Com a laminação do ferro se reduzem as “correntes parasitas” responsáveis pelo aquecimento o núcleo.

A laminação não elimina o aquecimento, mas reduz sensivelmente em relação ao ferro maciço.

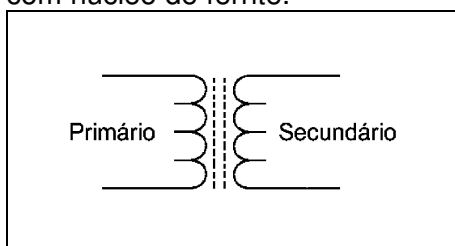
A figura a seguir mostra os símbolos empregado para representar o transformador, segundo a norma ABNT.



Os traços colocados no símbolo entre as bobinas do primário e secundário indicam o núcleo de ferro laminado.

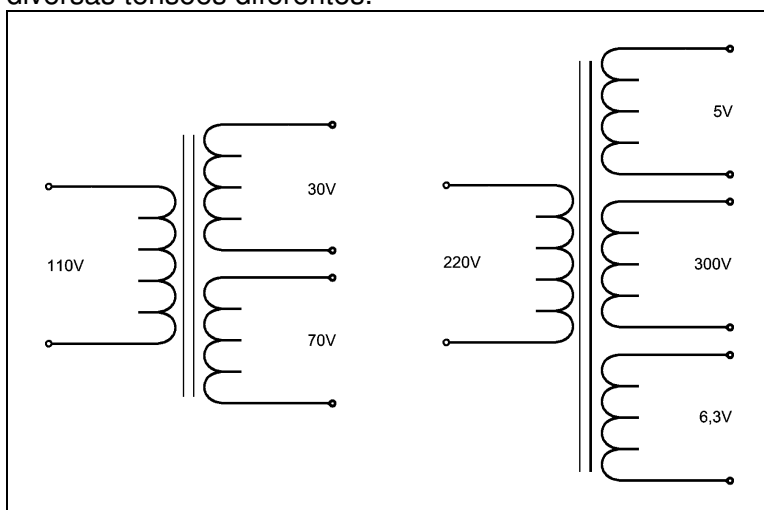
O núcleo de ferro é empregado em transformadores que funcionam em baixas frequências (50Hz, 60Hz, 120Hz).

Transformadores que funcionam em frequências mais altas (kHz) geralmente são montados em núcleo de **ferrite**. A figura abaixo mostra o símbolo de um transformador com núcleo de ferrite.



Transformadores com mais de um secundário

É possível construir transformadores com mais de um secundário, de forma a obter diversas tensões diferentes.

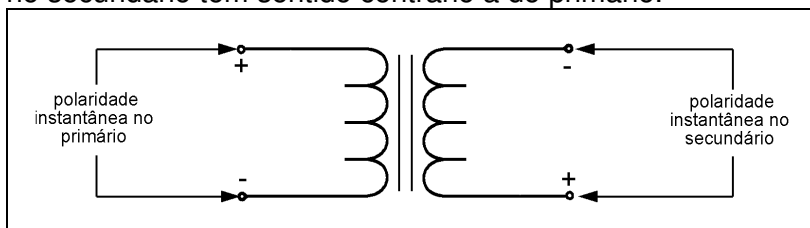


Este tipo de equipamento é muito utilizado em equipamentos eletrônicos.

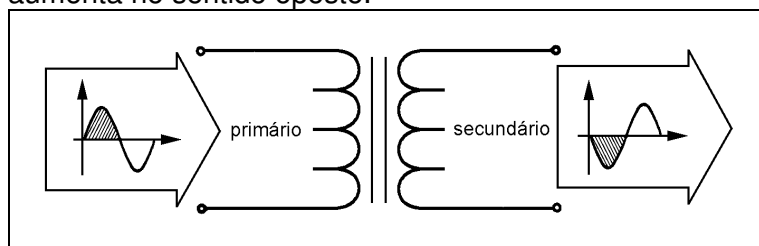
Relação de fase entre as tensões de primário e secundário

A tensão no secundário de um transformador é gerada quando o fluxo magnético variável do primário corta as espiras do secundário.

Como a tensão induzida é sempre oposta a tensão indutora, se conclui que a tensão no secundário tem sentido contrário a do primário.

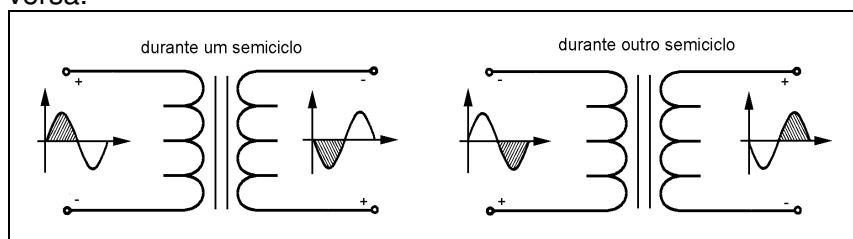


Isto significa que a tensão no secundário está defasada 180° da tensão no primário, ou seja, quando a tensão no primário aumenta num sentido a tensão do secundário aumenta no sentido oposto.



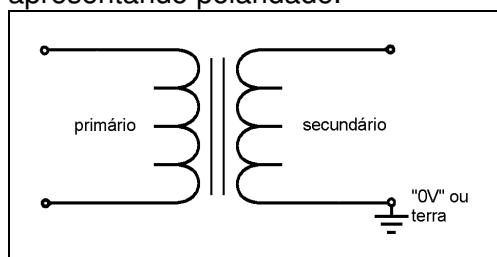
Ponto de referência

Considerando-se a bobina do secundário de um transformador ligado a CA observa-se que a cada momento um terminal é positivo e o outro negativo. Após algum tempo, existe uma troca de polaridade. O terminal que era positivo torna-se negativo e vice-versa.

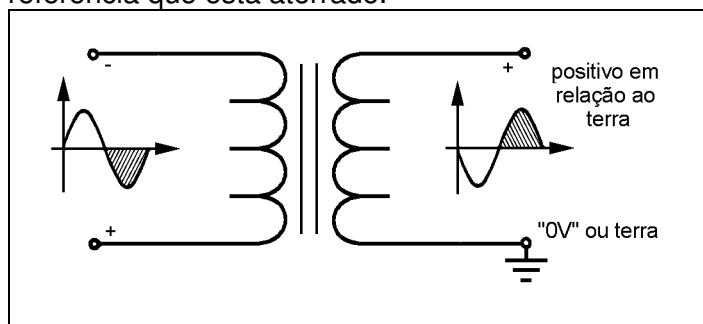


Nos equipamentos eletrônicos é comum um dos terminais dos transformadores ser utilizado como referência, sendo ligado ao terra do circuito.

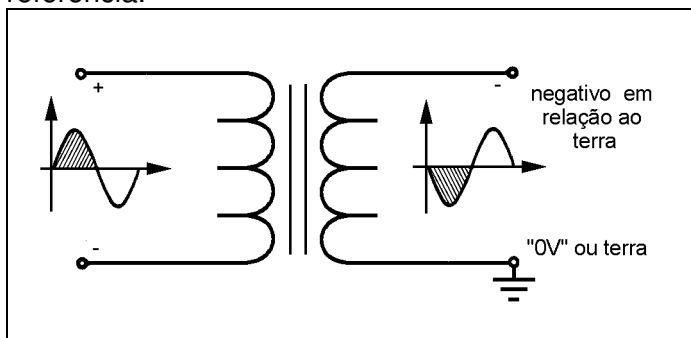
Neste caso, o potencial do terminal "alterado" é considerado como sendo "0", não apresentando polaridade.



Isto não significa que não ocorra a troca de polaridade no secundário no transformador. Em um semiciclo da rede o terminal livre é positivo com relação ao terminal de referência que está aterrado.

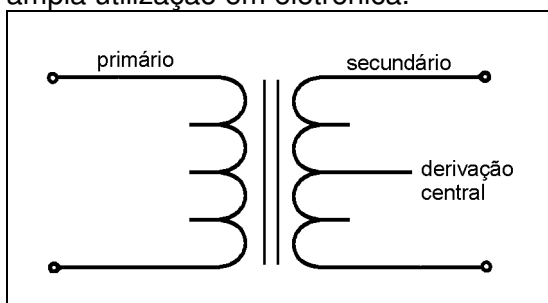


No outro semiciclo da rede o terminal livre é negativo em relação ao potencial de referência.

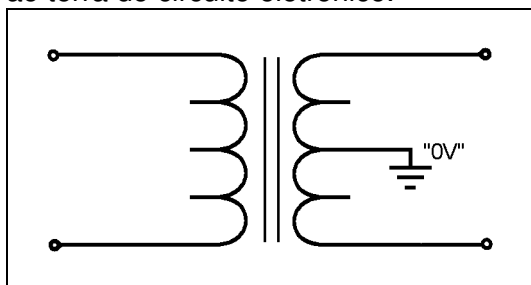


Transformador com derivação central no secundário

Os transformadores com derivação central no secundário (Center Tape) encontram ampla utilização em eletrônica.

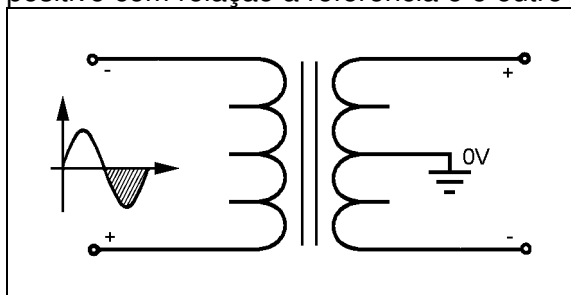


Na maioria das utilizações o terminal central é utilizado como referência, sendo ligado ao terra do circuito eletrônico.



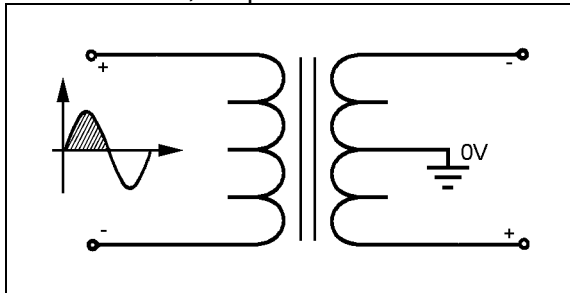
Durante o funcionamento deste tipo de transformadores ocorre uma formação de polaridades bastante singular.

Em um dos semiciclos da rede um dos terminais livres do secundário tem potencial positivo com relação a referência e o outro terminal tem potencial negativo.



Observa-se que a inversão de fase (180°) entre o primário e o secundário cumpre-se perfeitamente.

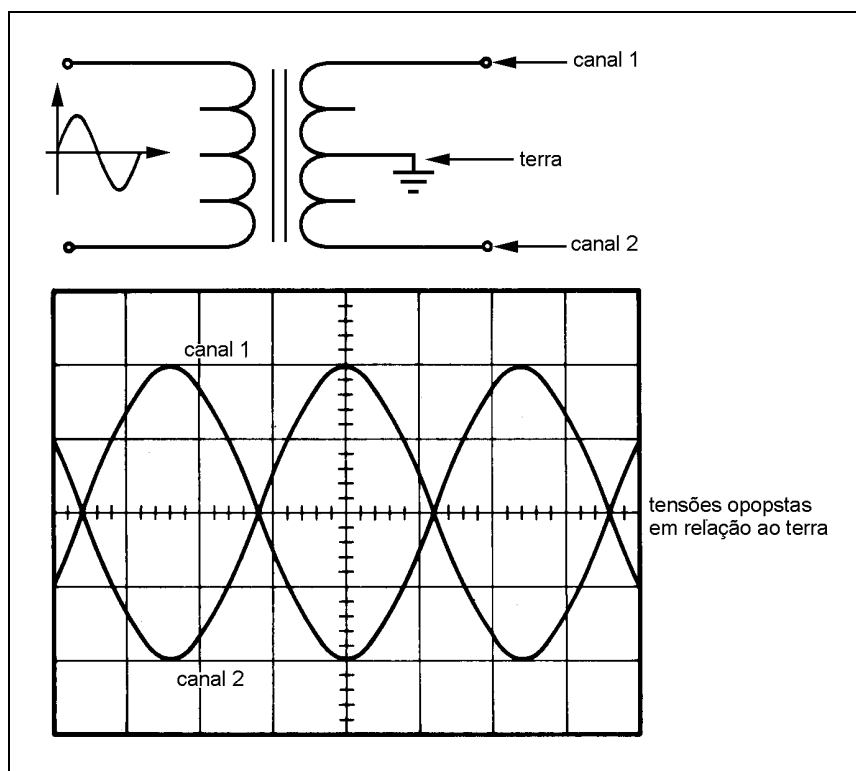
No outro semiciclo há uma troca entre as polaridades dos extremos livres do transformador, enquanto o terminal central permanece a “0V”.



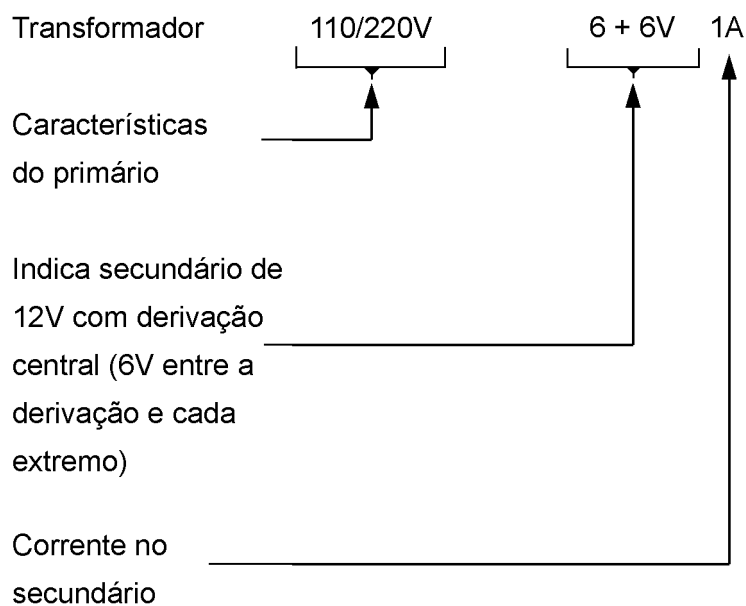
Verifica-se novamente a existência da defasagem de 180° entre o primário e o secundário.

Em um transformador em que o secundário disponha de uma derivação central, pode-se conseguir instantaneamente tensões negativas e positivas. Para isto, utiliza-se o terminal central como referência.

Isto pode ser observado com um osciloscópio.



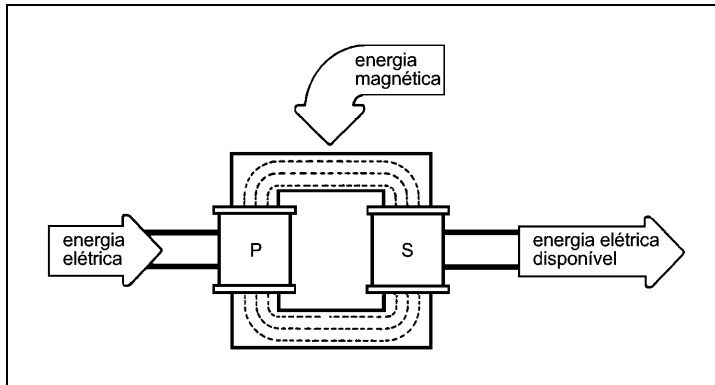
A especificação técnica de um transformador em que o secundário tenha derivação central deve ser feita da seguinte forma:



Relação de Potência nos transformadores

O transformador é um dispositivo que permite modificar os valores de tensão e corrente em um circuito de CA.

Em realidade, o transformador recebe uma quantidade de energia elétrica no primário, transforma em campo magnético e converte novamente em energia elétrica disponível no secundário.



A quantidade de energia absorvida da rede elétrica pelo primário do transformador é denominada de potência do primário, representada pela notação P_P .

Admitindo-se que não existam perdas por aquecimento do núcleo, pode-se concluir que toda a energia absorvida no primário está disponível no secundário.

A energia disponível no secundário é denominada de potência do secundário P_S . Se não existem perdas pode-se afirmar:

$$P_S = P_P$$

A potência do primário depende da tensão aplicada e da corrente absorvida da rede:

Potência do primário: $P_P = V_P \cdot I_P$

A potência do secundário é produto da tensão e corrente no secundário:

Potência do secundário: $P_S = V_S \cdot I_S$

Considerando o transformador como ideal pode-se, então escrever:

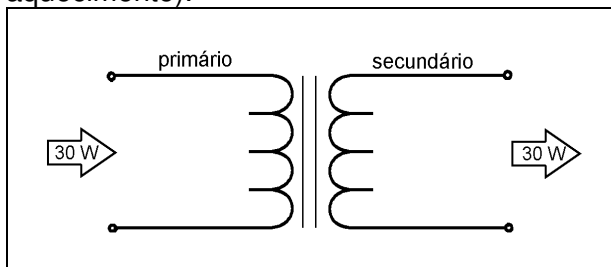
$$P_S = P_P$$

Relação de potências no transformador: $V_S \cdot I_S = V_P \cdot I_P$

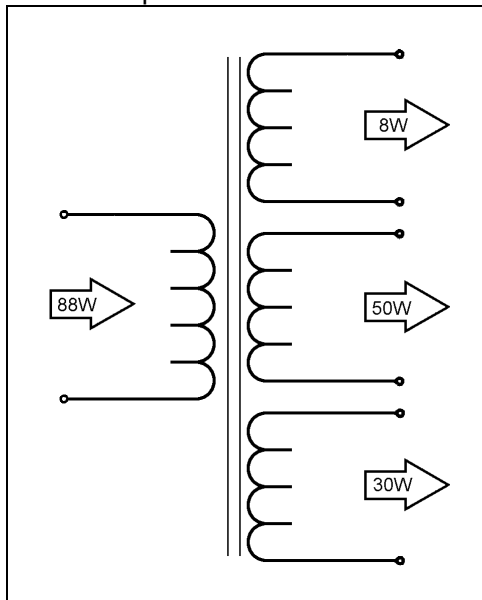
Esta equação permite que se determine um valor do transformador se os outros três forem conhecidos.

Potência em transformadores com mais de um secundário

Quando um transformador tem apenas um secundário a potência absorvida pelo primário é mesma fornecida no secundário (considerando que não existe perda de aquecimento).



Quando existe mais de um secundário, a potência absorvida da rede pelo primário é a soma das potências fornecida em todos os secundários.



A potência absorvida da rede pelo primário é a soma das potências de todos os secundários.

Matematicamente pode-se escrever:

$$P_P = P_{S_1} + P_{S_2} + K K + P_{S_n}$$

Onde

P_P = potência absorvida pelo primário

P_{S1} = potência fornecida pelo secundário 1

P_{S2} = potência fornecida pelo secundário 2

P_{Sn} = potência fornecida pelo secundário n

Esta equação pode ser reescrita usando os valores de tensão e corrente no transformador.

$$V_P \cdot I_P = (V_{S1} \cdot I_{S1}) + (V_{S2} \cdot I_{S2}) + \dots + (V_{Sn} \cdot I_{Sn})$$

Onde:

V_P e I_P = tensão e corrente no primário

V_{S1} e I_{S1} = tensão e corrente no secundário 1

V_{S2} e I_{S2} = tensão e corrente no secundário 2

V_{Sn} e I_{Sn} = tensão e corrente no secundário n

Materiais semi condutores

São materiais que podem apresentar características de isolante ou de condutor, dependendo da forma como se apresenta a sua estrutura química.

Um exemplo típico de material semi condutor é o carbono. Dependendo da forma como os átomos do carbono se interligam, o material formado pode se tornar condutor ou isolante.

Duas formas bastante conhecidas de matéria formada por átomos de carbono são:

- O diamante;
- O grafite.

Diamante

Material de grande dureza que se forma pelo arranjo de átomos de carbono em forma de estrutura cristalina. **É eletricamente isolante.**

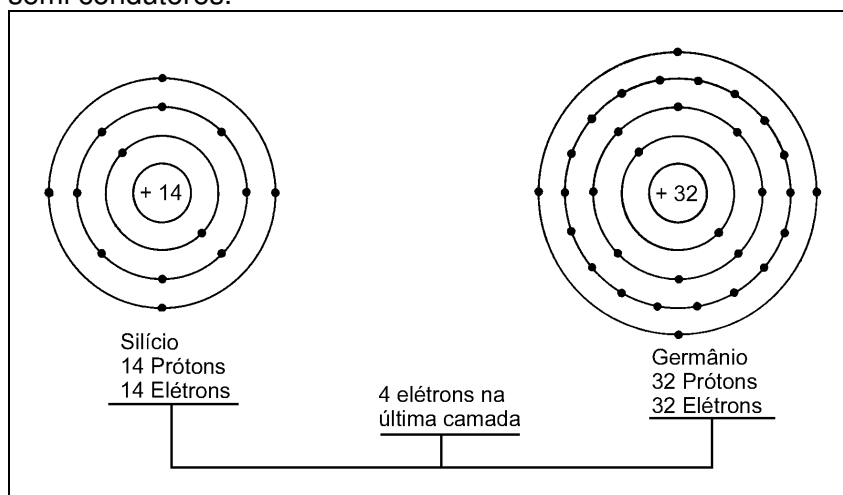
Grafite

Material que se forma pelo arranjo de átomos de carbono em forma triangular. **É condutor de eletricidade.**

Estrutura química dos materiais semicondutores

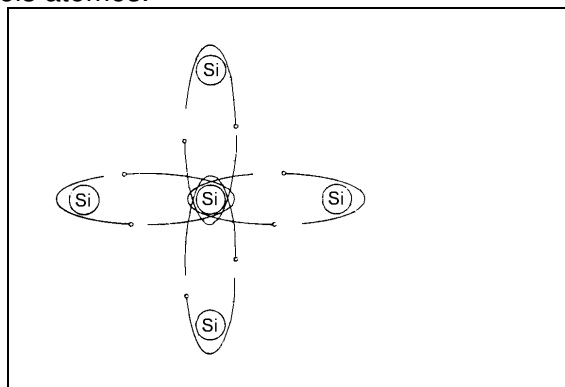
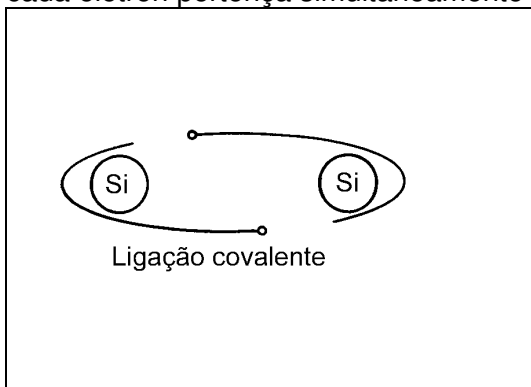
Os materiais semicondutores se caracterizam por serem constituídos de átomos que tem 4 elétrons na camada de valência (**Tetravalentes**).

A figura a seguir apresenta a configuração de dois átomos que dão origem a materiais semi condutores.

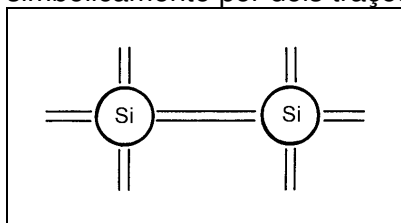


Os átomos que tem quatro elétrons na última camada tem tendência a se agruparem segundo uma formação cristalina.

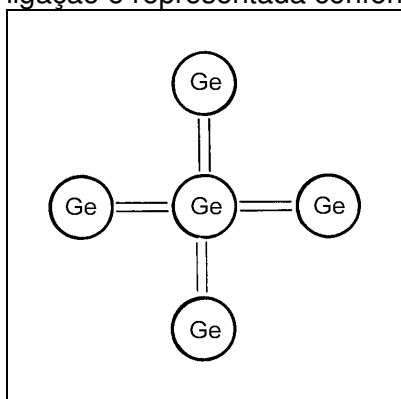
Neste tipo de ligação cada átomo se combina com quatro outros, fazendo com que cada elétron pertença simultaneamente a dois átomos.



Este tipo de ligação química é denominado de ligação covalente, e é representada simbolicamente por dois traços que interligam os dois núcleos.



Quando um átomo tetravalente se associa por ligações covalentes a quatro outros, a ligação é representada conforme figura abaixo.

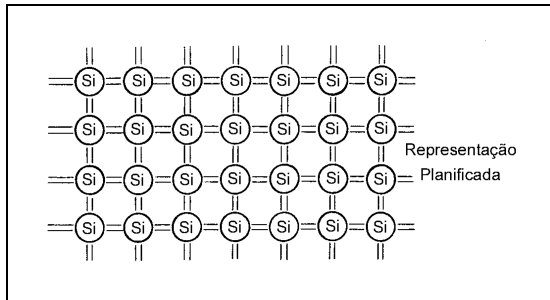


As ligações covalentes se caracterizam por manter os elétrons fortemente ligados aos dois núcleos associados.

Por esta razão as estruturas cristalinas puras, compostas unicamente por ligações covalentes, adquirem características de isolamento elétrica.

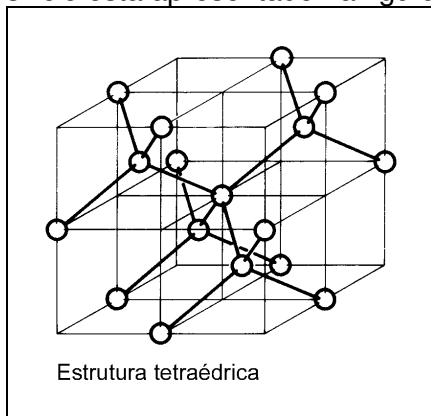
O silício e o germânio puros são materiais semicondutores com característica isolante quando agrupados em forma de cristal.

A figura a seguir mostra a configuração cristalina do silício de forma planificada.



Observa-se que cada átomo realiza quatro ligações covalentes com os átomos vizinhos.

O aspecto real de ligação dos átomos de uma estrutura cristalina de germânio ou silício está apresentado na figura abaixo.



Dopagem

A dopagem é um processo químico que tem por finalidade introduzir átomos estranhos a uma substância na sua estrutura cristalina.

A própria natureza executa um processo de dopagem propiciando a existência de “impurezas” na estrutura química dos cristais que se instalam durante a sua formação.

A dopagem pode também ser realizada em laboratórios, com um objetivo mais específico:

- Colocar no interior da estrutura de um cristal uma quantidade correta de uma determinada impureza, para que o cristal se comporte conforme as condições necessárias em termos elétricos.

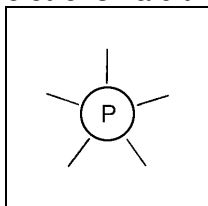
Nos cristais semicondutores (germânio e silício, principalmente) a dopagem é realizada para atribuir ao material certa condutibilidade elétrica.

A forma como o cristal irá conduzir a corrente elétrica e a sua condutibilidade dependem do tipo de impureza utilizado e da quantidade de impureza aplicada.

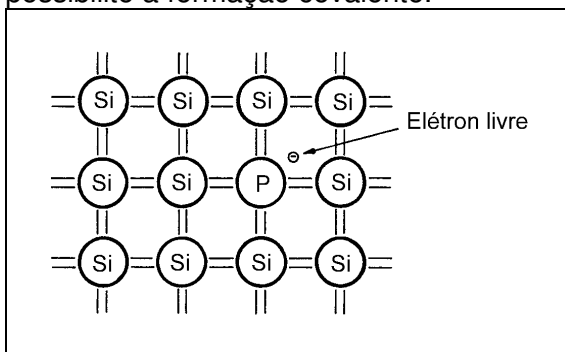
Cristal N

Quando o processo de dopagem introduz na estrutura cristalina uma quantidade de átomos **com mais de quatro elétrons** na última camada, forma-se uma nova estrutura cristalina denominada de cristal N.

Tomando-se como exemplo a introdução de átomos de fósforo que possuem cinco elétrons na última camada no cristal.



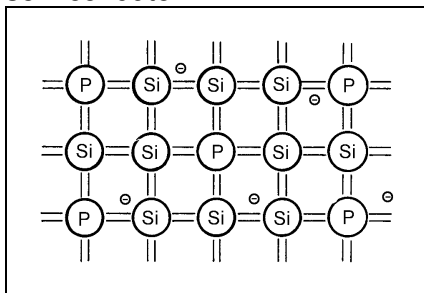
Dos cinco elétrons externos do fósforo apenas quatro encontram um par no cristal que possibilite a formação covalente.



O quinto elétron do fósforo não forma ligação covalente porque não encontra um elétron na estrutura que possibilite esta formação.

Este elétron isolado tem a característica de se libertar facilmente do átomo, passando a vagar livremente dentro da estrutura do cristal, constituindo-se um portador livre de carga elétrica.

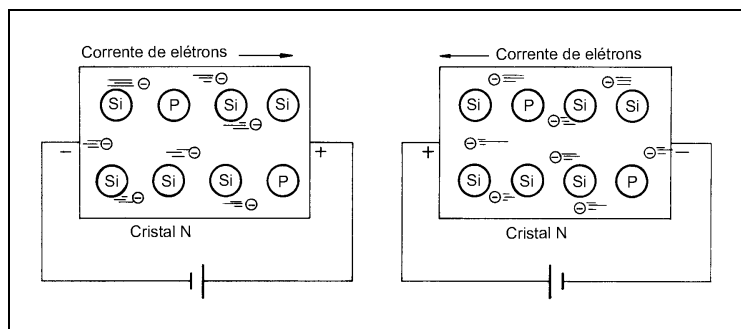
Cada átomo de impureza fornece um elétron livre dentro da estrutura do cristal semiconductor.



Com a adição de uma determinada quantidade de impurezas o cristal que era puro e isolante passa a ser condutor de corrente elétrica, através dos portadores livres (elétrons), que podem circular na banda de condução.

É importante observar que embora o material tenha sido dopado, seu número total de elétrons e prótons é igual, de forma que **o material continua eletricamente neutro**.

O cristal semiconductor dopado com impurezas de maior número de elétrons (como o fósforo) é denominado de **cristal N** porque a corrente elétrica é conduzida no seu interior por **cargas negativas**.

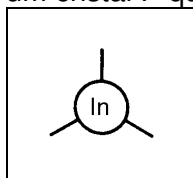


Observa-se que o cristal N conduz a corrente elétrica, independentemente da polaridade da bateria.

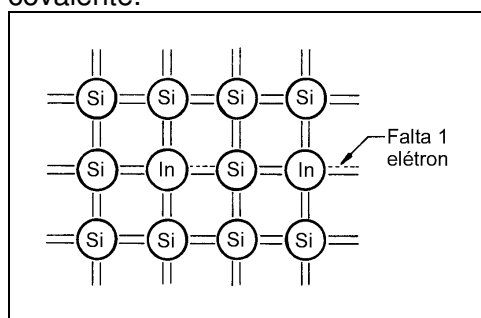
Cristal P

A utilização de átomos com menos de quatro elétrons na última camada para o processo de dopagem dá origem a um tipo de estrutura chamada de cristal P.

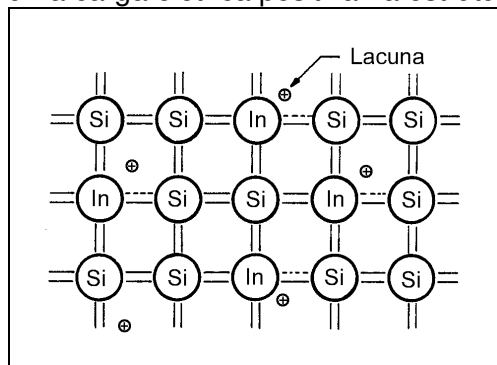
O átomo de índio, por exemplo, que tem três elétrons na última camada, dá origem a um cristal P quando é utilizado na dopagem.



Quando os átomos de índios são colocados na estrutura do cristal puro verifica-se a falta de um elétron para que os elementos tetravalentes se combinem de forma covalente.



Esta ausência no interior do cristal é denominada de lacuna, sendo representada por uma carga elétrica positiva na estrutura química.

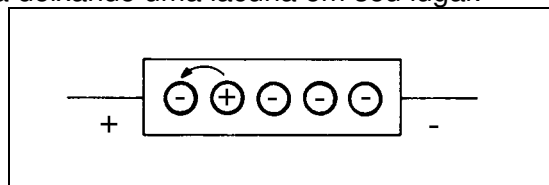
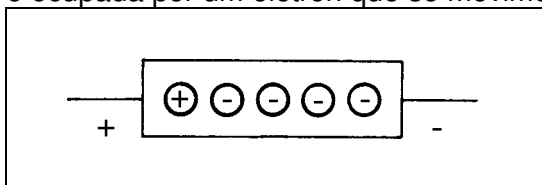


A lacuna não é propriamente uma carga positiva, mas sim, a ausência de uma carga negativa.

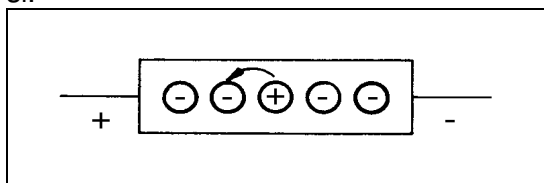
Os cristais dopados com átomos de menos de quatro elétrons na camada externa são denominados de cristais P porque a condução de corrente elétrica no seu interior se dá pela movimentação das lacunas.

O movimento de lacunas no cristal P pode ser facilmente observado, quando se analisa a condução de corrente passo a passo.

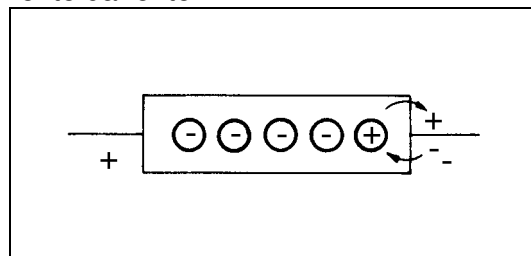
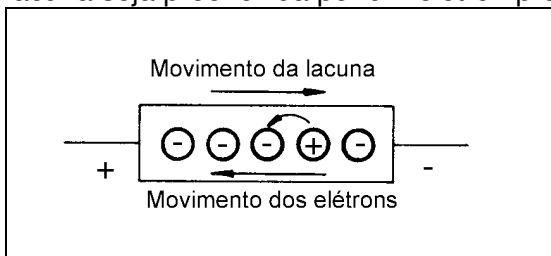
Quando se aplica uma diferença de potencial aos extremos de um cristal P uma lacuna é ocupada por um elétron que se movimenta deixando uma lacuna em seu lugar.



Esta lacuna é preenchida pelo elétron seguinte, que torna a criar outra lacuna atrás de si.

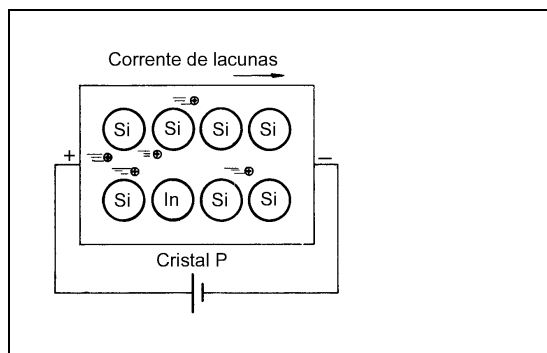
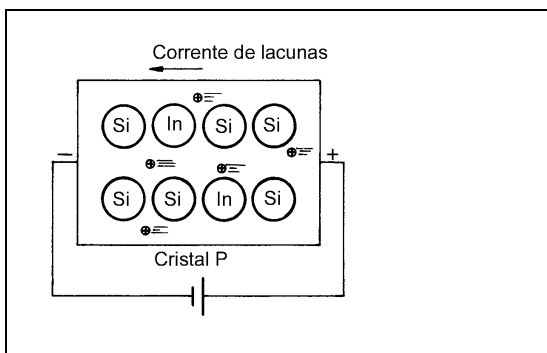


Assim, a lacuna será preenchida por outro elétron gerando nova lacuna, até que esta lacuna seja preenchida por um elétron proveniente da fonte.



As lacunas se movimentam na banda de valência dos átomos e os elétrons que as preenchem, na banda de condução.

A condução de corrente por lacunas no cristal P independe da polaridade da fonte de tensão.



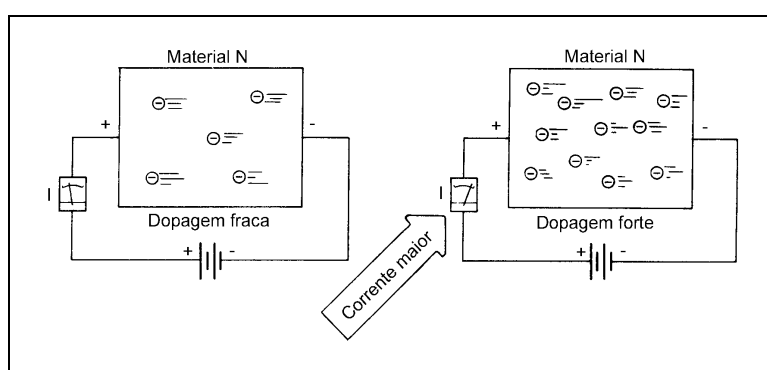
Conclui-se que os cristais P e N, isoladamente conduzem a corrente elétrica qualquer que seja a polaridade de tensão aplicada aos seus extremos.

Os cristais P e N são a matéria prima para fabricação dos componentes eletrônicos modernos tais como: diodos, transistores, circuitos integrados.

Influência da intensidade de dopagem no comportamento dos materiais semi condutores

A condução de corrente elétrica nos materiais semi condutores depende dos portadores livres de carga na estrutura química.

Os cristais dopados mais intensamente se caracterizam por apresentar maior condutibilidade, porque sua estrutura apresenta um maior número de portadores livres.

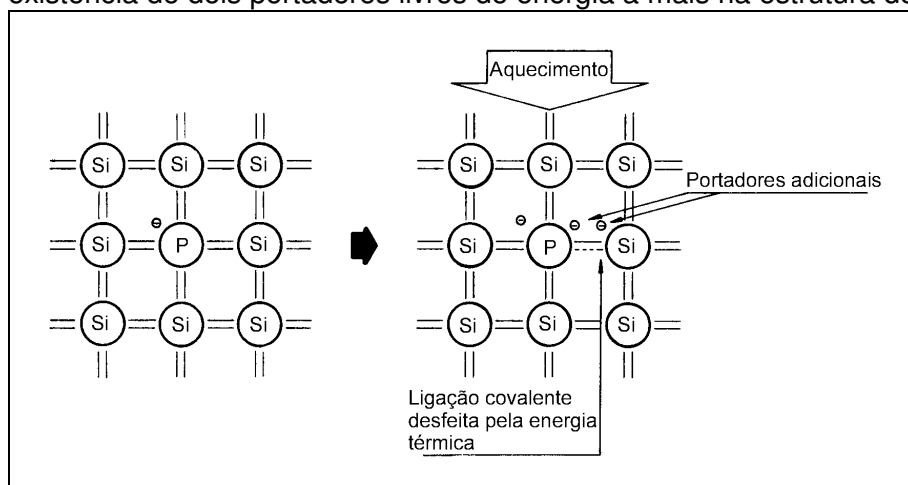


Influência da temperatura na condutibilidade dos materiais semicondutores

A temperatura exerce influência direta sobre o comportamento dos materiais semicondutores no que diz respeito a condutibilidade elétrica.

Quando a temperatura de um material semi condutor aumenta, a energia térmica adicional faz com que algumas ligações covalentes da estrutura se desfaçam.

Cada ligação covalente que se desfaz pelo acréscimo de temperatura propicia a existência de dois portadores livres de energia a mais na estrutura do cristal.



A existência de um maior número de portadores aumenta a condutibilidade do material, permitindo a circulação de correntes maiores no cristal.

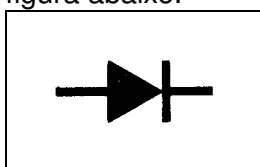
Diodo semi condutor

O diodo semi condutor é um componente que apresenta a característica de se comportar como condutor ou isolante elétrico dependendo da forma como a tensão é aplicada aos seus terminais.

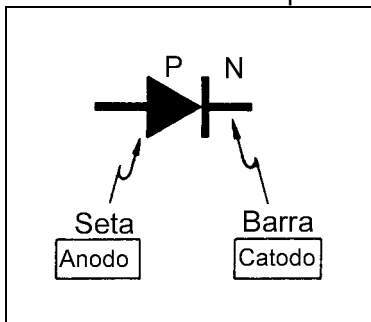
Uma das aplicações do diodo é na de transformação de corrente alternada em corrente contínua utilizada, por exemplo, nos “eliminadores de pilhas”.

Simbologia e aspecto real

O diodo semi condutor é representado nos esquemas pelo símbolo apresentado na figura abaixo.

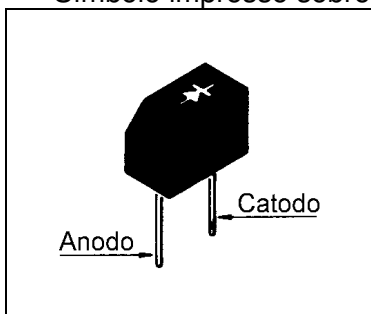


O terminal da seta representa o material P, denominado de **Anodo** do diodo, enquanto o terminal da barra representa o material N, denominado de **Catodo** do diodo.

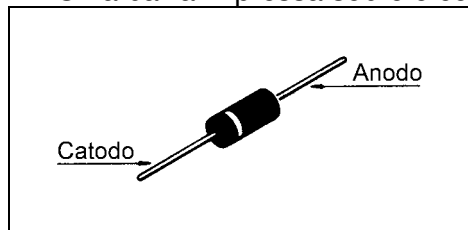


A identificação dos terminais (anodo e catodo) no componente real pode aparecer de duas formas:

- Símbolo impresso sobre o corpo do componente;

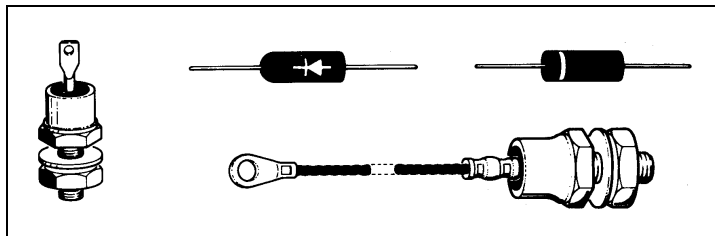


- Uma barra impressa sobre o corpo do componente, que indica o catodo.



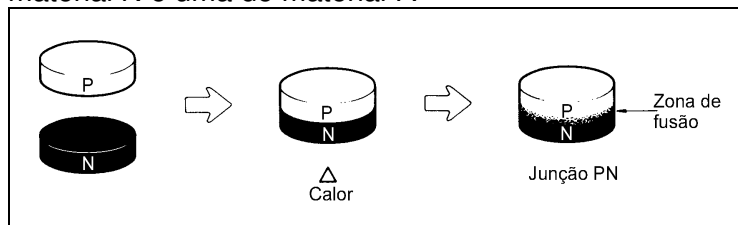
Observa-se que o comportamento de qualquer componente eletrônico fabricado com materiais semi condutores depende diretamente da sua temperatura de trabalho. Esta dependência é denominada de “**Dependência térmica**”, constituindo-se em fator importante que deve ser considerado quando se projeta ou monta circuitos com estes componentes.

A figura abaixo apresenta alguns tipos construtivos de diodos, utilizados em circuitos eletrônicos.



Formação do diodo - junção PN

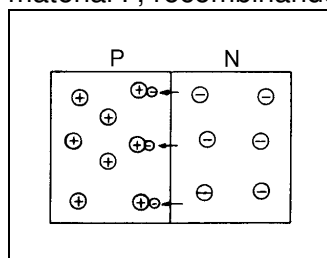
O diodo se constitui na junção de duas pastilhas de material semicondutor: uma de material N e uma de material P.



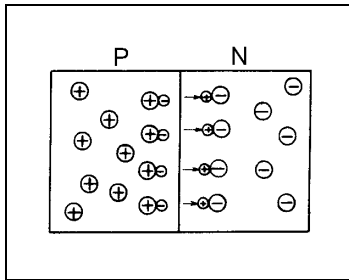
Comportamento dos cristais após a junção

Após a junção das pastilhas que formam o diodo ocorre um processo de “acomodamento” químicos entre os cristais.

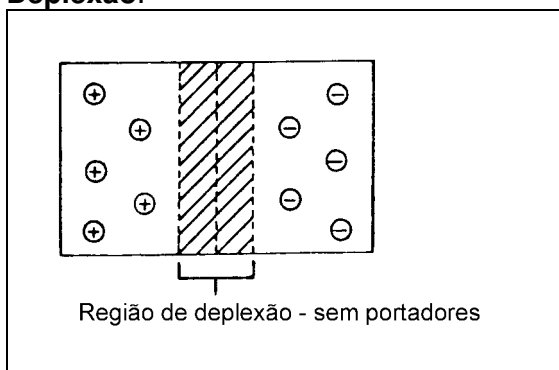
Na região da junção alguns elétrons livres saem do material N e passam para o material P, recombinao-se com as lacunas das proximidades.



O mesmo ocorre com algumas lacunas que passam do material P para o material N e se recombinam com os elétrons livres.

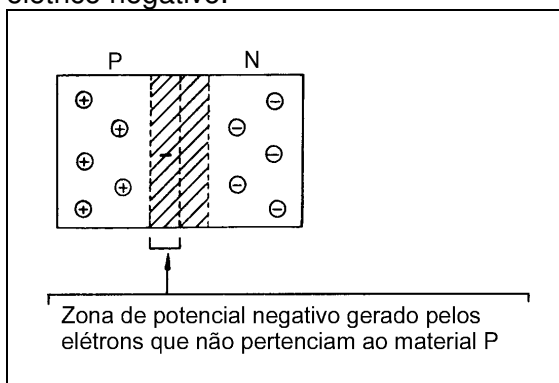


Forma-se na junção uma região onde não existem portadores de carga, porque estão todos recombinados, neutralizando-se. Esta região é denominada de região de **Deplexão**.

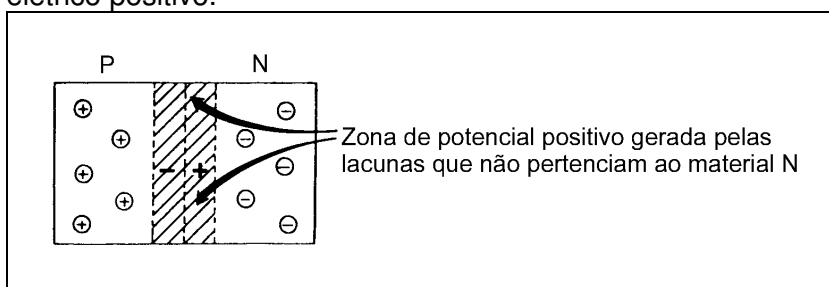


Como consequência da passagem de cargas de um cristal para outro cria-se um desequilíbrio elétrico na região da junção.

Os elétrons que se movimentaram do material N para o P geram um pequeno potencial elétrico negativo.



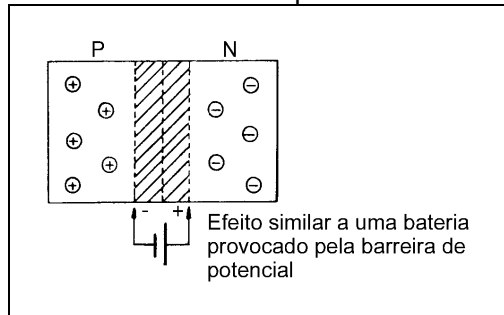
As lacunas que se movimentaram para o material N geram um pequeno potencial elétrico positivo.



Verifica-se que na região da junção existe uma diferença de potencial, proporcionada pelo movimento dos portadores de um cristal para o outro.

Este desequilíbrio elétrico é denominado de **barreira de potencial**.

No funcionamento do diodo esta barreira de potencial se comporta como uma pequena bateria dentro do componente.



É importante observar que a barreira de potencial é **negativa no cristal P e positiva no cristal N**.

A tensão proporcionada pela barreira de potencial no interior do diodo depende do material utilizado na sua fabricação.

Nos diodos de germânio a barreira de potencial tem aproximadamente 0,2V e nos diodos de silício aproximadamente 0,7V.

Não é possível medir a tensão da barreira de potencial, aplicando um voltímetro aos terminais de um diodo, porque esta tensão existe apenas internamente no componente.

No todo, o componente continua neutro, uma vez que não foram acrescentadas nem retirados portadores dos cristais.

Aplicação de tensão sobre o diodo

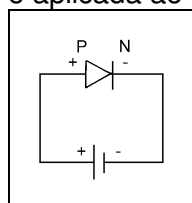
A aplicação de tensão sobre o diodo estabelece a forma como o componente se comporta eletricamente.

A tensão pode ser aplicada ao diodo de duas formas diferentes, denominadas tecnicamente de:

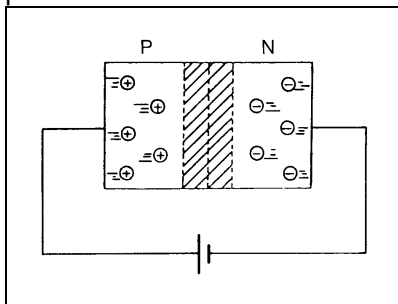
- Polarização direta
- Polarização inversa

Polarização direta

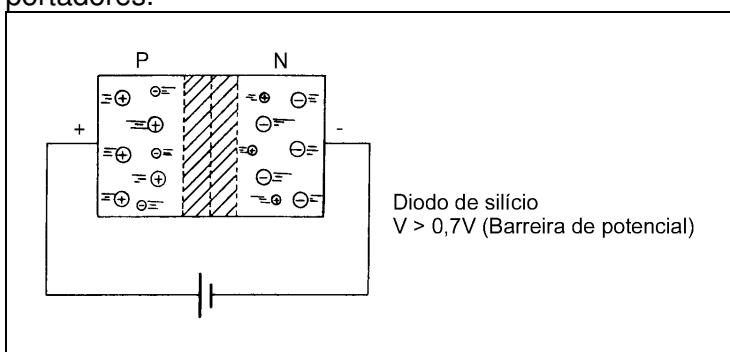
A polarização do diodo é denominada de polarização direta quando a tensão **positiva** é aplicada ao **material P** e a tensão **negativa** ao **material N**.



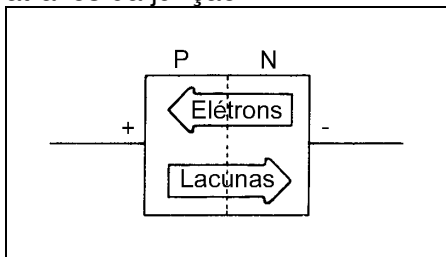
O pólo positivo da fonte repele as lacunas do material P em direção ao pólo negativo, enquanto os elétrons livres são repelidos pelo pólo negativo em direção ao pólo positivo.



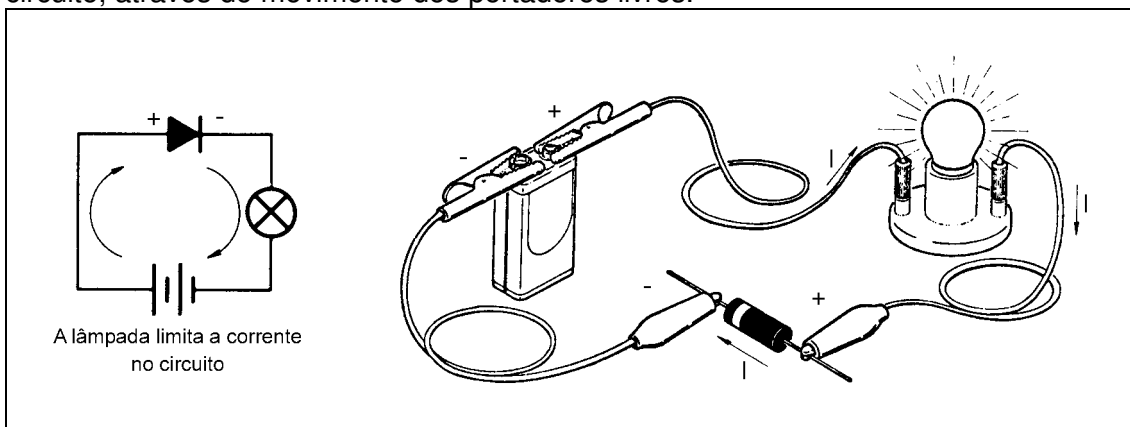
Se a tensão da bateria externa é maior que a tensão da barreira de potencial as forças de atração e repulsão provocadas pela bateria externa permitem aos portadores adquirir velocidade suficiente para atravessar a região onde há ausência de portadores.



Observa-se que nesta condição existe um fluxo de portadores livres dentro do diodo, através da junção.



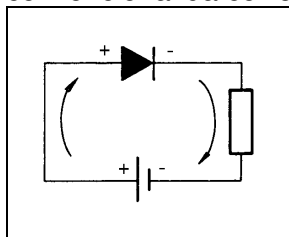
A polarização direta faz com que o diodo permita a circulação de corrente elétrica no circuito, através do movimento dos portadores livres.



Quando o diodo está polarizado diretamente, conduzindo corrente elétrica diz-se que:

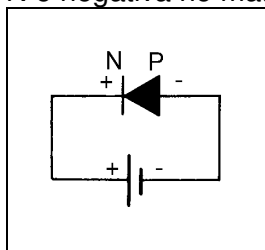
o diodo está em condução.

É importante observar que a seta do símbolo do diodo indica o sentido de circulação convencional da corrente.

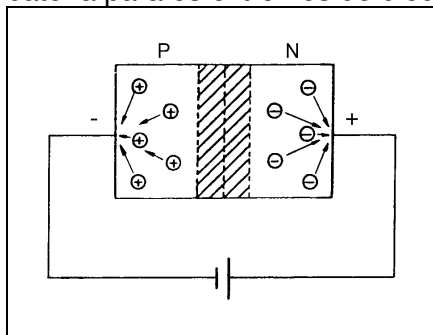


Polarização inversa:

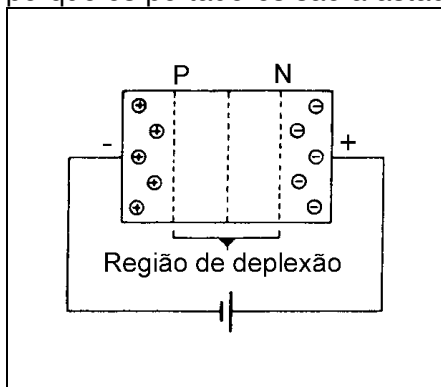
A polarização inversa de um diodo consiste na aplicação de tensão positiva no material N e negativa no material P.



Nesta situação os portadores livres de cada cristal são atraídos pelos potenciais da bateria para os extremos do diodo.



Observa-se que a polarização inversa provoca um alargamento da região de deplexão, porque os portadores são afastados da junção.

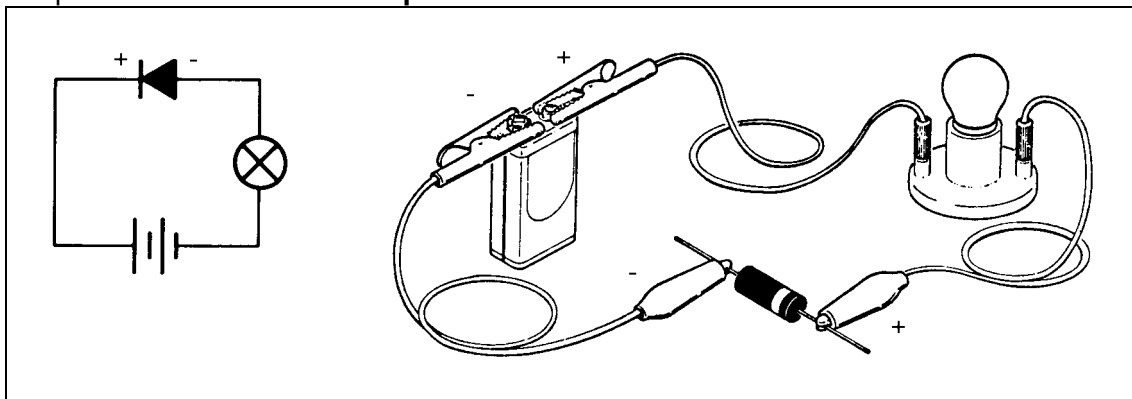


Não existe fluxo de portadores através da junção, quando o diodo é polarizado inversamente.

Portanto, conclui-se que:

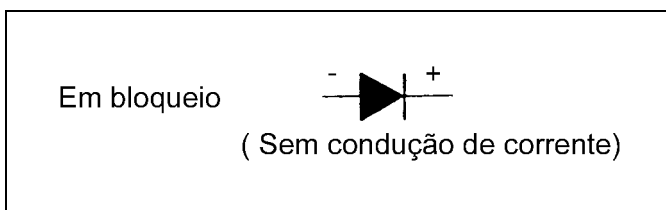
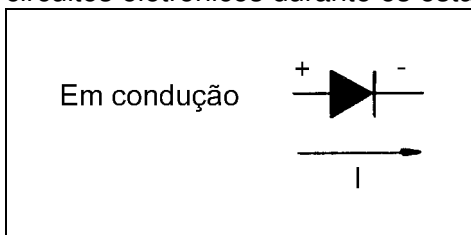
A polarização inversa se faz com que o diodo impeça a circulação de corrente no circuito elétrico.

Quando o diodo está polarizado inversamente, impedindo a circulação de corrente diz-se que: **O diodo está em bloqueio.**



Características de bloqueio e condução

As características do diodo fornecem informações sobre o seu comportamento nos circuitos eletrônicos durante os estados de condução ou bloqueio.

