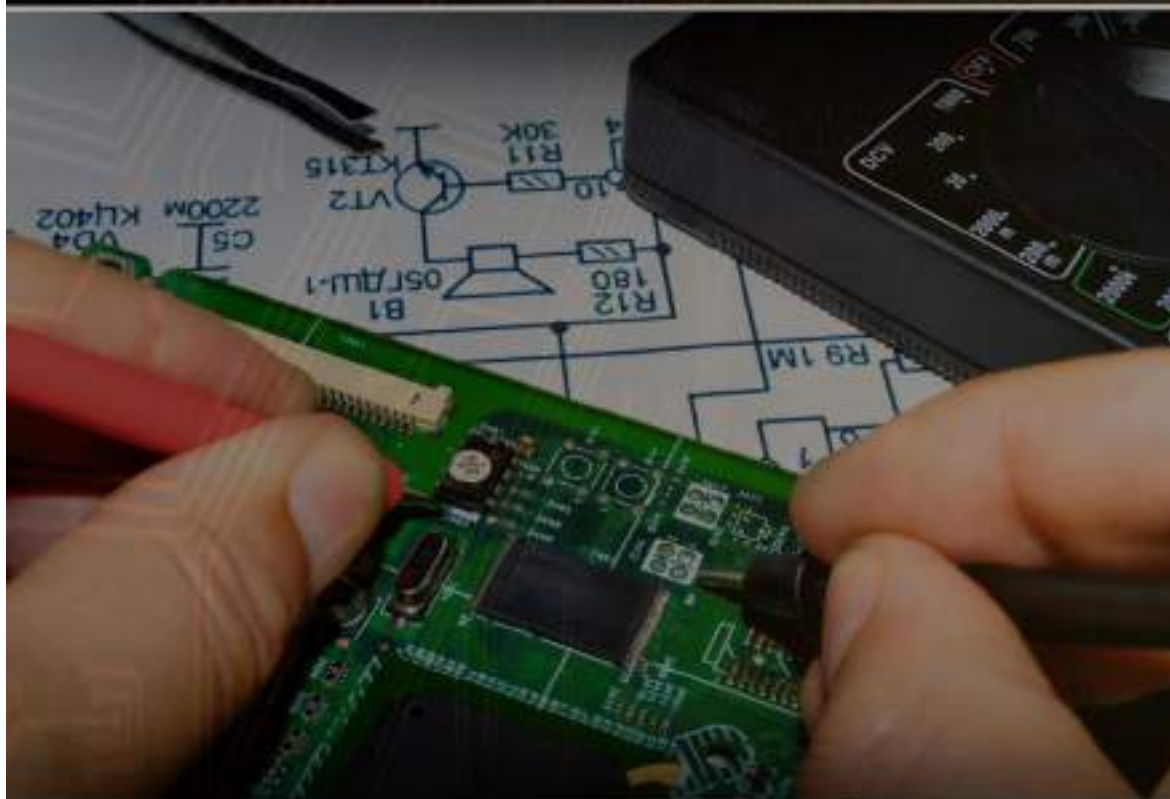


ESPECIALISTA EM REPAROS DE PLACAS ELETRÔNICA



CELSO MUNIZ

Especialista em Reparos de Placas eletrônicas

Sumário

Capítulo 1 - Grandezas Elétricas.....	3
Capítulo 2 - Multímetro Analógico.....	19
Capítulo 3 - Multímetro Digital.....	28
Capítulo 4 - Ponte LCR.....	36
Capítulo 5 - Fonte Regulável.....	46
Capítulo 6 - Osciloscópio.....	51
Capítulo 7 - Resistores.....	68
Capítulo 8 - Capacitores.....	122
Capítulo 9 - Indutores.....	189
Capítulo 10 - Diodos.....	234
Capítulo 11 - Transistor BJT.....	258

Introdução

A eletrônica é um campo fascinante e dinâmico que permeia muitos aspectos da nossa vida cotidiana. Desde os dispositivos que usamos diariamente até os complexos sistemas industriais, a eletrônica desempenha um papel crucial na nossa era tecnológica. Para aqueles que desejam se aventurar nesse universo, entender e manusear os instrumentos de medição é um passo fundamental.

Este livro foi concebido com o objetivo de ser uma referência completa para técnicos, engenheiros e entusiastas da eletrônica que desejam aprimorar suas habilidades na utilização de instrumentos de medição e compreender profundamente os componentes eletrônicos.