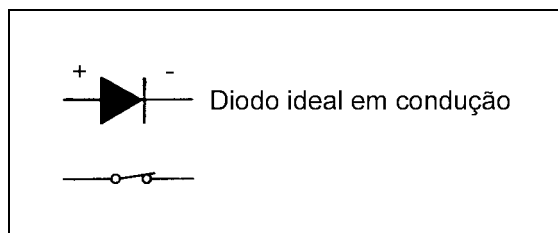


O diodo semicondutor ideal

Como diodo ideal se compreende um diodo que apresente características especiais, conduzindo ou bloqueando completamente.

Condução no diodo ideal e circuito equivalente

Um diodo ideal, polarizado diretamente, deve conduzir a corrente elétrica sem apresentar resistência, comportando-se como um interruptor fechado.



O interruptor fechado é denominado de “circuito equivalente” do diodo ideal em condução.

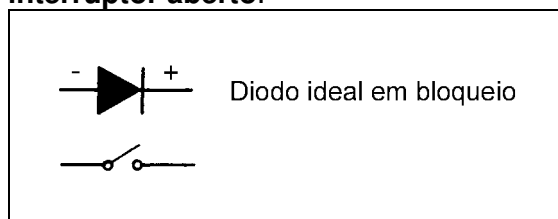
Os “circuitos equivalentes” são circuitos com componentes simples (interruptores, resistores, capacitores) que através dos quais se obtém o mesmo efeito que com um único componente mais complexo.

São usados como “ferramenta” para auxiliar na compreensão do comportamento de componentes mais complexos nos circuitos.

Bloqueio do diodo ideal

Polarizado inversamente um diodo semicondutor ideal deve se comportar como um isolante perfeito, impedindo completamente a circulação de corrente. A condição de bloqueio de um diodo também pode ser denominada de **corte do diodo**, porque o diodo corta a circulação de corrente.

Em circuito equivalente o diodo ideal **em bloqueio** pode ser representado como um **interruptor aberto**.



O diodo semicondutor real

O diodo real apresenta algumas diferenças em relação ao “diodo ideal”.

Estas diferenças existem porque o processo de purificação dos cristais semicondutores para fabricação de componentes eletrônicos não é perfeito.

Após a purificação ainda existe nos cristais uma pequena quantidade de impurezas originárias da formação do material na natureza.

Estas impurezas, chamadas de portadores minoritários, resultantes da deficiência na purificação fazem com que as características de condução e bloqueio dos diodos reais se distanciem dos ideais.

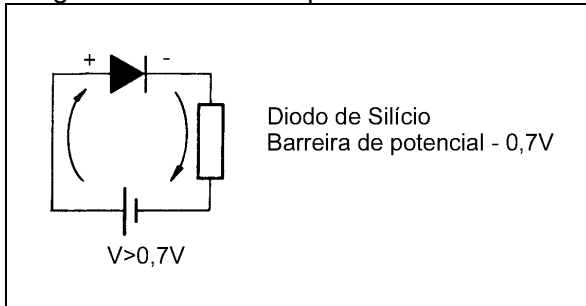
Condução no diodo real

Dois fatores diferenciam o diodo real do ideal no sentido de condução:

- A barreira de potencial;

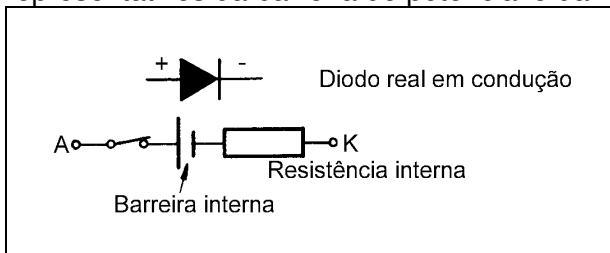
- A resistência interna.

A barreira de potencial, existente na junção dos cristais, faz com que o diodo entre em condução efetiva apenas a partir do momento em que a tensão da bateria externa atinge um valor maior que a tensão interna.



A resistência interna é devida ao fato de que o cristal dopado não é um condutor perfeito. O valor da resistência interna dos diodos na condução normalmente é menor que 1Ω .

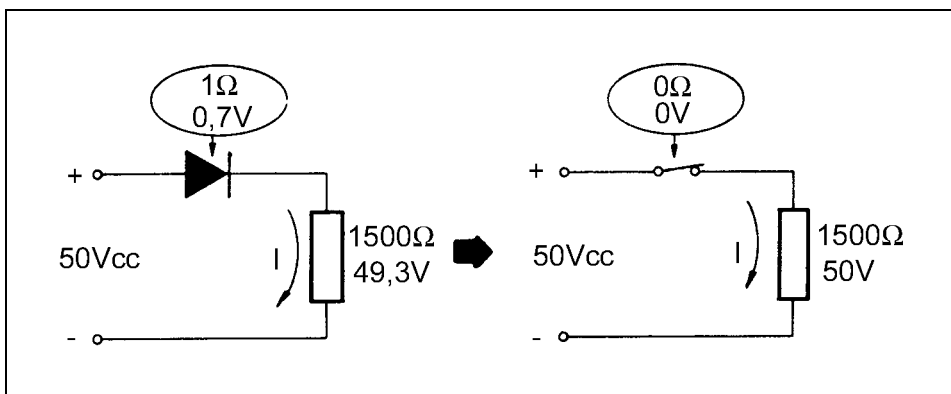
Assim, um circuito equivalente do diodo real em condução apresenta os elementos representativos da barreira de potencial e da resistência interna.



Na maioria dos casos em que o diodo é utilizado, as tensões e resistências externas do circuito são muito maiores que os valores internos do diodo ($0,7V$; 1Ω).

Assim, se pode normalmente considerar o diodo real igual ao ideal no sentido de condução, sem provocar um erro significativo.

No circuito da figura abaixo, por exemplo, a tensão e resistência externa ao diodo são tão grandes, comparadas com os valores do diodo, que se pode considerar o modelo ideal sem qualquer prejuízo.



$$I = \frac{49,3V}{1501\Omega} = 0,0328 \quad I = \frac{50}{1500} = 0,0333$$

$$\text{Erro} = 0,0333 - 0,0328 = 0,0005A$$

Erro desprezível face a tolerância do resistor.

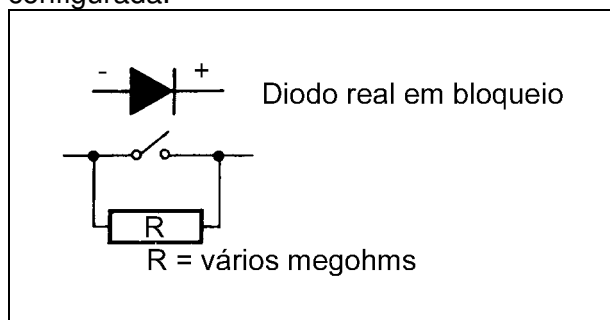
Bloqueio no diodo real

Devido a presença dos portadores minoritários resultantes da purificação imperfeita, o diodo real em bloqueio não é capaz de impedir completamente a existência de corrente no sentido inverso.

Esta corrente inversa que circula no diodo, denominada de **corrente de fuga**, é da ordem de alguns microampéres.

Isto significa que no sentido inverso o diodo apresenta uma resistência elevadíssima (vários Megaohms).

O circuito equivalente do diodo real em bloqueio apresenta esta característica configurada.



Como a corrente de fuga é muito pequena comparada com a corrente de condução a resistência inversa do diodo pode ser desprezada na análise da grande maioria dos circuitos, considerando-se o diodo como ideal.

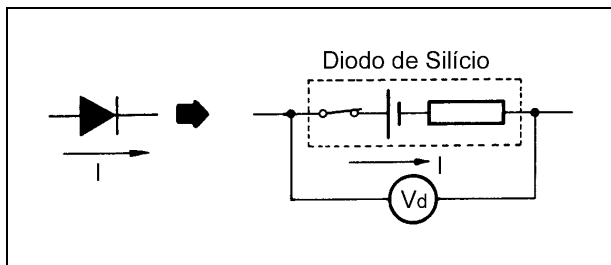
A curva característica do diodo real

O comportamento dos componentes eletrônicos pode ser expresso através de uma curva característica que permite determinar a condição de funcionamento do dispositivo em um grande número de situações.

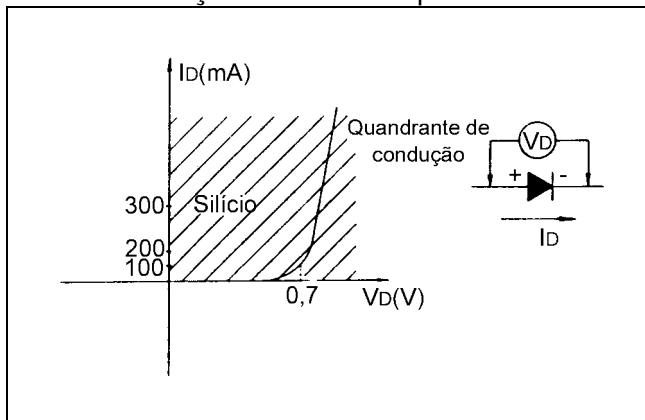
A curva característica do diodo mostra o seu comportamento na condução e no bloqueio.

Região de condução

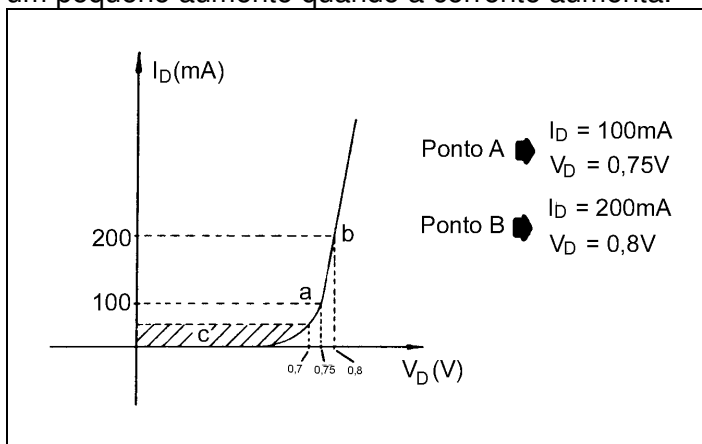
Durante a condução do diodo a corrente do circuito circula no cristal. Devido a existência da barreira de potencial e da resistência interna no diodo verifica-se a presença de um pequeno valor de tensão sobre o diodo.



A curva característica do diodo em condução mostra o comportamento da queda de tensão em função da corrente que flui no circuito.



Analisando a curva característica de condução verifica-se que a tensão no diodo sofre um pequeno aumento quando a corrente aumenta.



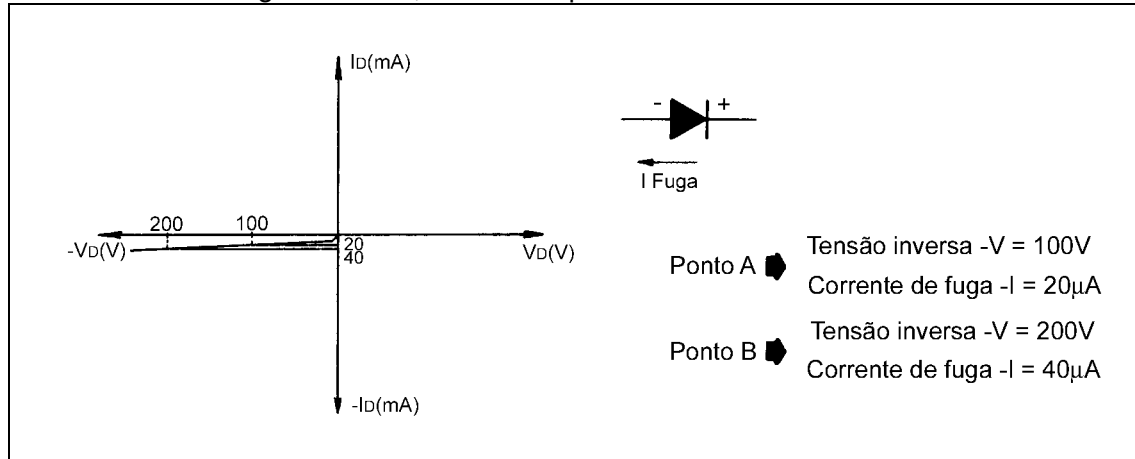
Através da curva verifica-se também que enquanto a tensão sobre o diodo está abaixo de 0,7V (no caso do silício) a corrente circulante é muito pequena (região “c” da curva). Isto se deve ao fato de que a barreira de potencial se opõe ao fluxo de cargas no diodo.

Devido a existência desta barreira de potencial a região típica de funcionamento dos diodos fica acima da tensão de condução característica.

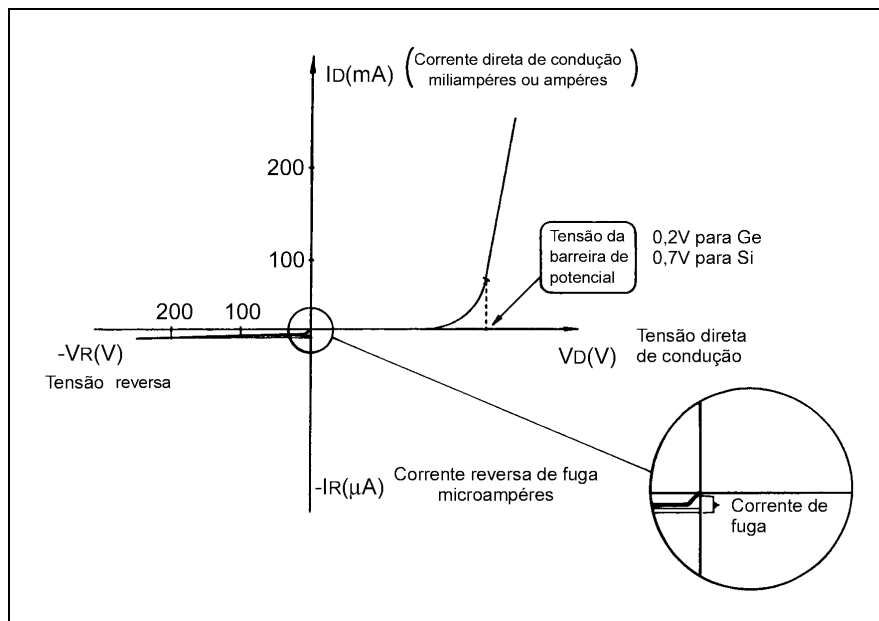
Região de bloqueio

No bloqueio o diodo semicondutor não atua como isolante perfeito, permitindo a circulação de uma corrente de fuga, de valor muito pequeno (da ordem de microampéres).

Esta corrente de fuga aumenta, a medida que a tensão inversa sobre o diodo aumenta.



A figura abaixo apresenta a curva do diodo com os dois quadrantes: de condução e de bloqueio.



Regimes máximos do diodo em CC

Os regimes máximos do diodo em CC estabelecem os limites da tensão e corrente que podem ser aplicados ao componente em circuitos de corrente contínua, sem provocar danos a sua estrutura.

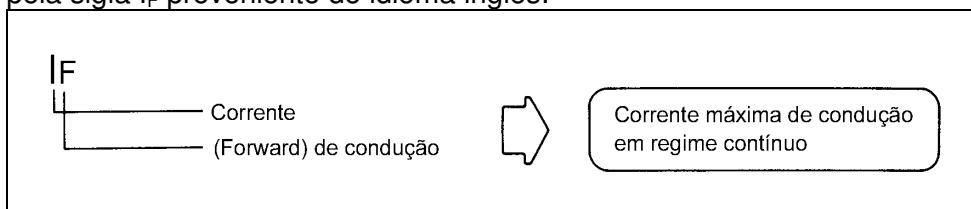
Analisando o comportamento do diodo em condução e bloqueio verifica-se que os fatores que dependem diretamente do circuito ao qual o diodo está conectado são:

- Corrente de condução (I_F);
- Tensão reversa (V_R).

A tensão de condução V_D não depende do circuito (0,7 para silício e 0,2 para germânio) e a corrente de fuga também depende apenas do material do diodo (alguns microampères).

Corrente máxima de condução

A corrente de condução máxima de cada tipo de diodo é dada pelo fabricante em folhetos técnicos. Nestes folhetos, a corrente máxima de condução aparece designada pela sigla I_F proveniente do idioma inglês:

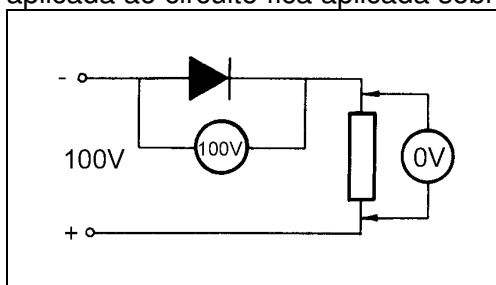


Abaixo estão colocados dois diodos comerciais e suas características de corrente máxima (I_F).

Tipo	I_F
SKE 1/12	1,0A
1N4004	1,0A

Tensão reversa máxima

As tensões reversas colocam o diodo em bloqueio. Nesta condição toda a tensão aplicada ao circuito fica aplicada sobre o diodo.



Cada diodo tem a estrutura preparada para suportar um determinado valor de tensão reversa. Aplicando um valor de tensão reversa **superior** ao especificado para cada diodo a corrente de fuga aumenta excessivamente e o diodo é danificado.

Os fabricantes de diodos fornecem em folhetos técnicos o valor característico de tensão máxima que o diodo suporta sem sofrer a ruptura.

Este valor aparece designado pela sigla V_R .

Abaixo estão colocados alguns diodos comerciais e seus valores característicos de tensão reversa máxima.

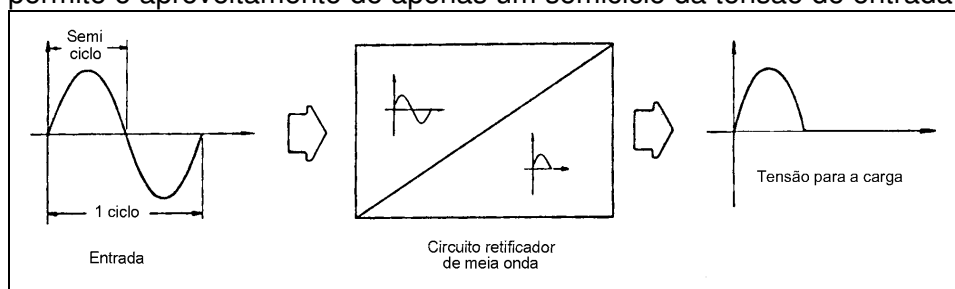
Tipo	V_R
1N4001	50V
BY127	800V
BYX13	50V
SKE1/12	1200V

Retificação de meia onda

Retificação é o nome dado ao processo de transformação de corrente alternada em corrente contínua.

A retificação é utilizada nos equipamentos eletrônicos com a finalidade de permitir que equipamentos de corrente contínua sejam alimentados a partir da rede elétrica CA.

A retificação de meia onda é um processo de transformação de CA em CC, que permite o aproveitamento de apenas um semiciclo da tensão de entrada na carga.



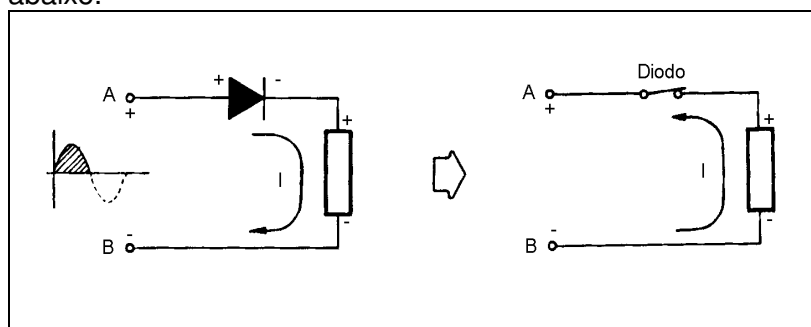
O circuito retificador de meia onda com diodo é empregado em equipamentos que não exigem uma tensão contínua pura, como por exemplo, os carregadores de bateria.

Retificação de meia onda com diodo semi condutor

As características de condução e bloqueio do diodo semi condutor podem ser utilizadas para obter uma retificação de meia onda a partir da corrente alternada da rede elétrica domiciliar.

Funcionamento

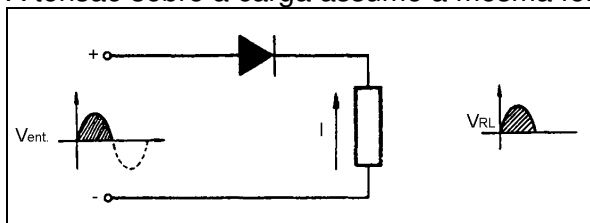
Tomando-se como referência o circuito retificador de meia onda com diodo da figura abaixo.



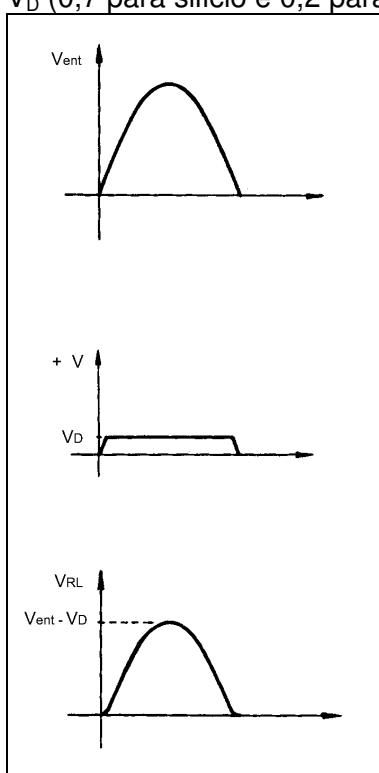
Primeiro semi ciclo

Durante o primeiro semi ciclo a tensão é positiva no ponto A, com relação ao ponto B. Esta polaridade de tensão de entrada coloca o diodo em condução, permitindo a circulação de corrente.

A tensão sobre a carga assume a mesma forma da tensão de entrada.



O valor do pico de tensão sobre a carga é menor que o valor do pico de tensão da entrada por que o diodo, durante condução, apresenta uma pequena queda de tensão V_D (0,7 para silício e 0,2 para germânio).



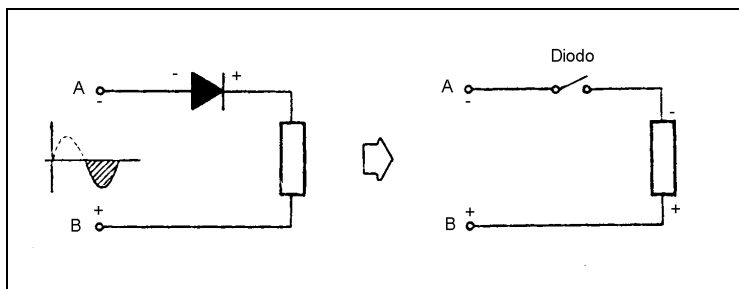
Entretanto, na maioria dos casos, a queda de tensão do diodo pode ser desprezada por que o seu valor é muito pequeno em relação ao valor total do pico de tensão sobre a carga.

A queda de tensão sobre o diodo deve ser considerada apenas quando o circuito retificador for aplicado a tensões pequenas (menores que 10V).

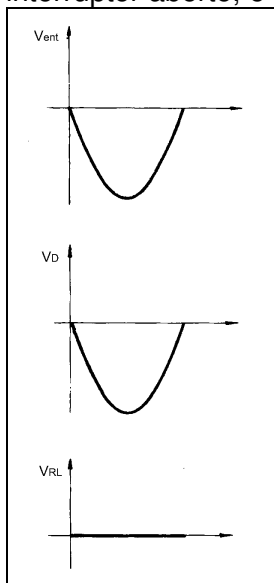
Segundo semi ciclo

Durante o segundo semi ciclo a tensão de entrada é negativa no ponto A, com relação ao ponto B.

Esta polaridade de tensão de entrada coloca o diodo em bloqueio, impedindo a circulação de corrente.

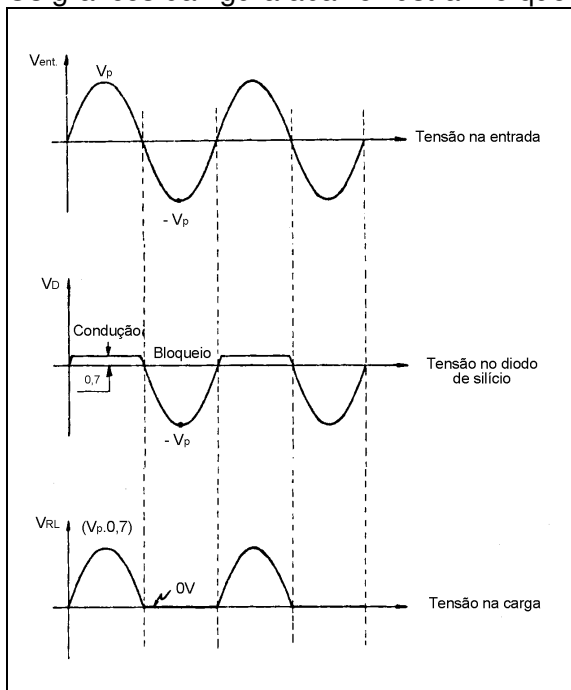


Nesta condição toda a tensão de entrada é aplicada sobre o diodo que atua como interruptor aberto, e a tensão na carga é nula porque não há circulação de corrente.



Observa-se que para cada ciclo completo da tensão de entrada apenas um semi ciclo passa para a carga, enquanto o outro semi ciclo fica sobre o diodo.

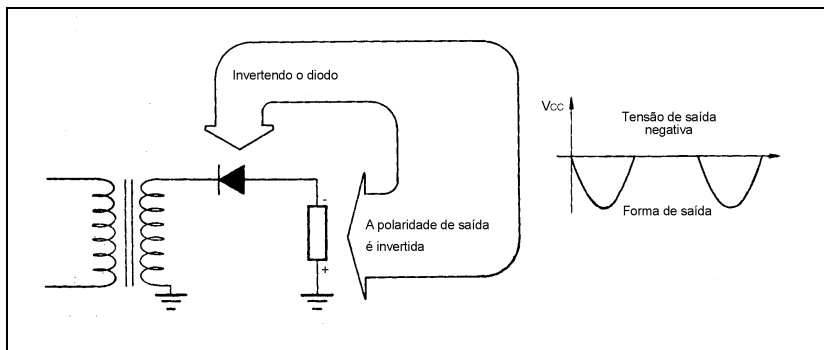
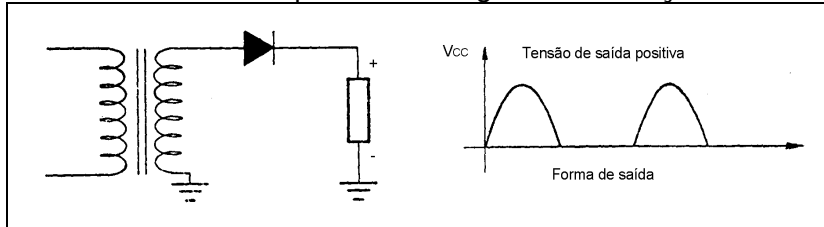
Os gráficos da figura abaixo ilustram o que foi descrito.



A forma de tensão encontrada na carga é denominada de tensão contínua pulsante.

Retificação de meia onda com tensão de saída negativa

Dependendo da forma com que o diodo está colocado no circuito retificador, pode-se obter uma tensão CC positiva ou negativa em relação ao terra.



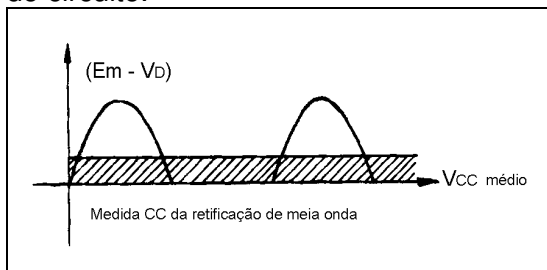
Tensão e corrente CC de saída

A tensão de saída de uma retificação é contínua, embora seja pulsante. Para medir esta tensão de saída utiliza-se um voltímetro de CC ou multímetro.

Os multímetros (em escala de V_{DC}) e os voltímetros de CC indicam sempre um valor de **Tensão contínua média**.

Na retificação de meia onda se alteram os períodos de existência e inexistência de tensão sobre a carga.

Conseqüentemente, o valor de tensão CC média sobre a carga (medido com voltímetro CC na saída da retificação) está muito abaixo do valor efetivo CA aplicado á entrada do circuito.



A tensão média na saída é dada pela equação:

$$V_{CC} = \frac{(E_M - V_D)}{\pi}$$

Onde:

V_{CC} = Tensão contínua média sobre a carga;

E_M = Tensão de pico da CA aplicado ao circuito ($E_M = V_{CA} \cdot \sqrt{2}$);

V_D = Queda de tensão típica do diodo (0,3V ou 0,7V).

Observação

Os livros e publicações de eletrônica costumam denominar o valor “tensão de pico” (V_p) de “tensão máxima” (E_M). Por esta razão nas apresentadas será utilizada a notação E_M para a tensão de pico.

Quando as tensões de entrada (V_{CA}^{ef}) forem superiores a 10V pode-se eliminar a queda de tensão do diodo se torna desprezível, reescrevendo a equação conforme apresentado abaixo:

$$V_{CC} = \frac{E_M}{\sqrt{2}} = \frac{V_{CA} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{2}}$$

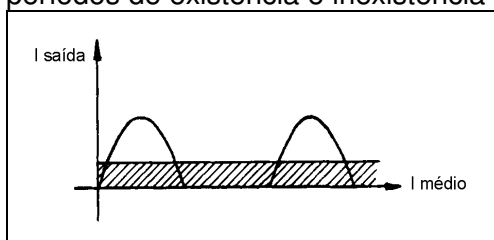
Simplificando os termos $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}}$ obtém-se 0,45; logo:

$$V_{CC} = V_{CA} \cdot 0,45$$

Corrente de saída

Na retificação de meia onda a corrente de saída também é pulsante, uma vez que a tensão sobre a carga é pulsante.

Isto significa que a corrente média na saída (sobre a carga) é uma média entre os períodos de existência e inexistência de corrente.



O valor da corrente média de saída pode ser determinado a partir da tensão média a da resistência de carga:

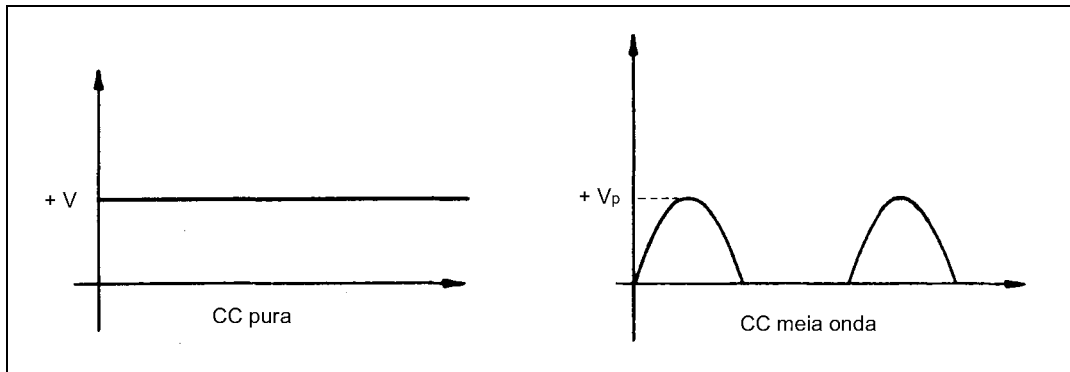
$$\text{Corrente média de saída } I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

O cálculo da corrente média de saída é muito importante porque serve como ponto de partida para a escolha do diodo que será utilizado no circuito.

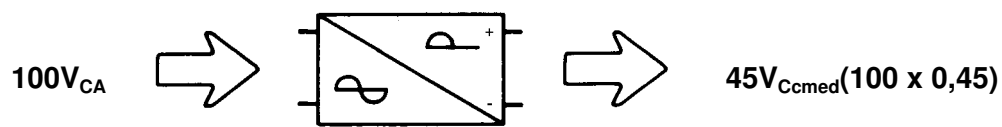
Inconvenientes da retificação de meia onda

A retificação de meia onda apresenta alguns inconvenientes, decorrentes de sua condição de funcionamento.

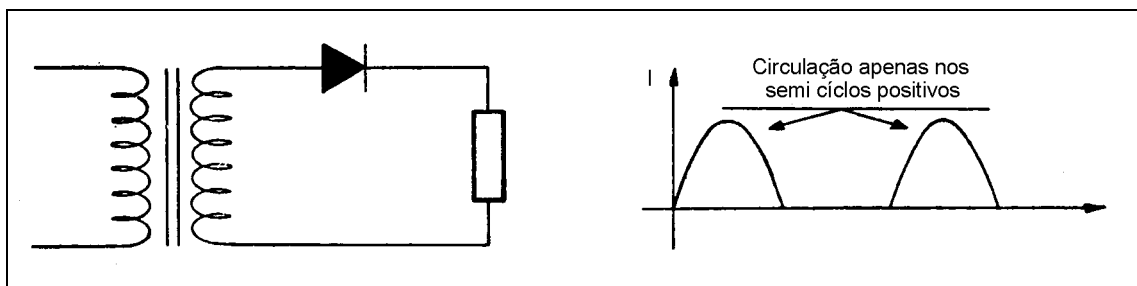
1. A tensão de saída é pulsante, diferindo sensivelmente de uma tensão contínua pura.



2. O rendimento é baixo (45%) em relação a tensão eficaz de entrada.

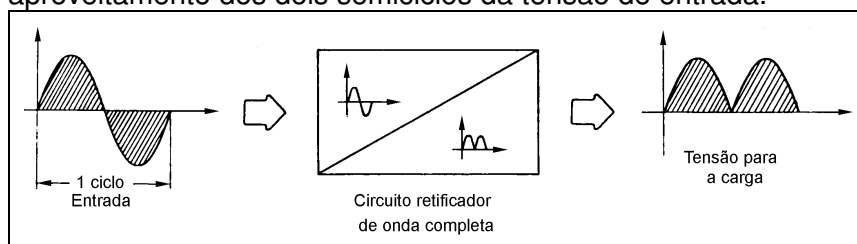


3. Nas retificações com transformador existe um mau aproveitamento da capacidade de transformação porque a corrente circula em apenas um semiciclo.



Retificação de onda completa

É um processo de conversão de corrente alternada em corrente contínua que faz um aproveitamento dos dois semiciclos da tensão de entrada.



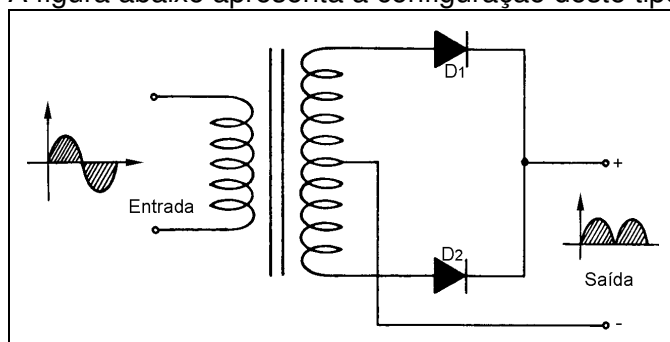
O circuito retificador de onda completa é o mais empregado nos equipamentos eletrônicos porque realiza um melhor aproveitamento da energia aplicada a entrada.

A retificação de onda completa com diodos semicondutores pode ser realizada de duas formas distintas:

- Empregando um transformador com derivação central e dois diodos.
- Empregando 4 diodos ligados em ponte.

Retificação de onda completa com derivação central

A figura abaixo apresenta a configuração deste tipo de circuito retificador.



Este tipo de retificação também é chamado de retificação de onda completa **Center tape**.

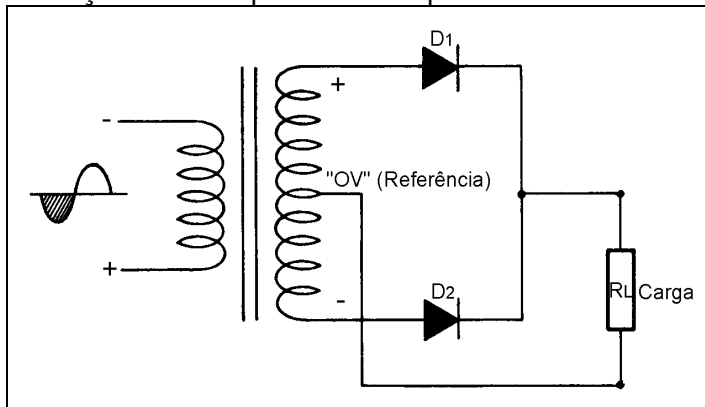
A expressão "Center tape" é inglesa e significa "derivação central".

Funcionamento

O princípio de funcionamento do circuito retificador de onda completa pode ser facilmente compreendido, considerando-se cada um dos semiciclos da tensão de entrada isoladamente.

Primeiro semiciclo

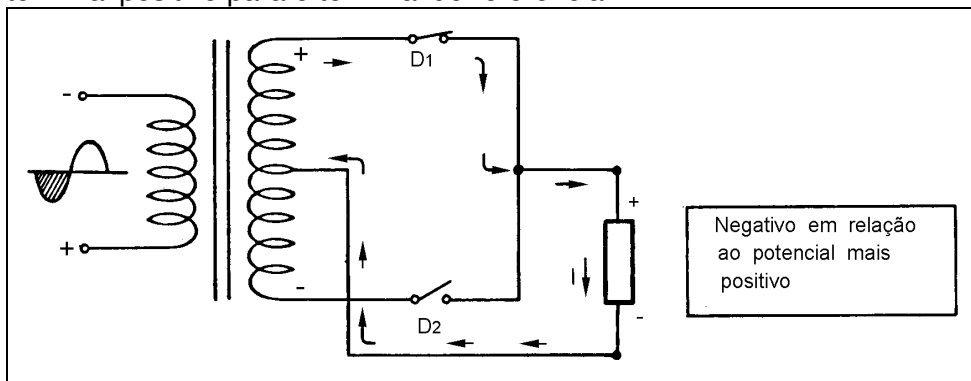
Considerando-se o terminal central do secundário como referência verifica-se a formação de duas polaridades opostas nos extremos das bobinas.



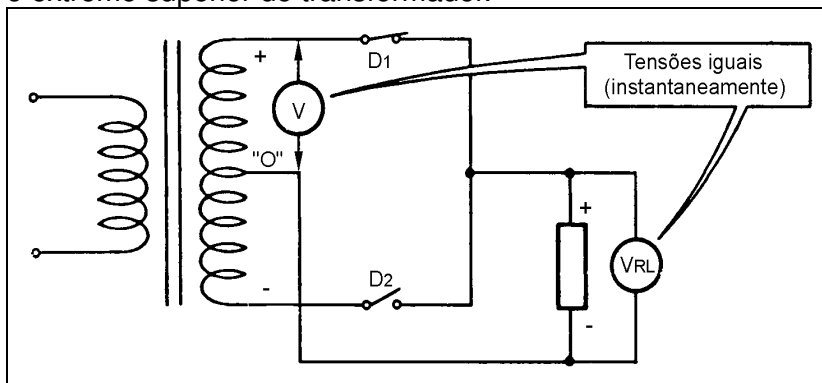
Nesta condição verifica-se que o diodo D_1 é polarizado diretamente, conduzindo, enquanto o diodo D_2 é polarizado inversamente, entrando em bloqueio.

Substituindo os diodos por seus circuitos equivalentes ideais obtém-se a configuração apresentada na figura abaixo.

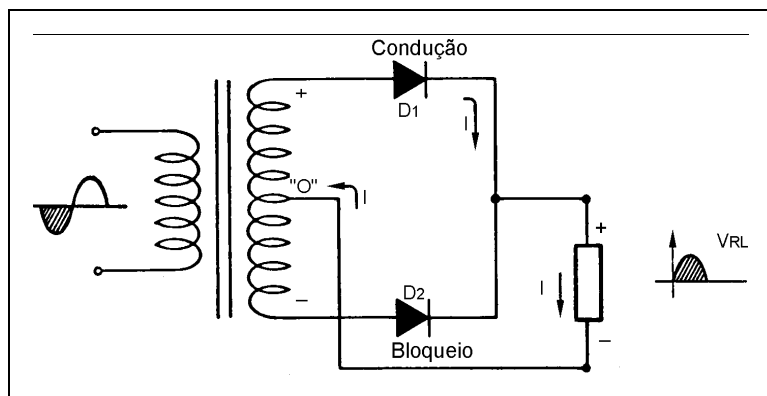
A condição de condução de D_1 permite a circulação de corrente através da carga do terminal positivo para o terminal de referência.



A tensão aplicada a carga é a tensão existente entre o terminal central do secundário e o extremo superior do transformador.

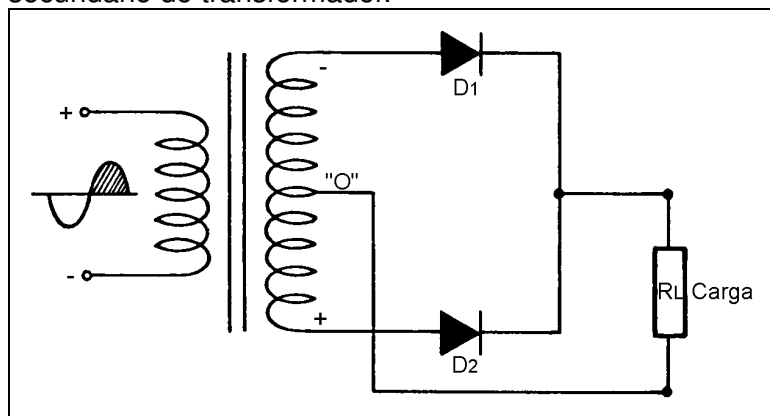


Durante todo o semiciclo analisado o diodo D_1 permanece em condução e a tensão na carga acompanha a tensão da parte superior do secundário.



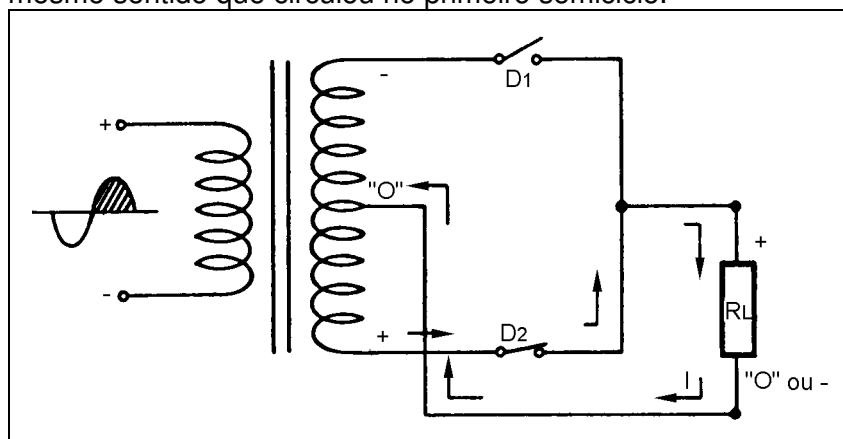
Segundo semiciclo

No segundo semiciclo da tensão de entrada ocorre uma inversão na polaridade do secundário do transformador.



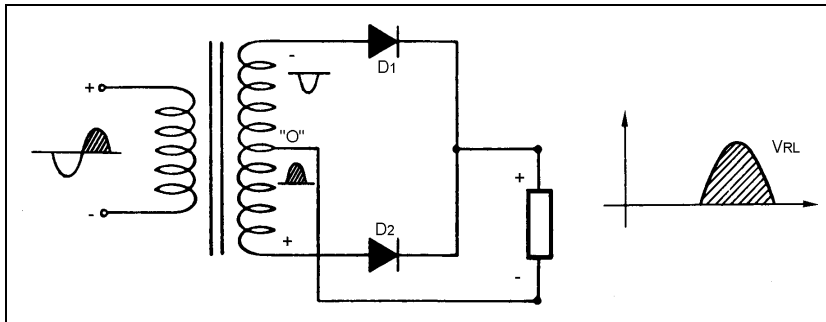
Nesta condição o diodo D_2 entra em condução e o diodo D_1 em bloqueio.

A corrente circula pela carga, passando através de D_2 que está em condução, no mesmo sentido que circulou no primeiro semiciclo.



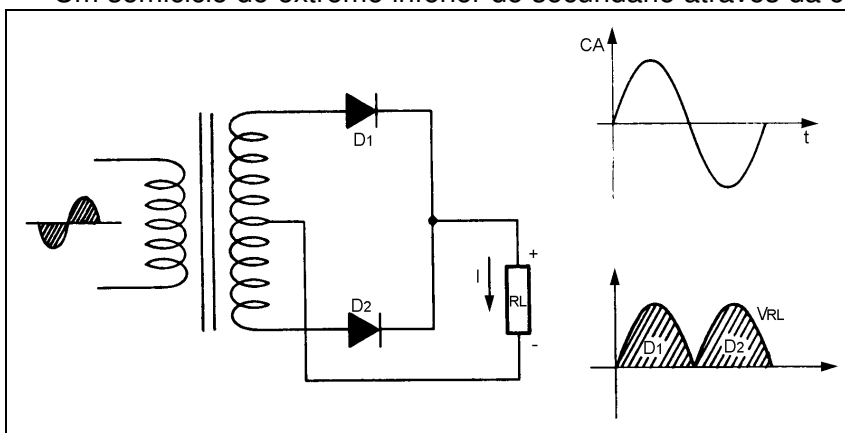
A tensão aplicada à carga é a tensão da bobina inferior do secundário do transformador.

Durante todo o semiciclo analisado o diodo D_2 permanece em condução e a tensão na carga acompanha a tensão da parte inferior do secundário.



Analisando um ciclo completo da tensão de entrada verifica-se que o circuito retificador entrega dois semiciclos de tensão sobre a carga:

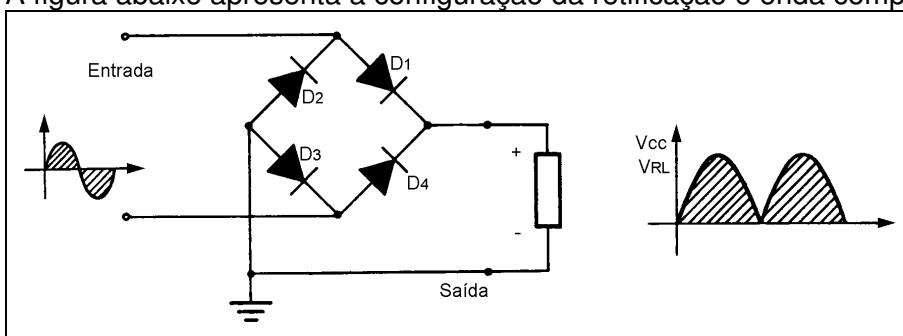
- Um semiciclo do extremo superior do secundário através da condução de D_1 .
- Um semiciclo do extremo inferior do secundário através da condução de D_2 .



Retificação de onda completa em ponte

A retificação em ponte, com quatro diodos, entrega a carga uma onda completa sem que seja necessário utilizar um transformador com derivação central.

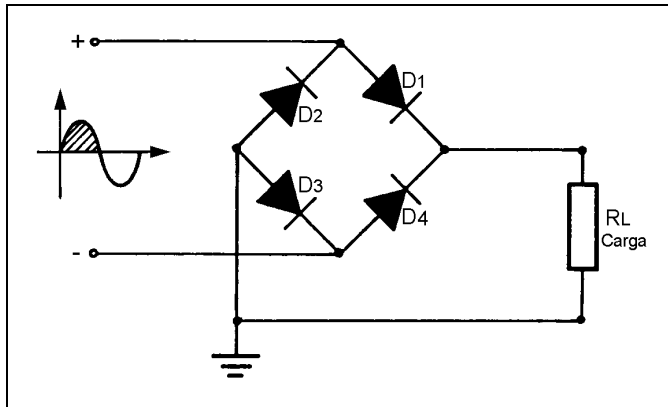
A figura abaixo apresenta a configuração da retificação e onda completa em ponte.



Funcionamento

Primeiro semiciclo

Considerando a tensão positiva no terminal de entrada superior.



A condição de polarização dos diodos se apresenta:

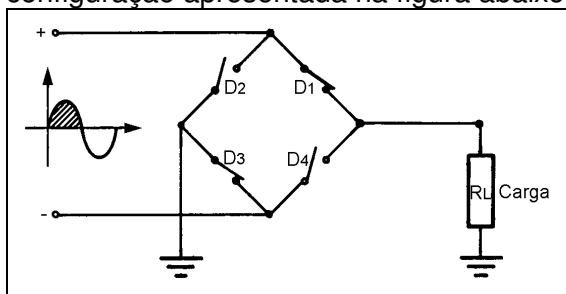
D₁ - Anodo positivo em relação ao catodo = Condução

D₂ - Catodo positivo em relação ao anodo = Bloqueio

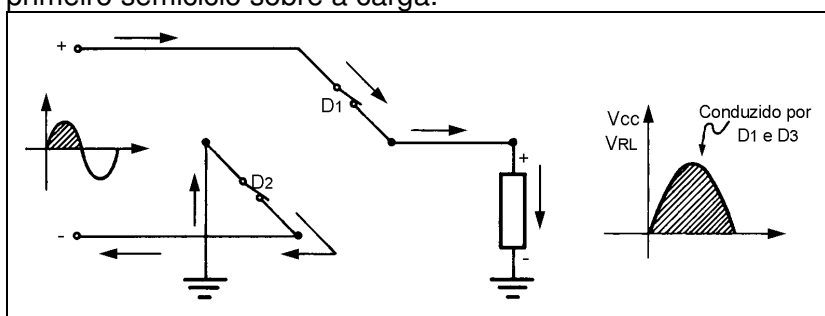
D₃ - Catodo negativo em relação ao anodo = Condução

D₄ - Anodo negativo em relação ao catodo = Bloqueio

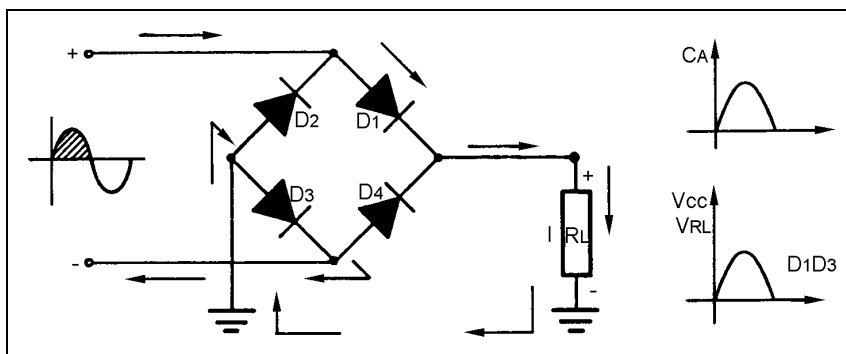
Substituindo-se os diodos pelo seus circuitos equivalentes ideais se obtém a configuração apresentada na figura abaixo.



Eliminando-se os diodos em bloqueio, que não interferem no funcionamento do circuito verifica-se que D₁ e D₃ em condução fecham o circuito elétrico, aplicando a tensão do primeiro semiciclo sobre a carga.

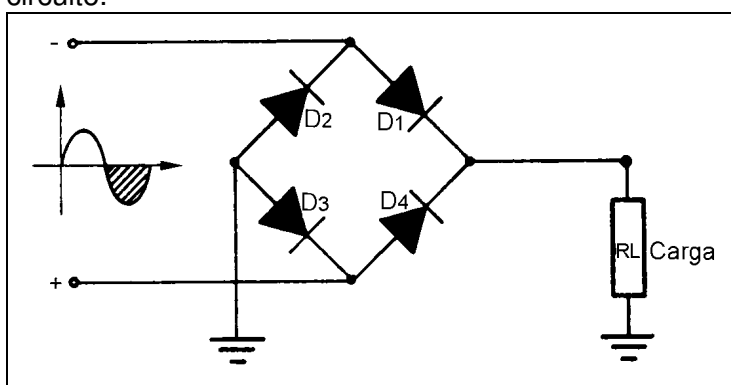


Recolocando-se os diodos na forma de componente (eliminando os circuitos equivalentes) observa-se como a corrente flui no circuito no primeiro semiciclo.



Segundo semiciclo

No segundo semiciclo ocorre a inversão da polaridade nos terminais de entrada no circuito.



A condição de polarização dos diodos se apresenta:

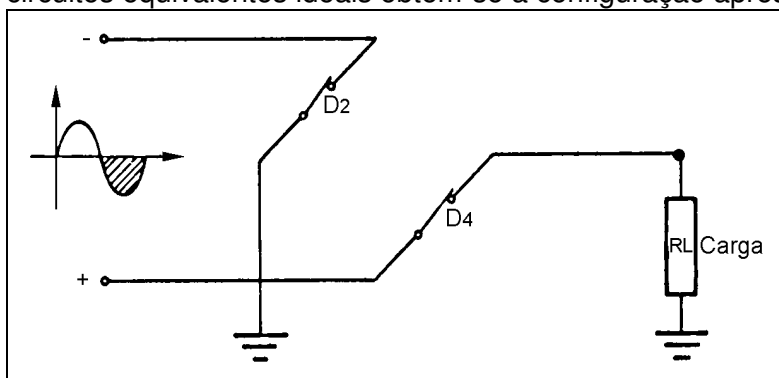
D_1 – Anodo negativo em relação ao catodo = Bloqueio

D_2 - Catodo negativo em relação ao anodo = Condução

D_3 - Catodo positivo em relação ao anodo = Bloqueio

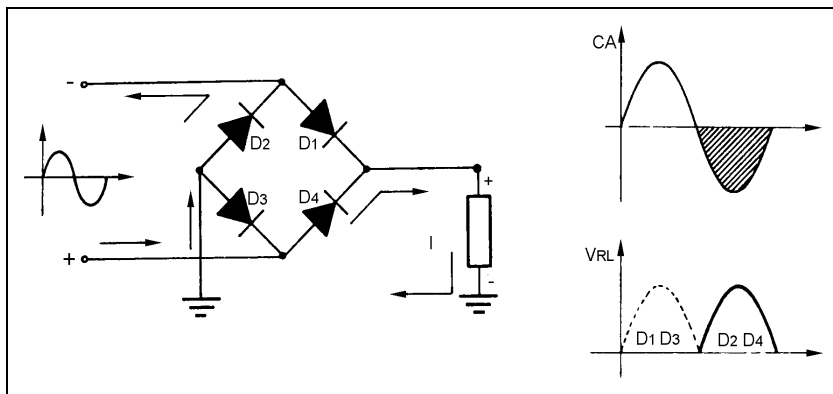
D_4 – Anodo positivo em relação ao catodo = Condução

Eliminando os diodos em bloqueio e substituindo os diodos em condução pelos seus circuitos equivalentes ideais obtém-se a configuração apresentada na figura abaixo.

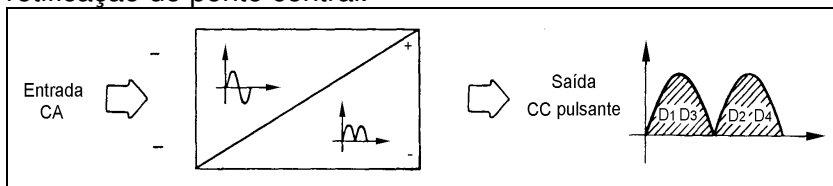


O circuito elétrico fechado por D_2 e D_4 aplica a tensão da entrada sobre a carga, fazendo a corrente circular na carga no mesmo sentido que no primeiro semiciclo.

Recolocando os diodos na forma original observa-se a forma como a corrente circula no circuito.



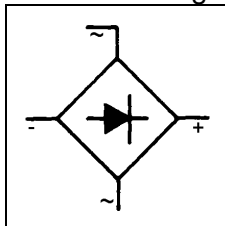
A ponte retificadora entrega a carga os dois semiciclos, da mesma forma que a retificação de ponto central.



A frequência da CC pulsante é o dobro da frequência da rede.

A ponte retificadora também pode ser representada em esquema conforme mostra a figura abaixo.

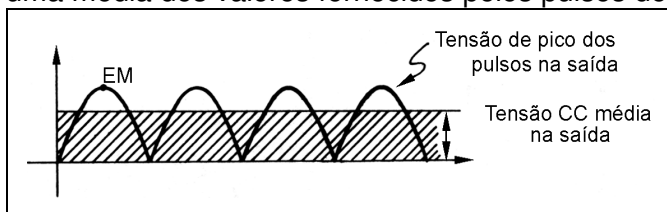
Nesta simbologia a barra do diodo aponta a saída positiva e a seta a saída negativa.



Tensão e corrente CC de saída

A retificação de onda completa entrega a carga dois semiperíodos de tensão para cada ciclo da tensão de entrada.

O valor de tensão média sobre a carga (medido com um voltímetro de CC na saída) é uma média dos valores fornecidos pelos pulsos de tensão.



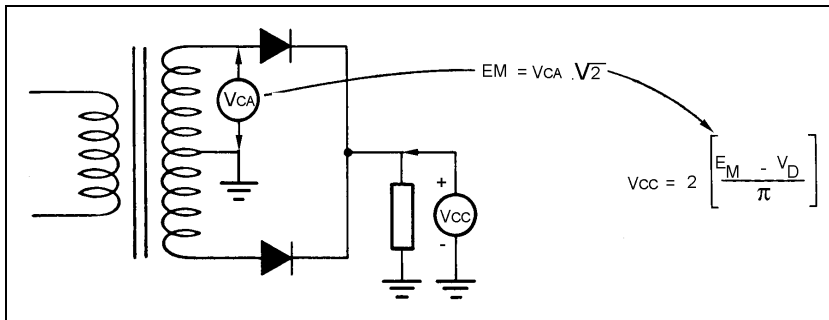
O rendimento da retificação de onda completa é o dobro da retificação de meia onda:

Tensão média na saída

$$V_{CC} = 2 \left[\frac{E_M - V_D}{\pi} \right] \text{ onde } E_M = V_{CA} \cdot \sqrt{2}$$

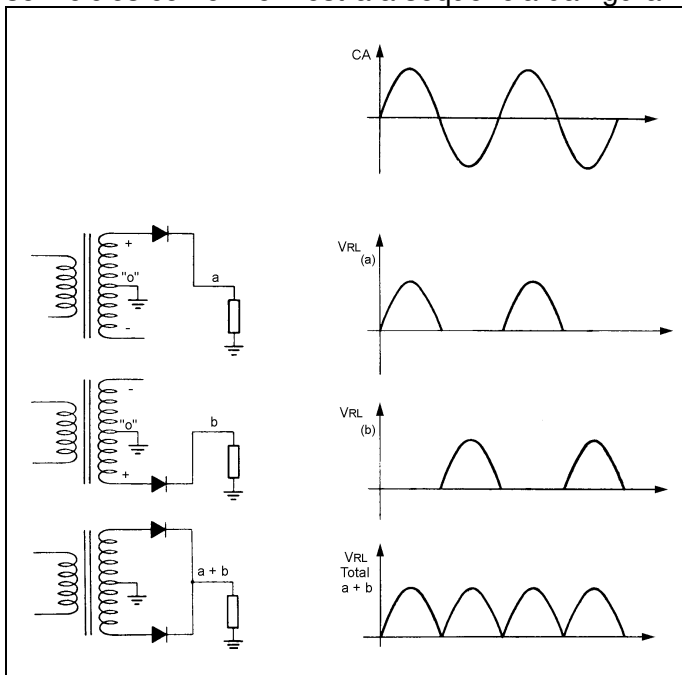
Tensão de saída em onda completa com derivação central

O valor E_M é determinado em função da tensão CA presente entre a derivação central e um dos extremos do transformador.



Isto se deve ao fato de que, na retificação de onda completa com ponto médio, cada metade do secundário do transformador está ativa durante um período e inativa em outro.

Observando atentamente este tipo de retificação é possível visualizar que o conjunto se constitui de duas retificações de meia onda, cada uma atuante em um dos semiciclos conforme mostra a seqüência da figura.



Para tensões de entrada acima de $10V_{CA}$ pode-se desconsiderar a queda de tensão no diodo, desenvolvendo a equação como:

$$V_{CC} = \left[\frac{E_M - V_D}{\pi} \right] \text{ desconsiderando } V_D \text{ têm-se:}$$

$$V_{CC} = 2 \cdot \frac{E_M}{\pi} \text{ como } E_M = V_{CA} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{CC} = 2 \cdot \frac{V_{CA} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \text{ simplificando } \frac{\sqrt{2}}{\pi} \text{ têm-se}$$

$$V_{CC} = 2 \cdot V_{CA} \cdot 0,45$$

Tensão contínua
média na saída

$$V_{CC} = V_{CA} \cdot 0,9$$

Para valores de V_{CA} maiores que 10V.

Corrente de saída

A corrente média na saída da retificação de onda completa depende da tensão média:

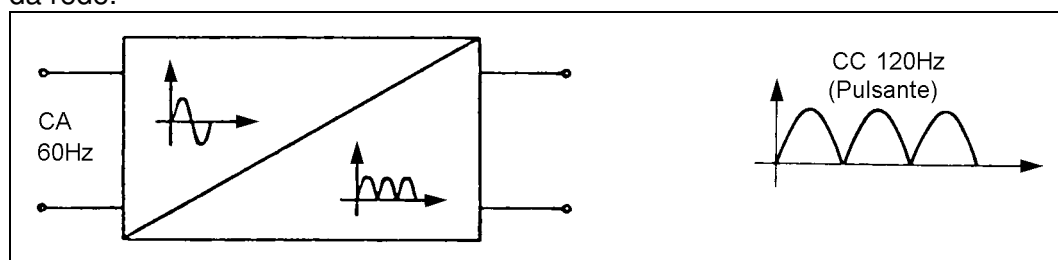
Tensão contínua
média de saída

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Relação entre frequência de entrada e frequência de saída

Na retificação de onda completa cada ciclo da tensão CA de entrada é transformado em dois semiciclos de tensão sobre a carga.

Desta forma, a frequência dos picos de tensão sobre a carga é o dobro da frequência da rede.

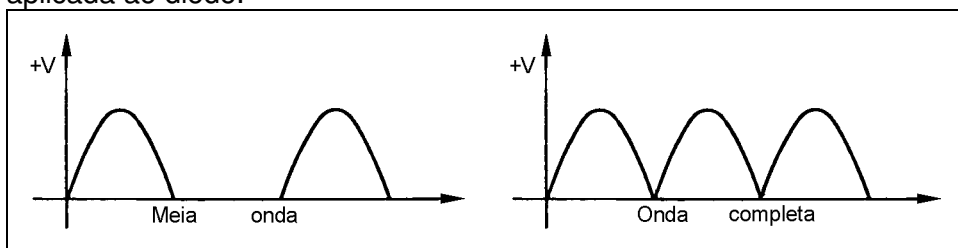


Filtro nas fontes de alimentação

As tensões contínuas puras se caracterizam por apresentarem polaridade definida e valor constante ao longo do tempo.

As tensões fornecidas pelos circuitos retificadores, tanto de meia onda como de onda completa são pulsantes.

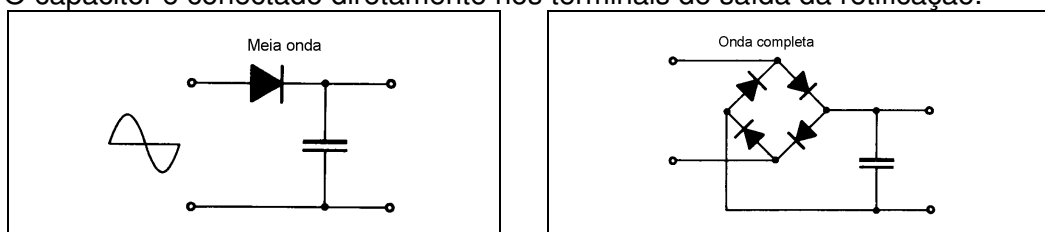
Embora tenham a polaridade definida, as tensões fornecidas pelos circuitos retificadores sofrem constante variação de valor, pulsando conforme a tensão senoidal aplicada ao diodo.



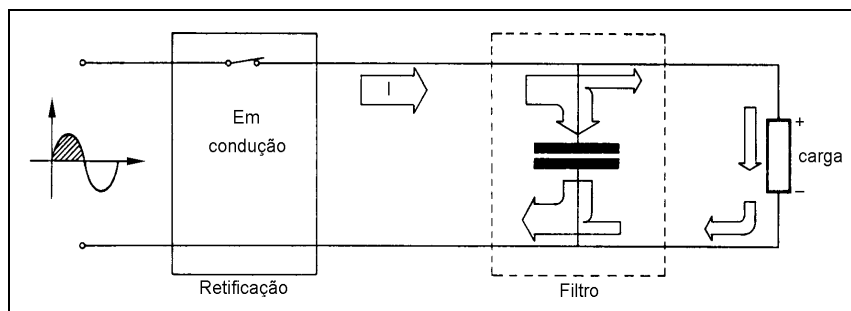
O capacitor como elemento de filtragem

A capacidade de armazenamento de energia dos capacitores pode ser utilizada como recurso para realizar um processo de filtragem na tensão de saída de um circuito retificador.

O capacitor é conectado diretamente nos terminais de saída da retificação.

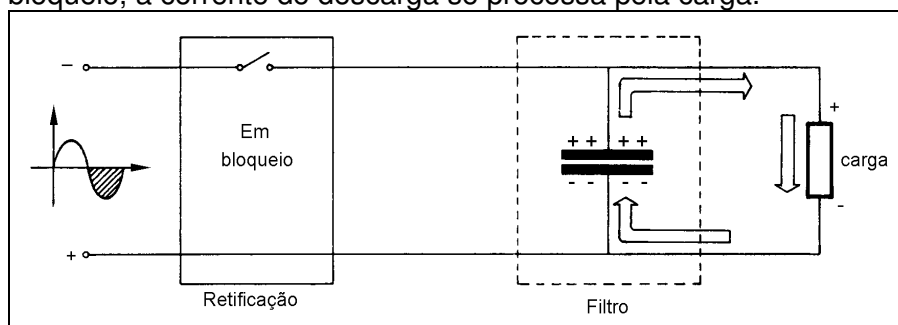


Nos intervalos de tempo em que o diodo conduz circula corrente através da carga e também para o capacitor. Neste período o capacitor armazena energia.



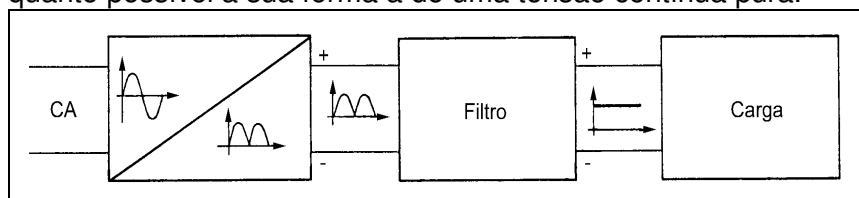
Nos intervalos de bloqueio do diodo o capacitor tende a descarregar a energia armazenada nas armaduras.

Como não é possível a descarga através da retificação, porque o diodo está em bloqueio, a corrente de descarga se processa pela carga.

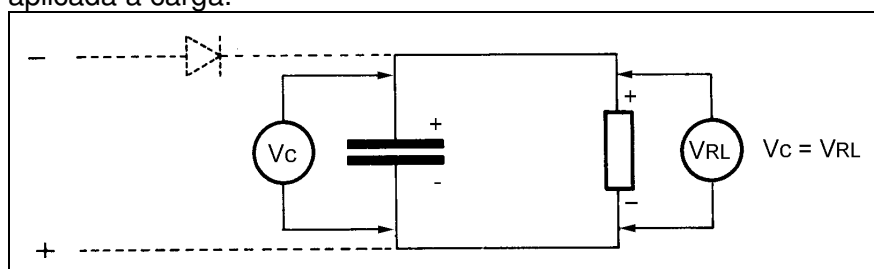


Esse circuito é denominado **circuito de filtro**.

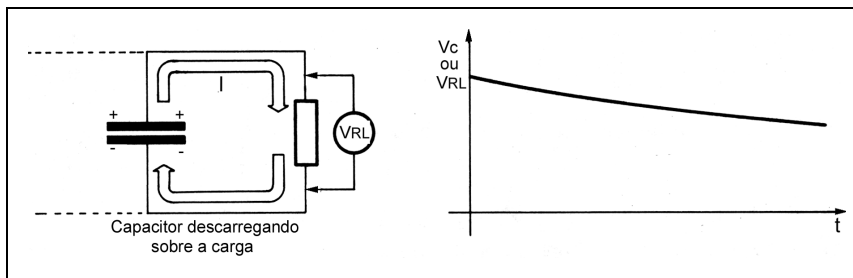
Os filtros atuam sobre a tensão de saída dos circuitos retificadores aproximando tanto quanto possível a sua forma à de uma tensão contínua pura.



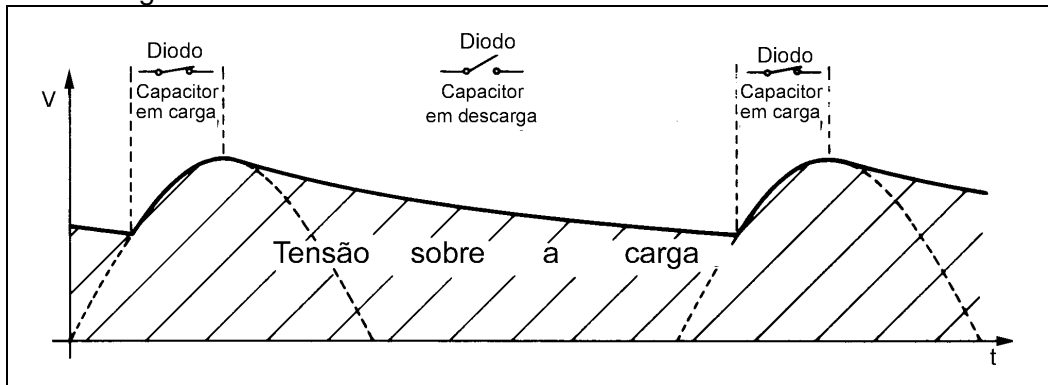
Como o capacitor está em paralelo com a carga, a tensão presente nas armaduras é aplicada a carga.



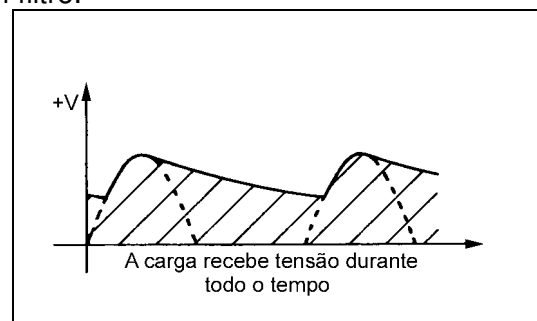
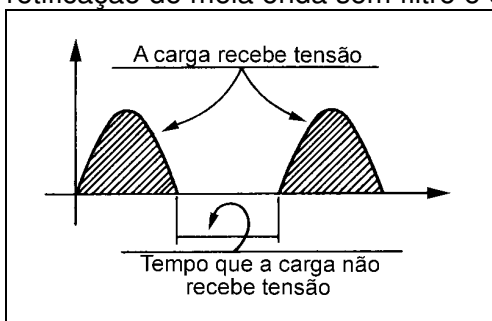
A corrente absorvida pela carga é fornecida pelo capacitor. Com o passar do tempo a tensão do capacitor diminui devido a sua descarga.



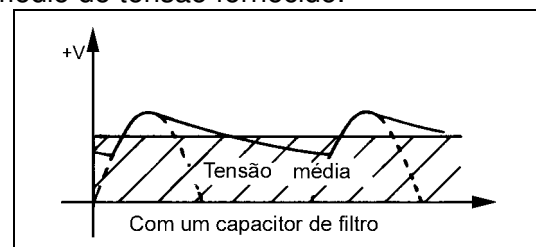
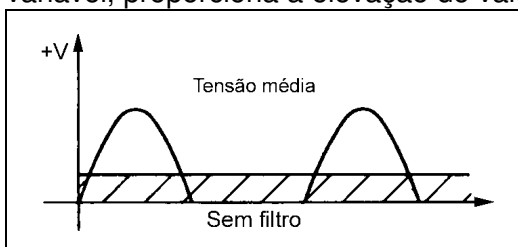
O capacitor permanece descarregado até que o diodo conduza novamente, fazendo uma recarga nas suas armaduras.



Com a colocação do capacitor a carga passa a receber tensão durante todo o tempo. As figuras abaixo mostram uma comparação entre a tensão de saída de uma retificação de meia onda sem filtro e com filtro.



A presença de tensão sobre a carga durante todo o tempo, embora com o valor variável, proporciona a elevação do valor médio de tensão fornecido.



A colocação de um filtro aumenta o valor da tensão média de saída de um circuito retificador.

Tensão de saída nos circuitos retificadores com filtro

A tensão CC média de saída em circuitos retificadores com filtro é dada pela equação:

$$V_{CC} = E_M - \frac{V_{ONDpp}}{2}$$

Onde:

V_{CC} → tensão CC na saída

E_M → tensão de pico $V_{CA} \cdot \sqrt{2}$, desconsiderando-se a queda nos diodos

V_{ONDpp} → tensão de ondulação de pico a pico

Quando um circuito retificador com filtro capacitivo está sem carga não há ondulação.

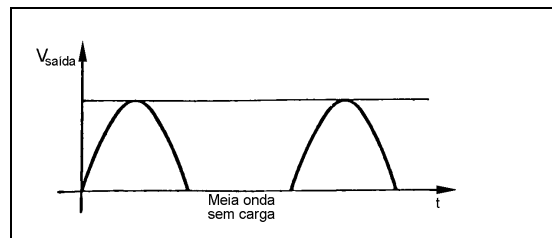
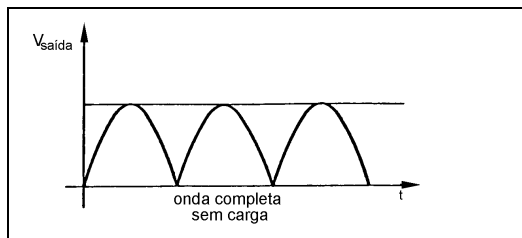
A tensão de saída é uma CC perfeita.

A tensão de saída é, neste caso:

$$V_{CC} = E_M - \frac{V_{ONDpp}}{2} \quad \text{como} \quad V_{ONDpp} = 0 \text{ tem-se}$$

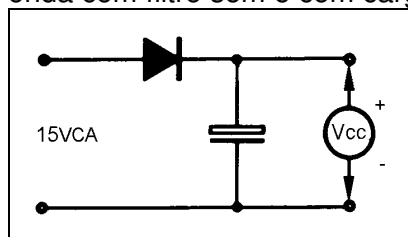
$$V_{CC} = E_M \quad \text{ou} \quad V_{CC} = V_{CA} \cdot \sqrt{2}$$

Isto é válido tanto para a retificação de meia onda com filtro para a onda completa com filtro.



Quando não há carga na saída a tensão de saída dos circuitos retificadores de meia onda e onda completa com filtro é a mesma.

Um exemplo ilustra o comportamento da tensão de saída de uma retificação de meia onda com filtro sem e com carga.



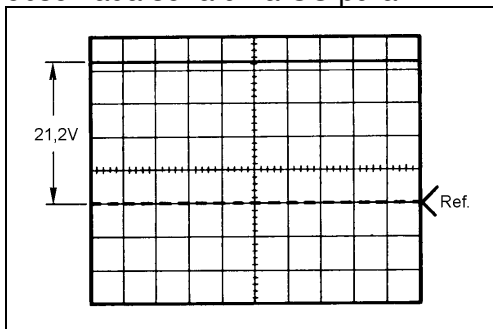
$$V_{CC} = E_M$$

$$V_{CC} = V_{CA} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{CC} = 15 \cdot 1,41 = 21,2V$$

$$V_{CC} = 21,2V$$

Conectando-se um osciloscópio em modo DC na saída da fonte a forma de onda observada seria uma CC pura.



Quando a carga é aplicada a ondulação aparece, fazendo com que a tensão de saída caia para valores inferiores a E_M .

A redução na tensão de saída se deve a ondulação, e será tanto maior quanto maior for a corrente solicitada pela carga.

Admitindo-se uma carga que provoque uma ondulação de 3 Vpp .

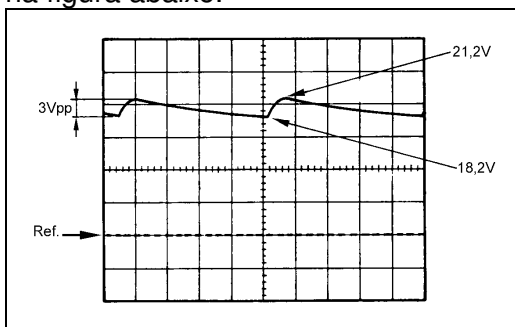
$$V_{CC} = E_M - \frac{V_{ONDpp}}{2}$$

$$E_M = V_{CA} \cdot \sqrt{2} \text{ (desprezando a queda no diodo)}$$

$$V_{CC} = 21,2 - \frac{3,0V_{pp}}{2}$$

$$V_{CC} = 19,7V$$

A forma de onda da saída, observada em osciloscópio, em modo DC, seria mostrada na figura abaixo.

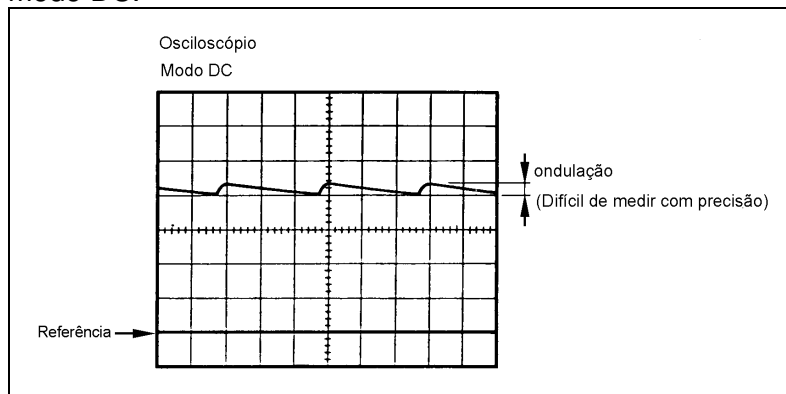


O valor médio da tensão de saída CC, devido a ondulação, cairia de 21,2V (sem carga) para 19,7V (média entre 21,2 e 18,2) devido a carga.

Observação da ondulação com osciloscópio

A ondulação é uma componente alternada presente no topo da forma de onda fornecida por uma fonte com filtro capacitivo e carga na saída.

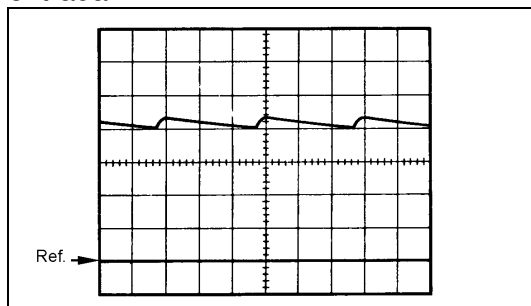
Como o valor desta ondulação é normalmente igual ou menor que 10% do valor da CC fornecida pela fonte, tornasse difícil medir o seu valor exato usando o osciloscópio no modo DC.



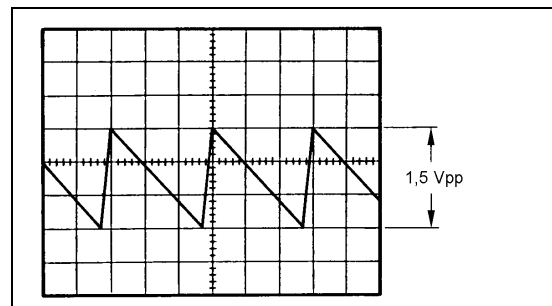
Para obter uma medida precisa da tensão de ondulação de pico a pico utiliza-se o modo AC.

Neste modo de entrada a componente CC da saída é eliminada de forma que o osciloscópio apresenta na tela apenas a ondulação. Isto permite aumentar o ganho vertical, ampliando apenas a ondulação na tela.

As figuras abaixo mostram mesma saída de uma fonte, nos modos DC e AC de entrada.



Modo DC vertical – 5V/Div



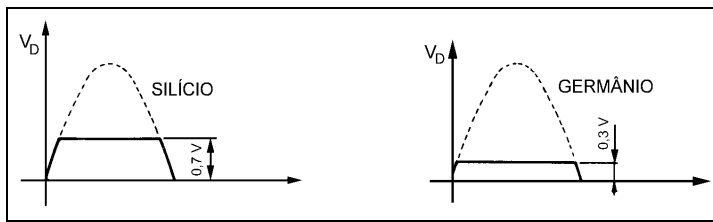
Modo CA vertical – 0,5V/Div

Regimes máximos do diodo em CA

Os regimes máximos em corrente alternada determinam os limites de corrente de condução e tensão inversa dos diodos empregados em circuitos retificadores.

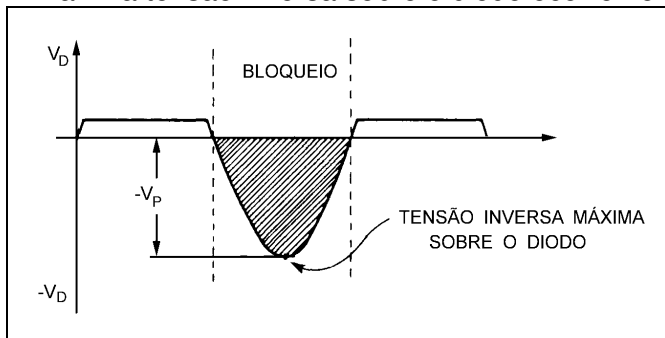
Tensão inversa do diodo

Nos circuitos retificadores o diodo está sujeito a um regime intermitente de ciclos de condução e bloqueio. Durante semiciclos de condução a tensão sobre o diodo é um valor típico que depende do material semicondutor.

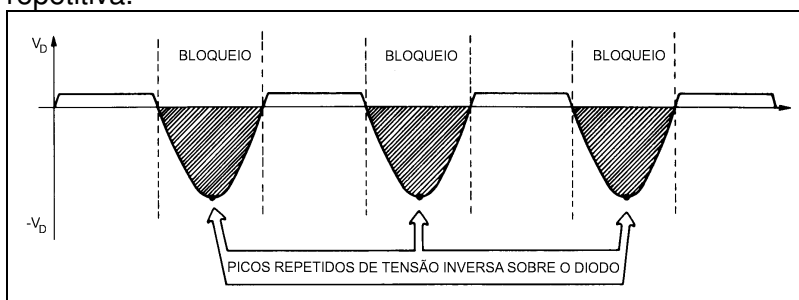


Durante os semiciclos de bloqueio a tensão sobre o diodo assume a forma senoidal de CA.

A máxima tensão inversa sobre o diodo ocorre no pico do semiciclo de bloqueio.

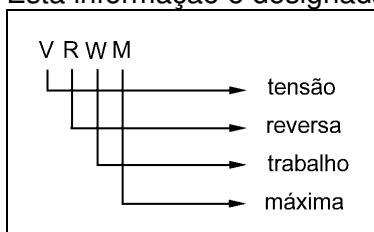


Este valor acontece sobre o diodo a cada semi período de bloqueio, de forma repetitiva.



Os folhetos técnicos de diodos, fornecidos pelos fabricantes, trazem o valor de tensão inversa de trabalho máxima que o componente pode suportar.

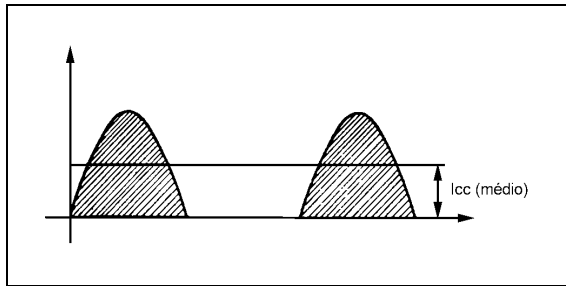
Esta informação é designada pelas letras VRWM que significa:



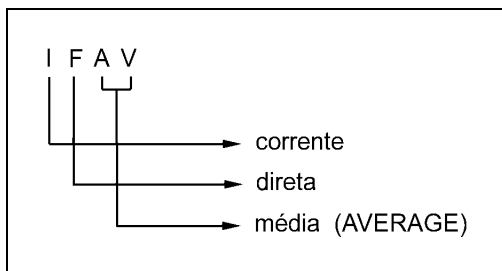
Corrente média nos diodos

Os diodos utilizados nos circuitos retificadores conduzem corrente em ciclos intermitentes.

Estes picos de corrente se traduzem em valor de corrente média que circula para a carga através do diodo (ou diodos).

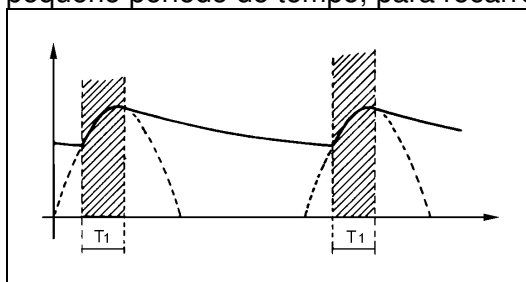


Os folhetos técnicos, fornecidos pelos fabricantes, trazem o valor de corrente média que cada diodo pode suportar. Esta corrente é designada pela sigla I_{FAV} que significa:



Corrente de pico nos diodos

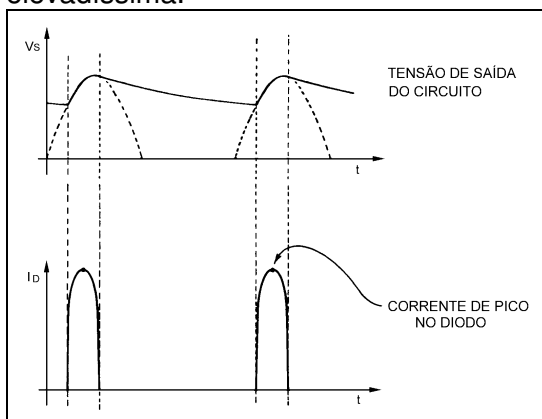
Nos circuitos retificadores com filtro o diodo retificador conduz apenas durante um pequeno período de tempo, para recarregar o capacitor (tempo de carga).



$T_1 = \text{Tempo de carga do capacitor (diodo em condução)}$

Durante o curto período de tempo que o diodo conduz o capacitor recebe toda a carga perdida durante o período de descarga.

Isto faz com que a intensidade de corrente durante a condução do diodo seja elevadíssima.



Esta corrente é denominada de **corrente de pico repetitiva do diodo**, sendo fornecida nos catálogos e manuais de diodos.

Esta corrente é difícil de determinar matematicamente, porque depende de muitos fatores. Porém, deve-se lembrar sempre que quanto maior o capacitor de filtro maior o seu valor.

A corrente de pico repetitiva é a razão pela qual não se pode aumentar indefinidamente o capacitor de filtro de uma fonte.

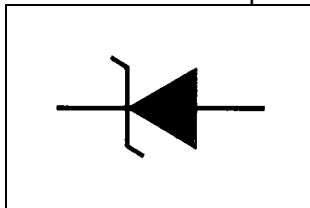
Diodo zener

O diodo zener é um tipo especial de diodo utilizado como regulador de tensão.

A sua capacidade de regulação de tensão é empregada principalmente nas fontes de alimentação, visando a obtenção de uma tensão de saída fixa.

O diodo zener é essencialmente um regulador de tensão.

O diodo zener é representado nos diagramas pelo símbolo abaixo.



Comportamento do diodo zener

O comportamento do diodo zener depende fundamentalmente da forma como é polarizado.

- Com polarização direta;
- Com polarização inversa.

Polarização direta

Com polarização direta o diodo zener se comporta da mesma forma que um diodo retificador, entrando em condução e assumindo uma queda de tensão típica.

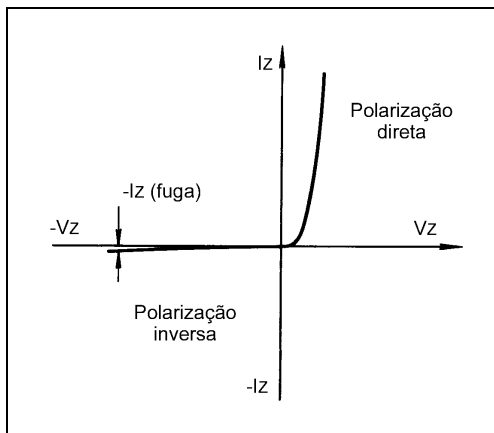
Polarizado diretamente o diodo zener se comporta como um diodo retificador convencional.

Normalmente o diodo zener não é utilizado com polarização direta nos circuitos eletrônicos.

Polarização inversa

Até um determinado valor de tensão inversa, o diodo zener se comporta como um diodo comum, ficando em bloqueio.

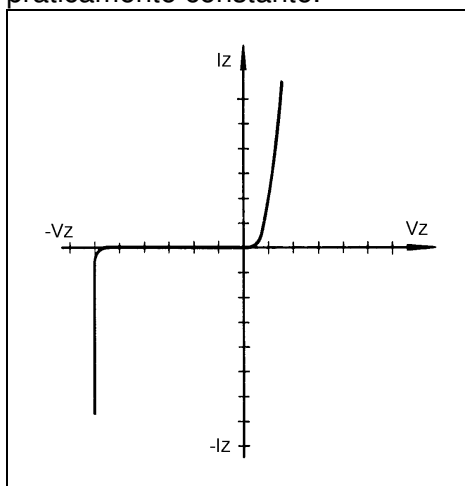
No bloqueio, circula no diodo zener uma pequena corrente de fuga, conforme mostra a figura a seguir.



O sinal negativo de I_z ($-I_z$) na figura anterior indica que esta corrente circula no sentido inverso pelo diodo.

Em um determinado valor de tensão inversa, o diodo zener entra subitamente em condução, apesar de polarizado inversamente.

A corrente inversa aumenta rapidamente e a tensão sobre o zener se mantém praticamente constante.



O valor de tensão inversa que faz com que o diodo zener entre em condução é denominado de **tensão zener**.

Enquanto houver corrente inversa circulando no diodo zener a tensão sobre seus terminais se mantém praticamente no valor de tensão zener.

O funcionamento típico do diodo zener é com corrente inversa, o que estabelece uma tensão fixa sobre seus terminais.

É importante observar que, no sentido reverso, o diodo zener difere do diodo retificador convencional.

Um diodo retificador nunca chega a conduzir intensamente no sentido reverso e se isto acontecer o diodo estará em curto, danificado permanentemente.

O diodo zener é levado propositalmente a conduzir no sentido reverso, visando obter a tensão zener constante sobre seus terminais, sem que isto danifique o componente.

Características do diodo zener

As características elétricas importantes do diodo zener são:

- Tensão zener;
- Potência zener;
- Coeficiente de temperatura;
- Tolerância.

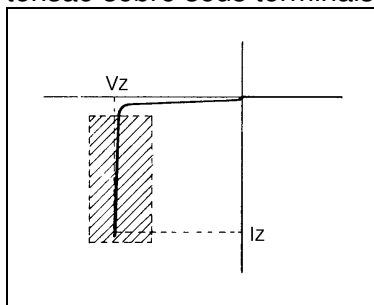
Tensão zener

A tensão zener (tensão de ruptura) dos diodos zener depende do processo de fabricação e da resistividade da junção semicondutora. Durante a ruptura o diodo zener fica com o valor de tensão zener sobre seus terminais.

Os diodos zener são fabricados para valores de tensão zener da ordem de 2V até algumas dezenas de volts. Este valor é fornecido pelo fabricante nos folhetos técnicos dos diodos zener.

Potência zener

O diodo zener funciona na região de ruptura, apresentando um valor determinado de tensão sobre seus terminais (V_Z) e sendo percorrido por uma corrente inversa.



Nestas condições verifica-se que o componente dissipa potência, em forma de calor.

A potência dissipada é dada pelo produto de tensão e corrente:

$$\begin{array}{lcl} P = V \cdot I & \Rightarrow & P_Z = V_Z \cdot I_Z \\ \text{POTÊNCIA} & & \text{POTÊNCIA ZENER} \end{array}$$

Os diodos zener são fabricados para determinados valores de potência de dissipação (0,4W, 1W, 10W).

Estes valores determinam a dissipação máxima que o componente pode suportar.

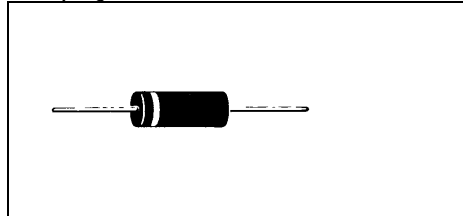
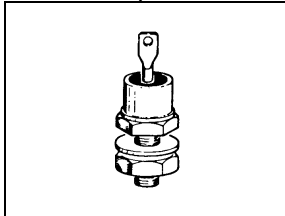
Cada diodo zener tem um valor de dissipação máxima que é fornecido pelo fabricante nos folhetos técnicos.

Utilizando os valores de tensão zener e potência zener máxima, fornecidos pelo fabricante, pode-se determinar a corrente máxima que o zener pode suportar.

$$\begin{array}{lcl} P_Z = V_Z \cdot I_Z & & P_{Z\text{máx}} = V_Z \cdot I_{Z\text{máx}} \\ \Rightarrow & & I_{Z\text{máx}} = \frac{P_{Z\text{máx}}}{V_Z} \end{array}$$

Este valor da corrente não pode ser excedido sob pena de danificar o diodo zener por excesso de aquecimento.

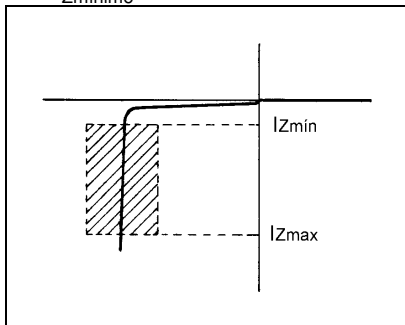
Os diodos zener de pequena potência (até 1W) podem ser encontrados em encapsulamento de vidro ou plástico enquanto os de maior potência são geralmente metálicos para facilitar a dissipação de calor.



A região de funcionamento do zener, é determinada por dois valores de corrente, uma vez que sua tensão inversa é constante.

Estes valores de corrente são:

- $I_{Z\text{máximo}}$;
- $I_{Z\text{mínimo}}$.



O valor de $I_{Z\text{máximo}}$ é definido pela potência zener:

$$I_{Z\text{máx}} = \frac{P_Z}{V_Z}$$

O valor de $I_{Z\text{mínimo}}$ é definido como 10% do valor de $I_{Z\text{máximo}}$.

$$\Rightarrow I_{Z\text{mín}} = \frac{I_{Z\text{máx}}}{10}$$

Coeficiente de Temperatura

Os diodos zener são fabricados com materiais semicondutores, que sofrem influência da temperatura nas suas condições de funcionamento (dependência térmica).

A tensão zener se modifica com a variação de temperatura do componente.

A influência da variação de temperatura na tensão zener é expressa sob a forma de relação entre dois valores (tensão e temperatura).

Esta relação define em quantos milivolts a tensão zener se modifica para cada grau centígrado de alteração da temperatura do componente.

COEFICIENTE DE TEMPERATURA

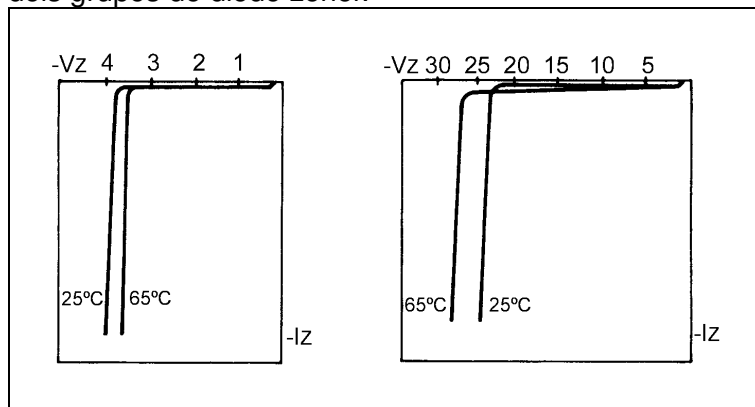
⇒

mV/°C

Devido a uma diferença no princípio de funcionamento interno, os diodos zener são divididos em dois grupos:

Tensão zener	Coeficiente de temperatura	Significado
Até 6V	-mV/°C	a tensão sobre o zener diminui com o aumento da temperatura
Acima de 6V	+mV/°C	a tensão sobre o zener aumenta com o aumento da temperatura

As curvas características da figura abaixo exemplificam a dependência térmica nos dois grupos de diodo zener.



Observação

Os valores de tensão zener fornecidos pelo fabricante nos folhetos técnicos são válidos para a temperatura de 25° C.

Tolerância

A tolerância do diodo zener especifica a variação que pode existir entre o **valor especificado** e o valor de tensão reversa do diodo zener.

Isto significa que um diodo zener de 12V pode ter uma tensão reversa real, por exemplo, de 11,5V.

Para especificar a tolerância os fabricantes de diodo zener utilizam uma codificação:

- Tolerância de 5% - a designação do diodo zener vem acompanhada de uma letra A. Exemplo: 1N4742A

Consultando o manual de diodos zener se verifica que o diodo 1N4742 é de 12V, 1W.

A letra A indica que pode existir uma variação de $\pm 5\%$ no valor de tensão do zener (de 11,4V a 12,6V).

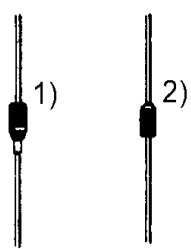




Tolerância de 10%

A designação do diodo vem sem letra no final.

Exemplo: 1N4733

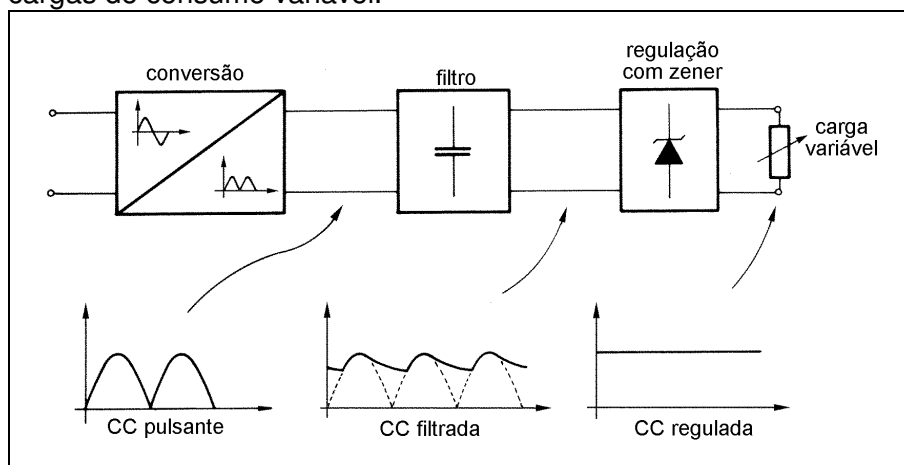
Características 5,1V; 1W; 10% de tolerância (de 4,85V a 5,35V).

A tabela abaixo apresenta a especificação de alguns diodos zener.

					
Vz +5%	400mV	1,3W		2,5W	20W 10W
1,4 2,1 2,8 3,3 3,6 3,9 4,3 4,7 5,1 5,6 6,2 6,8 7,5 8,2 9,1 10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75	BZX 76 @I _z =1mA DO.7 [C1V4 C2V1 C2V8 --- C3V6]	BZX 61 @I _z =20mA [C7V5 C8V2 C9V1 C10 C11 C12 C13 C15 C16 C18 C20 C22 C24 C27 C30 C33 C36 C39 C43 C47 C51 C56 C62 C68 C75]	BZX 87 @I _z =50mA [C5V1 C5V6 C6V2 C6V8 C7V5 C8V2 C9V1 C10 C11 C12 C13 C15 C16 C18 C20 C22 C24 C27 C30 C33 C36 C39 C43 C47 C51 C56 C62 C68 C75]	BZX 70 @I _z =50mA [C10 C11 C12 C13 C15 C16 C18 C20 C22 C24 C27 C30 C33 C36 C39 C43 C47 C51 C56 C62 C68 C75]	BZZ 14* BZZ 15* BZZ 16* BZY 93 @I _z =2A @I _z =1A @I _z =0,5mA @I _z =0,2mA [C7V5 C8V2 C9V1 C10 C11 C12 C13 C15 C16 C18 C20 C22 C24 C27 C30 C33 C36 C39 C43 C47 C51 C56 C62 C68 C75]
	DO-35 ²⁾	DO-15	SOD-35	(Plástico)	DO-4

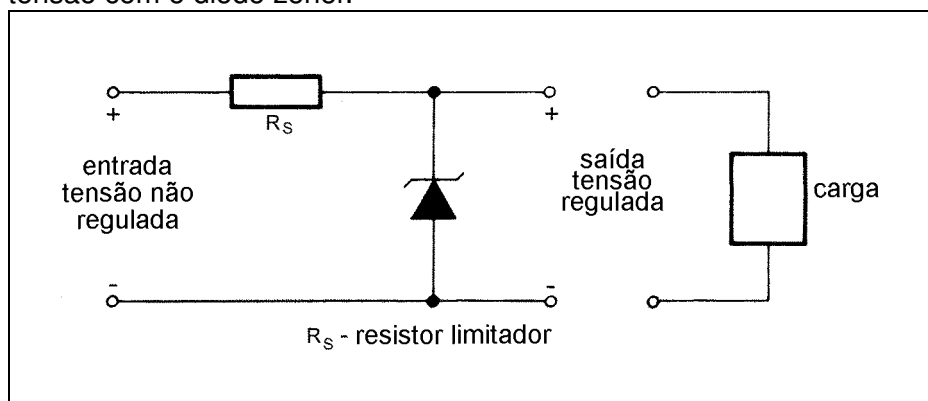
Diodo zener como regulador de tensão

As características de comportamento do diodo zener na região de ruptura permitem que o componente seja utilizado em circuitos que possibilitam a obtenção de uma tensão regulada, a partir de fontes que forneçam tensões variáveis ou mesmo com cargas de consumo variável.



Para que o diodo zener seja utilizado como regulador de tensão é necessário introduzir junto com o componente, no circuito regulador, um resistor que limite a corrente do zener abaixo do seu valor máximo ($I_{zmáximo}$).

A figura a seguir apresenta a configuração característica de um circuito regulador de tensão com o diodo zener.



A tensão sobre a carga é a mesma do diodo zener porque carga e zener estão em paralelo.

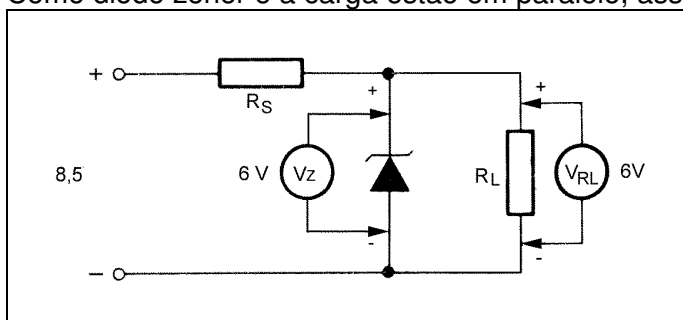
Funcionamento do circuito regulador

O circuito regulador com diodo zener deve receber na entrada uma tensão no mínimo 40% maior que o valor desejado na saída para que seja possível efetuar a regulação. Assim, se a tensão de saída desejada é de 6V o circuito regulador deve utilizar um diodo zener com $V_Z = 6V$ e tensão de entrada de pelo menos 8,5V.

Condição normal

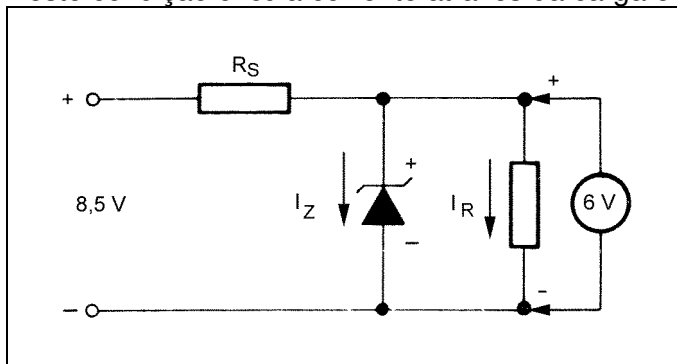
A aplicação de tensão de entrada superior a tensão de ruptura do diodo zener, coloca o componente na região de ruptura. Desta forma sobre o zener assume o valor característico V_Z .

Como diodo zener e a carga estão em paralelo, assume a mesma tensão.

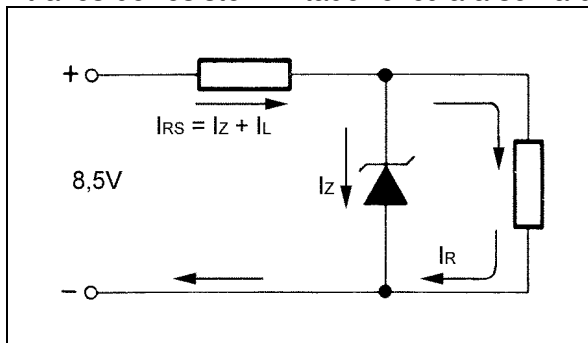


$$V_{RL} = V_Z$$

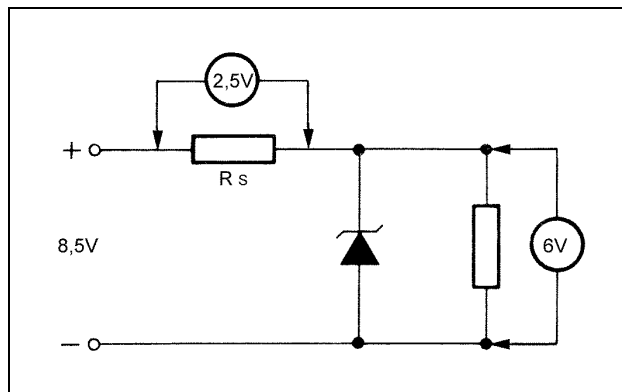
Neste condição circula corrente através da carga e do diodo zener.



Através do resistor limitador circula a soma das correntes do zener e da carga.

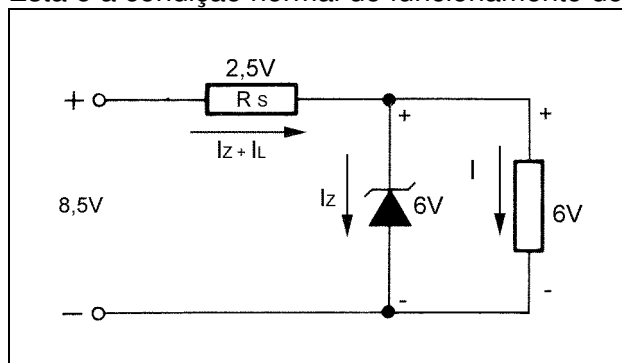


Estas correntes provocam uma queda de tensão sobre o resistor, cujo valor é exatamente a diferença entre a tensão da entrada e a tensão do zener.



$$V_{RS} = V_{ENT} - V_Z$$

Esta é a condição normal de funcionamento do circuito.



Condições de regulação

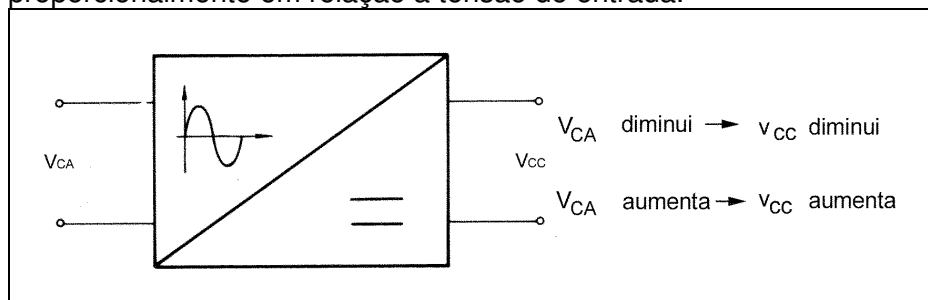
A partir da condição normal de funcionamento são possíveis três situações distintas:

- Regulação de tensão quando a tensão de entrada está sujeita a variações.
- Regulação de tensão quando o consumo de corrente de carga pode ser variável.
- Regulação de tensão quando a tensão de entrada e a corrente de carga variam.

Regulação de tensão com tensão de entrada variável

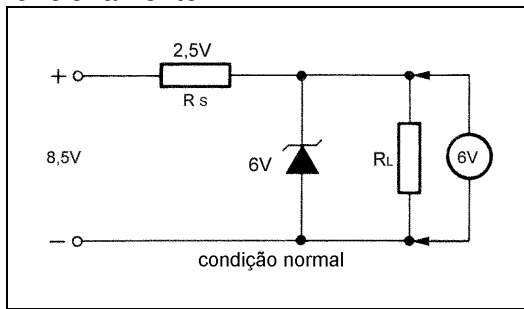
Esta situação é muito comum em circuitos eletrônicos alimentados pela rede elétrica CA.

A tensão fornecida pelas fontes retificadoras alimentadas pela rede elétrica CA variam proporcionalmente em relação a tensão de entrada.



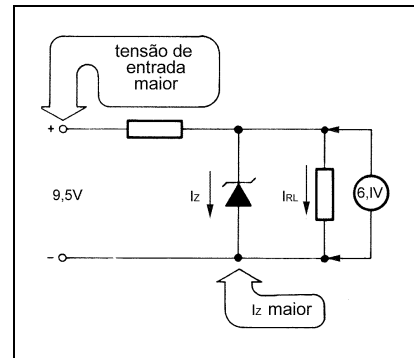
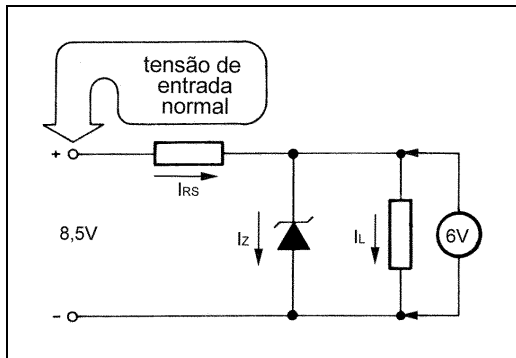
Para conseguir que a tensão CC fornecida aos circuitos eletrônicos alimentados pela rede CA seja constante, são utilizados circuitos reguladores com diodo zener. A seguir está descrita a forma como circuito regulador atua quando ocorre variação na tensão

de entrada, tomando como referência um circuito na condição normal de funcionamento.



Aumento na tensão de entrada

Quando ocorre um aumento na tensão de entrada este aumento tende a se transferir para a carga. Entretanto, o zener em paralelo com a carga mantém a tensão na carga constante; a do zener diminui, permitindo a circulação de um valor de corrente zener maior ($V_z = R_z \downarrow, I_z \uparrow$)



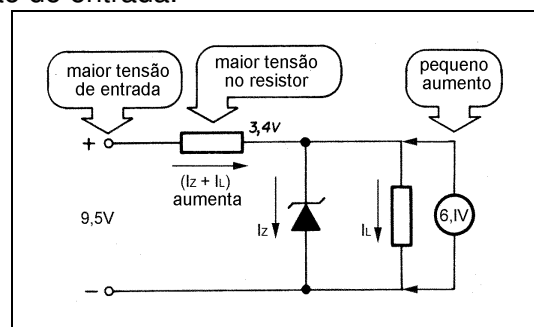
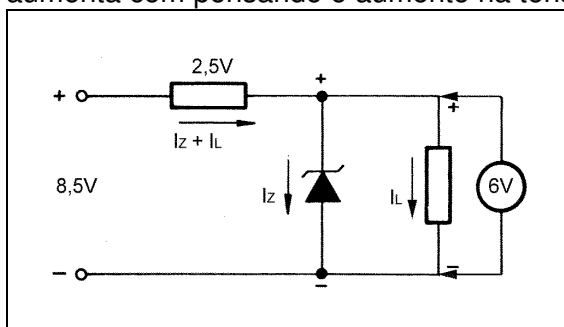
Resumindo:

Com o aumento na tensão de entrada.

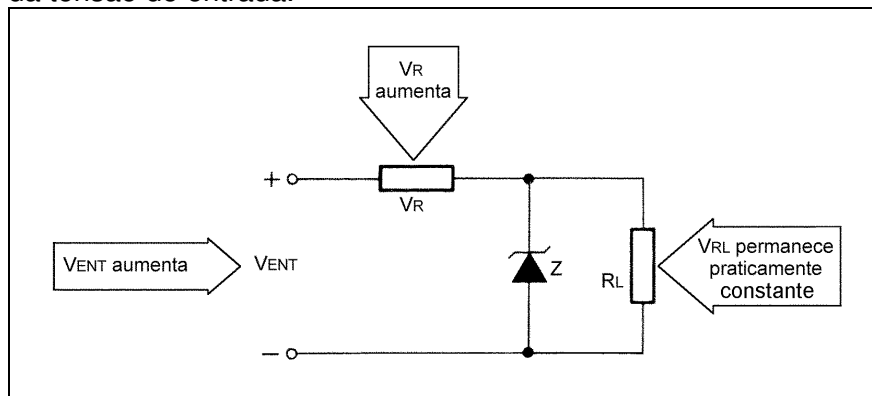
- A tensão e corrente na carga permanecem praticamente constantes.
- A corrente do zener aumenta.

A soma das correntes do zener e carga ($I_Z + I_{RL}$) circula no resistor limitador.

Com acréscimo da corrente do zener aumenta também a corrente no resistor limitador ($I_L + I_Z \uparrow = I_{RS} \uparrow$) Com acréscimo da corrente no resistor limitador a sua queda de tensão aumenta com pensando o aumento na tensão de entrada.



Na prática, observa-se um pequeno aumento na tensão zener (por exemplo de 6V para 6,1V). A figura a seguir ilustra o comportamento do circuito regulador com o aumento da tensão de entrada.

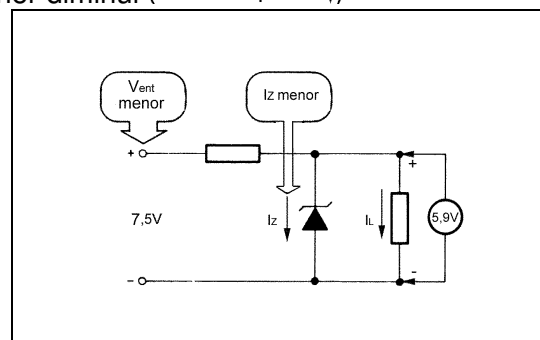
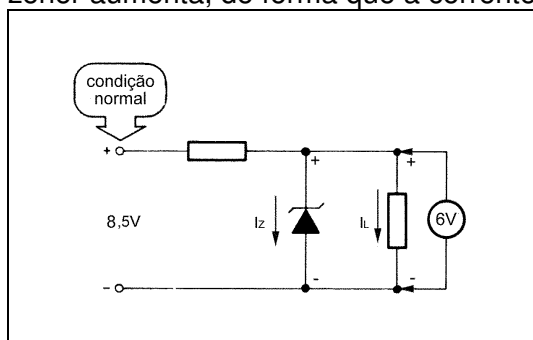


Redução na tensão de entrada

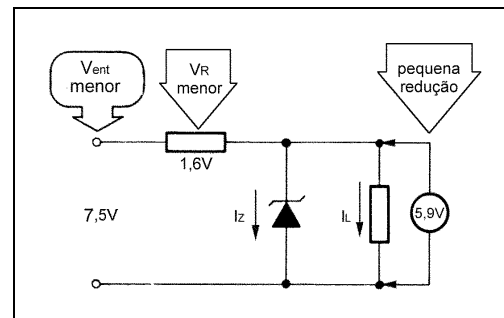
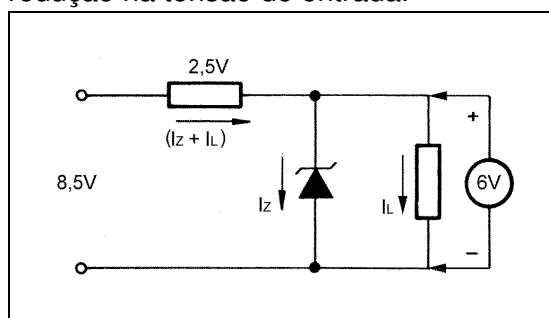
Quando há uma redução de entrada o zener se comporta de forma inversa.