Instrumentos de Medição

A precisão na medição é essencial para a manutenção, análise e desenvolvimento de circuitos eletrônicos. Neste livro, exploraremos detalhadamente os seguintes instrumentos:

- **Multímetro Analógico e Digital:** Instrumentos essenciais para medir tensão, corrente e resistência, com suas particularidades e aplicações em diferentes contextos.
- **Ponte LCR:** Fundamental para medir indutância (L), capacitância (C) e resistência (R) com precisão, permitindo uma análise detalhada de componentes passivos.
- **Fonte Regulável:** Crucial para fornecer energia controlada e estável em testes e desenvolvimento de circuitos.
- **Osciloscópio:** Indispensável para visualizar formas de onda e compreender o comportamento dinâmico dos sinais eletrônicos.

Componentes Eletrônicos

Além dos instrumentos de medição, este livro também aborda os principais componentes eletrônicos que são a base de qualquer circuito:

- **Resistores:** Dispositivos que limitam a corrente elétrica e são essenciais em praticamente todos os circuitos.
- **Capacitores:** Componentes que armazenam e liberam energia elétrica, utilizados em diversas aplicações, desde filtragem até temporização.
- **Indutores:** Utilizados para armazenar energia em um campo magnético, essenciais em aplicações de filtragem e transformação de energia.

- **Diodos:** Dispositivos que permitem a passagem de corrente em apenas uma direção, fundamentais em retificação e proteção de circuitos.
- **Transistores:** Componentes chave para amplificação e comutação de sinais, presentes em uma infinidade de aplicações modernas.

Ao longo deste livro, você encontrará explicações detalhadas, diagramas ilustrativos e exemplos práticos que irão ajudá-lo a dominar o uso desses instrumentos e componentes. Quer você seja um iniciante ou um profissional experiente, este livro oferece o conhecimento necessário para aprimorar suas habilidades e aprofundar seu entendimento no campo da eletrônica.

Prepare-se para embarcar em uma jornada de aprendizado que irá expandir suas capacidades técnicas e abrir novas possibilidades no universo da eletrônica.



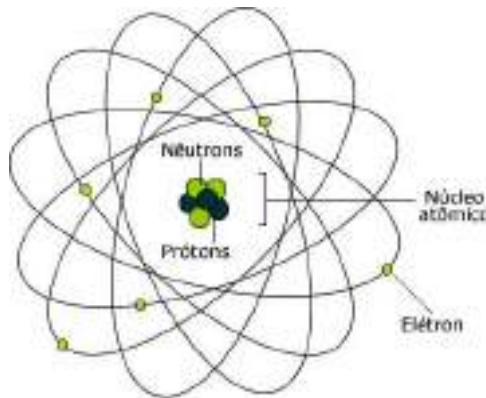
Capítulo 1

Grandezas Elétricas

No primeiro capítulo, exploraremos as principais grandezas elétricas fundamentais para a compreensão de qualquer circuito elétrico ou eletrônico. Este capítulo é crucial para estabelecer uma base sólida para os tópicos mais avançados que serão abordados posteriormente. Vamos definir e explicar detalhadamente as seguintes grandezas

1 - Condutores e isolantes

A estrutura dos átomos e como eles se relacionam com a condução elétrica pode ser entendida de uma maneira mais simples, focando nos elétrons e nas diferentes camadas de um átomo.



- **Estrutura do Átomo:** Um átomo é composto por um núcleo central, contendo prótons e nêutrons, e elétrons que orbitam esse núcleo em diferentes camadas ou níveis de energia.
- **Camada de Valência:** A camada mais externa de um átomo, onde os elétrons estão mais distantes do núcleo, é chamada de camada de valência. Os elétrons nesta camada são os mais importantes para a condução elétrica.
- **Liberação de Elétrons:** Quando um átomo recebe energia adicional (por exemplo, através de um campo elétrico, luz ou calor), os elétrons na camada de valência podem ganhar energia suficiente para se libertar do átomo. Uma vez livres, esses elétrons podem se mover pelo material, criando um fluxo de carga elétrica, ou seja, uma corrente elétrica.
- **Condução em Metais:** Nos metais, como prata, cobre, ouro e alumínio, os átomos têm poucos elétrons em sua camada de valência. Isso significa que esses elétrons podem ser liberados mais facilmente, criando uma grande quantidade de elétrons livres, mesmo em condições normais de temperatura e pressão. Essa é a razão pela qual os metais são bons condutores de eletricidade: eles têm muitos elétrons livres que podem se mover facilmente pelo material, transportando carga elétrica.

Em resumo, a facilidade com que os elétrons podem ser liberados da camada de valência de um átomo e se tornarem elétrons livres é crucial para a condução elétrica. Nos metais, essa liberação acontece mais facilmente, o que explica sua alta condutividade elétrica.