Embora a tensão de entrada diminua, o zener em paralelo com a carga mantém a tensão de saída constante.

Para que a tensão no zener (e na carga) permaneça constante a resistência interna do zener aumenta, de forma que a corrente zener diminui ($V_Z = R_Z \uparrow \cdot I_Z \downarrow$)

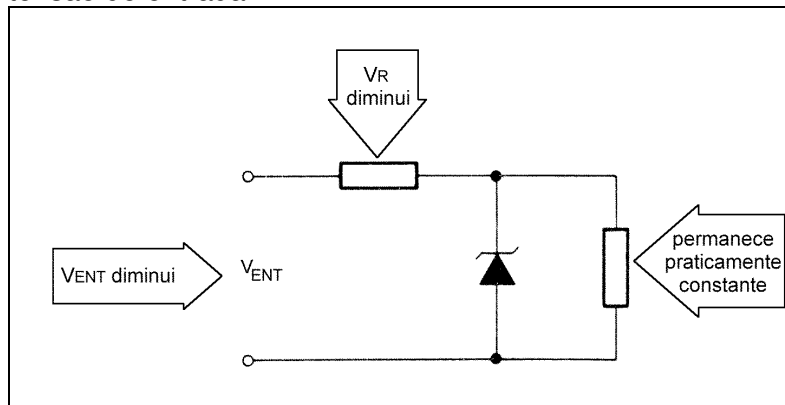


Com a diminuição de I_Z a corrente que circula no resistor limitador ($I_Z + I_{RL}$) se reduz. Isto provoca a redução na queda de tensão no resistor limitador, compensando a redução na tensão de entrada.



Verifica-se que a tensão sobre a carga permanece praticamente constante (6V e 5,9V) mesmo que a tensão de entrada diminua significativamente (8,5V para 7,5V).

A figura a seguir ilustra o comportamento do circuito regulador com a redução na tensão de entrada.



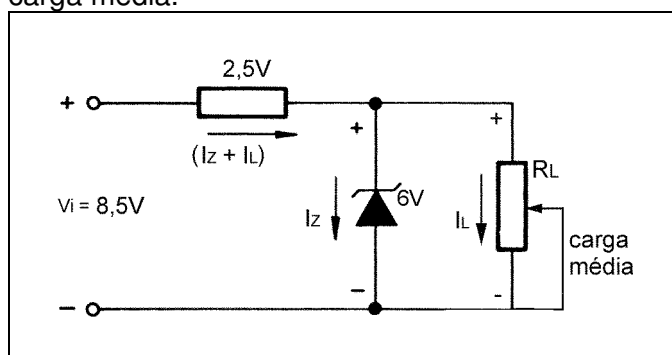
Conclusão

Analisando as duas situações de regulação, conclui-se que as diferenças de tensão de entrada ficam sobre o resistor limitador, permitindo a carga receber uma tensão praticamente constante.

Regulação de tensão com corrente de carga variável

As variações de tensão de alimentação em função da corrente de carga ocorrem, principalmente, devido as características dos filtros utilizados nas fontes retificadoras. A variação na tensão de ondulação na saída das fontes provoca alterações na tensão fornecida em função da corrente consumida pela carga.

O diodo zener pode ser utilizado, formando um circuito regulador, que possibilita o fornecimento de tensão constante, independente do consumo de corrente pela carga. A seguir é analisada a forma como o diodo zener se comporta frente as variações da corrente de carga, tomando como base um circuito na condição normal, com valor de carga média.



Considerando-se que a tensão de entrada seja constante pode-se afirmar que a tensão sobre o resistor limitador é constante.

Isso implica em que a corrente que circula através do resistor limitador tenha um valor constante independente das variações de carga. Resumindo, pode-se dizer:

$$V_i = \text{constante} \rightarrow V_{RS} = \text{constante}$$

$$I_{RS} = \text{constante}$$

Como I_{RS} é dado pela soma $I_Z + I_{RL}$ pode-se escrever:

$$\text{Tensão de entrada constante} \quad I_Z + I_{RL} = \text{constante}$$

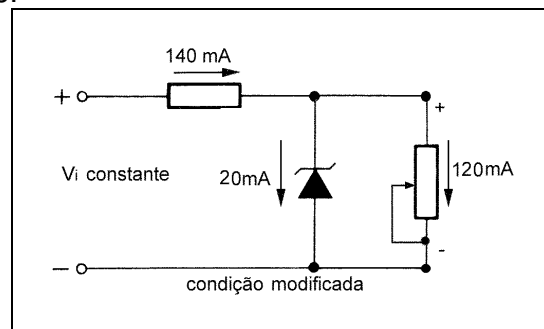
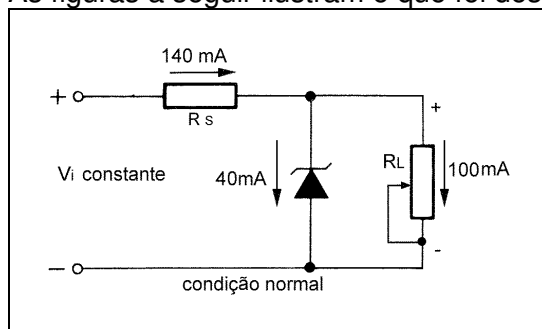
A partir desta conclusão pode-se analisar o comportamento do circuito quando a corrente de carga varia.

Aumento na corrente de carga

Quando a corrente de carga aumenta, a corrente no diodo zener diminui, porque a soma de $I_Z + I_{RL}$ é sempre constante.

$$I_Z + I_{RL} = \text{constante} \quad I_{RL} \uparrow + I_Z \downarrow = \text{constante}$$

As figuras a seguir ilustram o que foi descrito.



I_{RL} = aumentou 20 mA

I_Z = diminuiu 20 mA

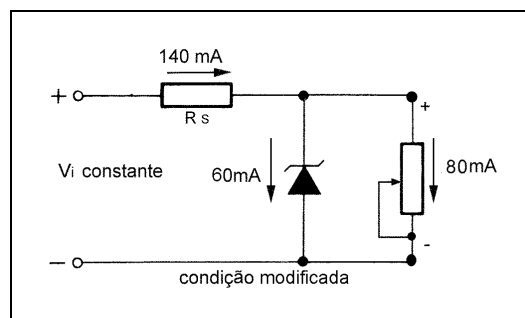
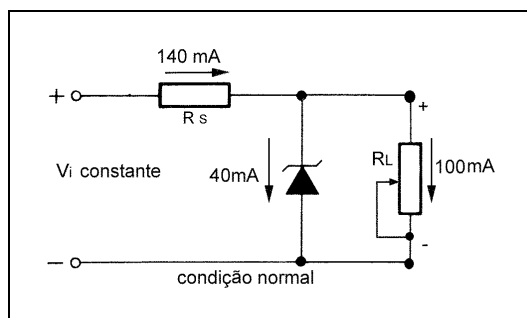
I_{RS} = permaneceu constante

Diminuição da corrente de carga

Quando a corrente de carga diminui, a corrente no zener aumenta, fazendo com que a corrente no limitador permaneça constante.

$$I_Z + I_{RL} = \text{constante} \quad I_{RL} \downarrow + I_Z \uparrow = \text{constante}$$

As figuras a seguir ilustram o comportamento do circuito com redução I_{RL} .



I_{RL} = diminui 20mA

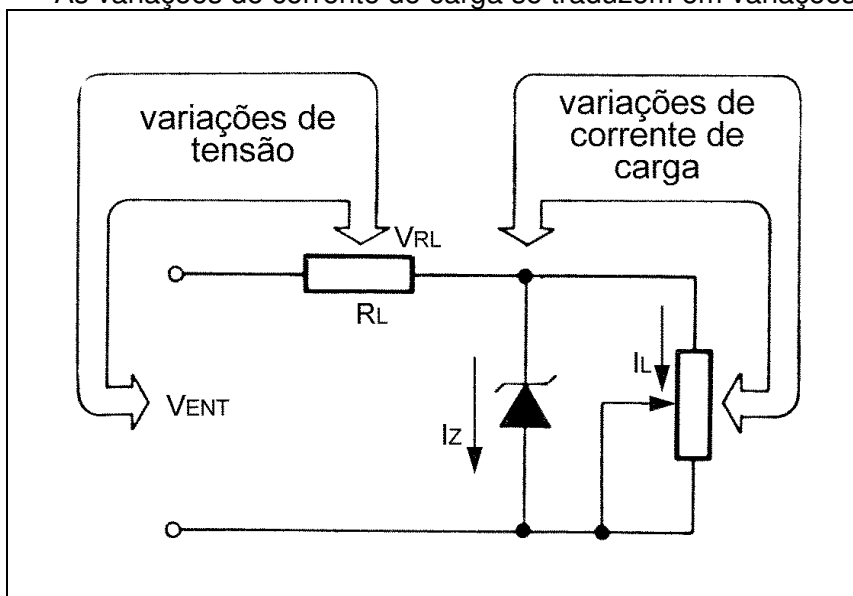
I_Z = aumentar 20mA

I_{RS} = permanecem constante

Observe as duas situações de variação da corrente de carga se observa que o zener absorve estas variações, de forma que a tensão sobre a carga permaneça constante. Na maioria dos casos os circuitos reguladores estão sujeitos a variações simultâneas de tensão de entrada e corrente de carga.

Nestas condições o comportamento do circuito pode ser resumido em duas situações:

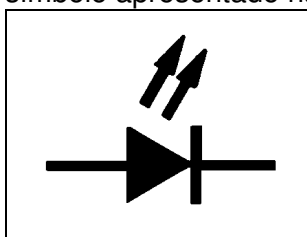
- As variações de tensão de entrada aparecem sobre o resistor limitador.
- As variações de corrente de carga se traduzem em variações na corrente do zener.



Diodo emissor de luz

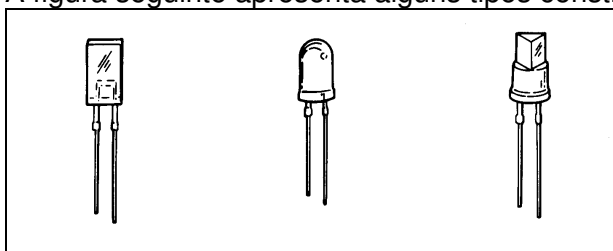
É um tipo especial de diodo semicondutor que emite luz quando é polarizado diretamente.

O diodo emissor de luz, identificado comumente como Diodo LED é representado pelo símbolo apresentado na figura seguinte.

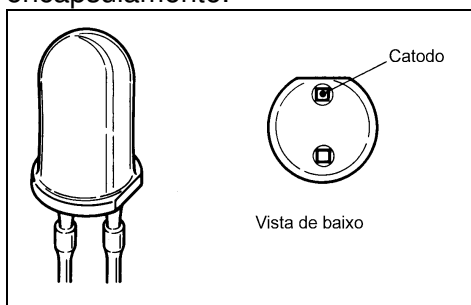


Os diodos LED são encontrados com as mais diversas formas e dimensões.

A figura seguinte apresenta alguns tipos construtivos de diodos LED.



O cátodo de um diodo LED pode ser identificado por um “corte” na base do encapsulamento.



O diodo LED é utilizado principalmente em substituição às lâmpadas incandescentes de sinalização, devido a uma série de vantagens que apresenta, tais como:

- Baixo consumo
- Alta resistência a vibrações
- Nenhum aquecimento
- Grande durabilidade

Corrente direta nominal (I_F)

É um valor de corrente de condução indicado pelo fabricante no qual o diodo LED apresenta um rendimento luminoso ótimo (normalmente 20mA).

Tensão direta nominal (V_F)

Especificação que define a queda da tensão típica do diodo no sentido de condução. A queda de tensão nominal (V_F) ocorre no componente quando a corrente direta tem valor nominal (I_F).

Para valores de corrente direta diferentes do valor nominal (I_F) a tensão direta de condução sofre pequenas modificações de valor.

Tensão inversa máxima (V_R)

Especificação que determina o valor de tensão máxima que o diodo LED suporta no sentido inverso, sem sofrer ruptura.

A tensão inversa máxima dos diodos LED é pequena (da ordem de 5V) uma vez que estes componentes não tem por finalidade a retificação.

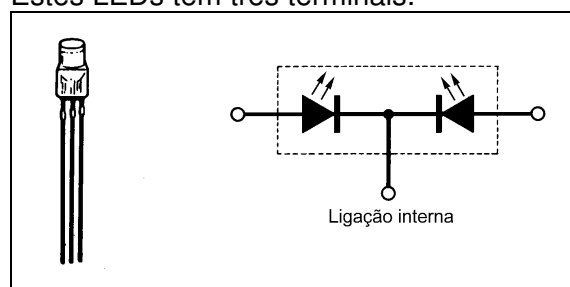
A tabela a seguir apresenta as características de alguns diodos LED.

LED	Cor	V_F a $I_F = 20\text{mA}$	I_F máx.
LD 30C	Vermelho	1,6V	100mA
LD 37I	Verde	2,4V	60mA
LD 35I	Amarelo	2,4V	60mA

LED bicolor

O LED bicolor consiste, na verdade, de dois LEDs colocados dentro de uma mesma cápsula.

Estes LEDs tem três terminais.



Um dos terminais é comum aos dois LEDs. Dependendo da cor que se deseja acender, polariza-se um dos diodos.

LED infravermelho

A luz infravermelha é um tipo de luz que não é visível ao olho humano.

Este tipo de luz é usado principalmente em alarmes contra roubos e circuitos de controle remoto.

Existem diodos LEDs que emitem luz infravermelha. Estes LEDs funcionam como os outros, porém não se pode observar visualmente se estão ligados ou não.

Teste do diodo LED

Os diodos LED podem ser testados como um diodo comum, usando um multímetro na escala de resistência.

Em um sentido o teste deve indicar baixa resistência e, em outro, alta resistência.

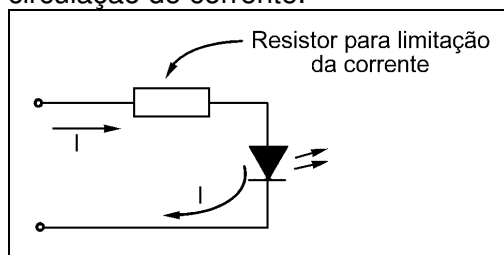
Observação

Em alguns casos, dependendo do multímetro utilizado para o teste, o LED acende durante o teste com polarização direta.

A identificação dos terminais ânodo e cátodo também podem ser feitos com o multímetro, da mesma forma que um diodo comum.

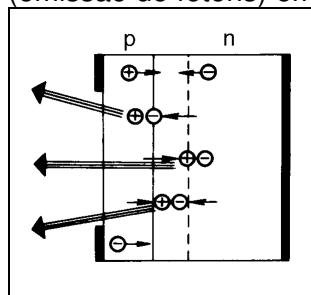
Funcionamento

Quando o diodo LED é polarizado diretamente entra em condução, permitindo a circulação de corrente.



A circulação da corrente se processa pela liberação de portadores livres na estrutura dos cristais.

O deslocamento de portadores de banda de condução provoca a liberação de energia (emissão de fótons) em forma de luz.



Características dos diodos LED

As características importantes do diodo LED são:

- Corrente direta máxima (I_{FM})

- Corrente direta nominal (I_F)
- Tensão direta nominal (V_F)
- Tensão inversa máxima (V_R)

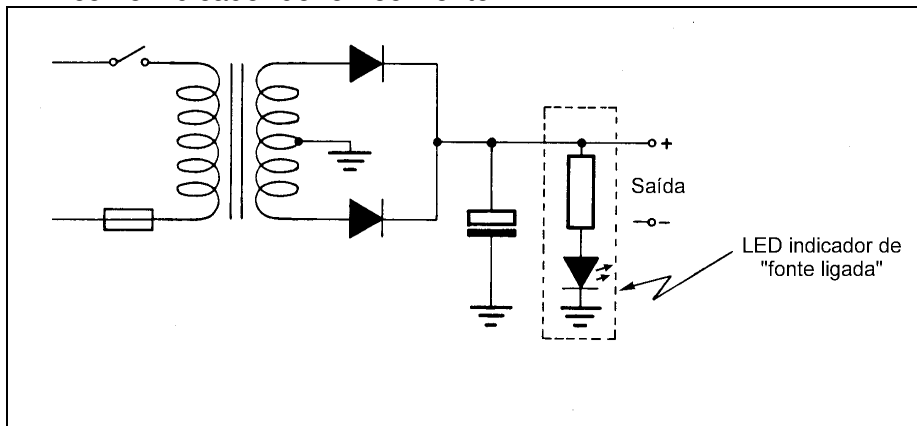
Corrente direta máxima (I_{FM})

Especificação que define a corrente máxima de condução do diodo LED sem prejuízo para sua estrutura.

Utilização do diodo LED em CC

A aplicação do diodo LED em tensões contínuas exige a fixação da sua corrente direta nominal (I_F). A limitação da corrente pode ser feita através de um resistor.

A figura seguinte apresenta um circuito retificador de onda completa que utiliza o diodo LED como indicador de fornecimento.



O valor do resistor limitador é dado pela expressão

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F}$$

Onde:

V_{CC} = tensão de saída da fonte

V_F = tensão nominal de condução do diodo LED

I_F = corrente nominal de condução do diodo LED

Transistor bipolar

Estrutura básica

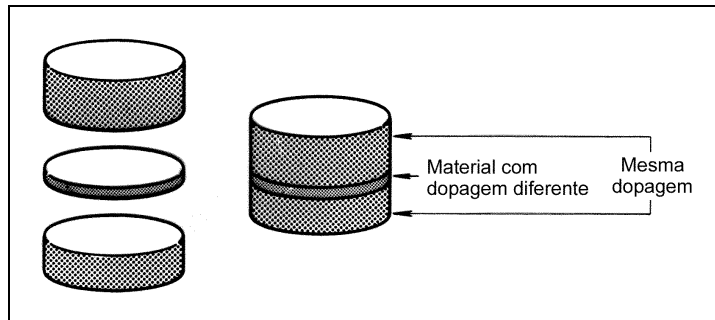
O transistor bipolar é um componente eletrônico constituído por materiais semicondutores, capaz de atuar como controlador da corrente, o que possibilita o seu uso como amplificador de sinais ou como “interruptor eletrônico”.

Em qualquer uma das duas funções o transistor encontra ampla aplicação:

- Amplificador de sinais = equipamentos de som e imagem e controles industriais.
- Interruptor eletrônico = controles industriais, calculadoras e computadores eletrônicos.

Estrutura básica

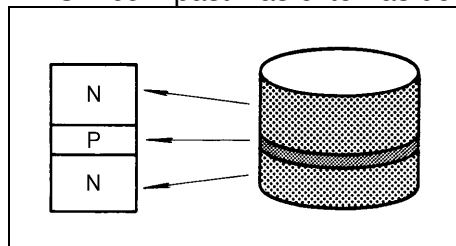
A estrutura básica do transistor se compõe de duas pastilhas de material semicondutor, de mesmo tipo, entre as quais é colocada uma terceira pastilha, bastante mais fina, de material semicondutor com tipo diferente de dopagem, formando uma configuração semelhante a um “sanduiche”.



Tipos de transistores

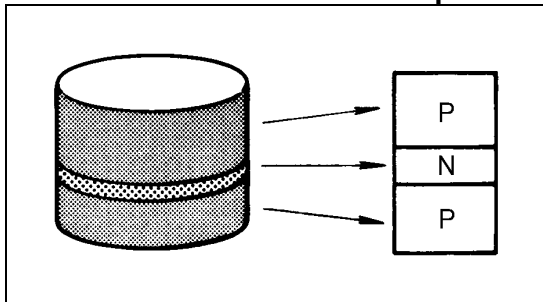
A configuração da estrutura, em forma de sanduiche, permite que se obtenham dois tipos distintos de transistores.

- Um com pastilhas externas de material N e pastilha central de material P.



Este tipo de transistor é denominado de **transistor bipolar NPN**.

- Outro com pastilhas externas de material P e pastilha central de material N, denominado de **transistor bipolar PNP**.



Os dois tipos de transistores podem cumprir as mesmas funções diferindo apenas na forma como as fontes de alimentação são ligadas ao circuito eletrônico.

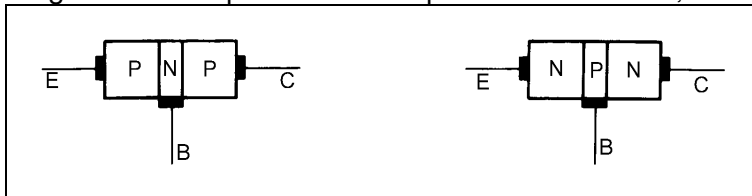
Terminais do transistor

Cada uma das pastilhas formadoras do transistor é conectada a um terminal que permite a interligação da estrutura do componente aos circuitos eletrônicos.

Os terminais recebem uma designação que permite distinguir cada uma das pastilhas:

- A pastilha central é denominada de **Base**, representada pela letra B.
- Uma das pastilhas externas é denominada de **Coletor**, representada pela letra C.
- A outra pastilha externa é denominada de **Emissor**, representada pela letra E.

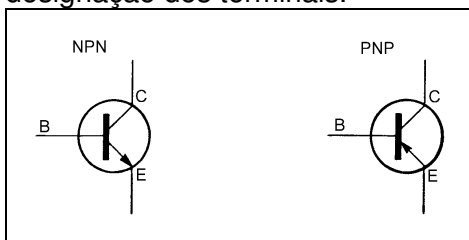
A figura abaixo apresenta dois tipos de transistores, com a identificação dos terminais.



Embora as pastilhas do coletor e do emissor sejam do mesmo tipo de material semicondutor, não é possível trocar as ligações de um terminal com o outro nos circuitos eletrônicos porque existe diferença de volume de material semicondutor e de intensidade de dopagem entre as pastilhas.

Simbologia

A figura a seguir apresenta o símbolo dos transistores NPN e PNP, indicando a designação dos terminais.

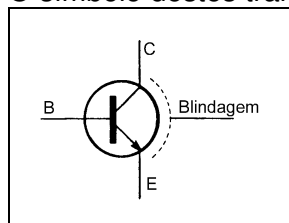


A diferença entre os símbolos dos dois transistores é apenas o sentido da seta no terminal “emissor”.

Alguns transistores, fabricados para aplicações específicas, são dotados de blindagem. Esta blindagem consiste em um invólucro metálico ao redor das pastilhas semicondutoras, que tem por finalidade evitar que o funcionamento do transistor seja afetado por campos elétricos ou magnéticos do ambiente.

Estes transistores apresentam um quarto terminal, ligado à blindagem para que esta possa ser ligada ao terra do circuito eletrônico.

O símbolo destes transistores mostra a existência do quarto terminal.



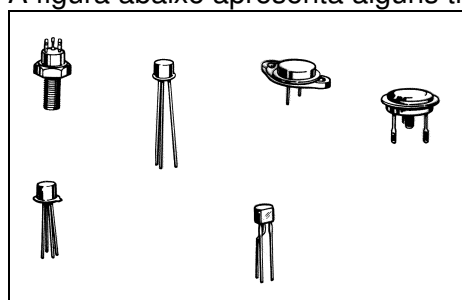
Aspecto real dos transistores

Os transistores podem se apresentar nos mais diversos formatos (encapsulamento).

Os seus formatos geralmente variam em função:

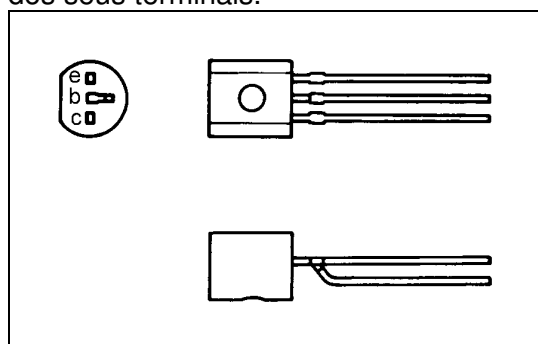
- Do fabricante;
- Da função da montagem;
- Do tipo de montagem;
- Da capacidade de dissipar calor.

A figura abaixo apresenta alguns tipos construtivos de transistores.



Por esta razão, a identificação dos terminais do transistor deve sempre ser feita com auxílio de um manual de transistores ou folheto técnico específico do fabricante do transistor.

A figura a seguir é parte de um folheto técnico de um transistor, mostrando a posição dos seus terminais.



Princípio de funcionamento do transistor

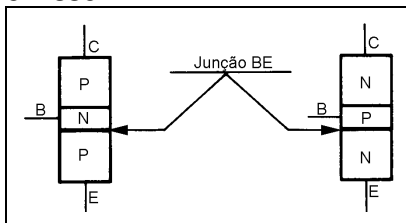
As tensões nos terminais do transistor

O estudo do princípio de funcionamento do transistor consiste em uma análise do movimento dos elétrons livres e lacunas no interior do componente, provocados pela aplicação de tensões externas ao coletor, à base e ao emissor.

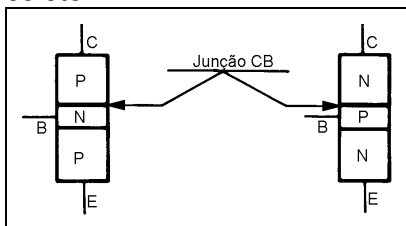
O movimento dos elétrons livres e lacunas está intimamente ligado a polaridade da tensão aplicada a cada um dos terminais do transistor.

As junções do transistor e a polaridade das tensões nos terminais

Uma junção PN entre o cristal da base e o cristal do emissor, chamada de junção base emissor.



Uma junção PN entre o cristal de base e o cristal do coletor, chamada de junção base coletor.



Ao unirem-se as três pastilhas semicondutoras de um transistor ocorre um processo de difusão dos portadores. Como em um diodo, este processo de difusão da origem a uma barreira de potencial em cada junção.

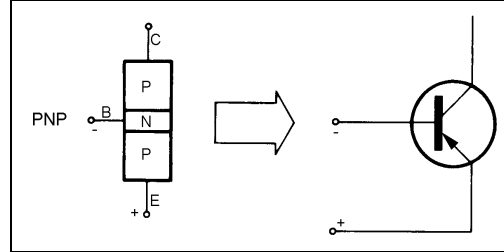
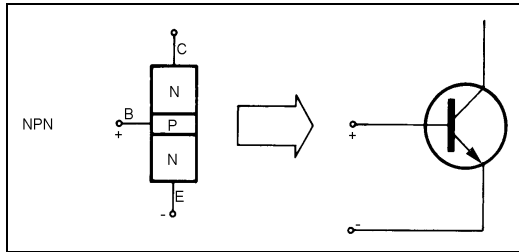
No transistor, portanto existem duas barreiras de potencial que se formam com a junção dos cristais:

- A barreira de potencial na junção base emissor.
- A barreira de potencial na junção base coletor.

A junção base emissor:

Na condição normal de funcionamento, denominada de funcionamento na região ativa, a junção base emissor é polarizada diretamente.

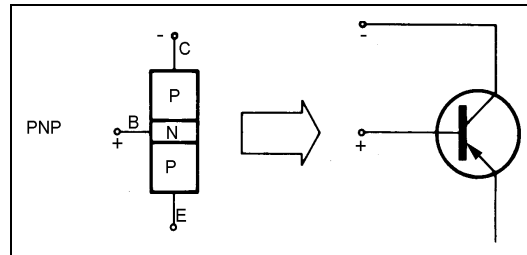
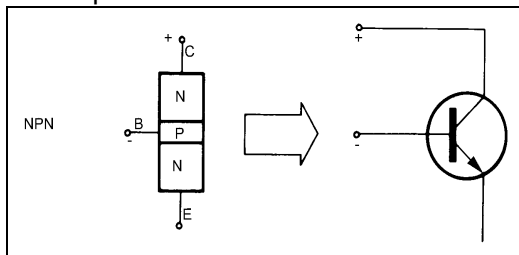
As figuras abaixo mostram a polaridade das tensões de base e de emissor em cada tipo de transistor.



A junção base-coletor:

Na região de funcionamento ativo, a junção base coletor é polarizada inversamente.

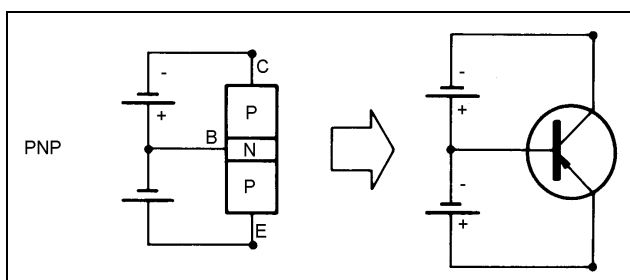
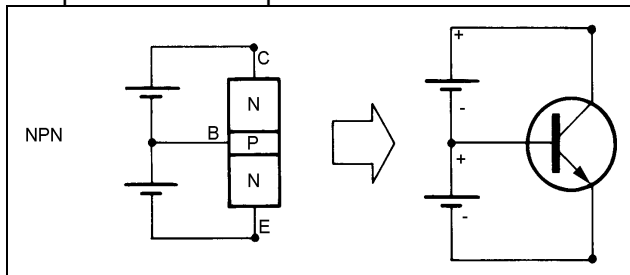
As figuras abaixo mostram a polaridade das tensões de coletor em relação a base em cada tipo de transistor.



Polarização simultânea das duas junções

Para que o transistor funcione corretamente as duas junções devem ser polarizadas ao mesmo tempo.

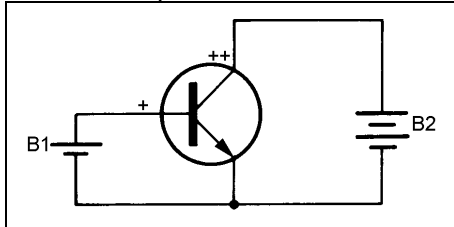
Isto pode ser feito aplicando duas tensões externas entre os terminais do transistor.



Observação

As baterias representam as tensões de polarização.

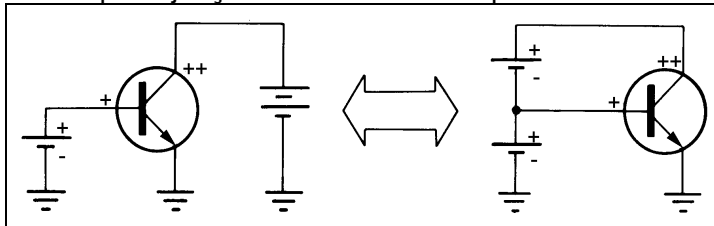
A figura abaixo mostra uma forma alternativa de polarização, tomando o transistor NPN como exemplo.



Analisando a figura observa-se:

- A bateria B_1 polariza a junção base-emissor do transistor diretamente.
- A bateria B_2 aplica uma tensão positiva ao coletor maior que a tensão positiva da base.

Se o coletor é mais positivo que a base então a base é mais negativa que o coletor de forma que a junção base-coletor fica polarizada inversamente.



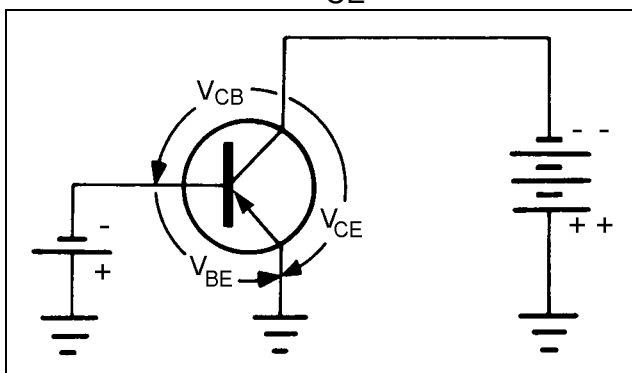
Transistor - região ativa

- A junção base-emissor deve ser polarizada diretamente.
- A junção base coletor deve ser polarizada inversamente.

A alimentação simultânea das duas junções, através das baterias externas, dá origem a três tensões entre os terminais do transistor.

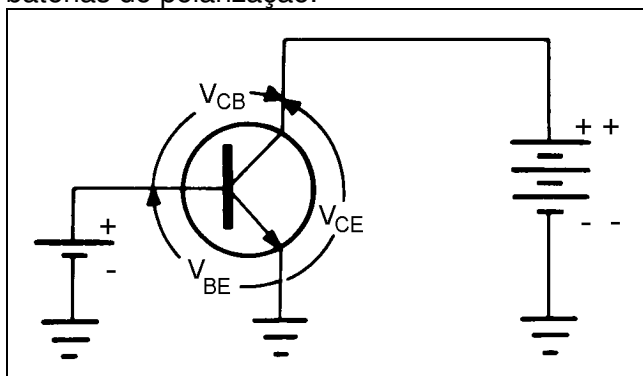
Tensão de base a emissor denominada de V_{BE} , a tensão de coletor a base, denominada de V_{CB} e a tensão de coletor a emissor denominada de V_{CE} .

Dispondo as três tensões na figura abaixo, se observa que as tensões $V_{BE} + V_{CB}$ somadas são iguais a V_{CE} .



$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

Para o transistor NPN a regra também é válida, invertendo-se apenas a polaridade das baterias de polarização.



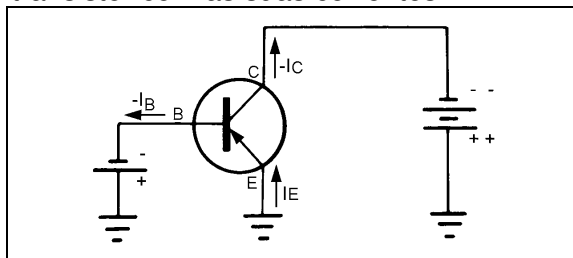
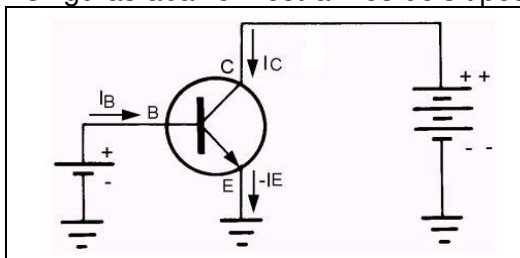
$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

Funcionamento do transistor

O movimento dos portadores livres dá origem a três correntes que circulam nos três terminais do transistor.

A corrente do terminal **emissor** é denominada de corrente de emissor representada pela notação I_E , a do terminal **base** de corrente de base (I_B) e a do terminal **coletor** de corrente de coletor (I_C). Por convenção se estabeleceu que toda a corrente que entra no transistor é positiva e a corrente que sai é negativa.

As figuras abaixo mostram os dois tipos de transistor com as suas correntes.



O princípio básico de funcionamento, que explica a origem das correntes no transistor é o mesmo para os transistores NPN e PNP.

Por esta razão usa-se estudar o princípio de funcionamento apenas de um tipo. O comportamento do tipo não analisado é semelhante, diferindo apenas na polaridade das baterias e no sentido das correntes.

A corrente de base

A corrente de base é provocada pela tensão aplicada entre a base e o emissor do transistor (V_{BE}).

Tomando-se como exemplo o transistor PNP, para analisar o efeito causado pela tensão V_{BE} têm-se:

- O potencial positivo aplicado ao emissor repele as lacunas do material P em direção à base.
- Se a tensão V_{BE} tiver um valor adequado (0,6V para o silício e 0,3V para o germânio) as lacunas adquirem velocidade suficiente para atravessar a barreira de potencial formada na junção base-emissor, recombinando-se com os elétrons livres da base.

Esta recombinação dá origem a corrente de base.

Devido a pequena espessura da base e também do seu pequeno grau de dopagem a recombinação acontece em pequena escala (poucos portadores que provém do emissor podem se recombinar).

Isto faz com que a corrente de base seja pequena, com valores que situam na faixa de microampéres ou miliampéres.

Como o emissor é fortemente dopado, um grande número de lacunas se desloca em direção à base, repelidos pela tensão positiva do emissor e atraídos pela tensão negativa da base.

A base, entretanto, não tem elétrons livres suficientes para recombinar com a maior parte destas lacunas que provém do emissor.

Assim, um grande número de lacunas atinge a base em grande velocidade e não se recombina, por falta de elétrons livres disponíveis.

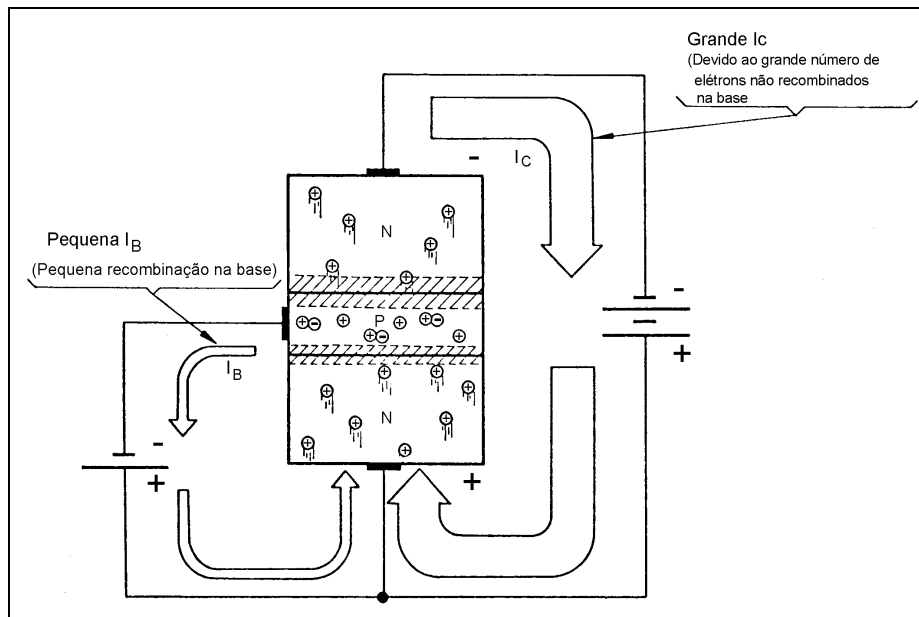
A corrente de coletor

As lacunas provenientes do emissor que não se recombinam se caracterizam por serem portadores minoritários na base do transistor que é de material N (lacunas presentes em um material N são portadores minoritários).

A barreira de potencial da junção coletor-base favorece o deslocamento das lacunas da base para o coletor, onde existe um alto potencial negativo.

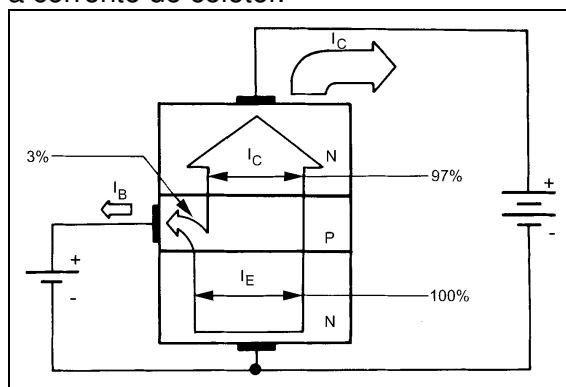
As lacunas que atingem o coletor, passando através da junção base-coletor dão origem à corrente de coletor.

A figura a seguir mostra o descrito acima



A corrente de coletor tem valores muito maiores que a corrente de base porque a grande maioria das lacunas que partem do emissor não se recombina sendo absorvidos pelo coletor.

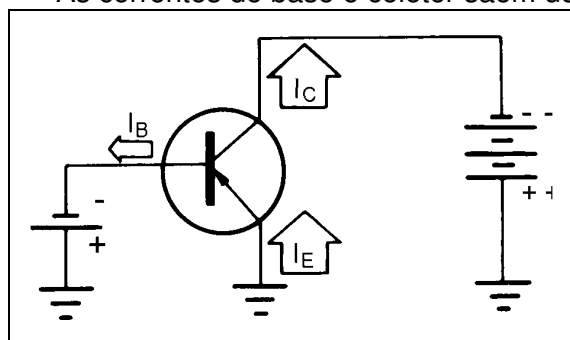
Em geral, do total de lacunas que entra no emissor de um transistor PNP apenas 5% ou menos correspondem a corrente de base. Os restantes 95% (ou mais) corresponde a corrente de coletor.



A corrente de emissor

Analisando-se um transistor PNP e suas correntes se verifica

- A corrente de emissor entra no transistor
- As correntes de base e coletor saem do transistor.



A corrente de base é formada por portadores que vem do emissor e recombina na base.

A corrente de coletor é formada por portadores que vem do emissor e não se recombina, dirigindo-se ao coletor.

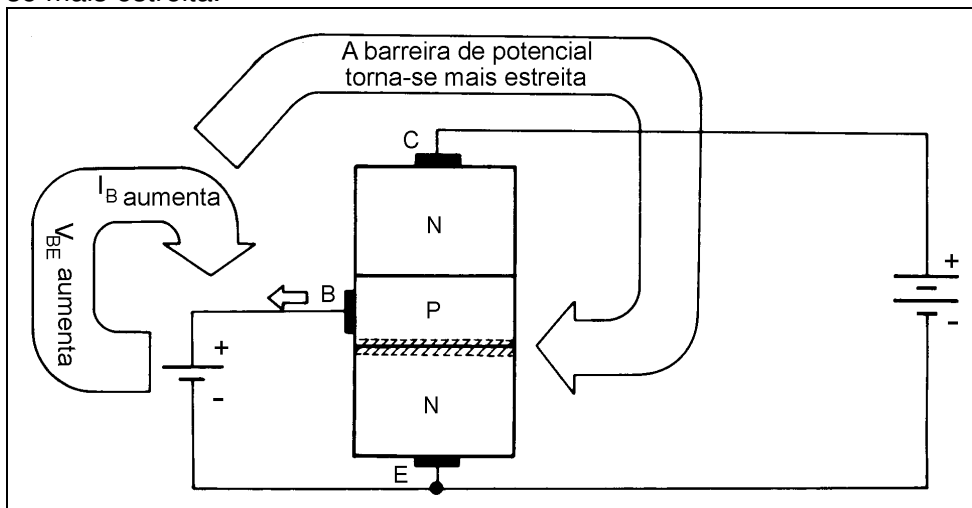
Conclui-se portanto que tanto a corrente de base como a corrente de coletor provém do emissor, de forma que se pode afirmar $I_C + I_B = I_E$.

Controle da corrente de base sobre a corrente de coletor

A principal característica do transistor reside no fato de que a corrente de base (pequena corrente) exerce um controle eficiente sobre a corrente de coletor (I_C).

Este controle se deve ao fato de que a corrente de base influi na largura de barreira de potencial da junção base-emissor.

Quando a tensão V_{BE} aumenta, a barreira de potencial na junção base-emissor torna-se mais estreita.



O estreitamento da barreira de potencial entre base e o emissor permite que um maior número de portadores do emissor atinjam a base.

Esta maior quantidade de portadores é absorvida pelo coletor, uma vez que a base não tem capacidade para recombiná-los. Verifica-se então um aumento na corrente de coletor.

Conclusão

Por analogia pode-se afirmar:

I_B aumenta $\rightarrow I_C$ aumenta

I_B diminui $\rightarrow I_C$ diminui

Isto significa que a corrente de base de um transistor atua como corrente de controle e a corrente de coletor como corrente controlada.

Ganho de corrente de transistor

Através de um transistor é possível utilizar uma pequena corrente (I_B) para controlar a circulação de uma corrente de valor muito maior (I_C), que a outra:

A corrente controlada (I_C) e a corrente de controle (I_B) podem ser relacionadas entre si para determinar quantas vezes uma é maior que a outra:

$$\frac{I_C}{I_B}$$

resulta em um número que indica quantas vezes a corrente de coletor é maior que a corrente de base.

O resultado desta relação é denominado tecnicamente de **ganho de corrente contínua entre base e coletor**, representado pela letra grega β (beta) em corrente contínua ou h_{FE} .

$h_{FE} \text{ ou } \beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$	Ganho de corrente contínua entre base e coletor
---	---

Conhecendo-se o ganho de corrente entre base e coletor do transistor (β_{DC}) é possível determinar a corrente de coletor a partir da corrente de base:

$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$	\rightarrow	$I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$
--------------------------------	---------------	------------------------------

É importante salientar que o fato do transistor permitir um ganho de corrente entre base e coletor não significa que sejam geradas ou criadas correntes no seu interior.

Todas as correntes que circulam em um transistor são provenientes da fontes de alimentação, cabendo ao transistor apenas controlar a quantidade de corrente fornecida por estas fontes.

Os transistores não geram correntes, atuando apenas como controladores das quantidades de correntes fornecidas pelas fontes de alimentação.

Dissipação de potência no transistor

Todo o componente sujeito a uma diferença de potencial e percorrido por uma corrente elétrica dissipa uma determinada potência ($P = V \cdot I$).

No transistor também existe uma dissipação de potência. A circulação de corrente elétrica através das junções do transistor, provocada pela aplicação de tensões aos seus terminais, dá origem a uma dissipação de potência no interior do componente. Esta dissipação se dá em forma de energia térmica, ou seja, produção de calor, resultando em um aquecimento do transistor.

A dissipação nas junções

A dissipação de potência, em forma de calor, ocorre nas duas junções do transistor. Estas potências dissipadas são denominadas de Potência de coletor (P_C) e Potência de base (P_B).

A potência total dissipada no transistor é, portanto:

$$P_{\text{total}} = P_C + P_B$$

Entretanto, analisando as tensões e correntes presentes nas duas junções verifica-se que a tensão e corrente presentes na junção base emissor (V_{BE} e I_B) são muito pequenas, comparadas com a tensão e corrente presentes na junção coletor base (V_{CB} e I_C).

Por esta razão, a potência dissipada na junção base-emissor é muito pequena comparada com a potência dissipada na junção base-coletor.

Assim, a potência dissipada na base do transistor é desprezada e se considera que a potência total dissipada no transistor é a própria potência dissipada no coletor:

$$P_{\text{total}} = P_C$$

A potência de coletor depende da tensão de coletor à base (V_{CB}) e da corrente de coletor (I_C):

$$P_C = V_{CB} \cdot I_C$$

Por questões de facilidade prática e objetivando a resolução de circuitos transistorizados através de curvas características, esta equação é substituída por outra aproximada, cujo erro é desprezível.

$$P_C = V_{CE} \cdot I_C \quad \Longleftarrow \quad \begin{array}{c} \text{Potência total dissipada} \\ \text{no transistor} \end{array}$$

Dissipação máxima de potência no transistor

O calor produzido pela dissipação de potência ($P_C = V_{CE} \cdot I_C$) provoca a elevação da temperatura dos cristais semicondutores que compõe o transistor, podendo levá-lo a destruição.

O valor de Potência de dissipação máxima ($P_{Cmáx}$) é o limite de dissipação que um transistor pode suportar sem sofrer danos por sobreaquecimento e é fornecido pelo fabricante do transistor nos manuais e folhetos técnicos.

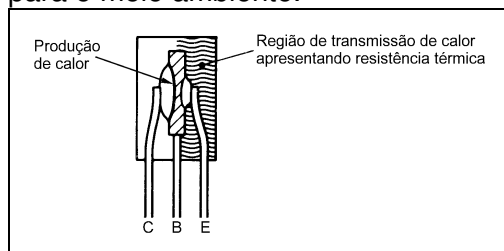
Fatores que influenciam na dissipação máxima

O limite de dissipação da potência é estabelecido em função de dois fatores:

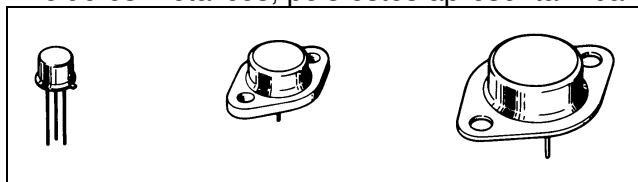
- Resistência térmica do encapsulamento;
- Temperatura externa ao transistor.

Resistência térmica

Em termos de transistor, a resistência térmica do encapsulamento, diz respeito a oposição imposta pelo encapsulamento a transmissão do calor gerado internamente para o meio ambiente.



Os transistores fabricados para capacidades de dissipação mais elevada (denominados de transistores de potência) são normalmente encapsulados em invólucros metálicos, pois estes apresentam baixa resistência térmica.

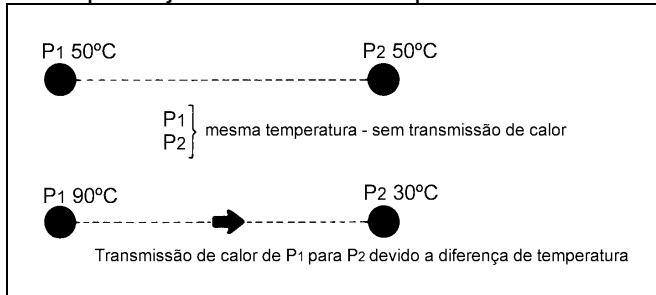


Os transistores de baixa dissipação (denominados transistores de sinal) são encapsulados em invólucros plásticos.

Temperatura externa ao transistor

Além da resistência térmica, a transmissão de calor entre dois pontos depende também da diferença de temperatura entre estes pontos.

Para que haja transmissão um ponto deve estar a temperatura mais alta que o outro.



A quantidade de calor transmitida é maior quando a diferença de temperatura é grande entre os dois pontos, e menor quando a diferença é pequena. Isto explica por exemplo porque uma xícara de café esfria mais rapidamente no inverno que no verão.

Quanto mais baixa a temperatura do ambiente, melhor a transmissão de calor do interior do transistor para fora, menor o seu aquecimento.

Assim, dois transistores trabalhando com as mesmas tensões e correntes (mesma potência dissipada PC) irão sofrer aquecimentos diferentes se estiverem funcionando em temperaturas diferentes.

Devido a influência da temperatura na transmissão de calor a especificação de potência máxima de dissipação do transistor é dada em função da temperatura.

Por exemplo:

Transistor BC547 Potência de dissipação máxima 50mW à 25° C

Redução da potência dissipada em função do aumento de temperatura ambiente

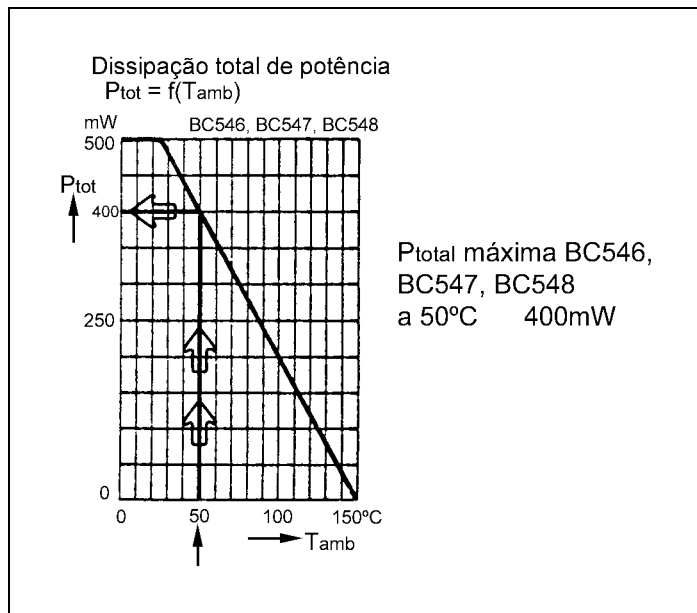
Em muitas ocasiões se faz necessário utilizar transistores em circuitos que irão funcionar em temperaturas superiores a 25° C.

Nestas ocasiões é necessário considerar que o valor de potência de dissipação máxima fornecida pelo fabricante não pode ser empregado porque é válido somente até 25° C.

O aumento de temperatura ambiente pode ser compensado, fazendo com que o transistor dissipe uma potência menor, gerando uma menor quantidade de calor, internamente e evitando a destruição por aquecimento excessivo.

Os fabricantes fornecem um gráfico de dissipação total de potência em função da temperatura ambiente ($P_{\text{tot}} = T_{\text{amb}}$) que indica a potência máxima no transistor para os diversos valores de temperatura ambiente.

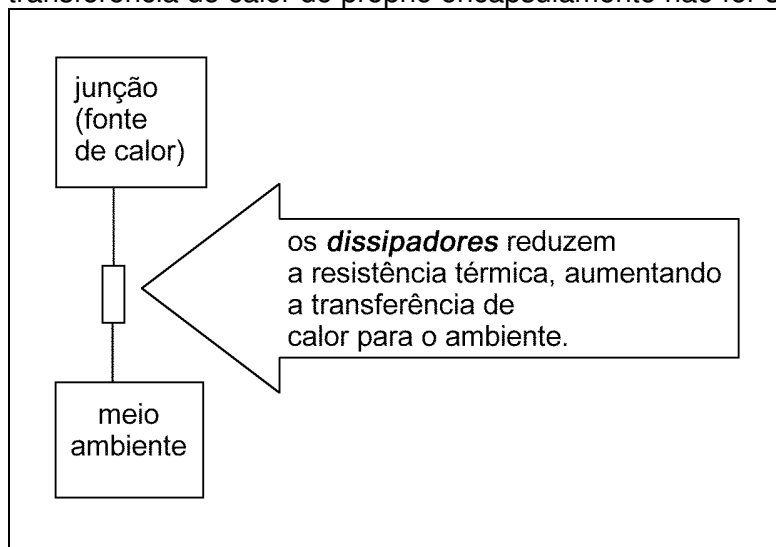
A figura abaixo ilustra o emprego do gráfico, determinando a potência de dissipação máxima dos transistores BC546, BC547, BC548 para uma temperatura ambiente de 50° C.



Dissipadores de calor

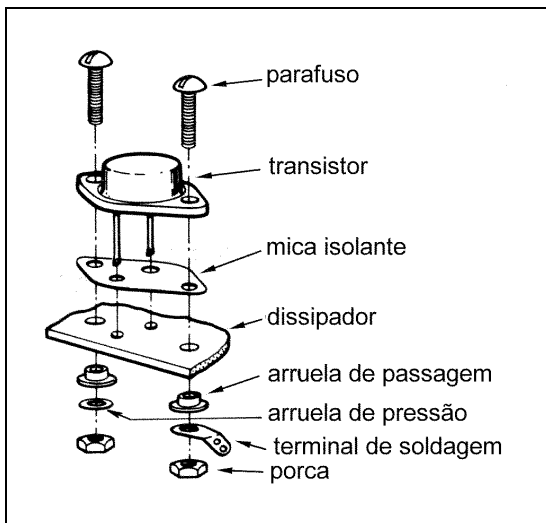
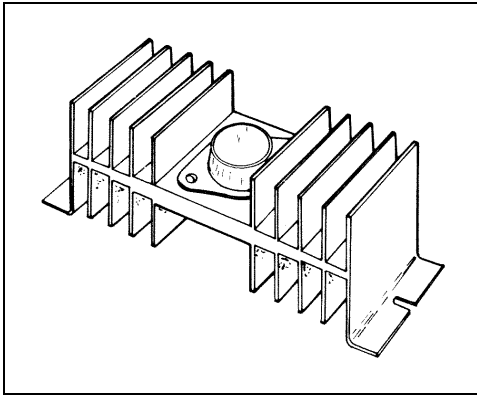
Os dissipadores de calor são dispositivos metálicos acoplados aos semi condutores com o objetivo de facilitar a transferência do calor gerado no interior do componente para o meio ambiente.

A necessidade do uso de dissipadores surge sempre que a capacidade de transferência de calor do próprio encapsulamento não for suficiente.



Tipos de dissipadores

Existe no comercio uma grande variedade de formas e dimensões de dissipadores, com uma ampla gama de valores de resistência térmica. As figuras a seguir mostram um tipo de dissipador de utilização muito comum e como o transistor é montado sobre ele.



Formas para melhorar a transferência de calor

Algumas providências podem ser tomadas para melhorar a transferência de calor entre a junção geradora e o ambiente, tais como:

- Estabelecer a maior área de contato possível entre o semi condutor e o dissipador;
- Ajustar firmemente o componente ao dissipador, através dos parafusos;
- Untar as regiões de contato entre componente e mica (isolante elétrico utilizado na montagem em dissipadores que possui baixa resistência térmica) e entre mica e dissipador com graxa de silicone, eliminando as bolhas de ar que aumentam a resistência térmica;
- Usar dissipadores enegrecidos;
- Aumentar a área do dissipador;
- Posicionar o dissipador de forma que na montagem final as aletas fiquem na posição vertical;
- Usar refrigeração forçada, através de ar com ventiladores, água ou óleo circulante por dentro dos dissipadores;
- Afastar os dissipadores e semi condutores de elementos que também aqueçam, tais como transformadores e resistores de potência.

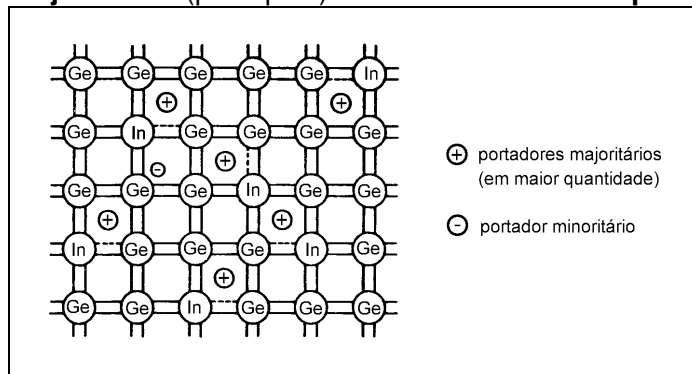
Corrente de fuga no transistor

Os transistores são fabricados com materiais semicondutores P e N. Estes materiais sofrem um processo de purificação e dopagem para conterem as lacunas e elétrons livres.

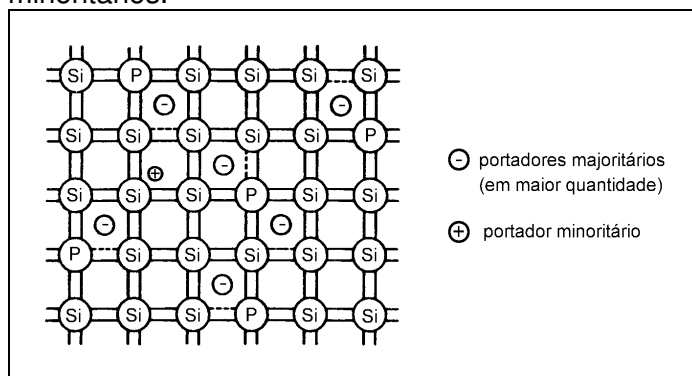
Entretanto, os materiais P e N não são perfeitamente puros, de forma que cada material contenha apenas um tipo de portadores.

O material tipo P apresenta uma grande quantidade de lacunas e apenas uma pequena quantidade de elétrons livres.

Por esta razão, no material P, as lacunas são denominadas de **portadores majoritários** (principais) e os elétrons livres de **portadores minoritários**.



O material do tipo N apresenta uma grande quantidade de elétrons livres, que são os portadores majoritários e um pequeno número de lacunas que são os seus portadores minoritários.



A existência dos portadores minoritários nos materiais semicondutores se deve fundamentalmente a dois fatores:

- Imperfeição nos processos de purificação dos cristais que sempre apresentam um pequeno grau de impurezas.
- A ruptura das ligações químicas pela energia térmica (aquecimento).

Movimento dos portadores minoritários

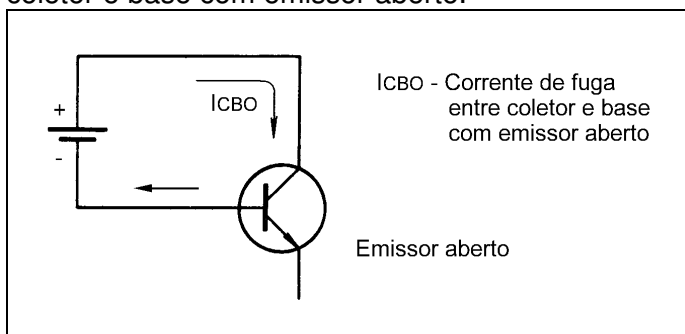
Os portadores minoritários sofrem a influência das tensões externas aplicadas ao componente semiconductor, movimentando-se no interior da estrutura cristalina.

Como no caso dos diodos, o movimento dos portadores minoritários só é importante quando a junção entre os cristais está inversamente polarizada.

Nos transistores o movimento dos portadores minoritários é importante apenas na junção base-coletor porque esta junção está normalmente com polarização inversa.

O movimento dos portadores minoritários na junção base-coletor, inversamente polarizada, dá origem a uma pequena corrente de fuga entre base e coletor.

Esta corrente é representada pela notação ICBO que significa: corrente de fuga entre coletor e base com emissor aberto.



Influência de ICBO na corrente de coletor

A corrente de coletor depende diretamente da corrente de base. Esta dependência está matematicamente expressa na equação que define o ganho de corrente do transistor:

$$hFE = \beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$$

Operando esta equação se obtém a expressão para determinação de I_C a partir de I_B :

$$\beta_x = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$$

A partir desta equação se verifica que com corrente de base $I_B = 0$ a corrente de coletor I_C é:

$$I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$$

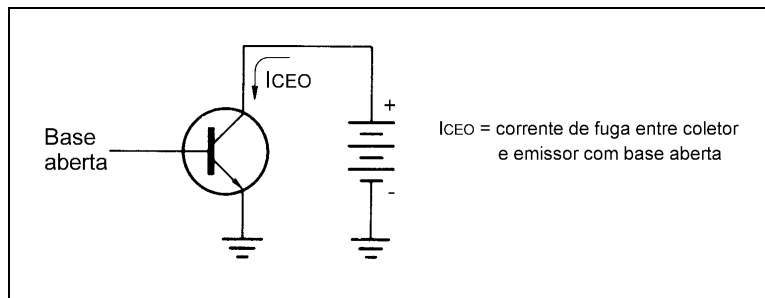
$$\text{se } I_B = 0$$

$$I_C = \beta_{DC} \cdot 0 = 0$$

Ou seja, quando não há corrente de base a corrente de coletor deve ser nula.

Entretanto na prática isto não ocorre.

Aplicação de tensão e coletor e emissor do transistor (VCE), mesmo sem corrente de base ($I_B = 0$) provoca a circulação de uma pequena corrente de coletor denominada de corrente de fuga entre coletor e emissor com a base aberta, representada pela notação ICEO.



Esta corrente de saturação reversa (I_{CEO}) é provocada pela corrente de fuga I_{CBO} . Ao circular através da junção base-coletor a corrente I_{CBO} provoca uma recombinação de portadores na base que tem um efeito resultante semelhante a aplicação de corrente de base no transistor, gerando a corrente I_{CEO} .

I_{CEO} é, portanto, uma corrente aproximadamente β (BETA) vezes maior que I_{CBO} .

$$I_{CEO} \cong I_{CBO} \cdot \beta_{DC}$$

Disparo térmico

O disparo térmico, também denominado de **avalanche térmica**, é um fenômeno que ocorre no transistor devido a corrente de fuga I_{CBO} e que pode levá-los a destruição por aquecimento excessivo.

A medida em que o transistor funciona em um circuito eletrônico ocorre um aquecimento das junções, pela dissipação de potência ($P_C = V_{CE} \cdot I_C$).

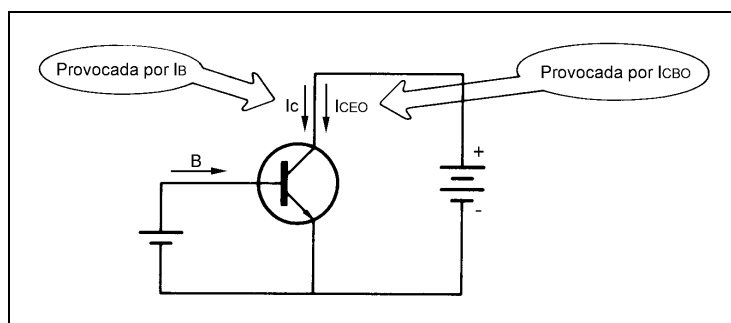
O aquecimento da junção provoca um aumento na corrente de fuga I_{CBO} .

Como a corrente de coletor é composta de duas parcelas $I_C = \beta I_B + \beta I_{CBO}$ o aumento de I_{CBO} resulta em I_C maior.

Com I_C maior a potência dissipada aumenta ($V_{CE} \cdot I_C \uparrow = P_C \uparrow$) e o transistor sofre novo aquecimento. A maior temperatura da junção provoca novo aumento em I_{CBO} .

A equação mostra que a corrente de fuga I_{CBO} é amplificada pelo transistor da mesma forma como corrente de base.

Nos circuitos a transistor a corrente I_{CEO} (provocada pela corrente de fuga I_{CBO}) e a corrente I_C (provocada pela corrente de base I_B), circulam ao mesmo tempo no terminal “coletor” do transistor.



Conclui-se, então, que a corrente real de coletor de um transistor é sempre a soma destas duas correntes.

$$I_C = (\beta_{DC} \cdot I_B) + (\beta_{DC} \cdot I_{CBO})$$

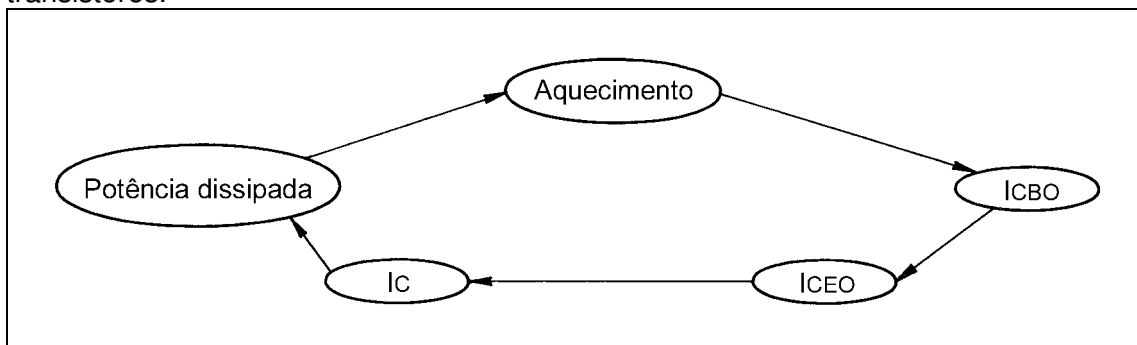
Observação

A corrente de fuga entre coletor e emissor com a base aberta I_{CEO} é, em valor exato, igual a $I_{CBO} (\beta + 1)$. Porém devido ao fato do β_{DC} dos transistores ser normalmente elevado (maior que 100) pode-se na prática desprezar o acréscimo da unidade considerando $I_{CEO} = I_{CBO} \cdot \beta_{DC}$.

Silício versus germânio

Embora a variação da corrente de fuga I_{CBO} com a temperatura seja aproximadamente a mesma (dobra a cada 6° C no germânio e a cada 10° C no silício), os transistores de silício se caracterizam por apresentarem um valor inicial de I_{CBO} até 500 vezes menores do que os transistores de germânio na mesma temperatura, motivo pelo qual são mais utilizados atualmente que os de germânio.

A figura a seguir representa graficamente o efeito cíclico do aquecimento nos transistores.

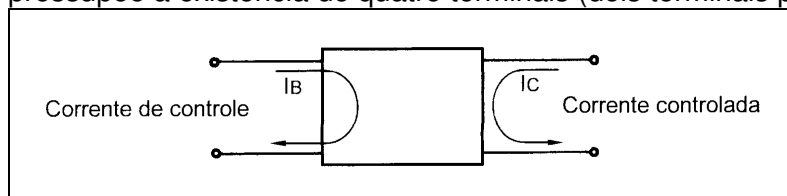


Nesta condição o transistor pode provocar uma auto destruição. Por este motivo deve-se, sempre que possível, evitar que os transistores trabalhem próximo a sua potência máxima de dissipação.

Configurações de ligação do transistor

No transistor a corrente de base atua como corrente de controle, determinando a corrente de coletor que poderia ser denominada controlada.

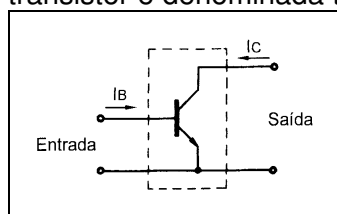
Em princípio, a circulação de duas correntes de valores diferentes em um componente pressupõe a existência de quatro terminais (dois terminais para cada corrente).



Como o transistor não dispõe de quatro terminais (dois de entrada e dois de saída) sua ligação aos circuitos eletrônicos é feita de forma que um dos terminais seja comum ao circuito de entrada e de saída simultaneamente.

Configuração emissor comum

Quando o terminal emissor é utilizado como terminal comum, a forma de ligação do transistor é denominada tecnicamente de **configuração de emissor comum**.

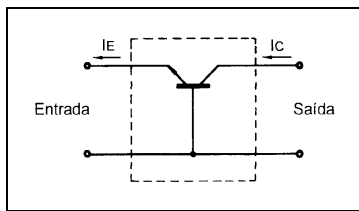


Observação

As baterias de polarização não foram colocadas para dar maior clareza a figura.

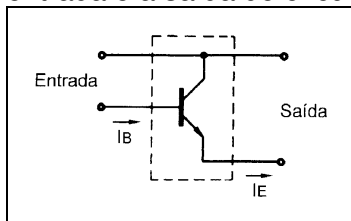
Configuração de base comum

Quando a base é utilizada como terminal comum, a forma de ligação do transistor é denominada de configuração de base comum.



Configuração de coletor comum

É a denominação dada a forma de ligação em que o coletor do transistor é comum a entrada e a saída do circuito.



Curvas características de um transistor

Quando se analisa o comportamento de um componente eletrônico procura-se colocar este componente sob as mais diversas situações em termos de correntes e tensões.

No diodo semicondutor, por exemplo, a corrente circulante depende do valor e da polaridade da tensão aplicada aos seus terminais.

O comportamento do transistor também é expresso através de curvas características, assim como o do diodo. As curvas características são gráficos obtidos através de medidas elétricas no transistor em vários circuitos, sob condições de tensão e corrente controladas.

As curvas características do transistor assumem grande importância no projeto de circuitos porque expressam o comportamento do componente em uma ampla faixa de condições de funcionamento, levando em consideração a forma como o transistor está ligado.

Parâmetros elétricos nas curvas características do transistor

Nos componentes semicondutores com apenas dois terminais (diodo semicondutor, diodo zener) são necessários apenas dois parâmetros elétricos para expressar o comportamento em gráfico:

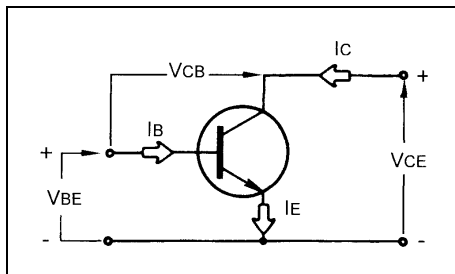
- Tensão entre dois terminais (Ex.: V_D).
- Corrente no dispositivo (Ex.: I_D).

No transistor, pelo fato de serem 3 terminais, existem 6 valores em jogo:

- I_C : corrente de coletor;
- I_B : corrente de base;
- I_E : corrente de emissor;
- V_{BE} : tensão de base e emissor;

- V_{CE} : tensão de coletor a emissor;
- V_{CB} : tensão de coletor e base.

A figura a seguir mostra os parâmetros elétricos do transistor.

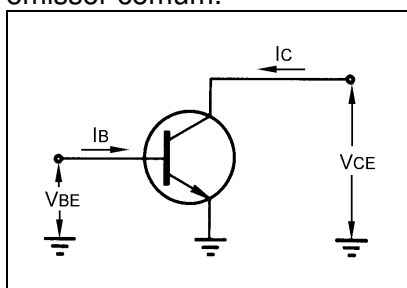


com base nestes valores e ainda outros não elétricos, tais como a temperatura, podem ser levantadas uma série de curvas características que expressam o comportamento do transistor nas mais diversas condições.

Curvas características na configuração EC (Emissor Comum)

A configuração de ligação do transistor mais utilizada é a de emissor comum, razão pela qual as curvas características dos transistores, fornecidas pelos fabricantes, são relativas a esta forma de ligação.

A figura abaixo mostra um esquema ilustrativo de um transistor ligado em emissor comum.



Analisando a figura se verifica que, na configuração de emissor comum quatro parâmetros são fundamentais:

V_{BE} , I_B , V_{CE} e I_C

Os valores V_{BE} e I_B são denominados de parâmetros de entrada e os valores V_{CE} e I_C de parâmetros de saída da configuração emissor comum.

Portanto, para representar através de gráficos o comportamento do transistor em emissor comum são necessárias duas curvas características:

- Uma que expressa o comportamento dos parâmetros da entrada do transistor, denominada de **curva característica de entrada**.
- Uma que expressa o comportamento dos parâmetros de saída, denominada de **curva característica de saída**.

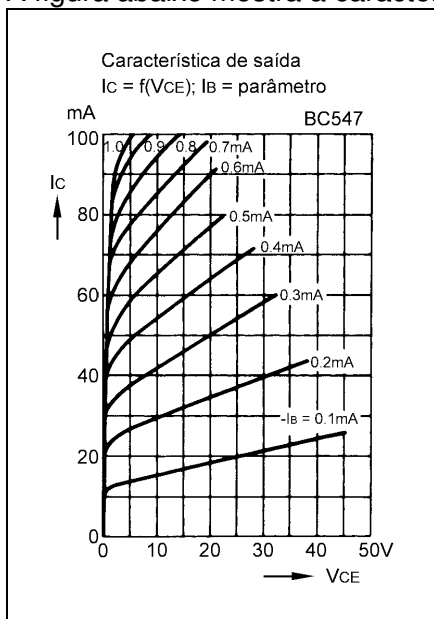
Característica de saída do transistor em emissor comum

Do conjunto de curvas características que pode ser levantado a partir dos valores elétricos do transistor a curva que assume maior importância é a curva característica de saída, também denominada de característica de coletor.

Os parâmetros de saída do transistor são I_C e V_{CE} . Entretanto, sabe-se que os valores V_{CE} e I_C dependem do valor de I_B .

A curva característica de saída é construída de forma a permitir que se relacionem as grandezas I_C , V_{CE} e I_B em um único gráfico.

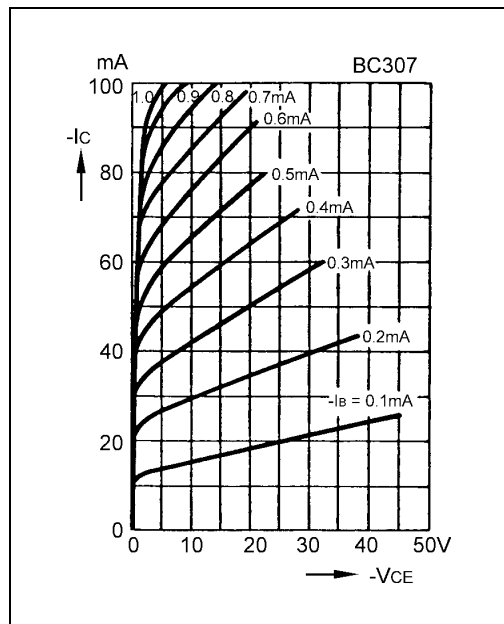
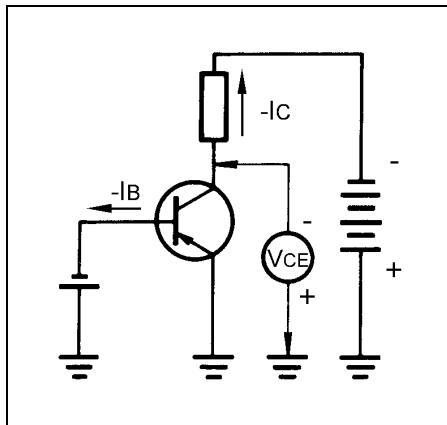
A figura abaixo mostra a característica de saída do transistor BC547.



As curvas mostram a dependência da corrente de coletor (I_C) em função da tensão coletor-emissor, mantendo a corrente de base em um valor constante.

Nos manuais esta curva é identificada como $I_C f(V_{CE}) I_B$ parâmetro (lê-se: corrente de coletor em função da tensão coletor-emissor para valores fixos de corrente de base).

Deve-se observar que nos transistores PNP os parâmetros nas curvas são negativos: $-I_B$, e $-V_{CE}$ (as correntes I_B e I_C no transistor PNP saem do transistor e o coletor é negativo com relação ao emissor).



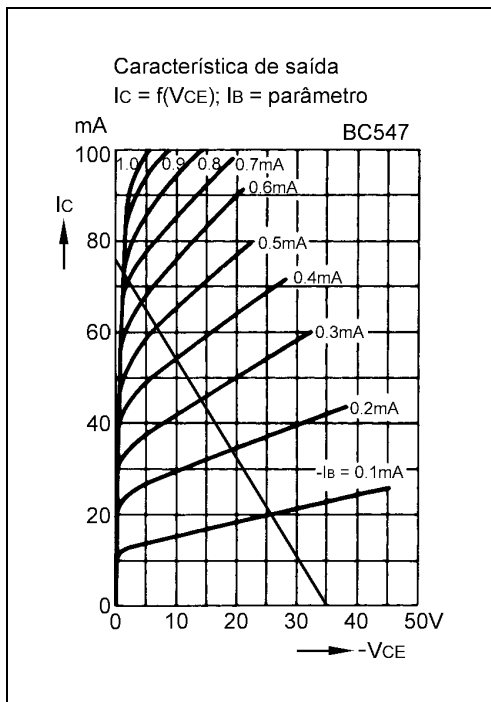
Outro aspecto importantíssimo a ressaltar com relação as curvas características fornecidas pelo fabricante de um transistor é que estas curvas representam o comportamento médio de um grande número de transistores testados. Isto significa que, na prática, o comportamento do componente pode apresentar alguma diferença com relação a curva.

Aplicação da característica de saída em emissor comum

A característica de saída em emissor comum encontra a sua maior aplicação na determinação das condições de funcionamento de um transistor em um circuito. Dispondo de valores do circuito tais como a tensão de alimentação e o valor do resistor de coletor traça-se a “reta de carga” que permite determinar graficamente o comportamento transistor em um circuito.

Reta de carga

A reta de carga é traçada sobre a curva característica de saída do transistor, permitindo que se determine graficamente as tensões presentes sobre o transistor e sobre o resistor de coletor em função da corrente de base.



Traçado da reta de carga

O traçado da reta de carga leva em conta dois fatores:

- A tensão de alimentação do circuito;
- O valor do resistor de coletor.

Isto significa que para cada transistor, e em cada circuito, existe uma reta de carga específica.

Para traçar a reta de carga utilizam-se dois pontos que ocorrem em duas situações especiais do transistor:

- Ponto de corte.
- Ponto de saturação.

O ponto de corte é a situação em que o transistor está sem corrente de base.

Usando as equações do transistor se verifica o seu comportamento nesta situação:

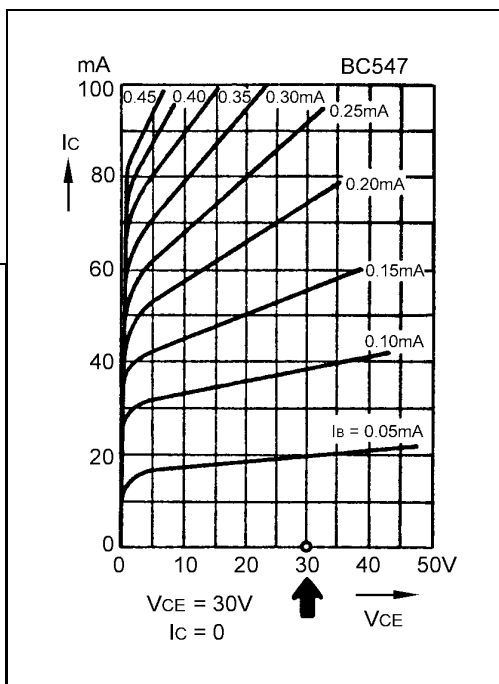
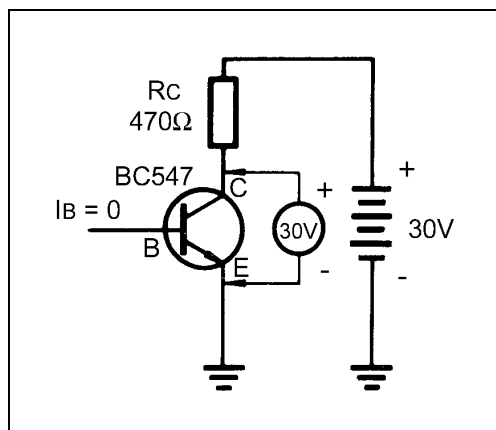
$$I_C = I_B \cdot \beta \quad \text{como } I_B = 0 \quad I_C = 0$$

$$V_{RC} = I_C \cdot R_C \quad \text{como } I_C = 0 \quad V_{RC} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC} \quad \text{como } V_{RC} = 0 \quad V_{CE} = V_{CC}$$

$$V_{CE} = V_{CC} \quad I_C = 0$$

Estes dois valores representam um ponto na curva característica de saída do transistor. Tomando como exemplo o esquema do circuito abaixo, o ponto de corte fica na posição mostrada no gráfico a seguir.



Este é um dos pontos da reta de carga.

O ponto de saturação é a situação em que se aplica ao transistor uma corrente de base suficiente para fazer com que a tensão de coletor a emissor caia praticamente a zero.

Considerando a tensão de coletor a emissor como “zero” tem-se:

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC} \quad \text{como } V_{CE} = 0 \quad V_{RC} = V_{CC}$$

$$V_{RC} = I_C \cdot R_C \quad I_C = \frac{V_{RC}}{R_C} \quad \text{como } V_{RC} = V_{CC} \quad I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Na situação de saturação a corrente de coletor assume o seu valor máximo, como se o resistor de coletor estivesse ligado diretamente a fonte de alimentação. Este valor de corrente de coletor é denominado de **corrente de saturação**.

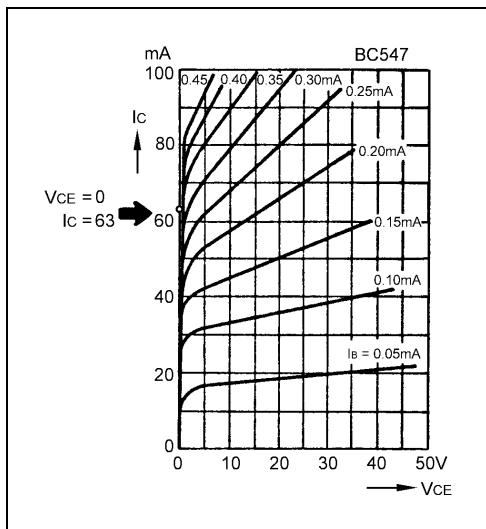
$$I_{C\text{sat}} = \frac{V_{CE}}{R_C}$$

No circuito tomado como exemplo a tensão de alimentação é de 30V e o resistor de coletor é de 470Ω. Portanto a corrente de saturação é:

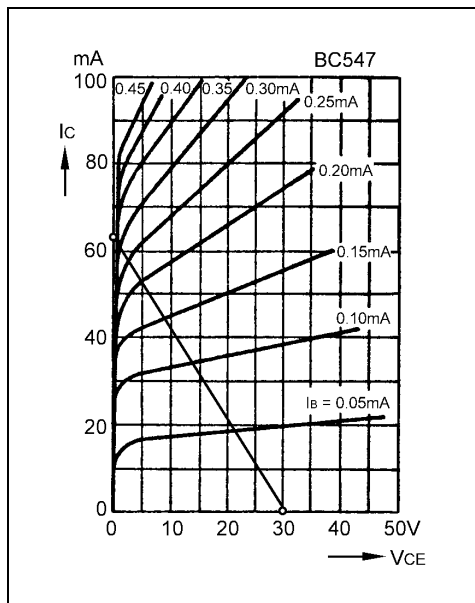
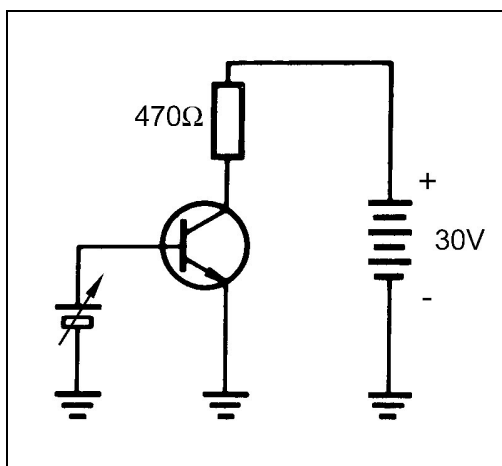
$$I_{C\text{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad I_{C\text{sat}} = \frac{30V}{470\Omega} \quad I_{C\text{sat}} = 63\text{mA}$$

$$V_{CE} \cong 0 \quad I_C = 63\text{mA}$$

Estes dois valores dão origem a outro ponto sobre a curva característica do transistor.



Este é o segundo ponto da reta de carga. Unindo os dois pontos têm-se a reta de carga do circuito usado como exemplo.



Esta reta de carga serve apenas para o circuito apresentado: transistor BC 547, $V_{CC} = 30V$ e $R_C = 470\Omega$.

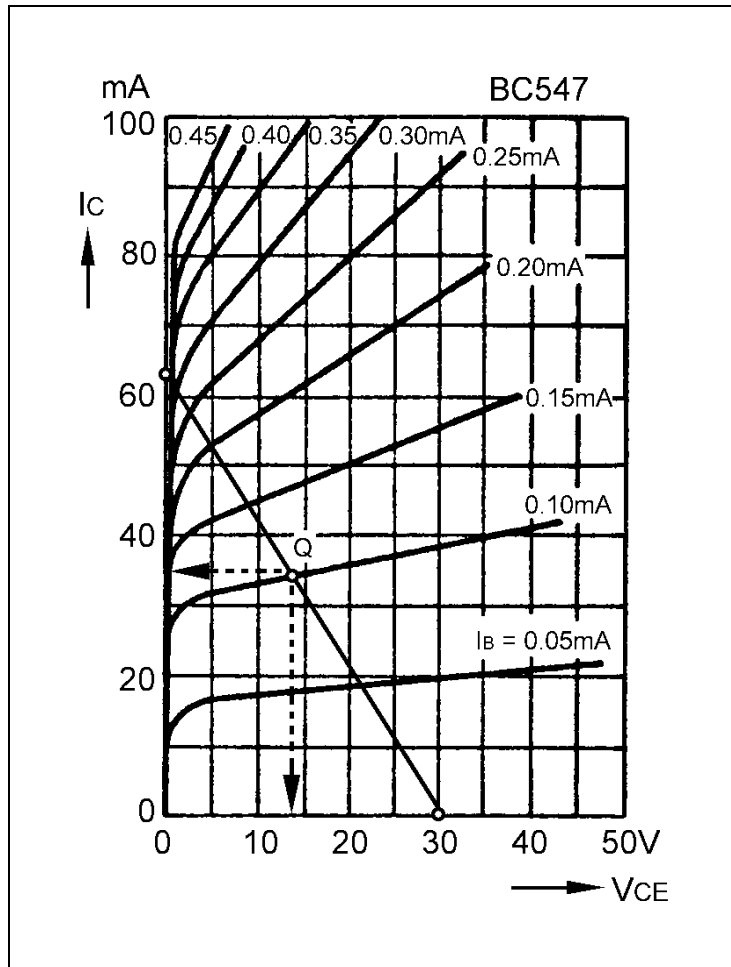
Caso o transistor, a alimentação ou o valor do resistor de coletor sejam modificados deve-se traçar outra reta de carga de acordo com os novos dados.

Aplicação da reta de carga

Uma vez traçada a reta de carga pode-se determinar graficamente os valores da tensão V_{CE} , da tensão sobre o resistor de coletor e da corrente de coletor do transistor, para cada valor de corrente de base.

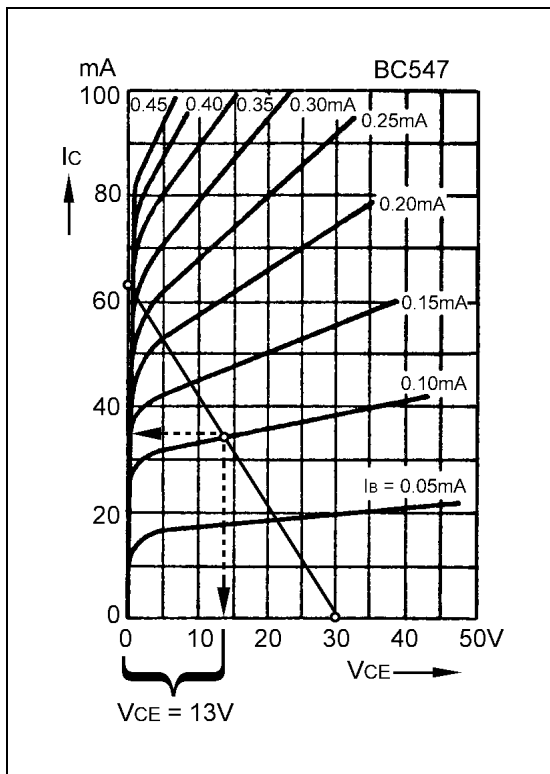
Tomando-se o circuito de exemplo (transistor BC 547, $V_{CC} = 30V$ e $R_C = 470\Omega$) pode-se determinar as tensões e correntes na malha de coletor quando a corrente de base for, por exemplo, $100\mu A$.

A resposta é obtida através do ponto de encontro entre a reta de carga e a curva de corrente de base 0,1mA.

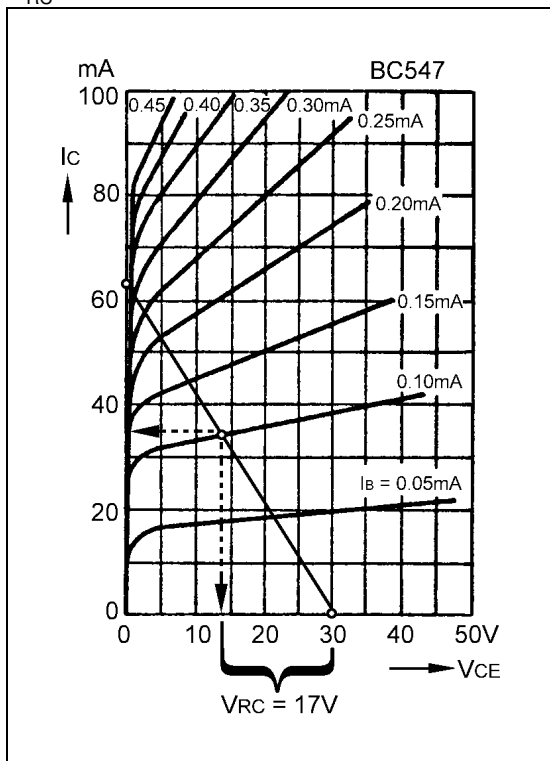


Projetando o ponto encontrado até o eixo horizontal encontra-se o valor do V_{CE} do transistor.

$$V_{CE} = 13V$$

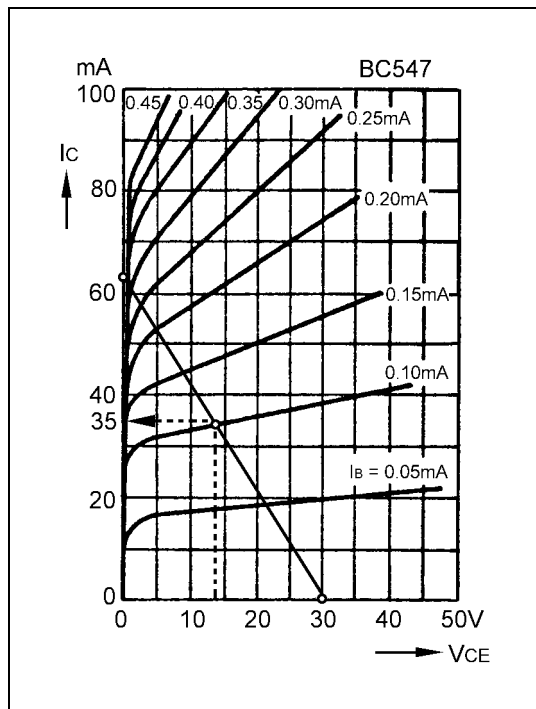


Encontra-se também a tensão sobre o resistor de coletor do circuito.
 $V_{RC} = 17V$

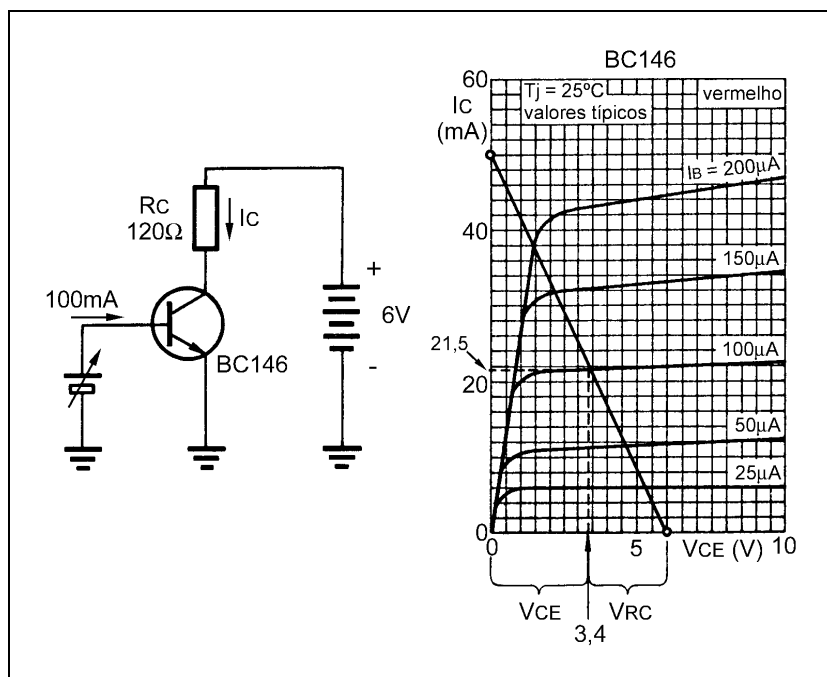


Projetando o ponto encontrado até o eixo vertical, encontra-se a corrente de coletor do transistor.

$I_C = 35mA$



A seguir, está apresentado mais um exemplo de reta de carga e determinação de parâmetros de um circuito através da curva característica de saída.



$$\begin{aligned}
 V_{CC} &= \underline{6} \text{ V} \\
 R_C &= \underline{120} \text{ } \Omega \\
 I_B &= \underline{100} \text{ } \mu\text{A} \\
 V_{CE} &= \underline{3,4} \text{ V} \\
 V_{RC} &= \underline{2,6} \text{ V} \\
 I_C &= \underline{21,5} \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Ponto de operação

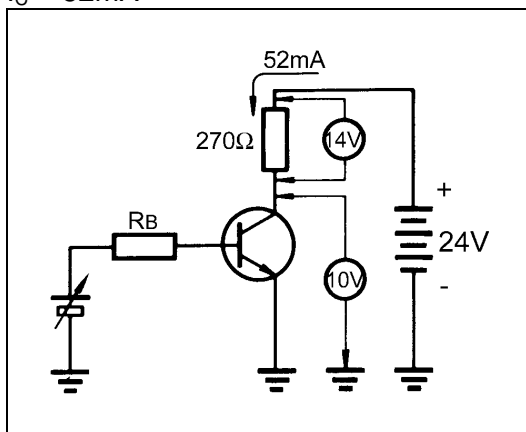
Ponto de operação ou ponto quiescente é a denominação dada ao conjunto de valores de tensão e corrente que se estabelecem automaticamente em um circuito a partir da sua alimentação.

A figura abaixo mostra um circuito com um transistor no ponto de operação:

$$V_{CE} = 10V$$

$$V_{RC} = 14V$$

$$I_C = 52mA$$



Uma vez estabelecidos os valores do ponto de operação, se nenhuma modificação for realizada no circuito, os valores permanecerão constantes.

A escolha correta do ponto de operação é fundamental, na medida em que todo o funcionamento do circuito se dará em torno das condições estabelecidas por este ponto.

Influência do ponto quiescente no circuito

O ponto de funcionamento determina, em outras palavras, a condição normal de funcionamento de um circuito, que se estabelece a partir da alimentação.

A importância do ponto de operação de um circuito eletrônico pode ser comparada, por exemplo, a importância do ajuste da posição de referência do traço do osciloscópio para uma medida de tensão CC.

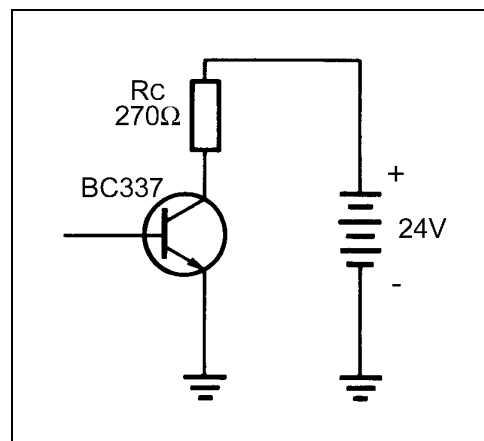
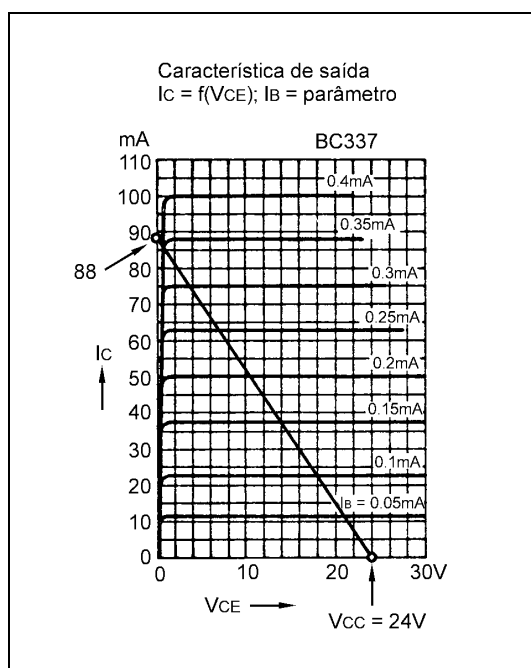
Se a referência está mal ajustada, todas as medidas realizadas estarão erradas. O mesmo ocorre com os circuitos eletrônicos. Se o ponto de operação estiver mal posicionado, todo o funcionamento do circuito estará prejudicado.

A escolha do ponto de operação

O ponto de operação de um circuito com um transistor sempre estará sobre a reta de carga deste circuito. Logo, pode-se afirmar que o ponto de funcionamento depende dos fatores que determinam a reta de carga.

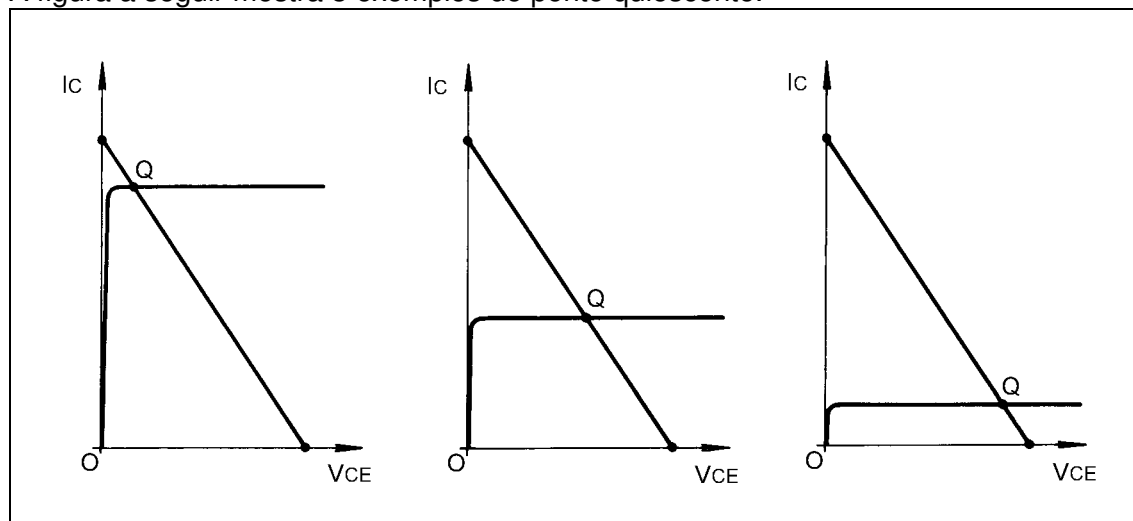
- Transistor utilizado;
- Tensão de alimentação;
- Resistor de coletor.

$$I_{CM} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$



De acordo com a função que o circuito irá desempenhar, o ponto de operação pode se situar em qualquer posição sobre a reta de carga do circuito.

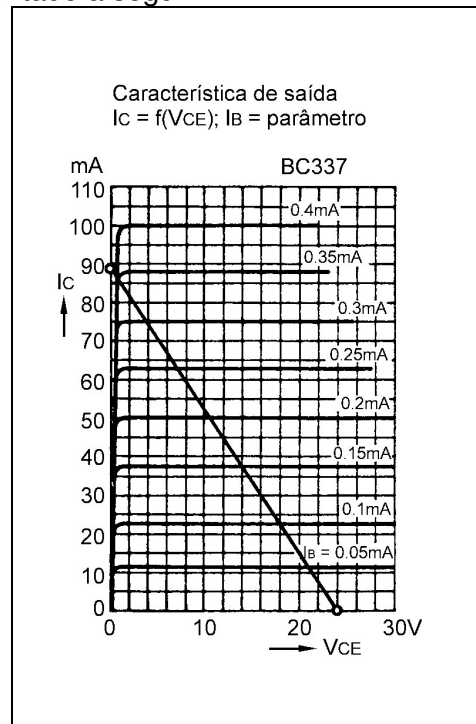
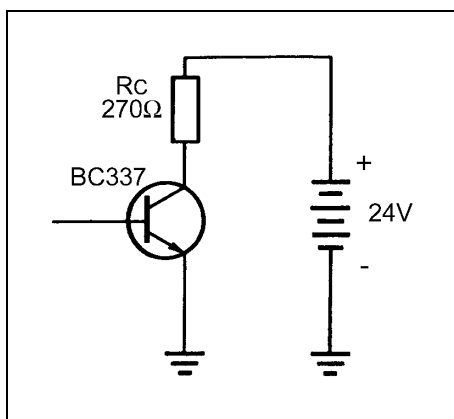
A figura a seguir mostra 3 exemplos de ponto quiescente.



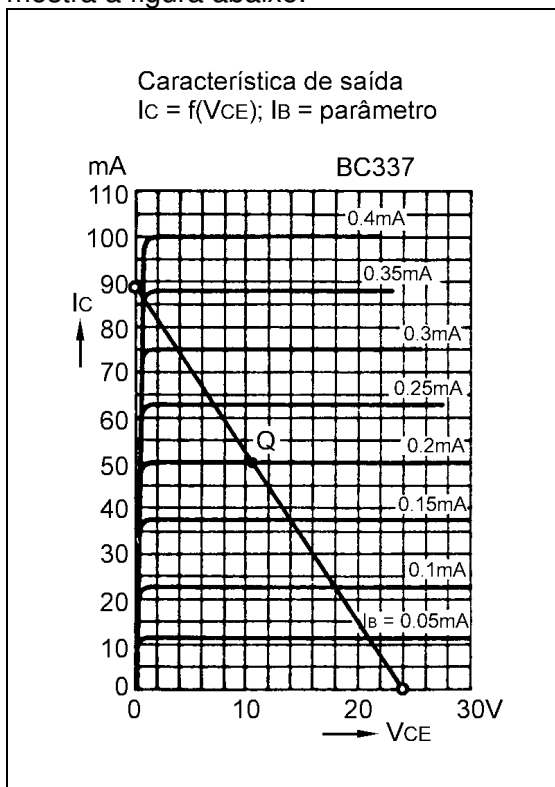
Na maioria dos circuitos eletrônicos o ponto de operação é localizado na região central da reta de carga.

A partir do momento em que o ponto quiescente é localizado sobre a reta de carga ficam automaticamente estabelecidos os valores da malha de coletor.

Tomando como exemplo o circuito apresentado a seguir.

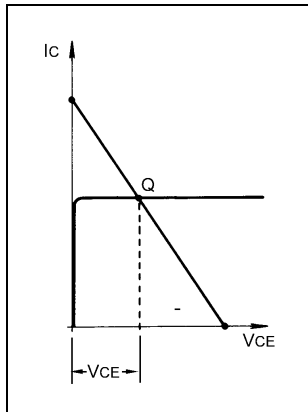


Escolhendo um ponto de operação na região central da reta de carga, conforme mostra a figura abaixo.

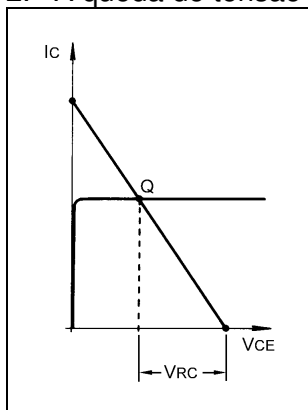


Deste ponto quiescente se obtém:

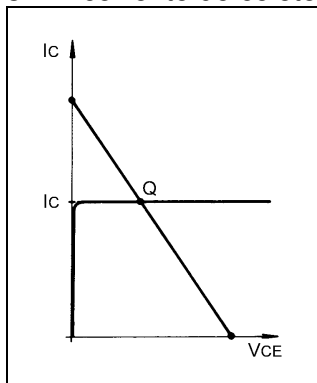
1. A tensão entre coletor-emissor.



2. A queda de tensão no resistor de coletor.



3. A corrente de coletor.

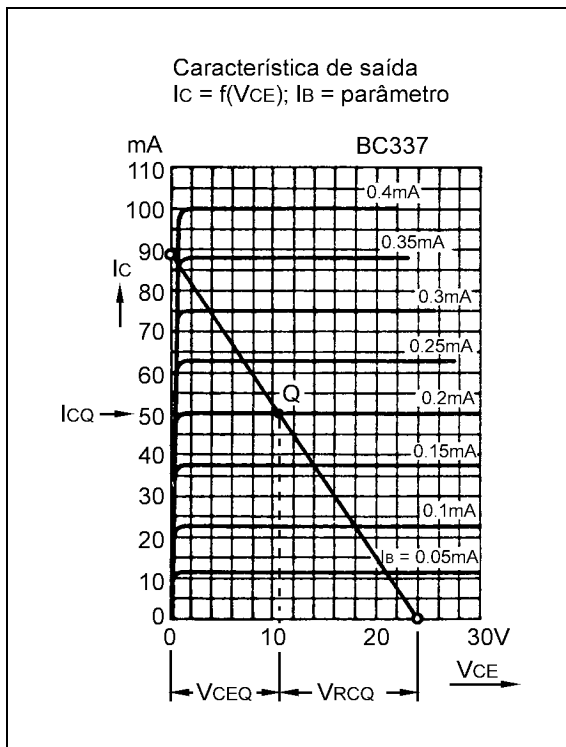


Estes valores são valores do ponto quiescente, razão pela qual são denominados de:

- V_{CEQ} : Tensão coletor-emissor no ponto quiescente.
- V_{RCQ} : Queda de tensão no resistor de coletor no ponto quiescente.
- I_{CQ} : Corrente de coletor no ponto quiescente.

Observando a seguir o gráfico do exemplo utilizado, verifica-se que estes valores são:

$$V_{CEQ} = 10,5V \quad V_{RCQ} = 13,5V \quad I_{CQ} = 50mA$$



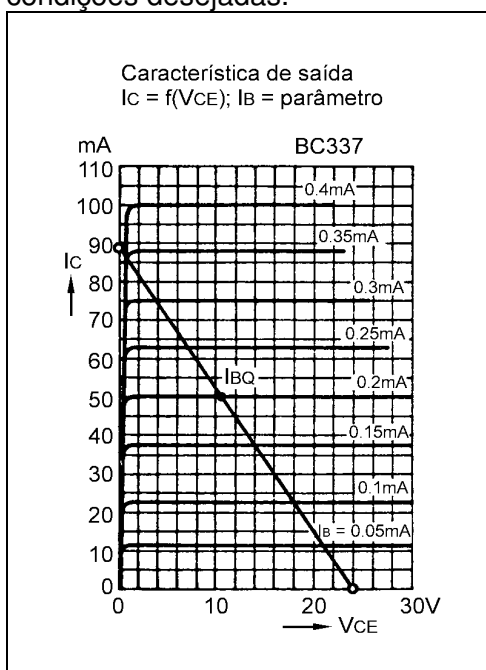
Observação

Pequenas diferenças devido a imprecisão gráfica e espessura dos traços no desenho não são significativas.

Para obter os valores quiescentes (V_{CEQ} , V_{RCQ} e I_{CQ}) é necessário aplicar ao transistor uma determinada corrente de base quiescente (I_{BQ}).

O valor desta corrente de base é obtido diretamente do gráfico.

No gráfico da figura abaixo, utilizado como exemplo, o ponto de operação está colocado sobre a curva de $I_B = 0,2mA$. Esta é a corrente necessária para obter as condições desejadas.



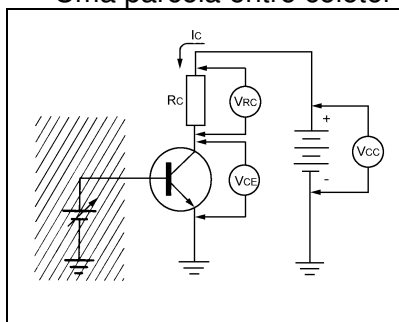
Relação entre os parâmetros I_B , I_C e V_{CE}

O circuito de coletor

Na grande maioria dos circuitos transistorizados o coletor do transistor é conectado a fonte de alimentação através de um resistor, denominado de “resistor de coletor”, geralmente abreviado por R_C .

Na malha de coletor, a tensão V_{CC} fornecida pela bateria se distribui em duas parcelas:

- Uma parcela sobre o resistor de coletor, denominada de queda de tensão no resistor de coletor, V_{RC} .
- Uma parcela entre coletor e emissor do transistor (V_{CE}), conforme figura seguinte.



Conforme estabelece a lei Kirchhoff, a soma das quedas de tensão nos componentes da malha de coletor é igual a tensão aplicada à malha. A partir disto, pode-se determinar a equação da malha de coletor.

$$V_{CC} = V_{CE} + V_{RC} \leftarrow \text{equação da malha de coletor}$$

Analisando particularmente cada um dos membros da equação da malha de coletor têm-se:

V_{CC}

É a tensão fornecida pela bateria ao circuito.

V_{RC}

É a queda de tensão no resistor de coletor.

$$V_{RC} = R_C \cdot I_C \leftarrow \text{equação da queda de tensão no resistor de coletor.}$$

A queda de tensão no resistor de coletor (V_{RC}) tem como principal característica o fator de ser proporcional a corrente de coletor do transistor.

Se a corrente de coletor se torna maior ($I_C \uparrow$) a queda de tensão sobre o resistor de coletor aumenta ($R_C \cdot I_C \uparrow = V_{RC} \uparrow$).

V_{CE}

O valor de V_{CE} é a resultante da equação.

V_{CE} depende da tensão de alimentação e da queda de tensão em R_C :

$V_{CC} = V_{CE} + V_{RC}$ operando têm-se

$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC} \leftarrow$ tensão coletor-emissor do transistor

Relações entre os parâmetros do transistor

Ao considerar que a queda de tensão V_{RC} depende de I_C , se afirma que V_{RC} depende também de I_B . Desenvolvendo a equação da queda de tensão no resistor de coletor têm-se:

$$V_{RC} = R_C \cdot I_C$$

Como $I_C = I_B \cdot \beta$

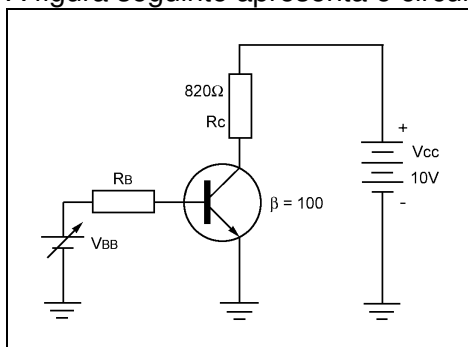
$$V_{RC} = R_C \cdot (I_B \cdot \beta)$$

\downarrow
 I_C

Nesta equação os valores de R_C e β são constantes, logo pode-se dizer que o valor da queda de tensão no resistor de coletor depende diretamente da corrente de base.

Tomando-se um circuito a transistor com duas correntes de base diferentes se pode verificar a relação entre os valores de I_B , I_C , V_{RC} e V_{CE} .

A figura seguinte apresenta o circuito usado como exemplo.



Observação

O resistor R_B na base do transistor serve para limitar a corrente de base do transistor.

Admitindo-se como primeiro valor de corrente de base $40\mu A$ os valores do circuito são:

$$I_C = I_B \cdot \beta$$

$$I_C = 40\mu A \cdot 100$$

$$I_C = 4mA$$

$$V_{RC} = I_C \cdot R_C$$

$$V_{RC} = 0,004A \cdot 820\Omega$$

$$V_{RC} = 3,3V$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC}$$

$$V_{CE} = 10V - 3,3V$$

$$V_{CE} = 6,7V$$

Admitindo-se um segundo valor de corrente de base - $70\mu A$ os valores do circuito são:

$$I_C = I_B \cdot \beta$$

$$I_C = 70\mu A \cdot 100$$

$$I_C = 7mA$$

$$V_{RC} = I_C \cdot R_C$$

$$V_{RC} = 0,007A \cdot 820\Omega$$

$$V_{RC} = 5,8V$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC}$$

$$V_{CE} = 10V - 5,8V$$

$$V_{CE} = 4,2V$$

Colocando os dados do circuito nas duas situações em uma tabela se observa o comportamento dos valores I_C , V_{RC} e V_{CE} quando a corrente de base é modificada.

Corrente de base $I_{B\downarrow}$	Corrente de coletor I_C	Queda de tensão no resistor de coletor V_{RC}	Tensão coletor emissor do transistor
$40\mu A$	4mA	3,3V	6,7V
$70\mu A$	7mA	5,8V	4,2V

Pela tabela se verifica que:

Se I_B aumenta $\rightarrow I_C$ aumenta

Se I_C aumenta $\rightarrow V_{RC}$ aumenta

Se V_{RC} aumenta $\rightarrow V_{CE}$ diminui

Relacionando apenas os dados relativos ao transistor pode se resumir o comportamento do circuito assim:

$$I_{B\uparrow} \quad I_{C\uparrow} \quad V_{CE\downarrow}$$

$$I_{B\downarrow} \quad I_{C\downarrow} \quad V_{CE\uparrow}$$

Considerando-se que a corrente de base I_B depende da tensão V_{BE} pode-se incluir mais este parâmetro no comportamento do transistor:

$$V_{BE\uparrow} \quad I_{B\uparrow} \quad \text{logo}$$

$$V_{BE\downarrow} \quad I_{B\downarrow}$$

Resumindo:

$$\begin{array}{cccc} V_{BE\uparrow} & I_{B\uparrow} & I_{C\uparrow} & V_{CE\downarrow} \\ V_{BE\downarrow} & I_{B\downarrow} & I_{C\downarrow} & V_{CE\uparrow} \end{array}$$

Métodos de polarização do transistor

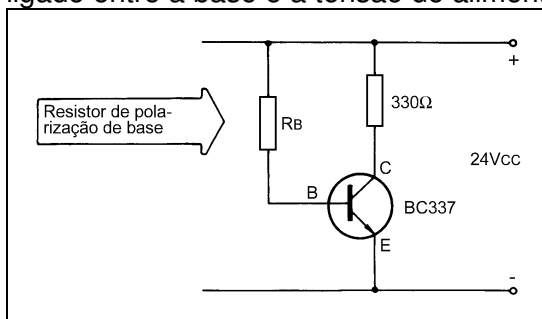
Polarização de base por corrente constante

Denomina-se de “polarização de base” o processo de obtenção da corrente de base necessária para levar o transistor ao ponto de operação.

Dentre os processos de polarização de base o mais simples é o de polarização por corrente constante.

Através do traçado da reta de carga e da determinação do ponto de funcionamento (PQ) fica determinada a corrente de base quiescente (I_{BQ}).

No método de polarização por corrente de base constante, a corrente de base quiescente (I_{BQ}) é obtida através de um resistor, denominado de resistor de base, que é ligado entre a base e a tensão de alimentação.

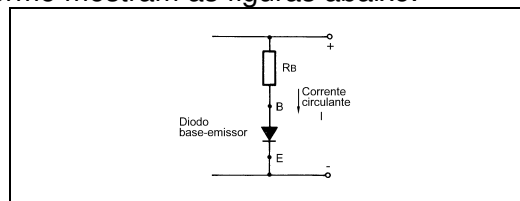
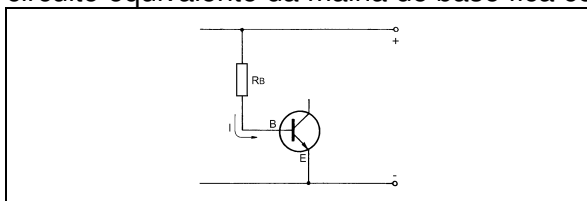


Análise do circuito de base

O circuito de base, se compõe do resistor de base (R_B) e da junção base-emissor ligados em série e aplicados a tensão de alimentação.

O circuito de base também é denominado de malha de base.

Considerando que a junção base-emissor do transistor se comporta como um diodo, o circuito equivalente da malha de base fica conforme mostram as figuras abaixo.



Observando o circuito equivalente verifica-se que o “diodo base-emissor” é polarizado diretamente, permitindo a circulação de corrente através do resistor. Esta corrente, que circula através do resistor, é a corrente de base.

Determinação do resistor de base

A corrente que circula na base do transistor (I_B) depende:

- Do valor do resistor (elemento de controle);
- Da tensão de alimentação - já definida;
- Do tipo de transistor utilizado - já definido.

Do circuito equivalente se verifica que a corrente circulante na base é dada pela equação:

$$\Rightarrow I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

V_{CC} - tensão de alimentação
 V_{BE} - típico do transistor
 R_B - resistor de base

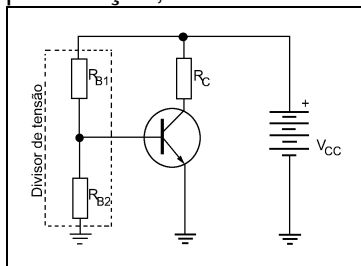
Operando esta equação se obtém a fórmula para determinar o resistor de base:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad \therefore \quad R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{BQ}}$$

Polarização de base por divisor de tensão

A polarização de base de um transistor pode ser feita a partir da utilização de um divisor de tensão, através do qual se aplica uma tensão V_{BE} entre base e emissor do transistor.

A figura abaixo mostra um circuito transistorizado que emprega este tipo de polarização, denominado de “polarização de base por divisor de tensão”.

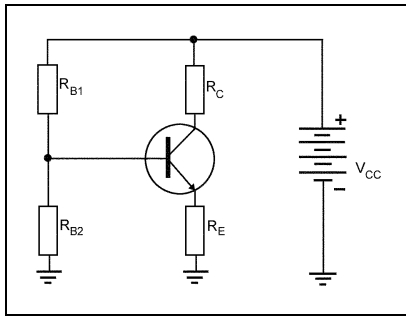


Na polarização de base por divisor de tensão a finalidade do divisor é fornecer à base uma tensão que polariza diretamente a junção base emissor.

Como o emissor está aterrado, a tensão de base V_B é a própria tensão V_{BE} aplicada ao transistor.

O valor da corrente I_{BQ} é ajustado aumentando ou diminuindo a tensão V_{BE} , que é fornecida pelo divisor.

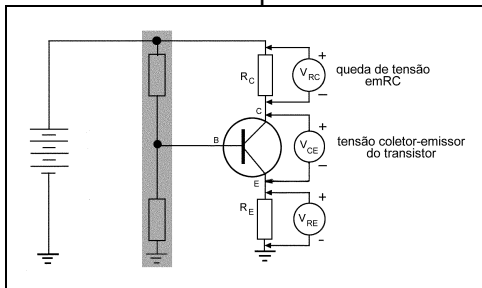
Normalmente os circuitos polarizados por divisor de tensão tem ainda um resistor de emissor (R_E), que tem por finalidade melhorar a estabilidade térmica do circuito figura abaixo.



A polarização por divisor de tensão acrescida do resistor de emissor é a mais empregada porque propicia um alto grau de estabilidade térmica ao circuito. Outra característica importante deste tipo de polarização é a menor variação dos valores de polarização quando o transistor é substituído.

Análise do circuito de coletor

A tensão fornecida pela fonte se distribui sobre os componentes do circuito de coletor.



Segundo a Lei de Kircchoff para circuitos série a soma das tensões equivale a tensão de alimentação.

$$V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} = V_{CC}$$

As quedas de tensão no resistor do coletor (V_{RC}) e no resistor de emissor (V_{RE}) dependem da corrente no circuito de coletor.

A diferença entre I_C e I_E é muito pequena, pois corresponde ao valor de I_B ($I_E = I_C + I_B$).

Por esta razão, costuma-se considerar $I_E = I_C$.

Desta forma, a equação da queda de tensão no resistor de emissor pode ser reescrita como:

$$V_{RE} = I_C \cdot R_E$$

As equações do circuito de coletor são:

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$$

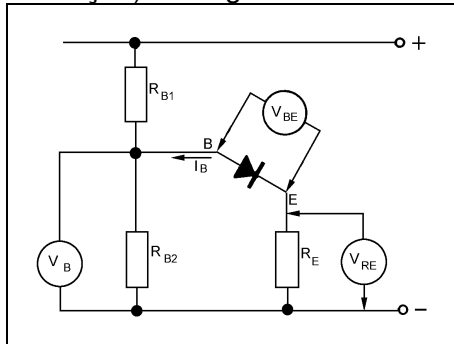
$$V_{RC} = I_C \cdot R_C$$

$$V_{RE} = I_C \cdot R_E$$

O circuito de base

O circuito de base, que corresponde ao divisor de tensão, tem por finalidade polarizar diretamente a junção base-emissor do transistor, provocando a circulação da corrente I_{BQ} .

Quando o circuito de polarização utiliza um resistor de emissor a tensão aplicada entre base e emissor (V_{BE}) é a diferença entre a tensão de base e a tensão de emissor. A tensão V_{BE} aplicada a junção base emissor (que se comporta como um diodo em condução) dá origem a uma corrente de base.



A própria curva característica da junção base-emissor é, essencialmente, a curva característica de um diodo em condução.

Através da aplicação do valor correto de V_{BE} se obtém a condição de funcionamento desejada para o circuito.

Determinação analítica dos componentes polarizadores (divisor de tensão)

A inclusão do resistor de emissor torna o circuito mais estável termicamente, o que é interessante do ponto de vista prático.

Entretanto, no que diz respeito a análise gráfica, através de uma reta de carga, a colocação do resistor de emissor se constitui em um problema.

Por esta razão, a determinação dos valores dos resistores de polarização neste tipo de circuito é feita de forma analítica (matemática).

Para simplificar a análise matemática, podem ser consideradas algumas aproximações e estimativas, que em nada prejudicam os resultados obtidos, tais como:

A pequena diferença existente entre I_C e I_E (que é a corrente de base)

$I_C = I_E$ não representa erro, comparada com a tolerância dos resistores (10% ou 5%).

$\beta \geq 100$ O ganho dos transistores que empregam a polarização por divisor (chamados transistores de sinal) raramente é inferior a 100.

Na determinação dos valores dos elementos polarizadores toma-se como pontos de partida os valores:

- da tensão de alimentação (V_{CC})
- da corrente de coletor (I_{CQ})
- da tensão sobre o resistor de coletor (V_{RCQ})

A tensão sobre o resistor de coletor (V_{RC}) e a tensão de alimentação estão relacionados entre si.

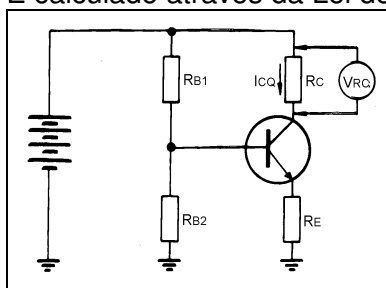
Neste tipo de estágio adota-se normalmente uma tensão no resistor de coletor igual ou próxima a metade da tensão de alimentação.

$$V_{RCQ} \cong \frac{V_{CC}}{2}$$

A corrente de coletor I_{CQ} nos estágios transistorizados polarizados por divisor assume, normalmente, valores que variam entre 1 a 10mA.. Dispondo dos valores V_{CC} , I_{CQ} e V_{RCQ} pode-se determinar os valores dos componentes da malha de coletor.

Resistor de coletor

É calculado através da Lei de Ohm, aplicada aos valores do transistor.



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

$$R_C = \frac{V_{RCQ}}{I_{CQ}}$$

Resistor de emissor

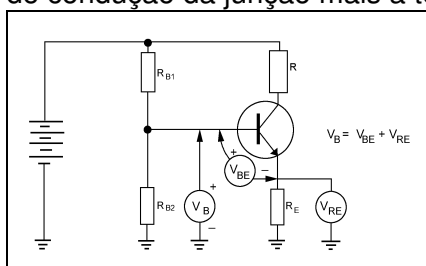
Adotando para o resistor de emissor uma queda de tensão um décimo da tensão de alimentação ($V_{RE} = 0,1V_{CC}$) se obtém um fator de estabilidade ótimo (10 a 15). Desta forma o resistor de emissor é determinado pela equação:

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} \quad \text{Como} \quad V_{RE} = 0,1 V_{CC} \quad I_E \cong I_{CQ} \quad R_E = \frac{0,1V_{CC}}{I_{CQ}}$$

Resistores de base

O divisor de tensão formado pelos resistores de base tem por finalidade fornecer a tensão V_B à base do transistor

Para que a junção base-emissor conduza, a tensão fornecida a base deve ser a tensão de condução da junção mais a tensão V_{RE} .



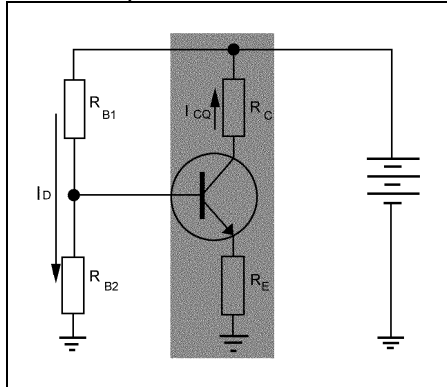
A tensão de saída do divisor é a própria queda de tensão no resistor R_{B2} , de forma que:

$$V_{RB2} = V_{BE} + V_{RE}$$

A tensão sobre R_{B2} é a tensão de alimentação menos a parcela que cabe a R_{B1} .

$$V_{RB1} = V_{CC} - V_{RB2}$$

Dispondo dos dois valores de tensão sobre os resistores deve-se assumir (escolher) um valor para a corrente de funcionamento do divisor.



Para que o circuito tenha um fator de estabilidade ótimo a corrente do divisor I_D deve ser suficientemente grande para que pequenas variações na corrente absorvida pela base não alterem significativamente a proporção de divisão da tensão sobre os resistores.

Adota-se, em função desta necessidade uma corrente I_D com valor:

$$I_D = 0,1 I_{CQ}$$

Este valor de corrente do divisor é pelo menos 10 vezes maior que a corrente de base

Com os valores de tensão dos resistores (V_{RB1} e V_{RB2}) e a corrente do divisor (I_D) o valor dos resistores é determinado com auxílio da Lei de Ohm.

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow \begin{aligned} R_{B1} &= \frac{V_{RB1}}{I_D} \\ R_{B2} &= \frac{V_{RB2}}{I_D} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{B1} &= \frac{V_{CC} - V_{RB2}}{I_D} \\ R_{B2} &= \frac{V_{RE} + V_{BE}}{I_D} \end{aligned}$$

Resumindo:

As equações para o cálculo dos elementos polarizadores por divisor de tensão são:

$$R_C = \frac{V_{RCQ}}{I_{CQ}}$$

$$V_{REQ} = 0,1 \cdot V_{CC}$$

$$R_E = \frac{V_{REQ}}{I_{CQ}}$$

$$V_{RB2} = V_{BE} + V_{REQ}$$

$$I_D = 0,1 \cdot I_C$$

$$R_{B2} = \frac{V_{RB2}}{I_D}$$

$$V_{RB1} = V_{CC} - V_{RB2}$$

$$R_{B1} = \frac{V_{RB1}}{I_D}$$

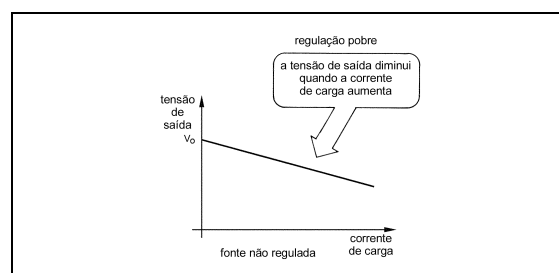
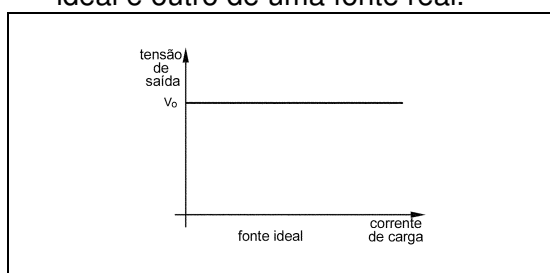
Os circuitos reguladores

Regulação de tensão em fontes de alimentação

Existem fundamentalmente duas razões pelas quais as fontes não reguladas se tornam inadequadas em certas aplicações:

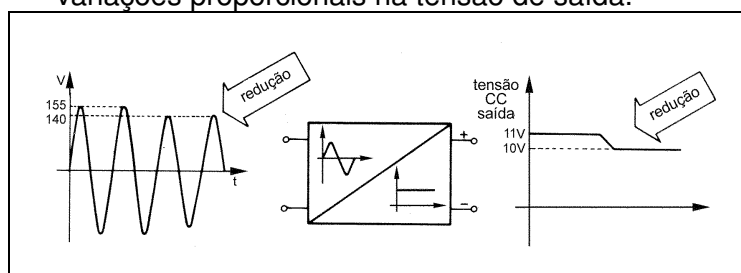
1. A regulação pobre:

Como resultado de uma regulação pobre, verifica-se uma variação na tensão de saída quando a carga varia. A influência de uma regulação pobre no desempenho de uma fonte de CC pode ser observada através de dois gráficos, um de uma fonte ideal e outro de uma fonte real.

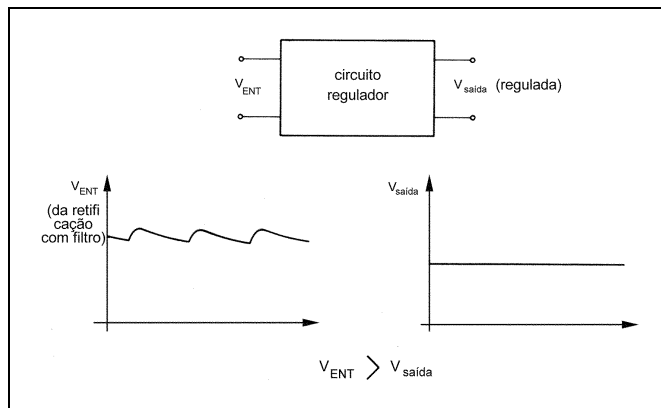


2. A estabilização pobre:

A tensão de saída varia conforme as variações de tensão de entrada. Nas fontes não reguladas, as variações de tensão de entrada (na rede AC) provocam variações proporcionais na tensão de saída.



Existem circuitos eletrônicos cuja finalidade é melhorar o desempenho das fontes de alimentação, fornecendo um valor pré-estabelecido de tensão da saída, independentemente das variações que ocorrem na corrente de carga na tensão da linha de alimentação CA. Normalmente, estes circuitos são denominados de reguladores de tensão, embora sejam na realidade reguladores e estabilizadores de tensão.



Deve-se sempre considerar que não existe um sistema regulador de tensão perfeito.

As variações na tensão de entrada sempre provocam pequenas alterações na tensão de saída.

Os sistemas reguladores devem funcionar de tal forma que as variações na tensão da saída (que sempre existem) sejam as menores possíveis.

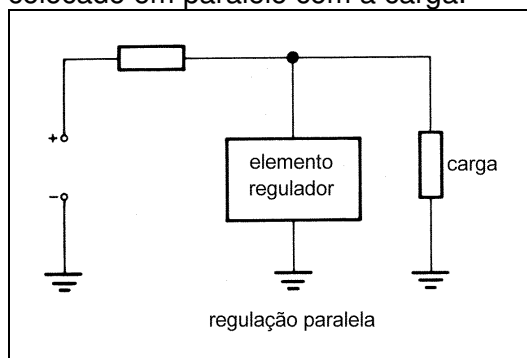
Tipos de reguladores

Os circuitos reguladores são classificados em dois grupos, segundo a posição do elemento regulador em relação a carga:

- Regulador paralelo
- Regulador série

Regulador paralelo

Um circuito regulador é classificado de **paralelo** quando o elemento regulador e colocado em paralelo com a carga.

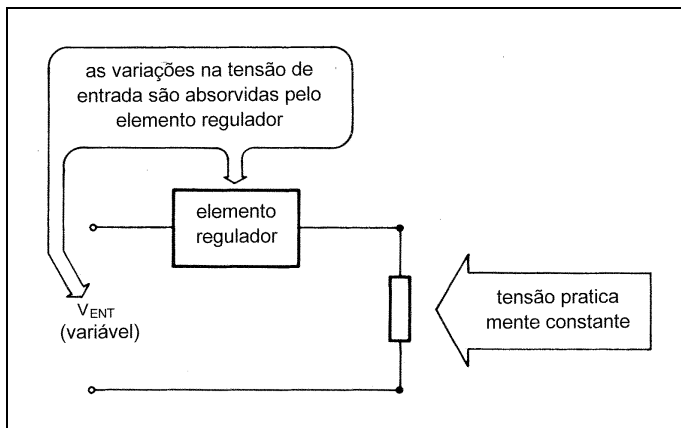


Um exemplo típico de regulação paralela é a regulação com diodo zener.

Regulador série

Um circuito regulador é classificado de **série** quando o elemento regulador é colocado em série com a carga.

Na regulação série, as **variações de tensão** da entrada são absorvidas pelo elemento regulador, entretanto a carga a uma tensão de saída praticamente constante.



Neste tipo de circuito, apenas o elemento regulador dissipa potência.

Princípio de funcionamento do regulador série com transistor

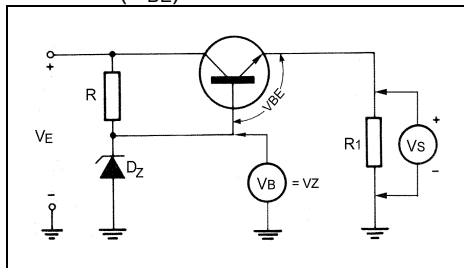
O princípio de funcionamento do circuito pode ser analisado com base nas tensões presentes no circuito.

A associação diodo zener-resistor, ligada à tensão de entrada, permitindo a obtenção de uma constante (V_Z), independentemente das variações da tensão de entrada.

A tensão constante do diodo zener é aplicada à base do **transistor**, ou seja, a tensão de base do transistor é estabilizada no valor V_Z .

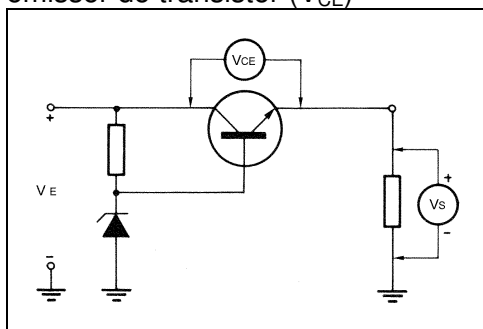
$$V_B = V_Z$$

Como a carga esta ligada ao circuito na posição de **resistor de emissor**, a tensão sobre esta carga será a tensão aplicada à base (V_Z) menos a queda na junção base emissor (V_{BE})



$$V_{RL} = V_B - V_{BE} \quad \text{ou} \quad V_S = V_Z - V_{BE}$$

A diferença entre a tensão de entrada e a tensão na carga (V_{RL}) fica entre coletor e emissor do transistor (V_{CE})

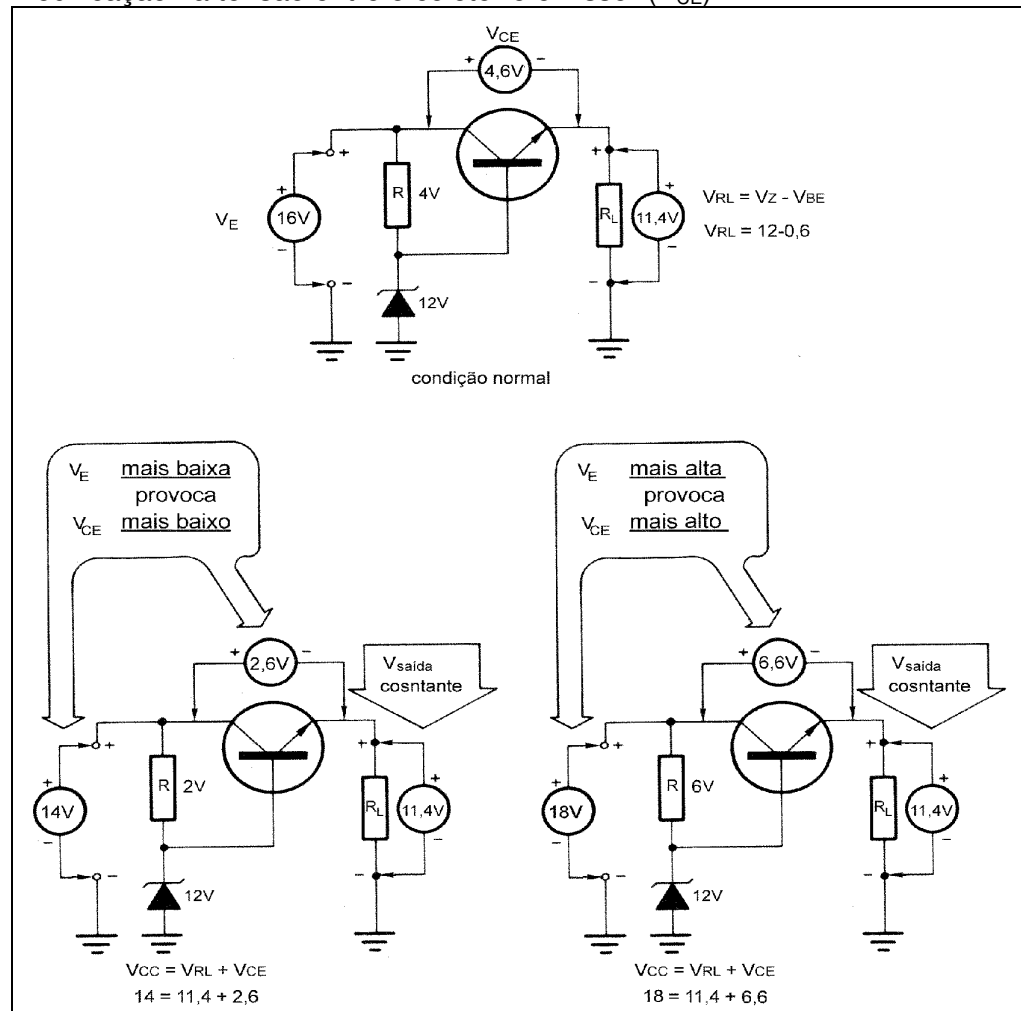


$$V_S = V_E - V_{CE}$$

Análise com base nas tensões: Estabilização

No circuito regulador série a transistor, a tensão aplicada à base pode ser considerada constante (mantida pelo diodo zener) de forma que a tensão sobre a carga também se mantém constante (0,6V ou 0,3V menor que V_Z).

As variações na tensão de entrada são assimiladas pelo transistor através de uma modificação na tensão entre o coletor e emissor (V_{CE}).



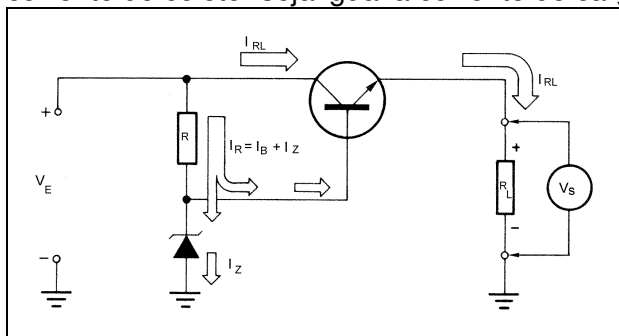
Nos circuitos das figuras anteriores se observa que a tensão de entrada sempre é maior que a tensão de saída. Isto é necessário para que a tensão coletor-emissor (V_{CE}) do transistor varie sem provocar alteração na saída do circuito.

Em geral, a tensão de entrada é aproximadamente 50% maior do que a tensão regulada necessária na saída.

Análise com base nas correntes: Regulação

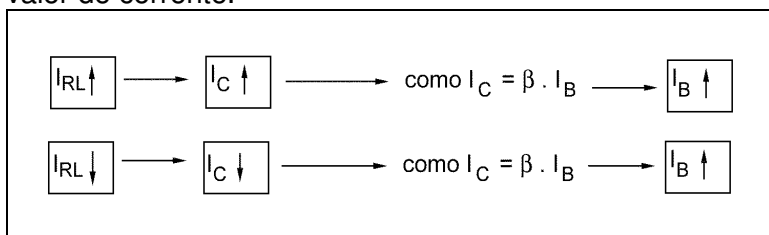
A análise do comportamento das correntes mostra a forma como o circuito regulador reage às modificações da corrente de carga.

Tomando como base uma condição inicial, com uma carga estabelecida, as correntes do circuito são mostradas na figura a seguir. Como $I_{RL} = I_E \cong I_C$, considera-se que a corrente de coletor seja igual a corrente de carga.

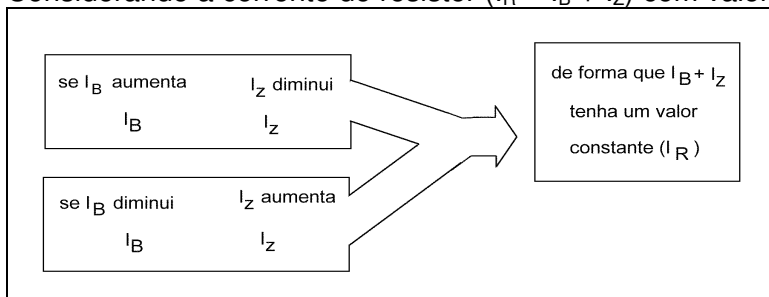


A corrente de base necessária para que o transistor forneça a corrente de carga é absorvida do circuito resistor-zener.

Quando a carga varia (exigindo maior ou menor corrente), a corrente de coletores se modifica. Com a modificação na corrente de coletor, a base passa a absorver outro valor de corrente.

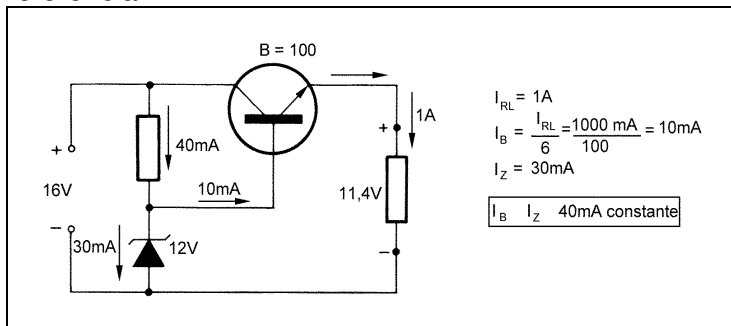


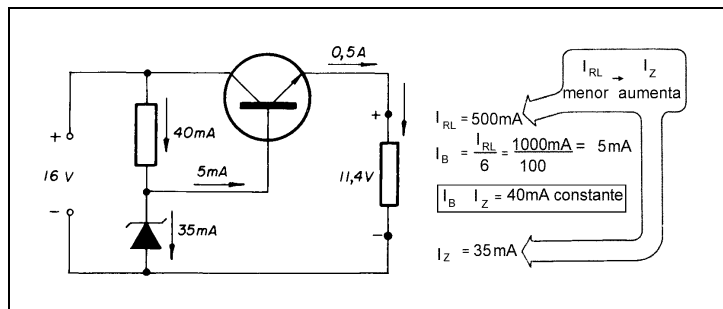
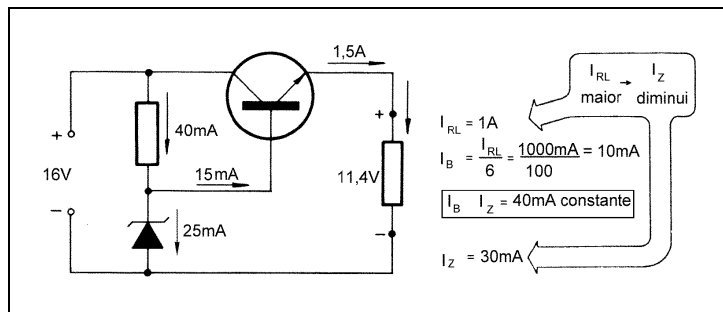
Considerando a corrente do resistor ($I_R = I_B + I_Z$) com valor constante, verifica-se:



Cabe ao diodo zener absorver o excesso de corrente ou fornecer uma corrente extra à base do transistor, conforme a situação de carga do circuito.

As figuras a seguir ilustram o que foi descrito, tomando uma carga de 1A como referência

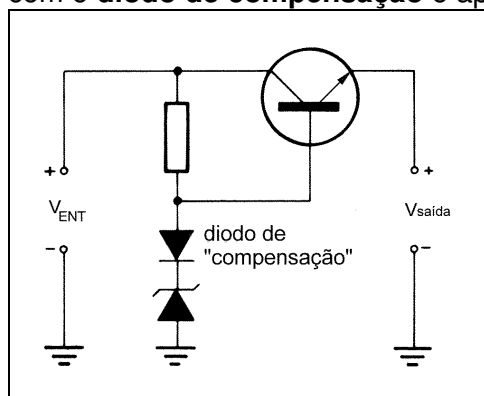




Verifica-se que nos circuitos reguladores série a condição fundamental para que a tensão de saída permaneça constante é a regulação de tensão no diodo zener. A tensão zener não deve variar com as modificações da carga ou da tensão de entrada.

Compensação da tensão V_{BE}

Para compensar a **perda de tensão** na junção base-emissor, pode-se acrescentar um diodo em série com o diodo zener (no sentido de condução). A configuração do circuito com o **diodo de compensação** é apresentada na figura a seguir.



Com a colocação do diodo, a tensão aplicada à base do transistor passa a ser $V_B = V_Z + V_D$. Utilizando um diodo de mesmo tipo do transistor (germânio ou silício), o acréscimo de tensão na base compensará a queda de tensão na junção base-emissor.

$V_{SAÍDA} = -(V_Z + V_D) - V_{BE}$

Como V_D tem o mesmo valor de V_{BE} , obtem-se:

$$V_{SAÍDA} = V_Z + V_D - V_{BE} \Rightarrow V_{SAÍDA} = V_Z$$

Dissipação de potência no circuito regulador série

Os circuitos reguladores de tensão sempre apresentam componentes que dissipam potências elevadas em forma de calor.

Nos circuitos reguladores série, o componente sujeito à dissipação elevada é o transistor.

Esta potência de coletor é o produto da corrente de coletor (mesmo I de carga) pela diferença de tensão entre a entrada e a saída.

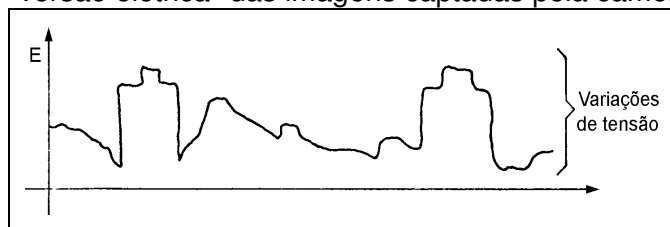
$$P_C = I_{RL} \cdot (V_{ENT} - V_{SAÍDA}) \quad (\text{SÉRIE})$$

Os transistores utilizados nos circuitos reguladores, em geral, são de potência, dimensionados de forma que a dissipação real não provoque o **disparo térmico**, levando o transistor à destruição.

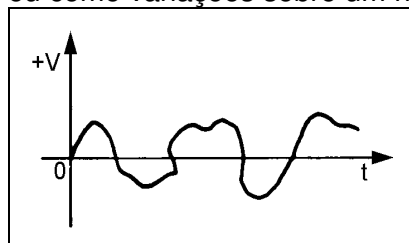
Amplificação de sinais elétricos

Denomina-se de sinal elétrico a **qualquer variação de tensão ou corrente** através da qual se conduz uma informação.

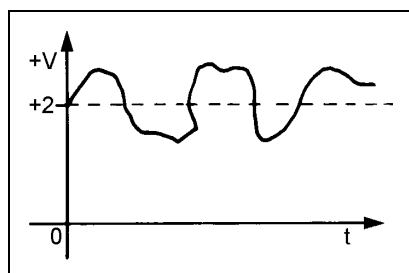
O sinal de televisão, por exemplo, se constitui em variações de tensão que são uma “versão elétrica” das imagens captadas pela câmera.



Os sinais elétricos podem se apresentar como variações puras de tensão ou corrente ou como variações sobre um nível de tensão ou corrente contínua.



Sinal → variação pura de tensão ou corrente



Sinal → variação sobre um nível de tensão CC

A música, reproduzida por um alto-falante, por exemplo, nada mais é do que um **sinal elétrico** transformado em som pelo alto-falante.

Dependendo da aplicação a que se destinam os sinais elétricos podem ser de grande e pequena intensidade.

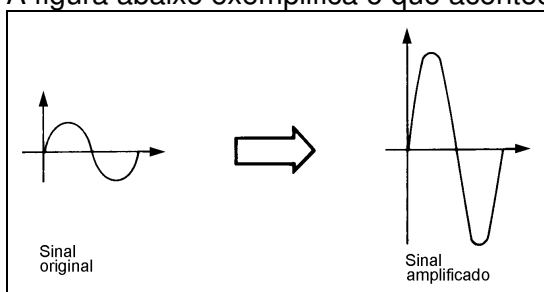
Por exemplo:

Para movimentar os alto-falantes de um estádio de futebol necessita-se que o sinal elétrico a ser reproduzido tenha uma grande intensidade, enquanto que para movimentar os fones de um gravador (ou **headfone**) é suficiente um sinal de pequena intensidade.

Existe um processo através do qual um sinal elétrico de pequena intensidade, pode ser transformado em um sinal elétrico de grande intensidade. Este processo é denominado de **amplificação**.

Amplificação é um processo que visa aumentar a intensidade (amplitude) de um sinal elétrico sem alterar a sua frequência e, na maioria dos casos, sem alterar a sua forma.

A figura abaixo exemplifica o que acontece com um sinal elétrico ao ser amplificado.

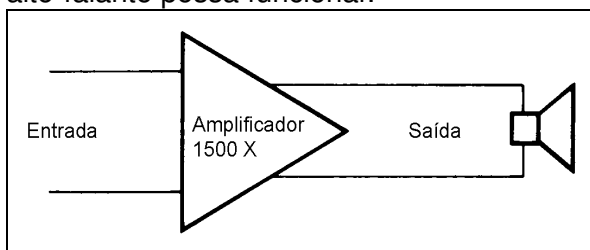


A amplificação possibilita, por exemplo, que o pequeno sinal elétrico produzido por uma agulha de toca-disco (alguns milivolts) seja reproduzido em um alto-falante.

Amplificador e estágio amplificador

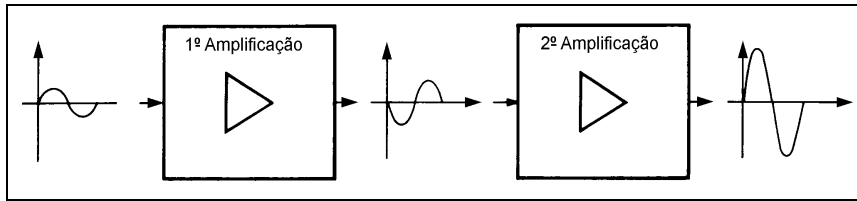
O termo “amplificador” define todo um conjunto de componentes e circuitos que realizam a amplificação de um sinal.

Um amplificador e toca-disco, por exemplo, se compõe de uma série de pequenos circuitos que, no conjunto, amplificam o sinal da agulha mais de 1000 vezes para que o alto-falante possa funcionar.

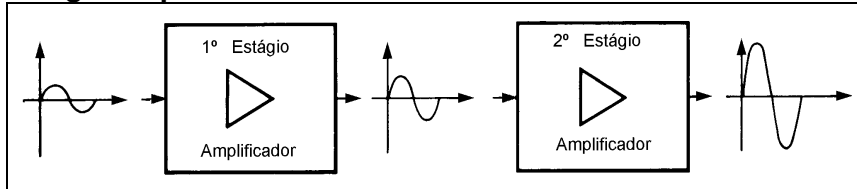


Amplificações de sinal da ordem de 1000 ou 2000 vezes são empregadas constantemente em circuitos de rádio, televisão e controles industriais.

Entretanto, devido a uma limitação prática, não é possível amplificar um sinal 1000 ou 2000 vezes diretamente. A amplificação é feita parceladamente, através de uma série de circuitos que realizam amplificações sucessivas sobre o sinal.



Cada um dos circuitos que realiza uma parcela da amplificação total é denominado de **estágio amplificador**.

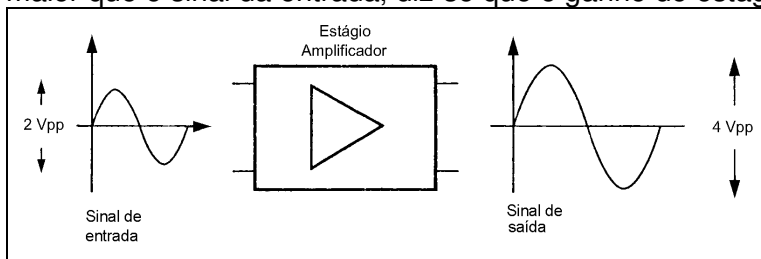


Ganho de um estágio amplificador

O ganho de um estágio amplificador define quantas vezes o sinal é amplificado por este estágio. É uma relação direta entre o sinal presente na saída do estágio e o sinal amplificado à sua entrada.

$$\text{Ganho} \rightarrow G = \frac{\text{sinal de saída}}{\text{sinal de entrada}}$$

Assim, se o sinal na saída de um estágio amplificador tem a amplitude duas vezes maior que o sinal da entrada, diz-se que o ganho do estágio é 2.



$$G = \frac{4V_{pp}}{2V_{pp}} = 2$$

O ganho dos estágios amplificadores pode ser determinado pela medição do sinal de saída e entrada com o osciloscópio.

Normalmente o ganho dos estágios amplificadores está na faixa 10 a 50 vezes. O

termo “ganho” é genérico, podendo expressar uma amplificação de potência.

$$\left(\frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \right), \text{ de tensão } \left(\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}} \right) \text{ ou corrente } \left(\frac{I_{\text{saída}}}{I_{\text{entrada}}} \right).$$

Tipos de estágios amplificadores

Os estágios amplificadores podem ser de três tipos:

- Estágio amplificador de tensão
- Estágio amplificador de corrente
- Estágio amplificador de potência para saída

Estágio amplificador de tensão

É um estágio destinado a aumentar a amplitude de tensão dos sinais aplicados a sua entrada. Recebem tensões da ordem de microvolts ou milivolts, propiciando alto ganho na saída (normalmente até 100 vezes).

Os estágios amplificadores de tensão funcionam como correntes pequenas de forma que não podem ser usados para acionar, por exemplo, um alto-falante que necessita de corrente mais elevadas.

Estágio amplificador de corrente

São estágios que se destinam a fornecer grandes variações de corrente na saída a partir de pequenas variações de corrente aplicadas à entrada.

Estágio amplificador de potência para saída

São estágios amplificadores com pequeno ganho de tensão (2 a 5 vezes) mas que propiciam também um ganho de corrente.

São destinados ao acionamento das cargas (alto-falantes, relés, etc) porque têm capacidade de corrente suficiente para operá-las.

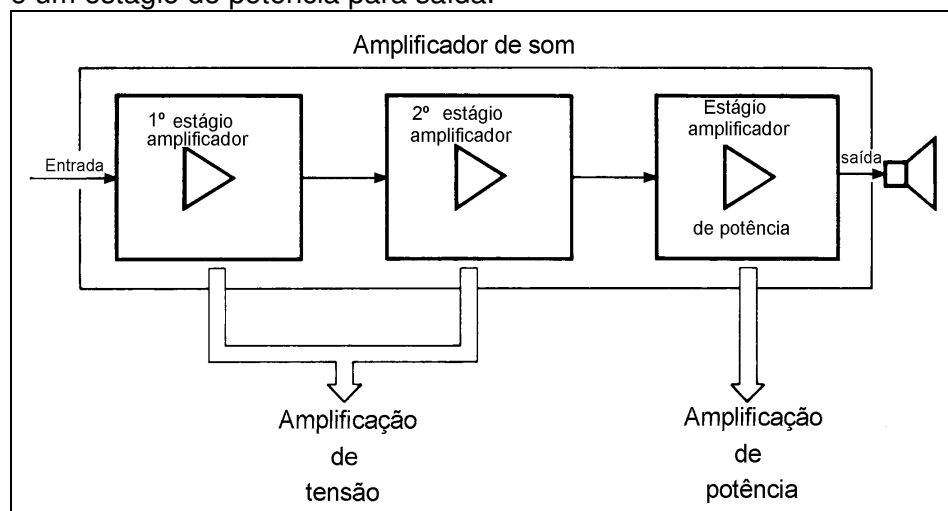
O ganho dos estágios de potência é normalmente definido em termos de potência:

$$G (\text{Potência}) = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada}}$$

Os estágios de potência são capazes de desenvolver sobre a carga potências de muitos **watts** recebendo na sua entrada apenas alguns miliwatts.

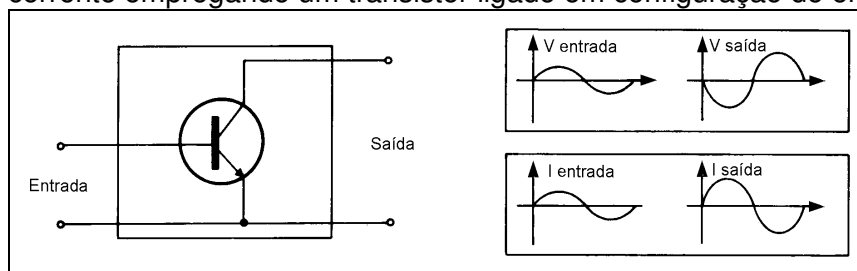
O amplificador de som

Os amplificadores de som são uma composição de estágios amplificadores de tensão e um estágio de potência para saída.



Amplificador em emissor comum

É um tipo de circuito amplificador de sinais que proporciona alto ganho de tensão e de corrente empregando um transistor ligado em configuração de emissor comum.



Os estágios amplificadores com transistor em emissor comum são os mais empregados na amplificação de sinais devido ao fato de apresentarem alto ganho de tensão e de corrente, o que resulta em um ganho de potência elevado.

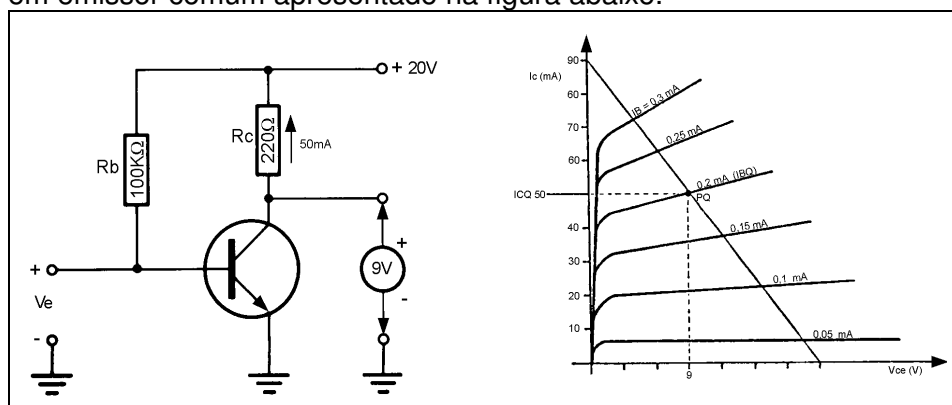
Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos estágios amplificadores baseia-se na mudança do ponto de operação do transistor.

O funcionamento do estágio amplificador pode ser dividido em três condições:

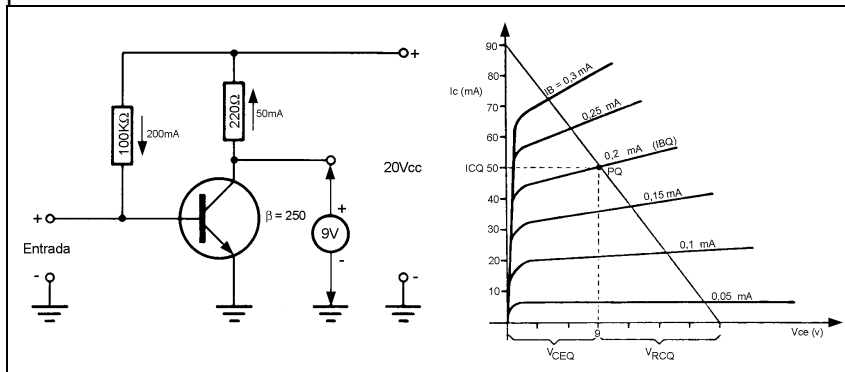
- Sem sinal de entrada
- Com sinal de entrada positivo
- Com sinal de entrada negativo

As três condições podem ser analisadas tomando como base o estágio amplificador em emissor comum apresentado na figura abaixo.



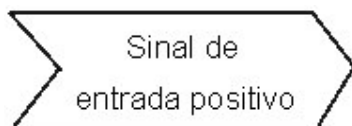
Sem sinal de entrada

Quando o estágio amplificador não recebe sinal na entrada, o transistor se mantém no ponto de funcionamento.



Com sinal de entrada positivo

Um sinal de entrada é positivo quando a corrente aplicada circula no mesmo sentido da corrente de polarização, somando-se a esta.



$$I_B = I_{BQ} + I_S$$

Onde:

I_B = Corrente de base

I_{BQ} = Corrente de polarização de base

I_S = Corrente de sinal

Tomando como exemplo um sinal positivo de 50μA aplicado ao circuito tem-se o que:

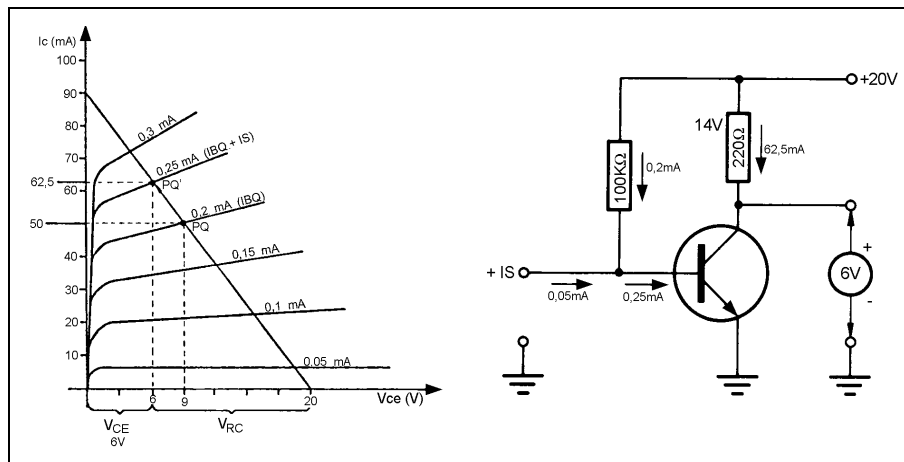
$$I_B = I_{BQ} + I_S$$

$$I_B = 200\mu A + 50\mu A$$

$$I_B = 250\mu A$$

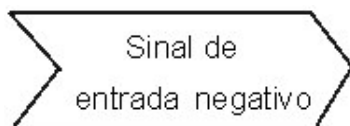
A mudança na corrente de base ($I_{B\uparrow}$) provoca alteração na corrente de coletor ($I_{B\uparrow} \rightarrow I_{C\uparrow}$), na queda de tensão do resistor de coletor ($I_{C\uparrow} \rightarrow V_{RC\uparrow}$) e na tensão de coletor-emissor ($V_{RC\uparrow} \rightarrow V_{CE\downarrow}$).

Através da curva característica com a reta de carga (220Ω) pode se determinar graficamente o comportamento do transistor com o aumento da corrente de base.



Com sinal de entrada negativo

Um sinal de entrada é negativo quando a corrente aplicada circula em sentido oposto a corrente de polarização. Logo:



$$I_B = I_{BQ} - I_S$$

Considerando-se como exemplo um sinal negativo de $50\mu A$ tem-se:

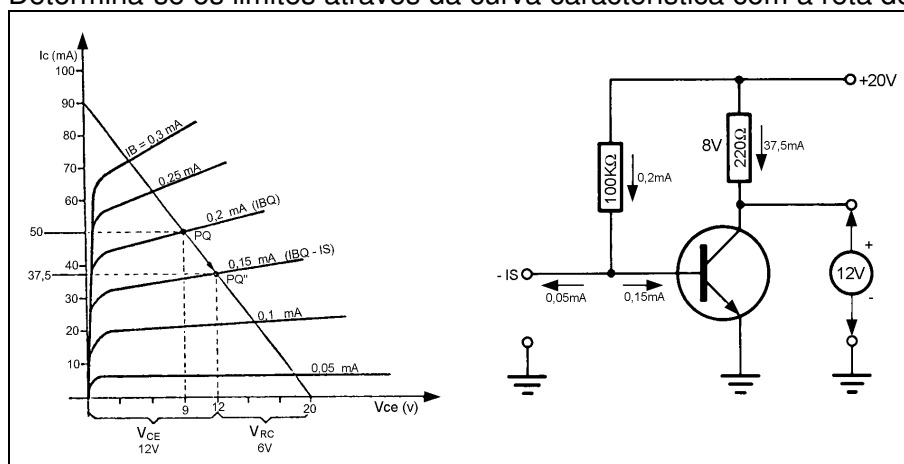
$$I_B = I_{BQ} - I_S$$

$$I_B = 200\mu A - 50\mu A$$

$$I_B = 150\mu A$$

A mudança na corrente de base ($I_{B\downarrow}$) provoca modificações na corrente de coletor ($I_{B\downarrow} \rightarrow I_{C\downarrow}$), na queda de tensão do resistor de coletor ($I_{C\downarrow} \rightarrow V_{RC\downarrow}$) e na tensão coletor-emissor ($V_{RC\downarrow} \rightarrow V_{CE\uparrow}$).

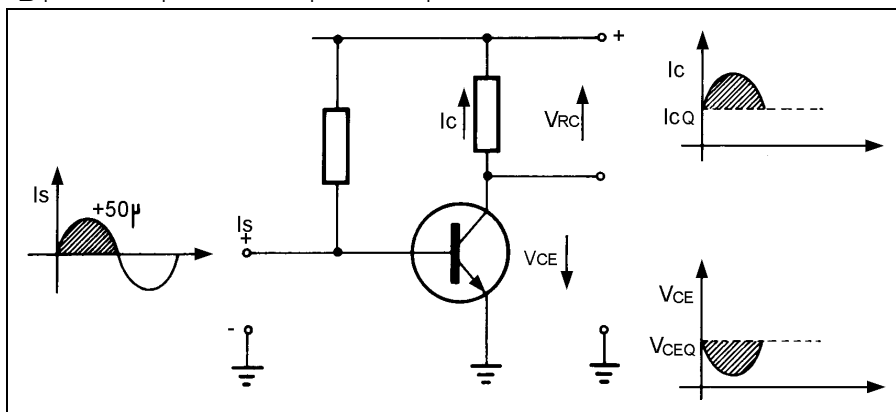
Determina-se os limites através da curva característica com a reta de carga.



Considerando que o sinal aplicado seja uma variação senoidal de tensão, tem-se uma variação senoidal de corrente conforme a figura abaixo.

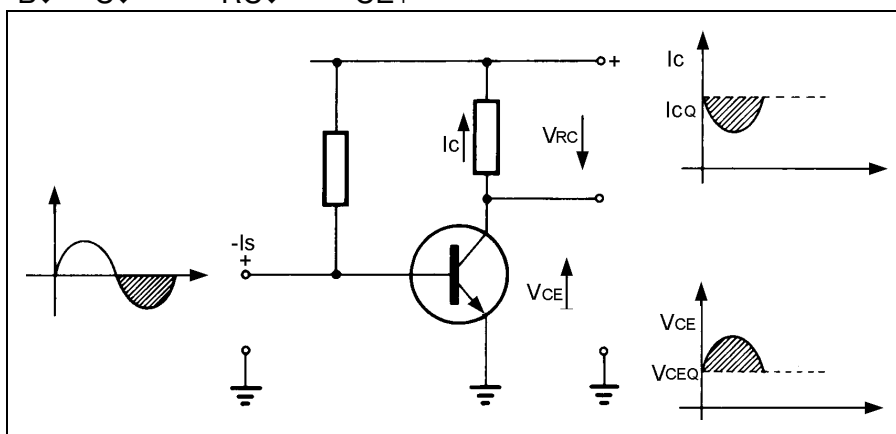
No semi ciclo em que o sinal de entrada é positivo tem-se:

$I_B \uparrow$ $I_C \uparrow$ $V_{RC} \uparrow$ $V_{CE} \downarrow$ acompanhando a forma senoidal do sinal de entrada.

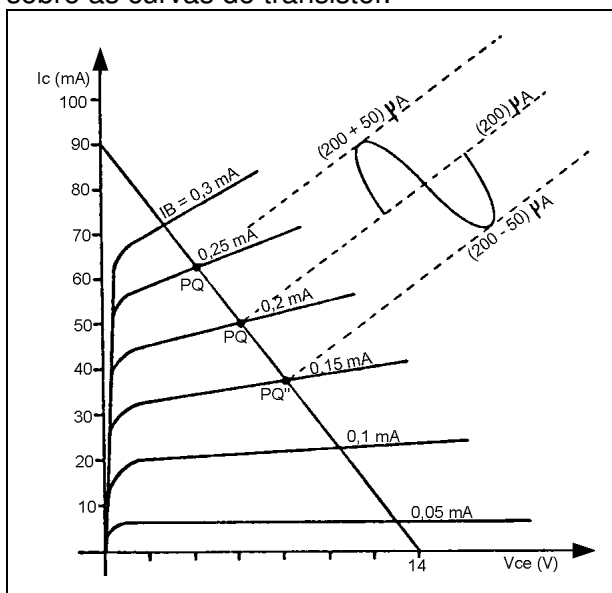


No semi ciclo em que o sinal de entrada é negativo tem-se:

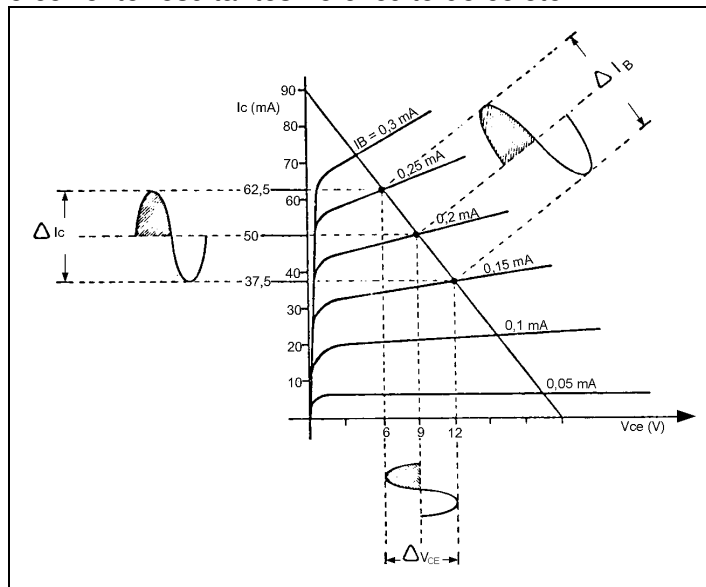
$I_B \downarrow$ $I_C \downarrow$ $V_{RC} \downarrow$ $V_{CE} \uparrow$ acompanhando a forma senoidal do sinal de entrada



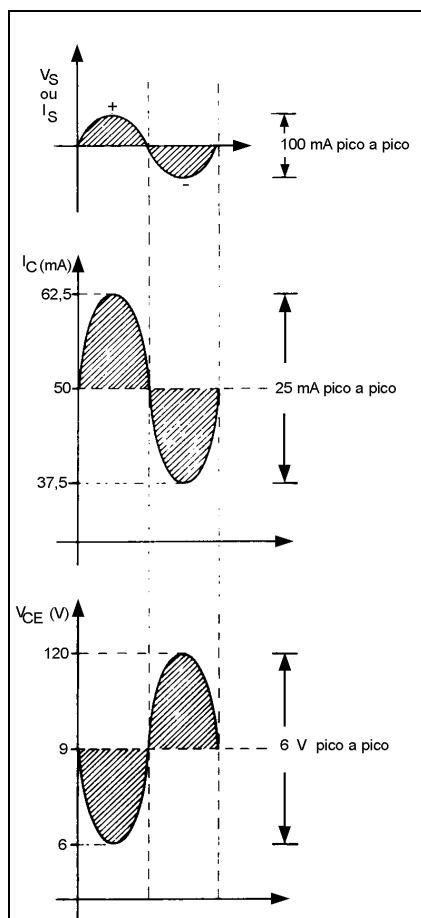
Os valores reais de corrente e tensões podem ser obtidos aplicando o sinal de entrada sobre as curvas do transistor.



Projetando os pontos A, B e C na vertical e horizontal se obtém as variações de tensão e corrente resultantes no circuito de coletor.



A figura abaixo mostra um ciclo completo do sinal de entrada e as formas de saída da corrente de coletor e tensão coletor-emissor ($V_{CE} = V_{saída}$) colocados em gráficos sincronizados.



Através da análise dos três gráficos verifica-se:

- As variações da corrente de coletor são uma versão amplificada (muitas vezes maior e em fase com as variações da corrente de sinal).
- As variações da tensão de coletor ($V_{saída}$) são uma versão amplificada e defasada (180°) da tensão de sinal.

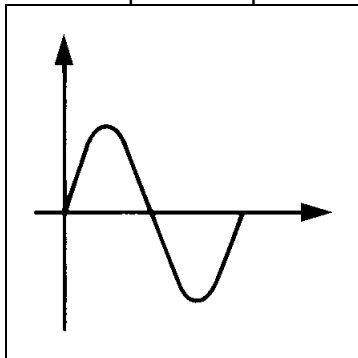
Conclusão

No amplificador em emissor comum

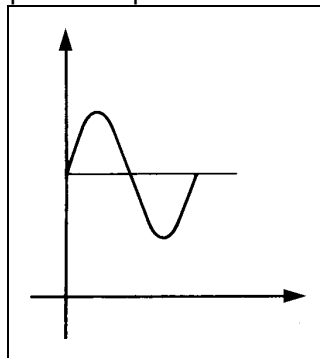
- As variações da corrente de coletor estão em fase com o sinal de entrada.
- As variações da tensão de saída (V_{CE}) estão defasadas 180° (invertidas) em relação ao sinal de entrada.
- As variações de corrente de coletor a tensão de saída são versões amplificadas do sinal de entrada.

Acoplamento e desacoplamento de sinais

Um sinal pode ser puro ou acompanhado por um nível de tensão CC.



Sinal puro

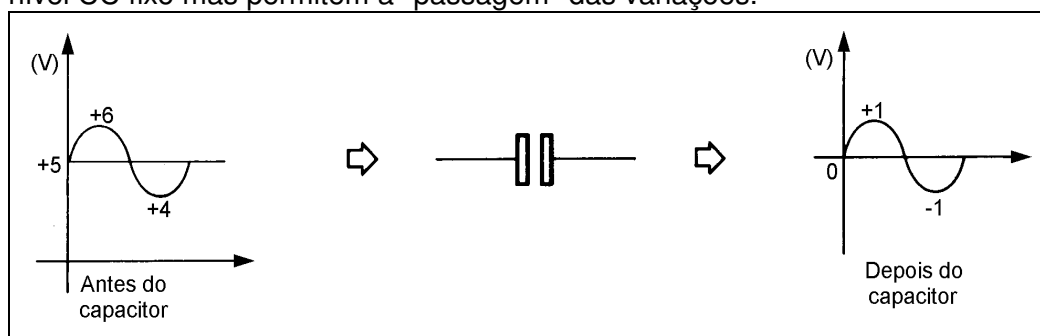


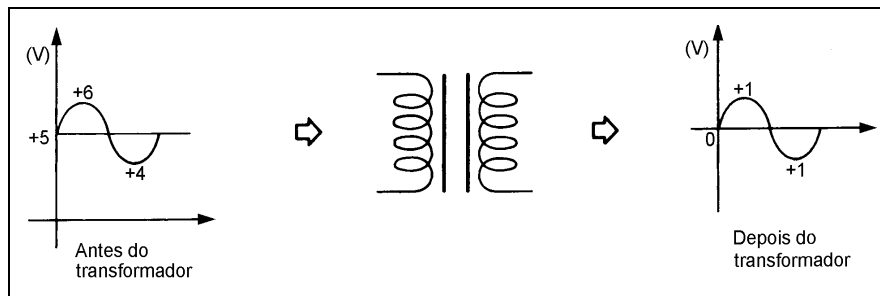
Sinal com nível de CC

No caso dos amplificadores interessa apenas amplificar **as variações** de tensão e corrente (sinal puro ou apenas a variação sobre o nível CC).

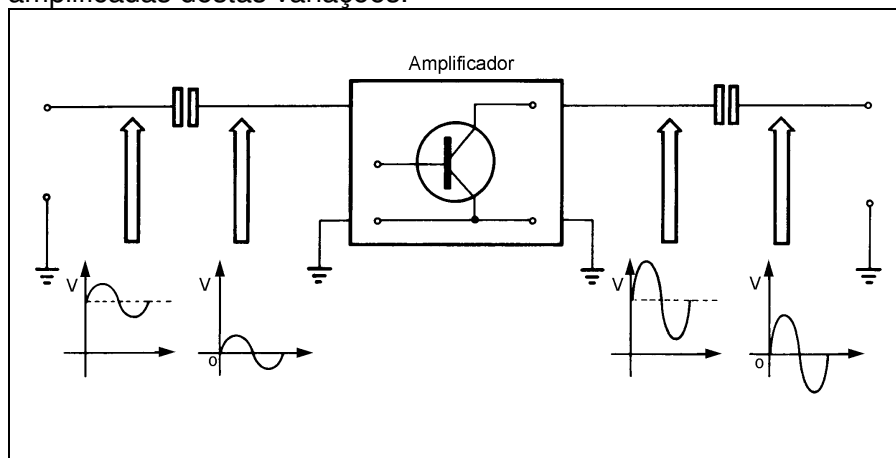
Se o sinal a ser amplificado está acompanhado por um nível CC é necessário eliminar esta componente CC para que não interfira nas tensões de polarização.

Isto pode ser feito através de capacitores ou transformadores que não transferem o nível CC fixo mas permitem a “passagem” das variações.

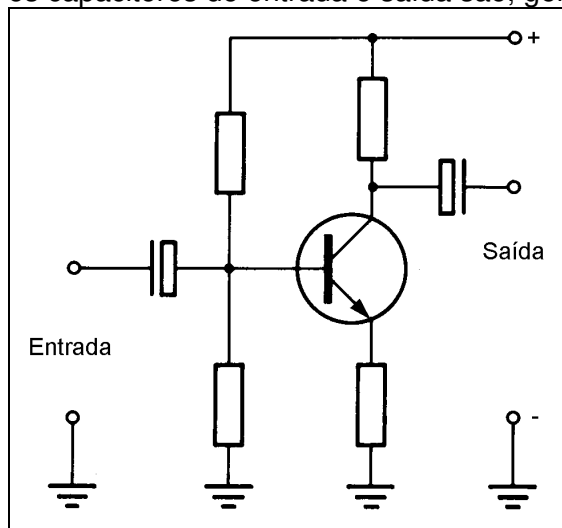




Os estágios amplificadores sempre possuem um capacitor ou transformador de entrada e outro de saída, de forma que o circuito amplificador propriamente dito receba apenas as variações de tensão ou corrente e entregue também apenas versões amplificadas destas variações.



Nos estágios amplificadores transistorizados para audio-freqüências (20Hz a 20KHz) os capacitores de entrada e saída são, geralmente, eletrolíticos.



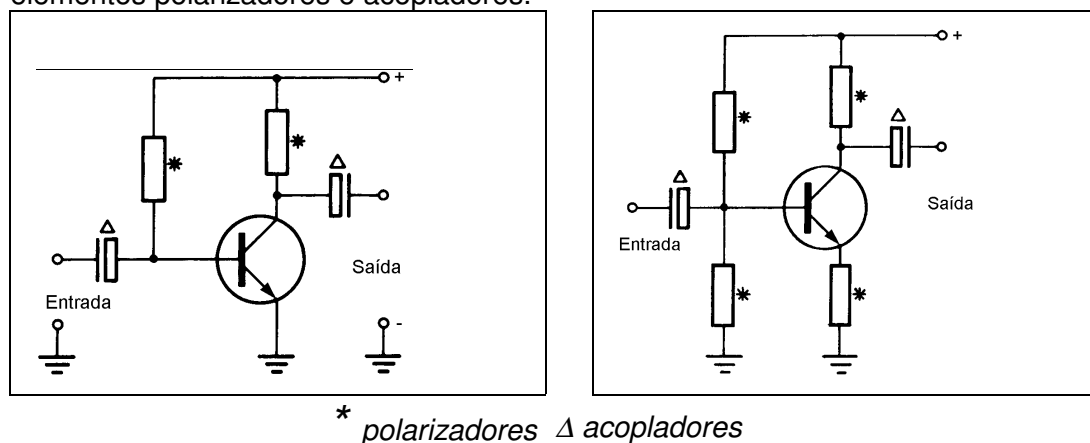
Assim, pode-se dizer que o circuito amplificador de sinais na configuração de emissor comum se compõe fundamentalmente de dois grupos de elementos:

- Elementos de polarização
- Elementos para aplicação e retirada de sinais

Os elementos de polarização são aqueles que tem por finalidade estabelecer o ponto de funcionamento do transistor (resistor de coletor, resistores de base, resistor de emissor).

Os elementos de entrada e saída de sinal são denominados de “acopladores” e são os capacitores ou transformadores de entrada e saída.

As figuras a seguir mostram dois estágios amplificadores completos, indicando os elementos polarizadores e acopladores.



Desacoplamento do emissor

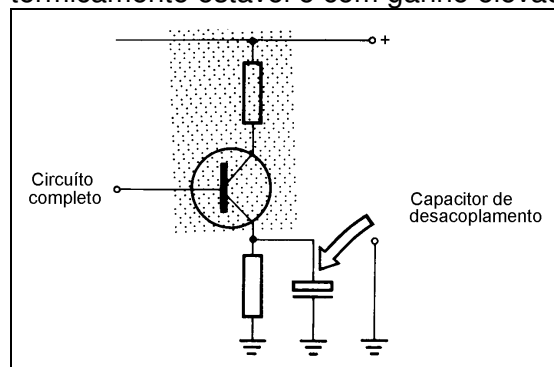
Nos estágios amplificadores em que o emissor está conectado diretamente ao terra, o ganho é elevado, geralmente maior que 50.

Como desvantagem este tipo de circuito tem baixa estabilidade térmica, sendo adequado para estágios iniciais não sujeitos a variações de temperaturas muito amplas.

Nos estágios polarizados por divisor de tensão a estabilidade térmica pode ser melhorada acrescentando-se um resistor de emissor ao circuito.

Por outro lado, o resistor de emissor incluindo no circuito reduz sensivelmente o seu ganho, que passa a se situar tipicamente próximo a 10.

Entretanto, acrescentando-se ao circuito um capacitor em paralelo com o resistor de emissor, denominado de **capacitor de desacoplamento** se obtém um estágio termicamente estável e com ganho elevado.



Se o capacitor conectado em paralelo com o resistor de emissor tiver uma reatância muito baixa, poderá ser considerado como um curto circuito, **toda a vez que o transistor amplificar um sinal.**

Enquanto o circuito estiver no ponto de operação, **sem sinal de entrada**, o capacitor se comporta como um circuito aberto, não interferindo nas tensões de polarização.

Quando se aplica um sinal de entrada, o capacitor se comporta (idealmente) como um curto circuito, de forma que o circuito funciona como se o emissor estivesse ligado diretamente à massa.

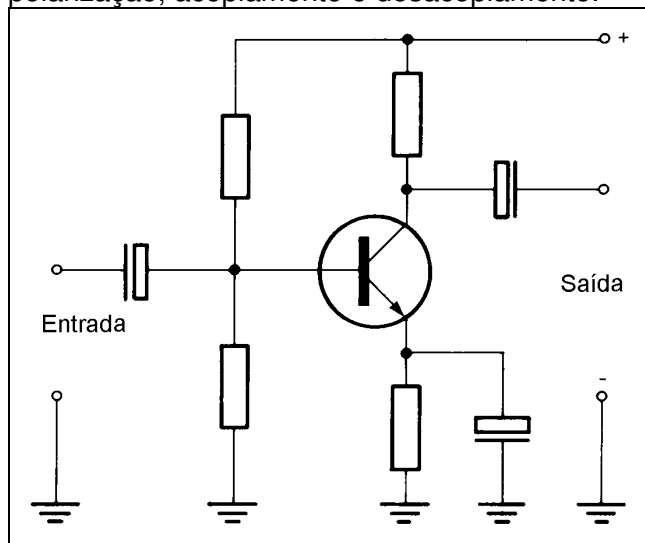
Desta forma pode-se obter um estágio amplificador com ganho da ordem de 50 e com boa estabilidade térmica.

Para que o capacitor realize o desacoplamento adequado sua reatância deve ser pequena em relação ao resistor de emissor.

Na prática, a reatância do capacitor de acoplamento deve apresentar uma reatância 10 vezes menor que o valor do resistor de emissor, menor frequência que será amplificada.

Por esta razão, em geral os capacitores de desacoplamento são eletrolíticos com valores entre $1\mu\text{F}$ e $50\mu\text{F}$.

A figura abaixo mostra um estágio amplificador completo, com os elementos de polarização, acoplamento e desacoplamento.



Propriedade do estágio amplificador em emissor comum

Como características do estágio amplificador pode-se citar:

- Ganho de corrente
- Ganho de tensão
- Impedância de entrada
- Impedância de saída

Ganho de corrente (A_i)

O ganho de corrente de um estágio amplificador é definido como sendo a relação entre a variação da corrente de saída e a variação da corrente de entrada. No estágio amplificador em emissor comum tem-se:

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

O ganho de corrente do estágio amplificador em emissor comum equivale ao próprio ganho de corrente do transistor (β).

Em termos de classificação genérica o ganho de corrente do estágio amplificador em emissor pode ser considerado **alto**, situando-se tipicamente em algumas dezenas de vezes.

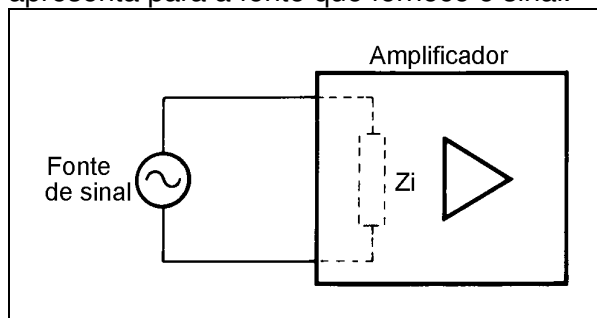
Ganho de tensão

No estágio amplificador em EC o ganho de tensão depende muito dos elementos “polarizadores” e das correntes de polarização. Isto dificulta a determinação analítica. Entretanto, o ganho de tensão pode ser determinado facilmente na prática, medindo-se com o osciloscópio a tensão de saída e de entrada.

Em termos de classificação genérica o ganho de tensão do estágio amplificador em emissor comum também pode ser considerado como **alto**. Tipicamente este ganho é de algumas dezenas de vezes.

Impedância de entrada (Z_i)

A impedância de entrada é a “resistência” que a entrada de um circuito amplificador apresenta para a fonte que fornece o sinal.

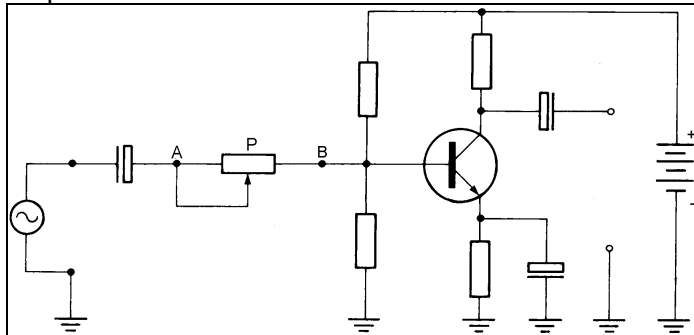


A impedância de entrada dos estágios amplificadores em emissor comum geralmente é de algumas centenas de ohms, que pode ser classificada genericamente como média.

A determinação analítica da impedância de entrada implica em um conhecimento mais profundo do transistor. Para evitar a necessidade de uma resolução matemática, em

caso de necessidade, pode-se determinar a impedância de entrada por um processo prático.

Este processo emprega um potenciômetro em série com a entrada do estágio amplificador.



Com o potenciômetro no valor mínimo de resistência (0Ω) ajusta-se a tensão pico a pico do sinal no ponto A para um valor conhecido (por exemplo 50mVpp).

Após, ajusta-se o potenciômetro até que a tensão no ponto B seja a metade da tensão aplicada ao ponto A (por exemplo 25mVpp)

Nesta situação, pelo princípio do divisor de tensão, a resistência do potenciômetro é igual a impedância de entrada do estágio. Pode-se, então, desconectar o potenciômetro do circuito sem mover o seu cursor e medir a sua resistência que é igual a Z_i do amplificador.

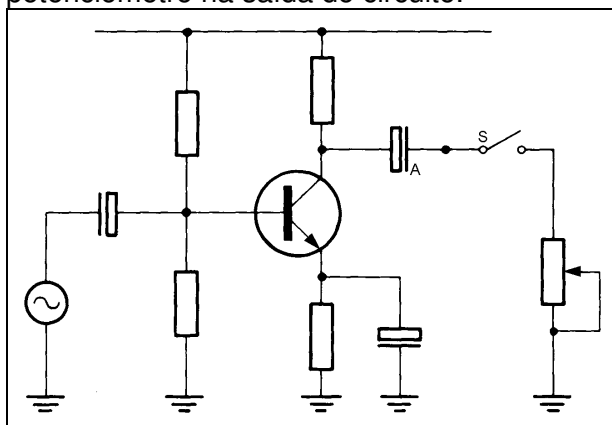
O conhecimento da impedância de entrada de um amplificador é importante quando se deseja conectá-lo a uma fonte de sinal e obter o correto casamento de impedâncias.

Impedância de saída (Z_o)

A impedância de saída de um circuito amplificador também é importante no momento em que se pretende conectar a saída deste estágio com outro circuito posterior.

O valor da impedância de saída pode ser determinado matematicamente, a partir de um conhecimento mais amplo do transistor.

Entretanto, o seu valor também pode ser obtido por processo prático, utilizando-se um potenciômetro na saída do circuito.



Com a chave desligada (amplificador sem carga) mede-se a tensão pico a pico do sinal presente no ponto A.

Após, liga-se a chave e ajusta-se o potenciômetro até que o sinal no ponto A tenha a metade da amplitude inicial.

Nesta situação, a resistência do potenciômetro tem o mesmo valor da impedância de saída do estágio.

É importante salientar que tanto para o processo prático de determinação de Z_i com Z_o o gerador de sinal deve ser ajustado para que não haja distorção no sinal de saída o que levaria a valores incorretos de Z_i e Z_o .

Os estágios amplificadores em emissor comum tem uma impedância de saída que pode ser classificada como **alta** situando-se tipicamente na faixa de centenas de ohms até vários quiloohms.

Em resumo, as características genéricas do amplificador em emissor comum são:

Ganho de corrente = alto (dezenas de vezes)

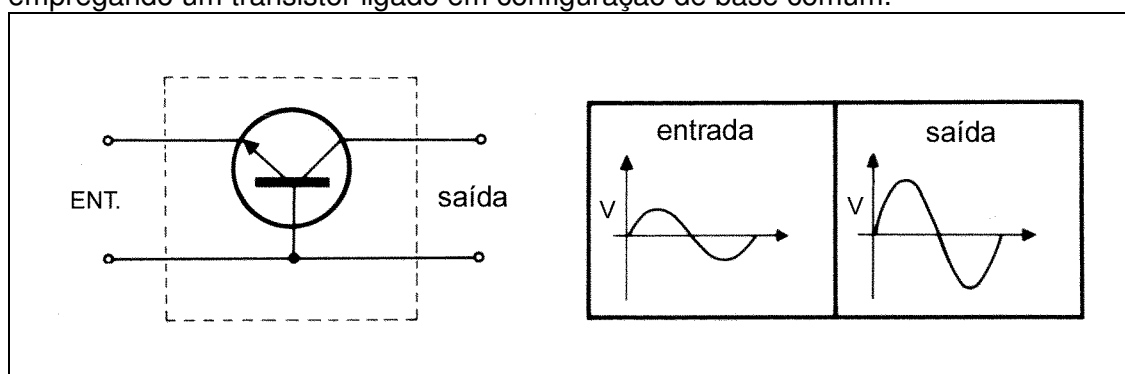
Ganho de tensão = alto (dezenas de vezes)

Impedância de entrada = (centenas de ohms)

Impedância de saída = (centenas até milhares de ohms)

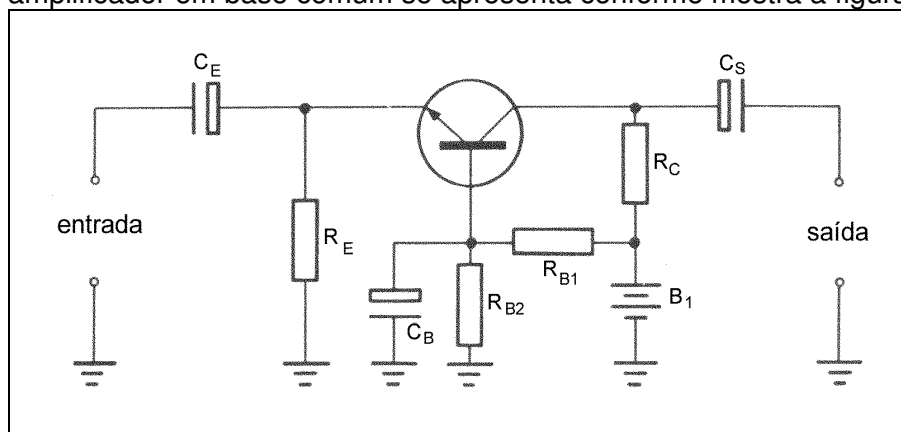
Amplificador em base comum

É o tipo de circuito amplificador de sinais que proporciona um alto ganho de tensão, empregando um transistor ligado em configuração de base comum.



O circuito do amplificador em base comum

Em uma forma simples, utilizando duas fontes de alimentação, o circuito do amplificador em base comum se apresenta conforme mostra a figura a seguir.



Neste circuito a função dos componentes é:

R_{B1} e R_{B2} : divisor de tensão

R_E : resistor de emissor

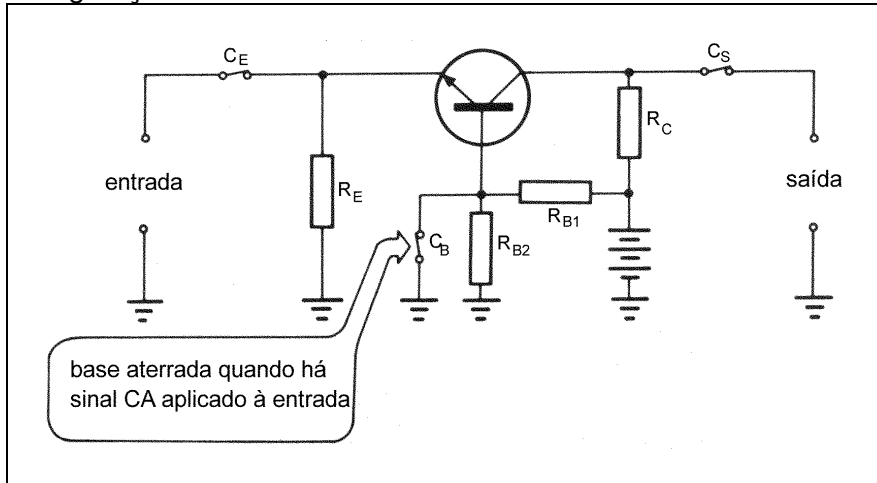
R_C : resistor de coletor

} polarização por divisor de tensão

C_E e C_S : capacitores de acoplamento de entrada e saída

C_B : capacitores de desacoplamento da base

Do ponto de vista de CA (quando existe sinal aplicado à entrada), considerando os capacitores como um curto circuito, a base fica aterrada e o circuito assume a configuração de base comum.



Princípio de funcionamento

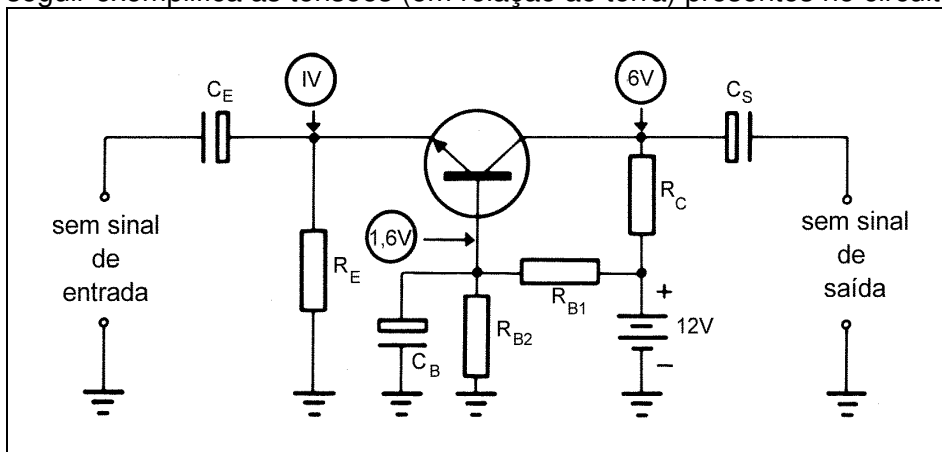
O funcionamento do amplificador em base comum baseia-se na modificação da tensão entre base e emissor do transistor. O primeiro aspecto a considerar é que **no amplificador em base comum a tensão de base V_B é sempre constante**, mantida pelo divisor de tensão e capacitor de acoplamento.

A partir desta consideração pode-se analisar o funcionamento do amplificador em base comum em três situações:

- Sem sinal de entrada;
- Com sinal de entrada positivo;
- Com sinal de entrada negativo.

Sem sinal de entrada

Quando não há sinal de entrada o circuito fica em seu ponto de operação. A figura a seguir exemplifica as tensões (em relação ao terra) presentes no circuito.



Com sinal de entrada positivo

Quando um sinal de entrada positivo é aplicado ao circuito, a tensão de sinal se soma a tensão no resistor de emissor.

Por exemplo, uma tensão senoidal de sinal de $+0,1V_p$ aplicada à entrada do estágio tomado como referência resultaria no aumento da tensão de emissor para $1,1V$.

Como a tensão na base é fixa, o aumento na tensão de emissor provoca a redução na tensão base emissor do transistor.

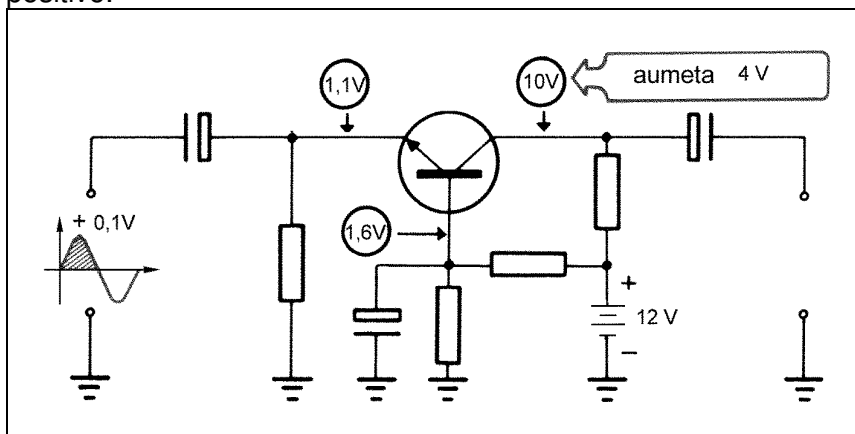
$V_{BE} = V_B - V_E$	como $V_B = \text{fixo}$	$V_{E\uparrow} \quad V_{BE\downarrow}$
----------------------	--------------------------	--

Conseqüentemente, o sinal de entrada positivo provoca uma redução na corrente de base ($V_{BE\downarrow}$ logo $I_{B\downarrow}$)

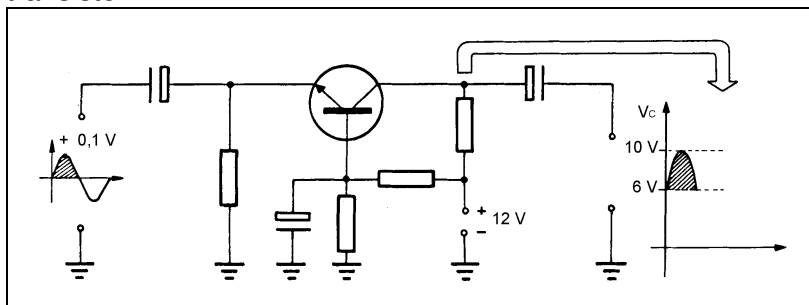
A partir daí, conhecendo-se a relação entre os parâmetros I_B , I_C e V_{CE} pode-se afirmar:

$I_{B\downarrow}$	$I_{C\downarrow}$	$V_{RC\downarrow}$	$V_{CE\uparrow}$
-------------------	-------------------	--------------------	------------------

A figura a seguir ilustra o comportamento da tensão no coletor com o sinal de entrada positivo.



Como resultado da aplicação de um semiciclo positivo de CA senoidal à entrada o circuito dá origem a uma variação de tensão semelhante, amplificada, no coletor do transistor.



Com sinal de entrada negativo

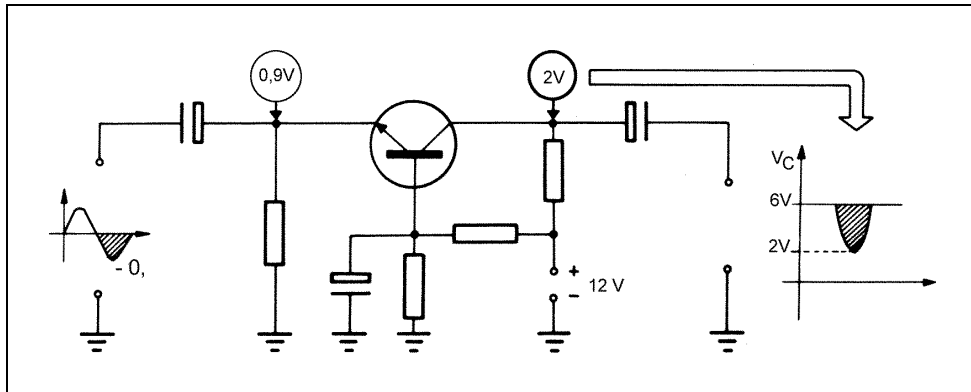
Quando um sinal de entrada negativo é aplicado ao circuito, a tensão de sinal se subtrai da tensão no resistor de emissor.

Tomando como exemplo uma tensão senoidal de sinal de $-0,1V_p$ tem-se a tensão de emissor diminuindo para $0,9V$.

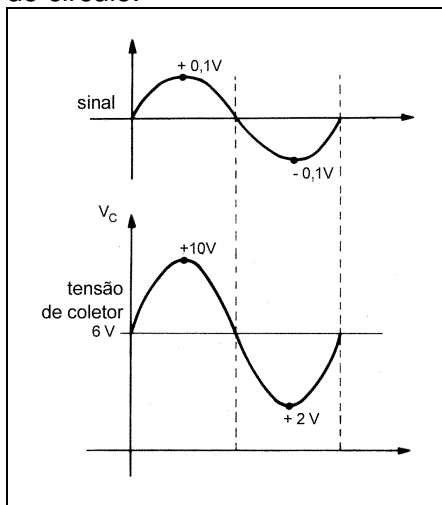
Por analogia se conclui que:

$V_{BE} \uparrow$	$I_B \uparrow$	$I_C \uparrow$	$V_{RC} \uparrow$	$V_{CE} \downarrow$
-------------------	----------------	----------------	-------------------	---------------------

A figura a seguir mostra o comportamento do circuito no semiperíodo negativo do sinal de entrada.



Considerando-se os dois semiciclos do sinal de entrada verifica-se o comportamento do circuito.



Resumindo:

Nos estágios amplificadores em base comum:

- as variações da corrente de coletor estão defasadas 180° em relação ao sinal de entrada.
- as variações da tensão de coletor estão em fase com as variações do sinal de entrada.
- as variações da tensão e corrente de coletor são uma versão amplificada do sinal de entrada.

Propriedades do estágio amplificador em base comum

Como propriedades do estágio amplificador em base comum tem-se:

- ganho de corrente
- ganho de tensão
- impedância de entrada
- impedância de saída

Ganho de corrente (A_i)

No estágio amplificador em base comum a corrente de entrada é a corrente de emissor e a corrente de saída é a corrente de coletor.

Portanto, sendo o ganho a relação entre corrente de saída e a de entrada tem-se:

$$A_i = \frac{\Delta I_s}{\Delta I_E} \quad \text{ou} \quad A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$$

Como I_C é sempre menor que I_E ($I_C = I_E - I_B$) o ganho de corrente é menor que 1, situando-se na faixa de 0,95 e 0,999. Na prática pode-se considerar o ganho de corrente em base comum como sendo unitário: $A_i = 1$.

Ganho de tensão (A_v)

Os estágios amplificadores em base comum geralmente utilizam resistores de coletor de valor elevado, tipicamente várias dezenas e até mesmo centenas de kilohms.

Isto traz como resultado um estágio amplificador cujo ganho se situa em várias dezenas ou até mesmo centenas de vezes. Portanto, pode-se classificar genericamente o ganho do estágio amplificador em base comum como sendo ALTO.

Impedância de entrada (Z_i)

Nos estágios amplificadores o sinal de entrada é aplicado ao emissor e a base é aterrada (diretamente ou através de um capacitor de decoplamento).

Em outras palavras, o sinal de entrada é aplicado diretamente a junção base-emissor do transistor.

Como a função base-emissor esta polarizada diretamente, a impedância de entrada é de, no máximo, algumas dezenas de ohms. Classificando genericamente, a impedância de entrada do estágio amplificador de base comum é BAIXA.

Impedância de saída (Z_o)

O resistor de coletor de alto valor utilizado nos estágios amplificadores em BC permitem que se obtenha grandes variações de tensão de saída a partir de pequenas variações na corrente de coletor.

Uma vez que a impedância de saída é a relação entre variação de tensão (grande) e de corrente de saída (pequena) resulta em um valor elevado.

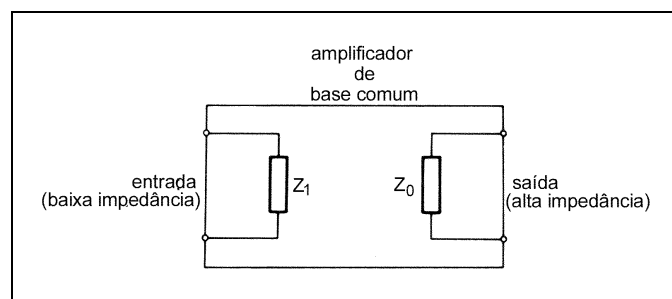
A impedância de saída dos estágios amplificadores em BC é da ordem de dezenas a centenas de kilohms, podendo ser classificada genericamente como ALTA.

Resumindo:

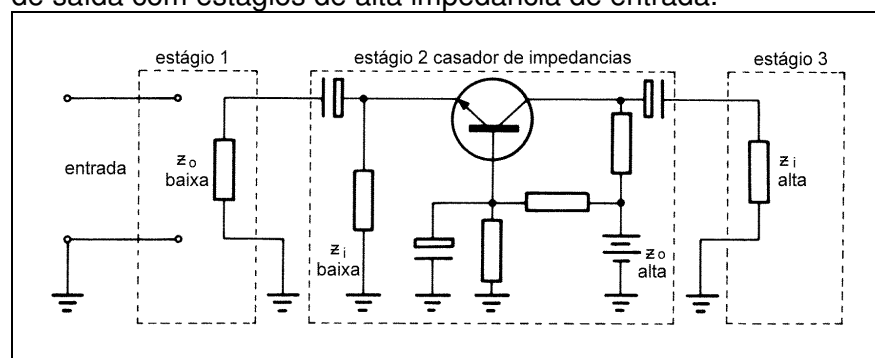
Amplificador em Base comum	Característica	Classificação
	A_i	$\cong 1$
	A_v	ALTO - dezenas a centenas de vezes
	Z_i	BAIXA - dezenas de ohms
	Z_o	ALTA - dezenas a centenas de $K\Omega$

Aplicações dos estágios amplificadores em BC

Caracteristicamente os estágios amplificadores de base comum apresentam baixa impedância de entrada e alta impedância de saída.



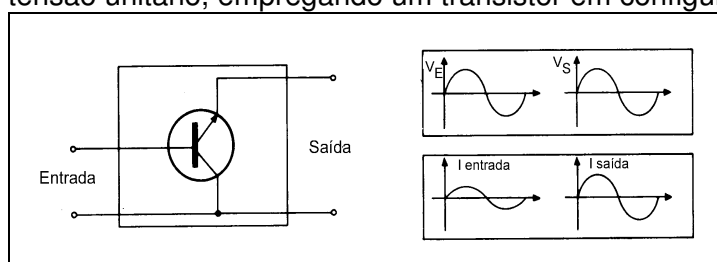
Estas propriedades permitem que os estágios amplificadores de base comum sejam utilizados como casadores de impedância, interligando estágios de baixa impedância de saída com estágios de alta impedância de entrada.



Outra aplicação característica dos amplificadores em BC são os circuitos para altas frequência (na faixa dos 50MHz ou mais). Um exemplo típico de aplicação são as telecomunicações, onde as frequências de transmissão e recepção são elevadas.

Amplificador em coletor comum

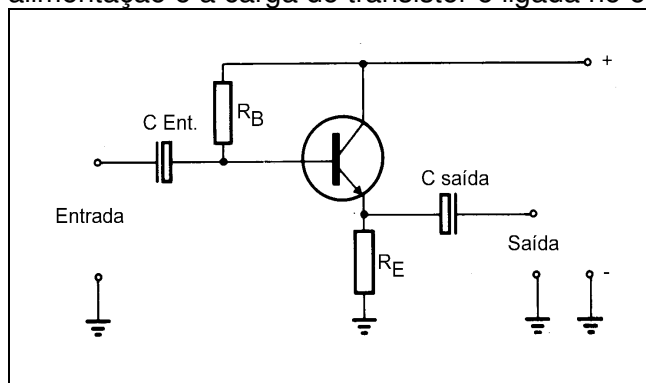
É um tipo de circuito amplificador que proporciona alto ganho de corrente e ganho de tensão unitário, empregando um transistor em configuração coletor comum



Os estágios amplificadores em coletor comum são empregados geralmente como estágios de potência em fontes reguladas e amplificadores de som.

O circuito do amplificador em coletor comum

Neste tipo de circuito amplificador o transistor tem o coletor ligado diretamente a alimentação e a carga do transistor é ligada no emissor.



R_B – resistor de polarização de base

R_E – carga do transistor

C_{ENT} – capacitor de acoplamento

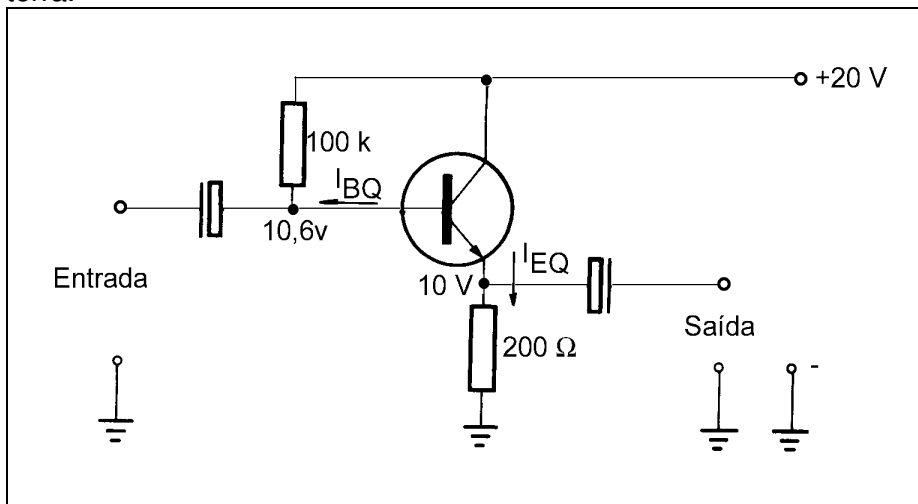
$C_{SAÍDA}$ – capacitor de acoplamento

O terminal do coletor é considerado terminal comum porque a fonte representa uma impedância baixíssima para os sinais CA.

Desta forma, sempre que o circuito amplifica um sinal o coletor pode ser considerado como “aterrado” ficando comum a entrada e saída de sinal.

Princípio de funcionamento

Tomando como ponto de partida um estágio amplificador no ponto de funcionamento conforme mostra a figura a seguir. Todas as tensões indicadas são com relação ao terra.



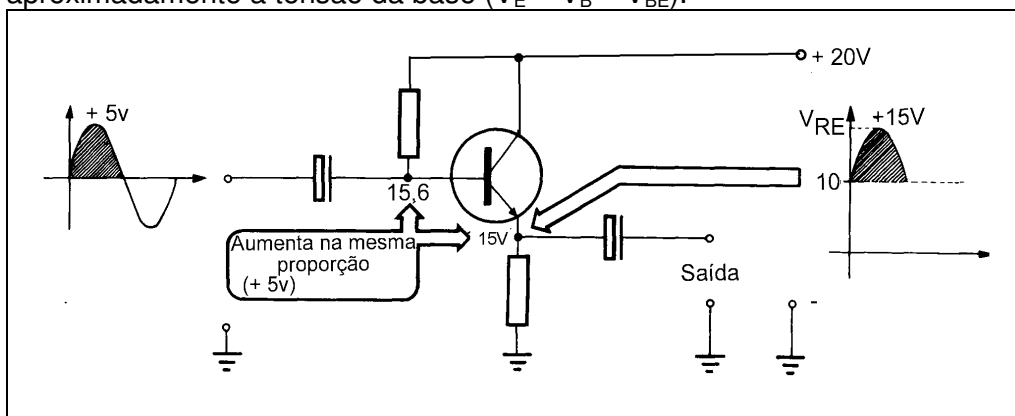
Sinal de entrada positivo

Ao receber na entrada um semiperíodo positivo de sinal, a tensão do sinal se soma com a tensão de polarização de base.

O aumento na tensão de base faz com que a tensão base - emissor (V_{BE}) do transistor seja maior, provocando a elevação na corrente de base ($V_{BE} \uparrow I_B \uparrow$) como consequência do aumento da corrente de base aumentam também a corrente de coletor e de emissor do transistor ($I_B \uparrow I_C \uparrow I_E \uparrow$).

A maior corrente de emissor do transistor provoca um aumento na queda de tensão no resistor de emissor ($V_{RE} = I_E \cdot R_E \quad I_E \uparrow \cdot R_E = V_{RE} \uparrow$).

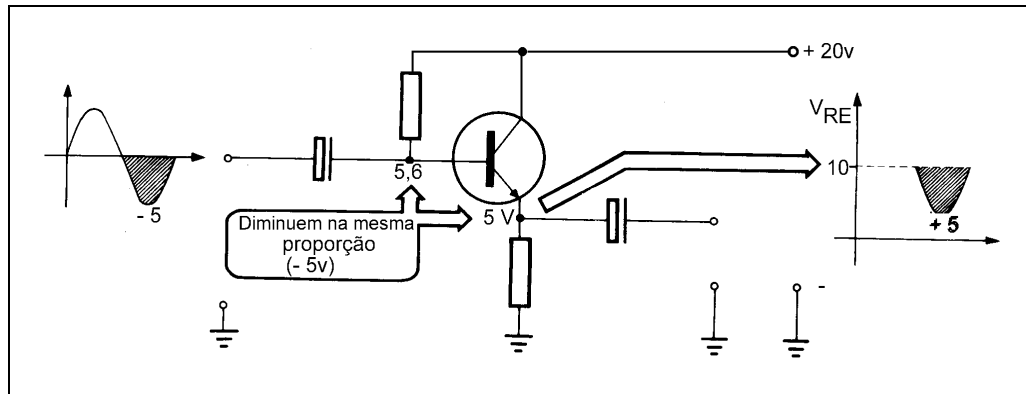
A corrente de emissor do transistor se eleva até que a tensão no emissor seja aproximadamente a tensão da base ($V_E = V_B - V_{BE}$).



Verifica-se desta forma que a queda de tensão sobre o resistor de emissor tem a mesma amplitude e mesma fase do sinal de entrada (exceto pela pequena diferença de V_{BE}).

Sinal de entrada negativo

Quando o semiperíodo de sinal aplicado à base é negativo o comportamento do circuito é inverso.



Devido ao fato da tensão de emissor seguir a tensão de base o estágio em coletor comum também é conhecido como estágio seguidor de emissor.

Propriedades

O estágio amplificador em coletor comum pode ser avaliado segundo os seguintes parâmetros:

- Ganho de tensão
- Ganho de corrente
- Impedância de entrada
- Impedância de saída

Ganho de tensão

Considerando que a variação da tensão de saída (V_{RE}) é praticamente a mesma tensão de entrada conclui-se que o ganho de tensão pode ser considerado unitário:

Ganho de tensão	$A_V \cong 1$
-----------------	---------------

Observação

Para fins práticos, em amplificação de grandes sinais, o ganho de tensão pode ser considerado como unitário sem qualquer problema.

Ganho de corrente

Para que se desenvolva sobre o resistor de emissor (normalmente de baixo valor) um sinal de amplitude igual ao da base, a corrente de emissor do transistor assume valores altos (comparada com a corrente de base).

Isto significa que o circuito apresenta uma amplificação de corrente elevada entre base e emissor.

O ganho de corrente do circuito amplificador em coletor comum é o ganho de corrente do transistor.

Ganho de corrente	$AI \cong \beta$
-------------------	------------------

De forma genérica o ganho de corrente dos estágios amplificadores em coletor comum pode ser considerado como **alto**.

Impedância de entrada

Como em qualquer estágio amplificador, a impedância de entrada depende não apenas do transistor, mas também de todos os componentes externos de polarização e acoplamento. Isto torna mais difícil uma determinação matemática do valor exato.

Adotando o princípio da classificação genérica, já utilizado anteriormente, pode-se dizer que a impedância de entrada dos estágios em coletor comum é **alta**, tipicamente de várias centenas de ohms até a faixa dos quilos ohms.

Impedância de saída

A impedância de saída do estágio amplificador em coletor comum depende de uma série de fatores, tais como:

- Impedância do gerador (ou estágio ligado a entrada)
- Resistor de emissor
- Da corrente de emissor

Numa aproximação com base na dependência da corrente de emissor pode-se dizer:

I_E	Impedância de entrada aproximada
1mA	25 Ω
de 1mA a 100mA	de 25 Ω a 0,25 Ω
de 100mA a 1A	0,25 Ω a 0,025 Ω

A aproximação da impedância de saída mostra que, mesmo em baixas correntes, o valor é sempre menor que algumas dezenas de Ohms.

Considerando ainda que este tipo de estágio dificilmente é utilizado em correntes menores que 100mA, pode-se afirmar que a impedância de saída típica é menor que 1 Ω .

Com base nestas considerações a impedância de saída dos estágios em coletor comum pode ser classificada de **muito baixa**.

O quadro a seguir apresenta o resumo das propriedades do estágio amplificador em coletor comum:

Propriedade	Faixa típica
A_v	Aproximadamente unitário
A_i	Alto ($A_i \cong \beta$)
Z_i	Alta (tipicamente centenas até milhares de Ohms)
Z_o	Muito baixa (tipicamente menor que 1Ω)

Aplicações de estágios amplificadores coletor comum

Existem fundamentalmente três aplicações para os estágios “seguidores de emissor”:

- Etapas de saída em fontes reguladas
- Etapas de potência em amplificadores
- Casamento de impedância

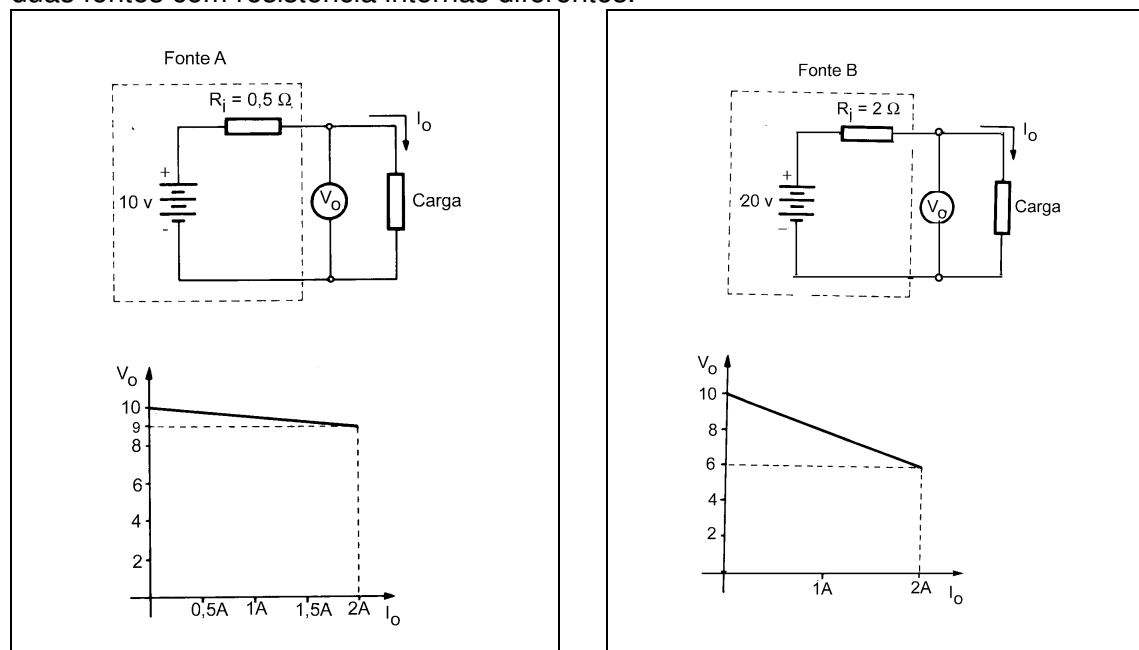
Destas aplicações, as duas primeiras correspondem as de maior utilização, razão pela qual merecem uma análise mais detalhada.

Etapas de saída em fontes reguladas: as características mais importantes em uma fonte são:

- A tensão de saída;
- A impedância interna (ou resistência interna).

A primeira característica é importante por razões óbvias. A segunda característica, impedância ou resistência interna, é importante devido a queda de tensão que existe internamente quando uma fonte fornece corrente a uma carga.

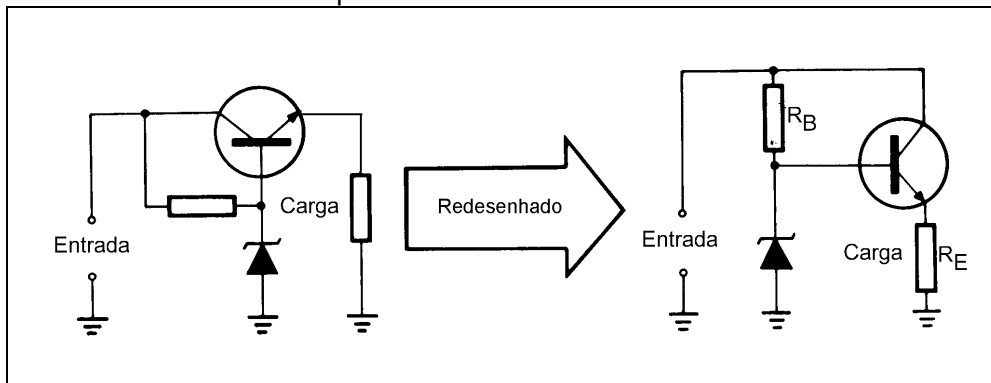
As figuras abaixo mostram dois gráficos que permitem comparar o comportamento de duas fontes com resistências internas diferentes.



A comparação entre os gráficos mostra que a fonte A, que tem menor resistência interna, mantém a tensão terminal V_O mais constante quando a corrente de carga I_O aumenta. Isto leva a concluir que quanto mais baixa a impedância ou resistência interna de uma fonte melhor o seu desempenho.

Por esta razão os estágios amplificadores em coletor comum, que apresentam baixíssima impedância de saída são utilizados como estágio reguladores de tensão em **fontes** de alimentação.

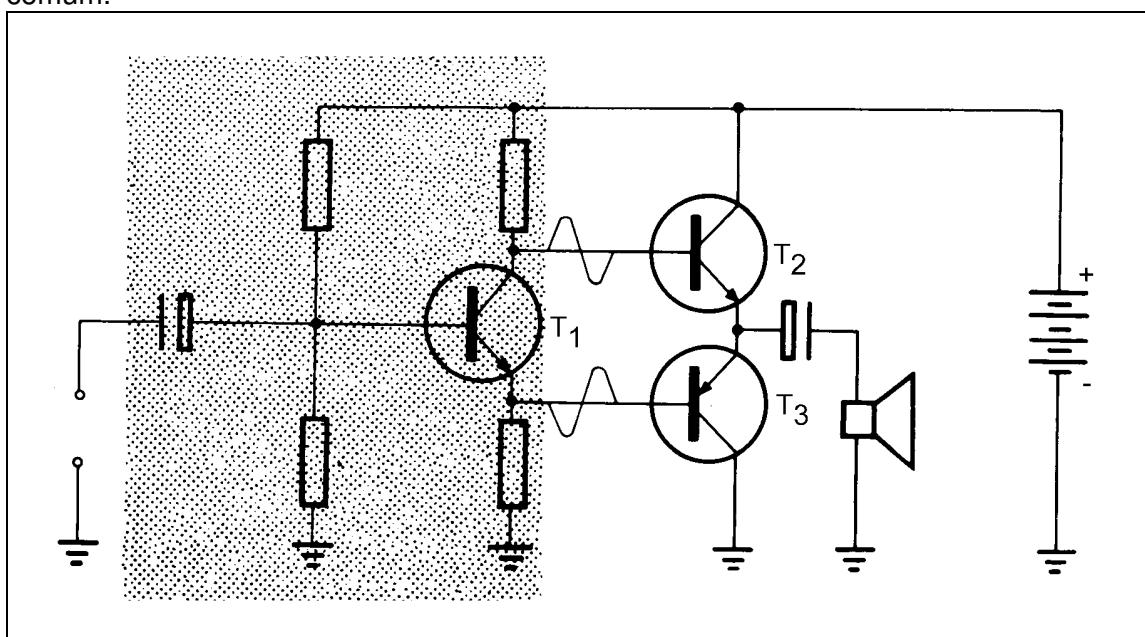
A figura abaixo mostra um estágio regulador de tensão à transistor já estudado em ocasião anterior. Este estágio regulador nada mais é do que **um estágio amplificador em coletor comum** em que a tensão de base é mantida constante.



Etapa de potência em amplificadores de áudio

Uma das aplicações mais utilizadas para os amplificadores em coletor comum é a construção de estágios amplificadores de potência para áudio.

A figura abaixo, mostra, de forma simplificada, um estágio de potência, também denominado de classe B, utilizando dois transistores em configurações de coletor comum.

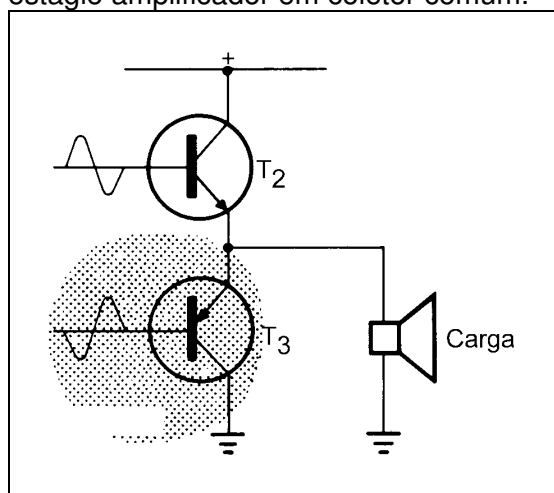


Na figura acima os transistores T_2 e T_3 em evidência (não hachurados) correspondem a estágios amplificadores em coletor comum.

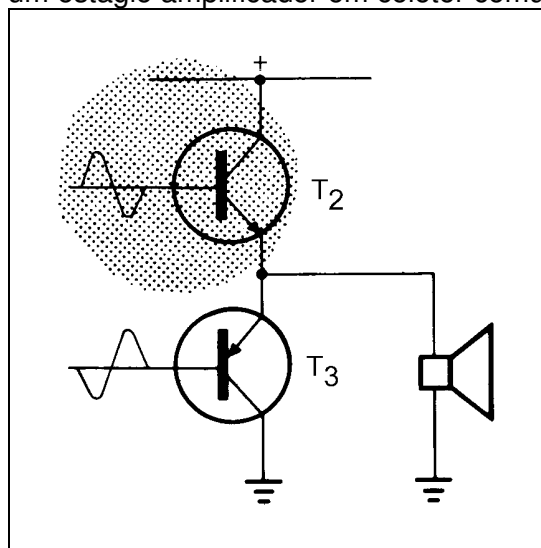
Considerando inicialmente que um sinal CA esteja sendo amplificado, o capacitor em série com o alto-falante pode ser considerado como um curto circuito

Desta forma, toda a vez que um sinal é amplificado, o alto-falante funciona como carga, estando ligado ao emissor dos dois transistores (características dos estágios em coletor comum).

Assim, o transistor T_2 e o alto falante, analisados isoladamente, correspondem a um estágio amplificador em coletor comum.



Da mesma forma, T_3 (PNP) e o alto falante, analisados isoladamente correspondem a um estágio amplificador em coletor comum.



Este tipo de estágio de potência é adequado para ligação direta como o alto falante porque tem baixa impedância de saída, proporcionando uma boa transferência de potência.

Por esta razão este tipo de estágio é muito utilizado em aparelhos portáteis, tais como rádios e gravadores.

Amplificadores em cascata

Em muitas ocasiões o ganho de tensão ou de corrente fornecido por estágio amplificador não é suficiente para a aplicação que se necessita. Nestas ocasiões costuma-se utilizar dois ou mais estágios amplificadores, interligados de forma a obter amplificações sucessivas do sinal.

Para obter amplificações sucessivas a conexão entre os estágios amplificadores deve ser feita da seguinte forma:

- Saída do primeiro estágio ligado à entrada do segundo estágio.
- Saída do segundo estágio ligado à entrada do terceiro estágio, e assim sucessivamente.

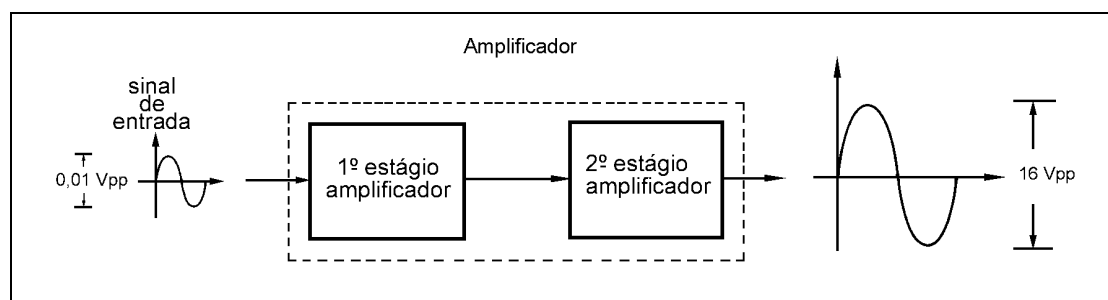
Este tipo de ligação entre os estágios amplificadores é denominado de ligação em cascata.

Ganho total de um amplificador com estágios em cascata

O ganho total de um amplificador é o resultado de todas as amplificações sofridas pelo sinal nos diversos estágios. O ganho total é uma relação direta entre o sinal presente **na saída do último estágio** amplificador e o sinal aplicado na **entrada do primeiro estágio** amplificador.

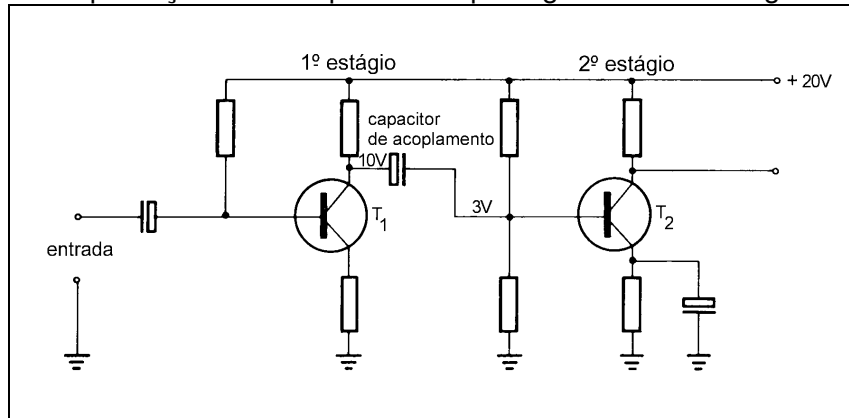
$$\text{Ganho total} \Rightarrow GT = \frac{\text{Sinal de saída (no último estágio)}}{\text{Sinal de entrada (no 1º estágio)}}$$

A figura a seguir mostra um amplificador composto por dois estágios com ganho total de 1600 vezes.

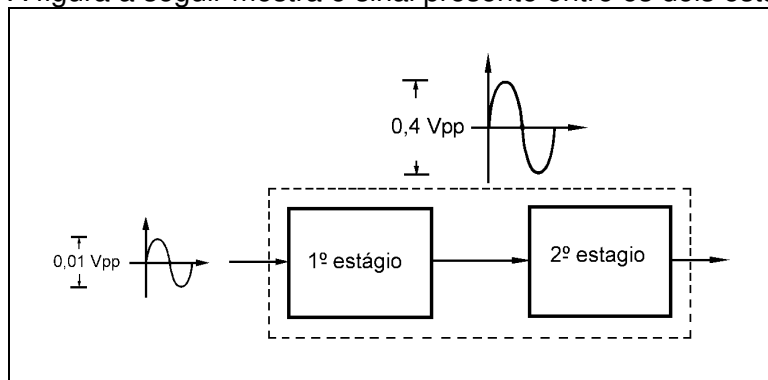


$$GT = \frac{16 \text{ V}_{pp}}{0,01 \text{ V}_{pp}} = 1600$$

No amplificador da figura abaixo cada um dos estágios é responsável por uma parcela da amplificação total. Supondo-se que o ganho do 1º estágio amplificador seja 40



A figura a seguir mostra o sinal presente entre os dois estágios.



O sinal na saída do primeiro estágio é aplicado na entrada do segundo estágio.

Supondo-se que o ganho do segundo estágio também seja de 40 o sinal na saída é 16Vpp.

Observa-se que o ganho total do amplificador composto por dois estágios de ganho 40 é 1600 vezes, ou seja, o ganho total GT é $40 \times 40 = 1600$.

O ganho total de um amplificador é o produto do ganho dos estágios que o compõem:

$$GT = G_1 \times G_2 \times \dots$$

Pela equação do ganho total verifica-se que um ganho total de 900 (por exemplo) pode ser obtido:

1. Por dois estágios de ganho 30:

$$GT = 30 \times 30 = 900$$

2. Por um estágio de ganho 25 e um estágio de ganho 36:

$$GT = 25 \times 36 = 900$$

3. Por dois estágios quaisquer cujos ganhos multiplicados resultem 900.

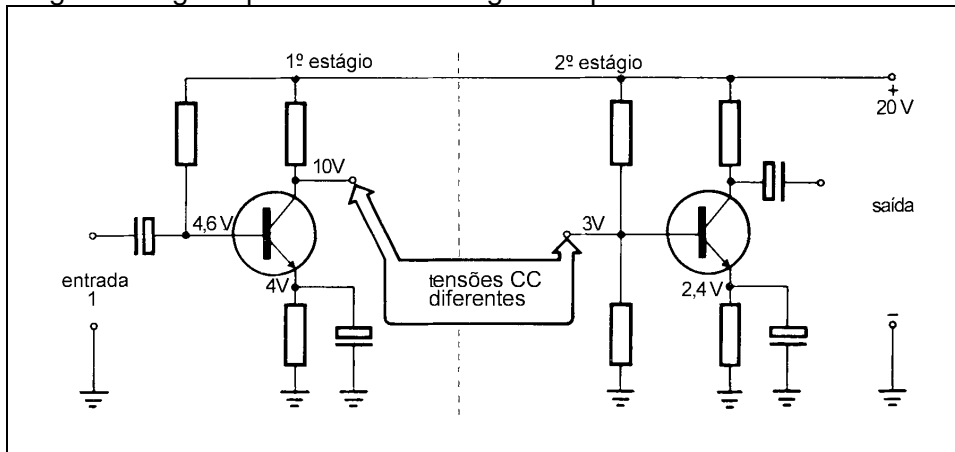
Acoplamento entre estágios amplificadores

Os estágios amplificadores devem ser interligados entre si para que o sinal seja sucessivamente amplificado. A ligação entre os estágios é denominada de

Acoplamento.

Entretanto, o acoplamento da saída de um estágio à entrada do estágio seguinte não pode ser realizada pela simples ligação direta, através de um condutor. Analisando dois estágios amplificadores que devem ser interligados é possível verificar a razão pela qual a ligação não pode ser direta.

A figura a seguir apresenta dois estágios amplificadores ainda não interligados.



Analisando os estágios nos seus pontos de operação verifica-se:

- A tensão na saída do 1º estágio é 10V
- A tensão na entrada do 2º estágio é 3V.

Pela comparação entre os dois valores verifica-se que é impossível ligar diretamente a saída do primeiro estágio com a entrada do segundo porque a tensão de 10V positivos seria aplicada a base do segundo transistor, alterando a sua polarização.

Conclui-se que o acoplamento entre os estágios deve ser feito de forma que:

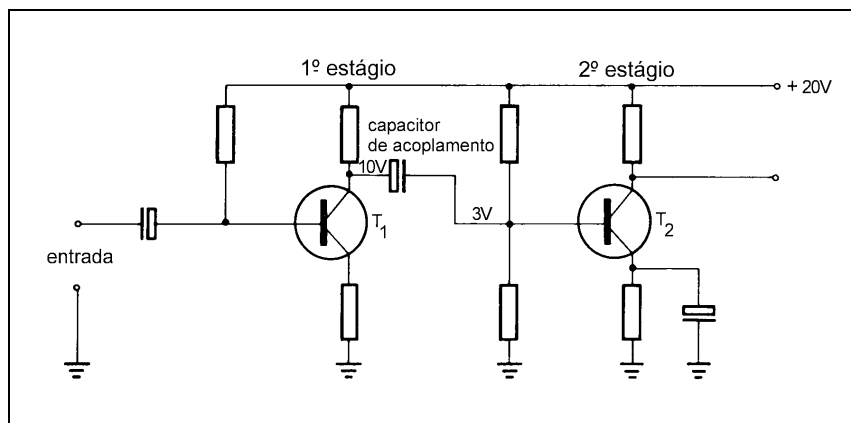
- A tensão contínua da saída de um estágio não seja aplicada à entrada do estágio seguinte.
- O sinal amplificado da saída do 1º estágio (variação de tensão no coletor) passe para a entrada do estágio seguinte.

Resumindo:

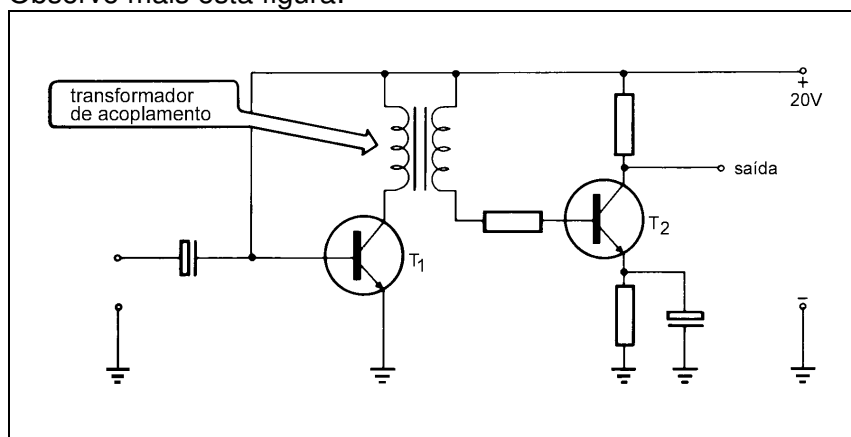
O acoplamento entre os estágios amplificadores deve:

- Bloquear a passagem de tensões contínuas;
- Permitir a passagem de tensões alternadas (sinais).

Os capacitores e os transformadores são ideais para cumprir a função de acoplamento. As figuras a seguir mostram como seria o acoplamento utilizando um capacitor e um transformador.



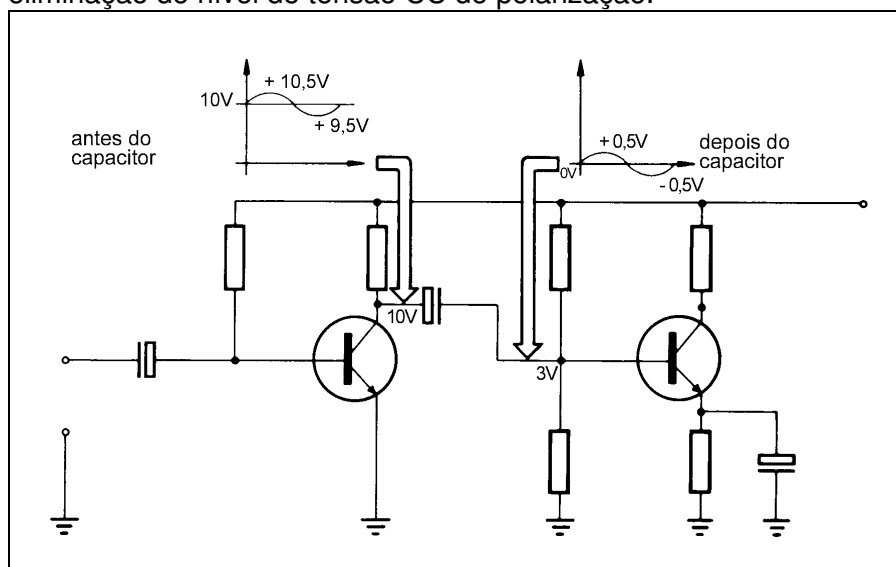
Observe mais esta figura:



É importante salientar que a utilização de transformadores de acoplamento implica na mudança do método de polarização do transistor T_2 , passando a ser por corrente de base constante.

Este fato, acrescido ao custo do transformador faz com que o método de acoplamento mais utilizado seja o capacitivo, que é mais barato e não implica em modificações no circuito.

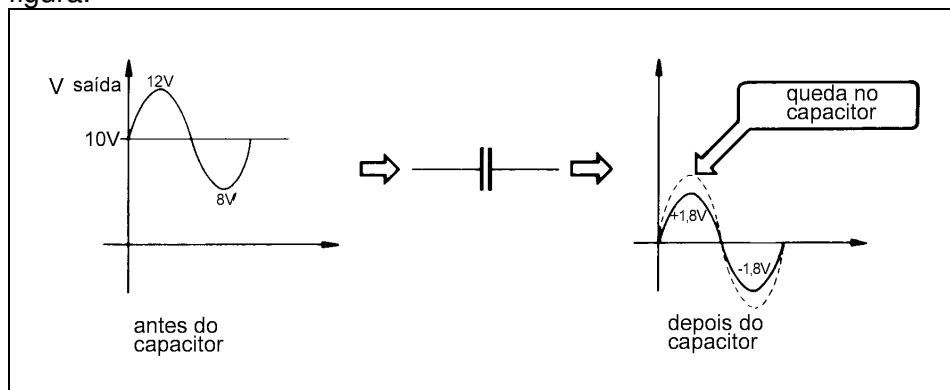
A figura a seguir mostra o sinal antes do capacitor de acoplamento e após, ilustrando a eliminação do nível de tensão CC de polarização.



O capacitor utilizado para acoplar dois estágios é denominado de **capacitor de acoplamento**.

Um aspecto importante a considerar no acoplamento é que o componente utilizado (capacitor ou transformador) não é ideal. Tomando como exemplo o capacitor se verifica que o sinal CA, aplicado flui através da reatância capacitiva.

Esta reatância provoca uma queda de tensão no capacitor de acoplamento, veja a figura.



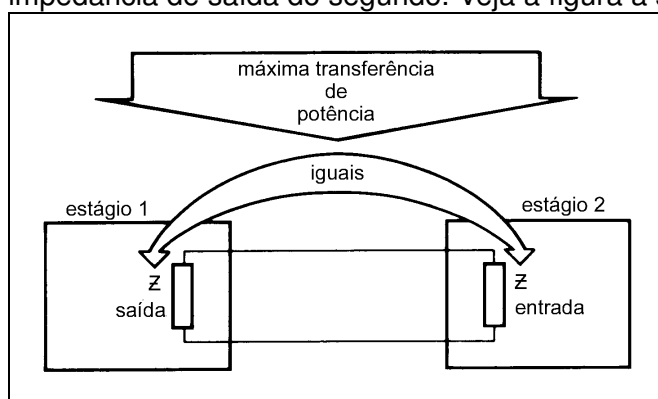
Esta queda de tensão no capacitor é denominada de “perda no acoplamento” e deve ser tão pequena quanto possível.

Por esta razão, a capacitância do capacitor de acoplamento é determinada em função da menor frequência a ser amplificada, tendo em vista que esta será a situação de maior reatância capacitiva e, portanto, de maior perda.

Casamento de impedâncias no acoplamento entre estágios amplificadores

Um dos aspectos mais importantes a considerar quando se interligam estágios amplificadores em cascata é o correto casamento de impedâncias.

Esta preocupação se deve ao fato de que a maior transferência de potência entre um estágio e o outro ocorre quando a impedância de saída do primeiro estágio é igual a impedância de entrada do segundo. Veja a figura a seguir.

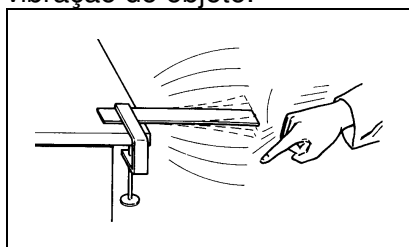


Na prática é difícil obter a igualdade entre as impedâncias, devendo-se procurar a melhor aproximação possível.

Ondas sonoras

Os sons captados pelo ouvido humano são, na realidade, um movimento das partículas de ar no ambiente.

A vibração de um objeto se transmite às moléculas de ar. Assim, todas as moléculas de ar do ambiente se movimentam segundo o ritmo e intensidade determinado pela vibração do objeto.



Quando o movimento das moléculas de ar atinge o tímpano no ouvido, este vibra, levando ao cérebro informações que são interpretadas como sons.

As ondas sonoras se propagam no ar em forma de circunferências concêntricas, cujo centro é o emissor do som.

A propagação de uma onda sonora no ar é semelhante a ondulação provocada por uma pedra jogada na água.

Uma vez que as ondas sonoras são vibrações do ar, pode-se concluir que não há propagação do som no vácuo.

Altura e intensidade do som

O som sempre é proveniente de uma vibração. Dependendo da frequência com que a vibração é produzida o som ouvido pode ser grave ou agudo.

As vibrações rápidas dão ao ouvido a impressão de um som agudo, enquanto as oscilações lentas se traduzem em sons graves.

A esta característica do som, de provir de uma vibração de alta ou baixa frequência dá-se o nome de altura.

A altura é uma característica das ondas sonoras que está ligada à frequência de vibração do ar.

- Notas altas → frequências altas → sons agudos;
- Notas baixas → frequências baixas → sons graves.

Existe ainda uma segunda característica importante relativa as ondas sonoras: a intensidade, que está relacionada com o “volume” de um som.

Por exemplo:

Uma corda de um violão emite uma nota musical com uma intensidade.

Se este violão estiver ligado a um amplificador, a mesma nota (de mesma frequência) será ouvida, porém com uma intensidade maior.

A característica que define se um som é mais fraco ou mais forte é denominada de intensidade.

A voz humana

A voz humana apresenta três características fundamentais:

- Altura;
- Intensidade;
- Timbre.

A altura da voz de uma pessoa define se sua voz é normalmente grave ou aguda.

A intensidade define se a pessoa fala alto ou baixo.

O timbre é o fator que caracteriza propriamente a voz de cada pessoa. É o timbre que permite as pessoas se identificarem, por exemplo, numa ligação telefônica.

O timbre consiste na mistura de frequências e intensidades que uma pessoa emite ao falar. Cada pessoa tem um timbre que lhe é característico.

A faixa audível

A constituição do ouvido humano permite às pessoas captarem vibrações que vão desde os 20Hz até 20KHz. Por isto as frequências entre 20Hz e 20KHz são denominadas áudio frequências.

Entretanto, nem todas as pessoas tem igual capacidade auditiva. É comum encontrar pessoas que não ouvem sons acima de 15KHz.

Os animais apresentam uma faixa audível diferente dos seres humanos: os cães

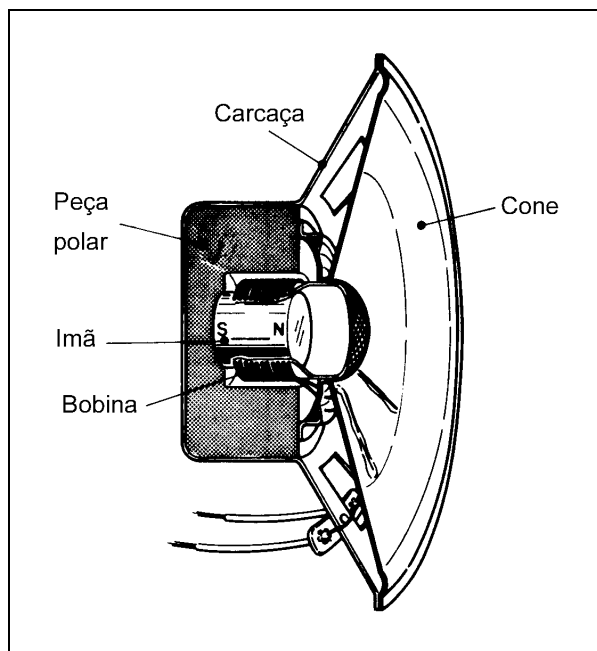
Alto-falantes e fones

O alto-falante é o elemento responsável pela transformação de sinais elétricos em ondas sonoras.

São utilizados em todos os equipamentos de reprodução ou amplificação sonora.

Constituição

O alto-falante se compõe basicamente de quatro partes, conforme figura a seguir:



Carcaça

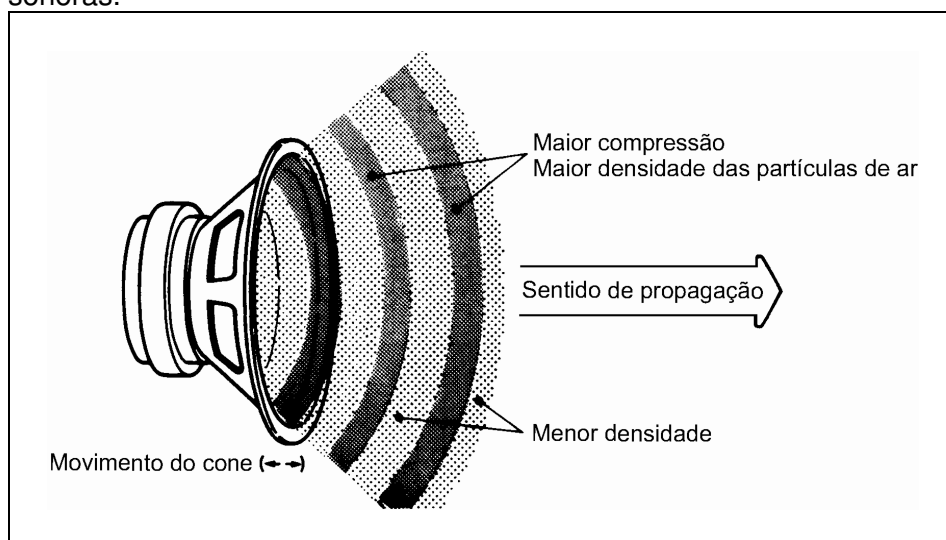
É uma armação metálica que serve para sustentação do conjunto de peças que formam o alto-falante.

Cone

É uma tira de papel ou fibra sintética em forma de cone, fixada a carcaça do alto-falante.

Uma das extremidades do cone é fixada à bobina e a outra fixada à carcaça de forma que o cone possa vibrar.

A vibração do cone é a responsável pelo movimento do ar que produz as ondas sonoras.



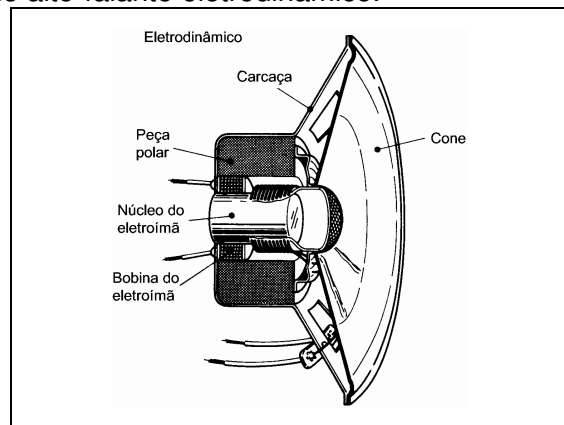
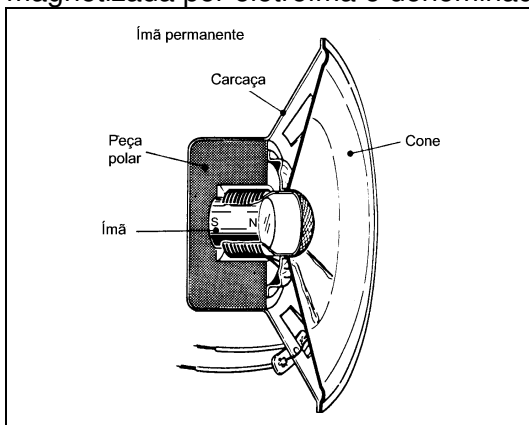
Bobina

É o elemento responsável pelo movimento vibratório do cone. A bobina do alto-falante recebe os impulsos elétricos que são transformados em sons, através da vibração do cone.

Ímã e peça polar

O ímã tem como finalidade fornecer um campo magnético que interage com o campo magnético da bobina fixa ao cone. A peça polar situa-se na parte posterior do alto-falante junto ao ímã.

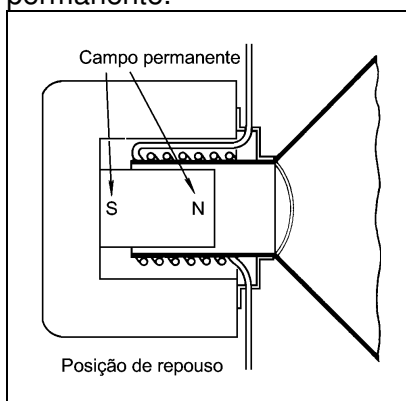
Quando a peça polar é magnetizada por um ímã permanente, o alto-falante é classificado como alto-falante de ímã permanente. O alto-falante que tem a peça polar magnetizada por eletroímã é denominado de alto-falante eletrodinâmico.



Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos alto-falantes de ímã permanente e eletrodinâmicos é semelhante de forma que é possível analisá-lo tomando como base um alto-falante de ímã permanente.

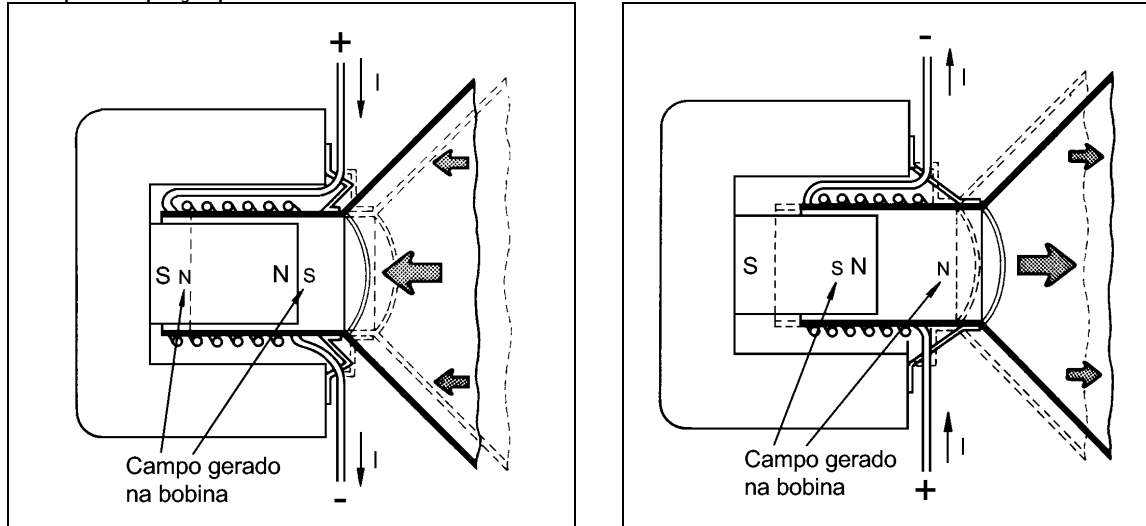
O ímã permanente produz um campo magnético que polariza a peça polar. A figura a seguir mostra o alto falante em corte, com o campo magnético produzido pelo ímã permanente.



Quando uma corrente variável percorre a bobina cria-se um campo magnético no seu interior.

O campo magnético variável formado pela bobina interage com o campo fixo da peça polar.

Dependendo das polaridades dos dois campos a bobina é atraída ou repelida pelo campo da peça polar.



Como o cone do alto-falante está preso à bobina, o movimento da bobina se transfere para o cone, fazendo vibrar o ar ao redor e produzindo ondas sonoras.

Quando o alto-falante está ligado a um amplificador, sua bobina recebe sinais elétricos de frequência e intensidade variáveis, fazendo o cone vibrar com as intensidades e frequências correspondentes, reproduzindo o som.

Características do alto-falante

O alto-falante possui um grande número de características. Entretanto as fundamentais são:

- Impedância;
- Potência;
- Característica de resposta de frequência.

Impedância

A impedância do alto-falante é o efeito resistivo que o elemento apresenta quando aplica-se um sinal alternado na sua bobina.

A impedância nominal do alto-falante é normalmente fornecida para uma frequência de 400Hz. Esta impedância é razoavelmente constante entre 200Hz e 600Hz, aumentando em frequências abaixo e acima destes dois limites.

Os alto-falantes mais comuns tem impedância de 3,2 Ω , 4 Ω , 8 Ω e 16 Ω .

Potência

A potência de um alto-falante indica a quantidade máxima de energia que pode ser dissipada pela sua bobina.

A aplicação de potências superiores ao limite do alto-falante provoca o rompimento do fio da bobina, inutilizando o alto-falante. Os alto-falantes são fabricados para potências diversas.

Entre as capacidades mais comuns têm-se:

1W, 5W, 10W, 15W, 30W, 50W, 100W.

Um fato importante quanto a potência de um alto-falante é que o valor fornecido pelo fabricante corresponde à máxima dissipação, de forma que um alto-falante pode funcionar dissipando potências menores que a nominal.

Por exemplo:

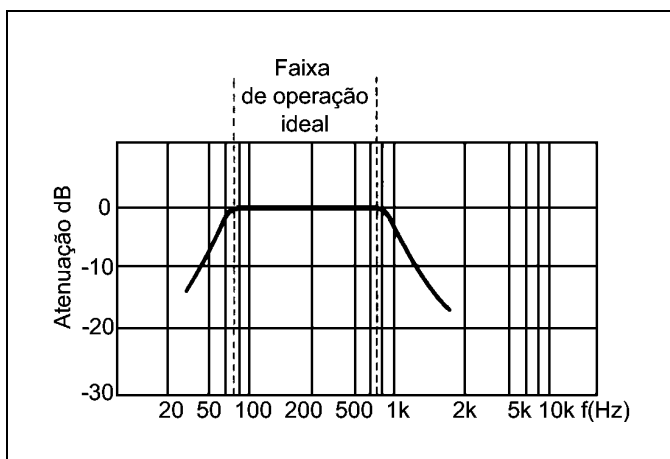
Um alto-falante de 10W pode ser usado em um amplificador de 1W, 2W, 5W, ..., até 10W.

Resposta de frequência

Devido principalmente a fatores de construção física cada alto-falante se caracteriza por reproduzir mais pronunciadamente uma determinada faixa de frequências.

A resposta de frequência é uma característica que indica os limites de frequência em que um alto-falante mantém um rendimento uniforme.

A resposta de frequência é normalmente apresentada em forma de gráfico que apresenta nitidamente a região de operação ideal do dispositivo ou circuito.



Conforme se observa pela curva de resposta de frequência da figura anterior o rendimento dos alto-falantes se modifica quando a frequência de sinal aplicado varia de um extremo ao outro da faixa audível (20Hz a 20KHz).

Isto quer dizer que um alto-falante não tem a mesma capacidade de reprodução de sons em todas as frequências.

Por esta razão, são fabricados alto-falantes para a operação em faixas mais estreitas de frequências.

Estes alto-falantes podem ser classificados em quatro grupos:

- Até 700Hz - alto-falantes para graves (WOOFER);
- De 700Hz a 5KHz - alto-falantes para médios (MID RANGE);
- De 5KHz a 20KHz - alto-falantes para agudos (TWEETER);
- De 20Hz a 20KHz - alto-falantes de ampla faixa (FULL RANGE).

Observações

As designações entre parênteses são de origem inglesa, muito utilizadas por fabricantes e usuários de alto-falantes.

Casamento de impedância

Para que um sistema de sonoro composto por amplificador e alto-falantes alcance o seu rendimento máximo (máxima transferência de potência) é necessário que a impedância do alto-falante corresponda da melhor forma possível a impedância de saída do amplificador.

A máxima transferência de potência do amplificador para o alto-falante acontece quando o “casamento de impedâncias” é perfeito, ou seja: impedância do alto-falante = impedância de saída do amplificador.

O casamento de impedâncias é uma preocupação fundamental quando se determina os alto-falantes para um sistema sonoro.

Ao conectar um sistema de alto-falantes à um amplificador deve-se realizar o casamento de impedâncias correto.

Quando a impedância do conjunto de alto-falantes é maior do que a impedância de saída do amplificador, o sistema apresenta perda de potência.

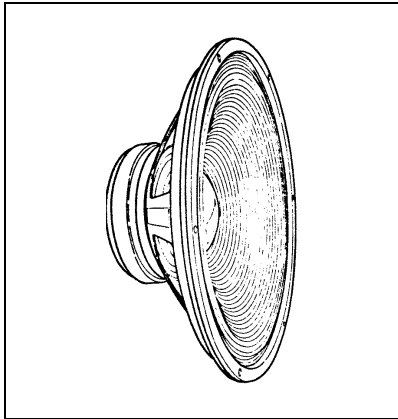
A potência desenvolvida sobre os alto-falantes é menor do que o valor especificado no amplificador.

Se a impedância do conjunto de alto-falantes é menor do que a impedância do amplificador, existe uma sobrecarga no sistema.

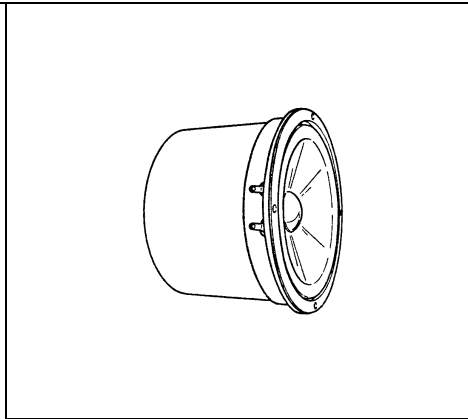
Nessa condição, o conjunto de alto-falantes solicita maior corrente para o seu funcionamento do que o amplificador pode fornecer, podendo inclusive danificar o equipamento.

Tipos de alto-falantes

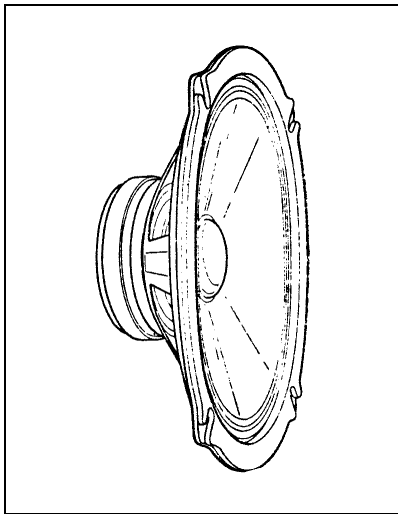
Existem basicamente 4 tipos de alto-falantes quanto a faixa de frequência de trabalho:



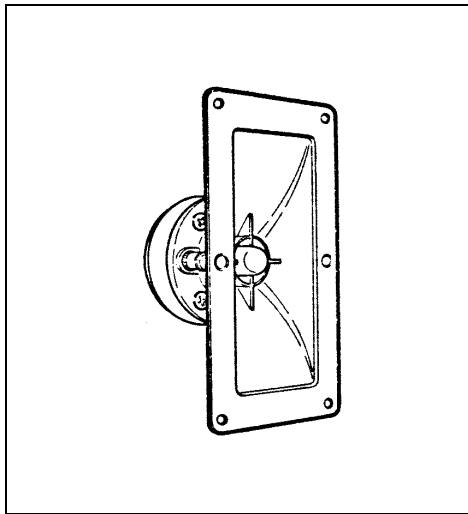
Woofe



Mid Range



Full Range



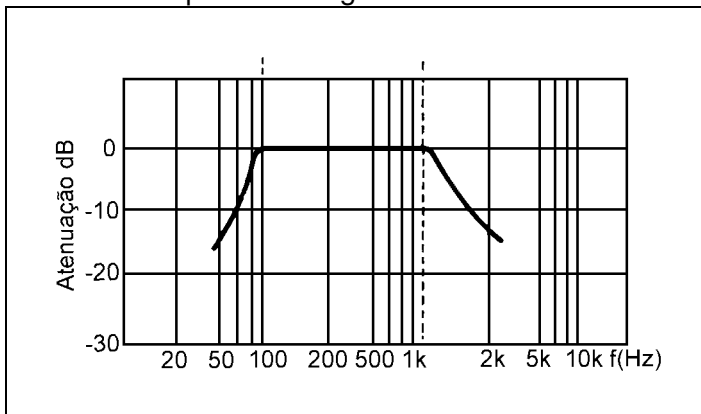
Tweeter

Alto-falantes para graves (WOOFER)

São alto-falantes pesados, com dimensões que possibilitam um cone com área grande (25cm ou 10", 30cm ou 12" de diâmetro).

As dimensões do cone favorecem a reprodução de baixas freqüências onde a vibração do cone é lenta. O gráfico de resposta de freqüência típica dos alto-falantes

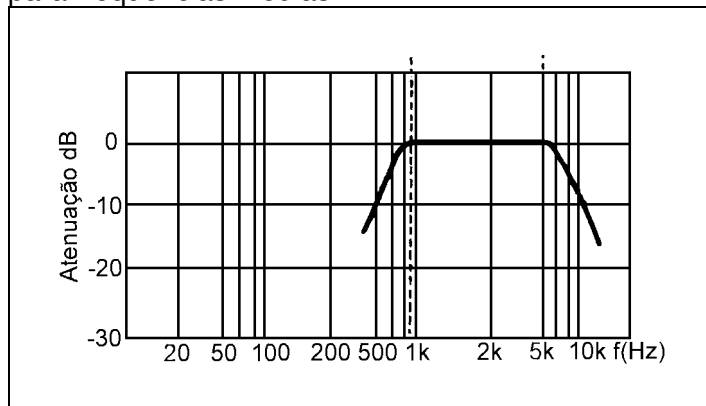
"WOOFER" aparece na figura abaixo.



Alto-falantes para médios (MID RANGE)

São alto-falantes de porte médio destinados a reprodução de freqüências da ordem dos 700Hz a 5KHz. Nesta faixa de freqüências situam-se a grande maioria das vozes humanas. O alto-falante para freqüências médias é um elemento essencial em caixas de som de boa qualidade.

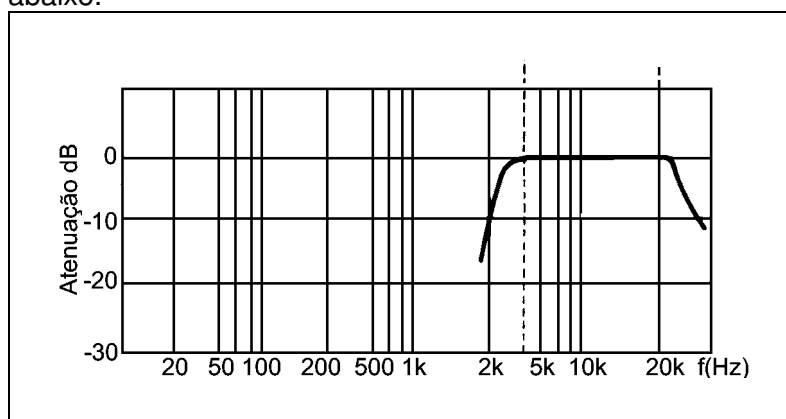
A figura a seguir mostra o gráfico típico de resposta de freqüência de um alto-falante para freqüências médias.



Alto-falantes para agudos (TWEETER)

Os alto-falantes para reprodução de freqüências de áudio elevadas (mais de 5000Hz). São normalmente pequenos, porque as dimensões reduzidas do cone favorecem a vibração em alta velocidade necessária para o trabalho nestas freqüências.

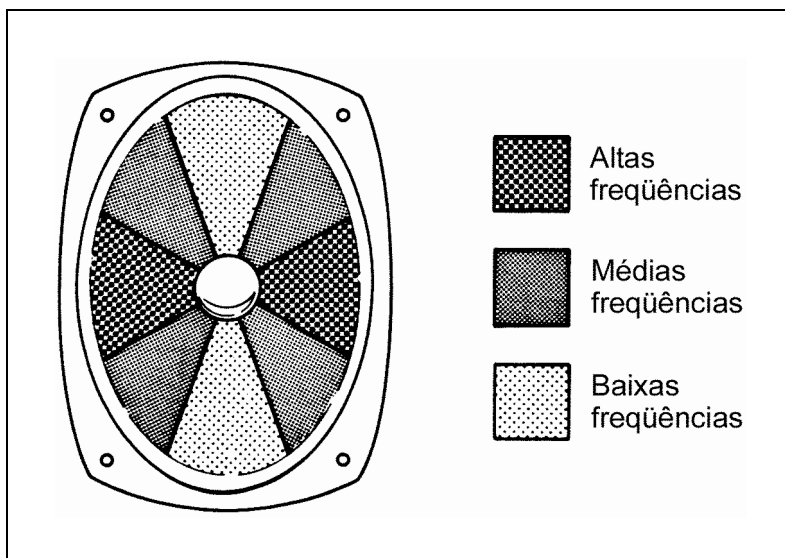
O gráfico de resposta de freqüência típica de um “TWEETER” é apresentado na figura abaixo.



Alto-falantes de ampla faixa (FULL RANGE)

Quando a utilização de um sistema de diversos alto-falantes é muito dispendiosa, pode-se usar um único alto-falante que tenha um bom desempenho ao longo de toda a faixa audível: o alto-falante de ampla faixa.

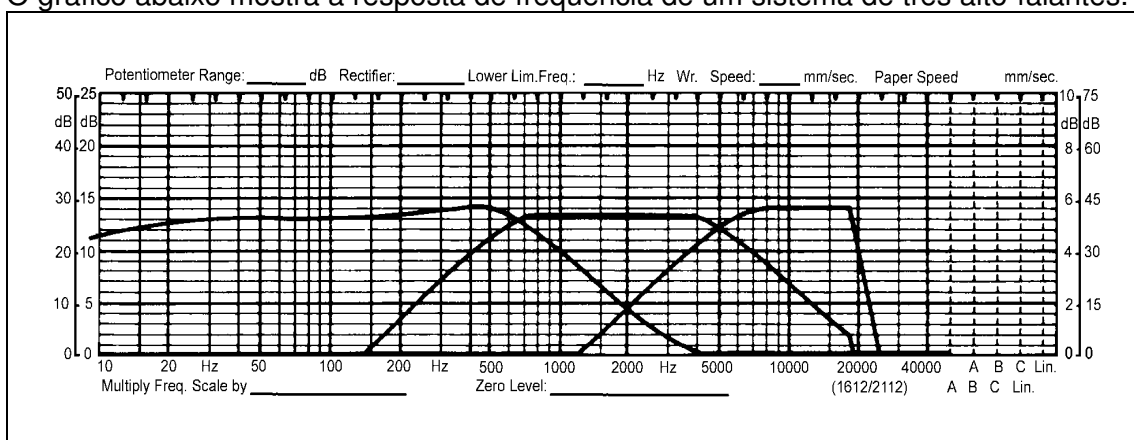
Esses alto-falantes tem a forma ovalada, propiciando regiões de emissão para sinais de baixa, média e alta freqüência porque o cone tem dimensões variáveis.



Sobreposição das faixas de operação

Os sistemas de reprodução sonora (caixas de som) contam normalmente com um alto-falante para cada faixa de freqüências (baixa, média, alta). Desta forma, o desempenho do conjunto é praticamente o mesmo ao longo de toda a faixa de freqüência audível.

O gráfico abaixo mostra a resposta de freqüência de um sistema de três alto-falantes.

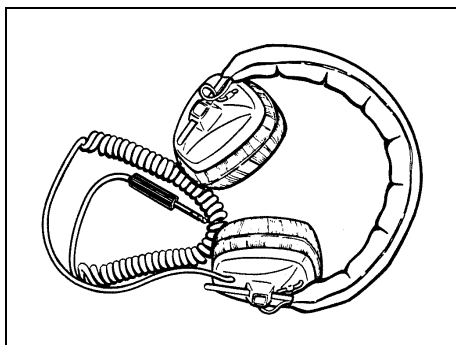


Fones

Os fones são utilizados em substituição aos alto-falantes, permitindo que se possa escutar individualmente um programa sonoro.

Constituição

A constituição de um fone se assemelha a de um alto-falante. O conjunto é reduzido em dimensões para ser alojado em um pequeno volume.



Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos fones é o mesmo dos alto-falantes.

Resposta de frequência

A dimensão reduzida do fone favorece a reprodução de altas frequências.

O rendimento dos fones em notas agudas é superior ao rendimento em notas graves.

Tipos de fones

Existem fones para reprodução monofônica ou estereofônica. Nos fones para reprodução monofônica a cápsula (ou cápsulas) são ligadas diretamente à saída do amplificador.

Os fones para reprodução estereofônica tem duas cápsulas. Cada uma das cápsulas é ligada a uma das saídas do amplificador.

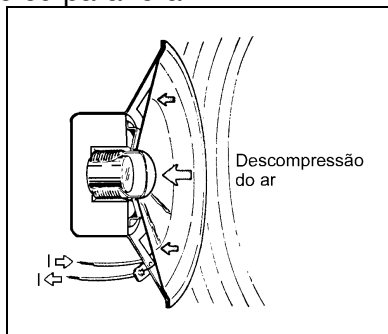
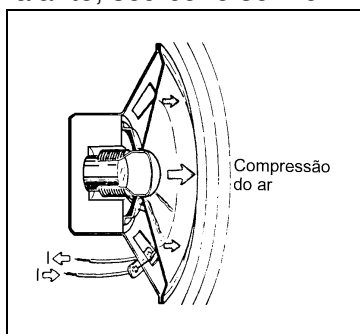
Associação de alto-falantes

Em certas ocasiões torna-se necessário associar alto-falante para obter o casamento de impedâncias correto entre os sistemas de amplificação e as caixas de som.

A associação destes elementos requer alguns conhecimentos para que se obtenha não apenas um casamento de impedâncias perfeito, mas também o melhor rendimento e distribuição do som nos ambientes.

Polaridade dos alto-falantes

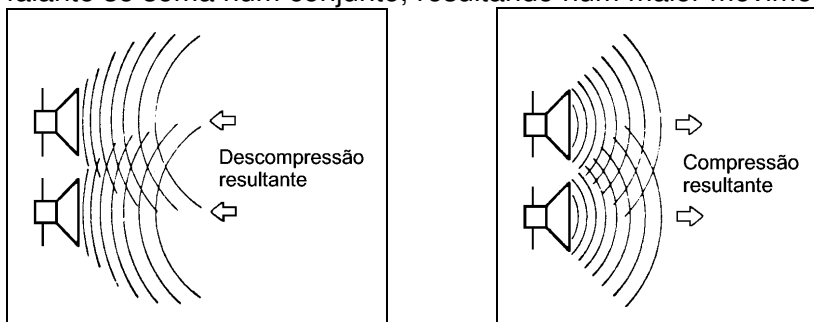
Dependendo do sentido e da intensidade da corrente que circula na bobina de um alto-falante, seu cone se movimenta para dentro ou para fora.



O movimento para a frente comprime as moléculas de ar enquanto o movimento para trás descomprime estas moléculas.

Quando se executa a associação de alto-falantes, é importante conectá-los de forma que os cones se movimentem em um mesmo sentido quando o sinal foi aplicado.

Desta forma, o efeito de compressão e descompressão das moléculas de cada alto-falante se soma num conjunto, resultando num maior movimento de ar no ambiente.



Se os alto-falantes trabalham em sentidos opostos (um comprime e outro descomprime) os efeitos sobre o ambiente tendem a se anular.

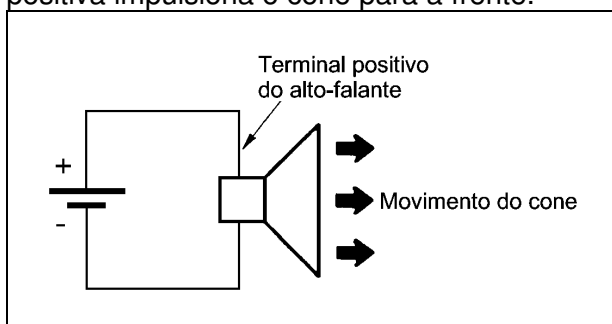
Este fenômeno provoca uma redução significativa no rendimento sonoro da caixa de som, principalmente nas notas mais graves.

Para possibilitar a ligação correta de um sistema de alto-falantes deve-se estabelecer a polaridade de cada um para posteriormente realizar a interligação do conjunto.

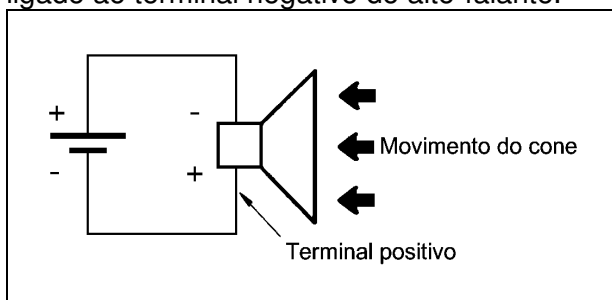
A polaridade do alto-falante é na realidade, uma convenção, uma vez que para cada alto-falante, isoladamente, a ordem de ligação dos fios é indiferente.

Costuma-se convencionar que o movimento do cone para a frente é positivo.

Assim, é denominado de terminal positivo do alto-falante aquele que com tensão positiva impulsiona o cone para a frente.



Se, no entanto, o cone se movimenta para trás o terminal positivo da bateria está ligado ao terminal negativo do alto-falante.



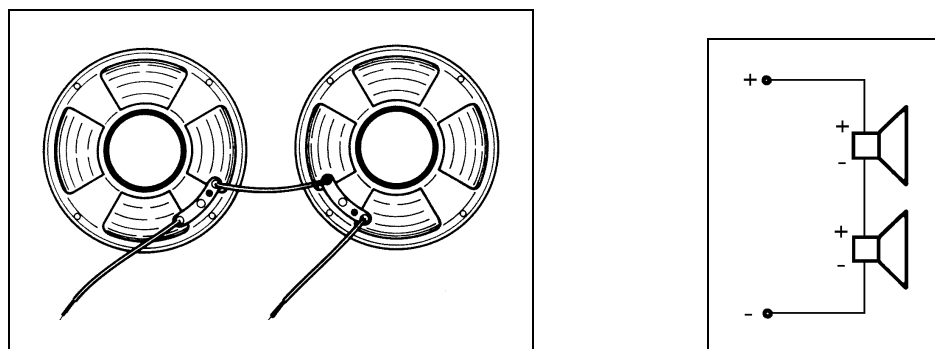
A polaridade nos alto-falantes é normalmente expressa por um sinal + ou por um ponto que indicam o terminal positivo.

Observação

É importante salientar novamente que esta polaridade é uma convenção para possibilitar a associação de alto-falantes. Isoladamente, o alto-falante pode ser ligado sem preocupação com a ordem dos fios.

Associação série de alto-falantes

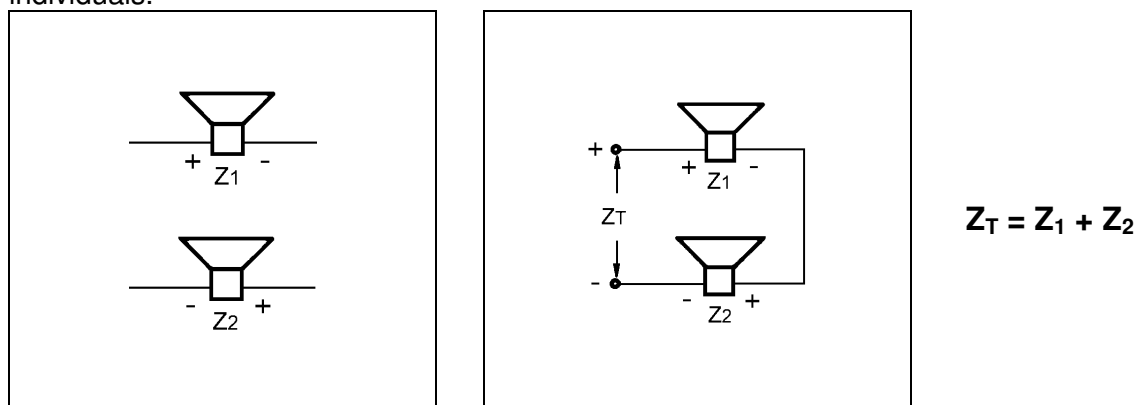
As figuras a seguir apresentam uma ligação série de dois alto-falantes com a observação das polaridades corretas (o ponto indica o terminal positivo) e o esquema da ligação.



A polaridade do conjunto é importante para possibilitar a ligação de diversos conjuntos (ou conjuntos estereofônicos) de alto-falantes no mesmo ambiente.

Impedância total

A impedância total de um sistema de alto-falantes em série é a soma das impedâncias individuais.



Observa-se que a fórmula é semelhante a da resistência total de uma associação série de resistores.

Distribuição de potência

Na associação série a potência se distribui de forma diretamente proporcional a impedância dos elementos.

$$Z_1 > Z_2 \therefore P_1 > P_2$$

Se a impedância do alto-falante 1 é maior que a impedância do alto-falante 2 a potência transformada pelo alto-falante 1 é maior que a do alto-falante 2.

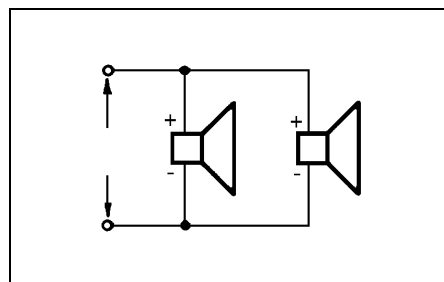
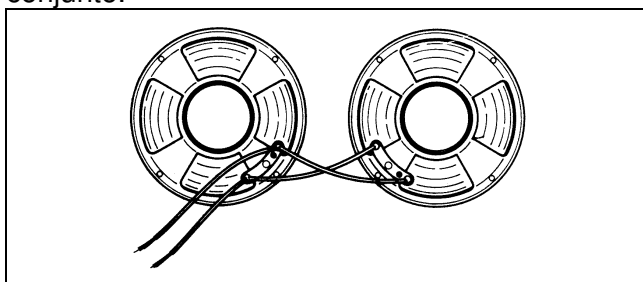
Observação

Quando os alto-falantes tem valores diferentes é necessário calcular a potência dissipada em cada um para dimensioná-los corretamente.

O cálculo é semelhante ao cálculo de dissipação de potência em associações de resistores.

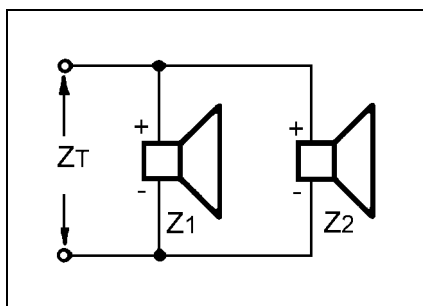
Associação paralela de alto-falantes

As figuras a seguir apresentam uma associação paralela de dois alto-falantes e sua simbologia, com a observação das polaridades corretas dos alto-falantes e do conjunto.



Impedância total

A impedância total de uma associação paralela de alto-falantes mostrada na figura abaixo é:



$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}$$

A fórmula é semelhante à utilizada para cálculo da resistência total de uma associação paralela de resistores.

Distribuição de potência

A potência se distribui de forma inversamente proporcional à impedância dos elementos na associação paralela.

$$Z_1 > Z_2 \therefore P_1 < P_2$$

Se a impedância do alto-falante 1 é maior que a impedância do alto-falante 2, a potência transformada pelo alto-falante 1 é menor que a do alto-falante 2.