1.1 - Classificação Elétrica dos Materiais:

A facilidade ou dificuldade com que os elétrons podem se mover livremente em um material é um fator crucial para determinar sua classificação como condutor, isolante ou semicondutor. Essas categorias estão diretamente ligadas à condutividade elétrica do material, ou seja, sua capacidade de conduzir corrente elétrica.

Materiais Condutores: Os condutores são materiais que permitem que os elétrons se movam livremente através deles com grande facilidade. Isso ocorre porque eles têm muitos elétrons livres em sua estrutura atômica. Os elétrons podem facilmente se deslocar do átomo, permitindo um fluxo eficiente de corrente elétrica. Exemplos comuns de condutores incluem metais como cobre, prata, ouro e alumínio. Estes materiais são usados em uma variedade de aplicações onde a transferência de eletricidade é necessária, como em fios e cabos.

Materiais Isolantes: Ao contrário dos condutores, os isolantes têm uma dificuldade extrema em liberar elétrons. Seus elétrons estão firmemente ligados aos seus átomos e não se movem livremente. Isso faz com que sejam muito resistentes à passagem de corrente elétrica. Materiais como vidro, borracha e plástico são bons isolantes e são utilizados para revestir ou encapar fios e componentes elétricos, evitando o fluxo indesejado de eletricidade e oferecendo segurança.

Materiais Semicondutores: Os semicondutores possuem propriedades elétricas que estão entre os condutores e isolantes. Eles não conduzem eletricidade tão facilmente quanto os condutores, mas também não bloqueiam o fluxo de elétrons tão eficazmente quanto os isolantes. Seu comportamento de condução pode ser alterado e controlado por aditivos e condições externas, como a temperatura. Elementos como carbono (na forma de grafite), silício e germânio são semicondutores típicos. Esses materiais são a base da eletrônica moderna, usados em componentes como diodos, transistores e circuitos integrados.

A "**condutividade**" é uma medida de quão bem um material pode transportar uma corrente elétrica, enquanto a "**resistividade**" é o inverso disso - uma medida de quão fortemente um material se opõe ao fluxo de corrente elétrica. Essas propriedades são fundamentais para classificar materiais em termos de sua capacidade de conduzir eletricidade. Tabelas de resistividade são frequentemente usadas para comparar diferentes materiais e são uma ferramenta valiosa na escolha de materiais para aplicações específicas na engenharia elétrica e eletrônica.

veja exemplos na tabela abaixo:

Material	Classificação	Resistividade à 20° C ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
Cobre	condutor	0,0172
germânio	semicondutor	470000
Mica	isolante	90000000000

2 - Carga elétrica

A compreensão da carga elétrica e seu papel na física e na eletrônica é crucial para entender como funcionam os circuitos elétricos e os fenômenos relacionados à eletricidade. Vamos detalhar melhor esses conceitos:

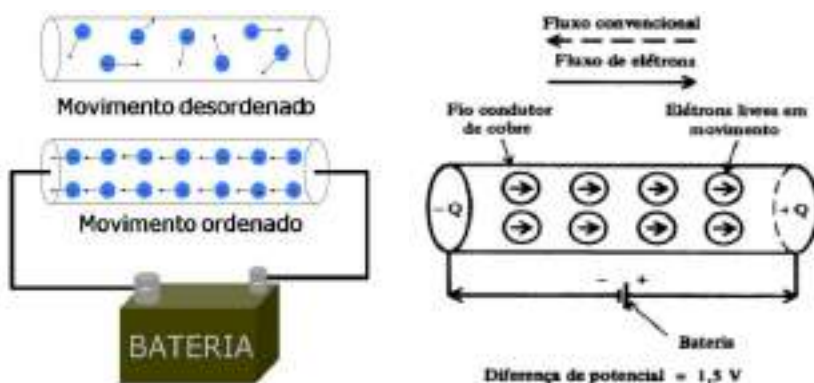
- **Carga Elétrica:** A carga elétrica é uma propriedade fundamental das partículas que compõem a matéria, como prótons e elétrons. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de carga elétrica é o Coulomb (C).
- **Carga Elementar:** Cada próton e cada elétron têm uma carga elementar, que é uma quantidade padrão de carga elétrica. A carga elementar é de aproximadamente $1,6 \times 10^{-19}$ Coulombs. Os prótons têm carga positiva (+), enquanto os elétrons têm carga negativa (-).
- **Atração e Repulsão:** As cargas elétricas se manifestam por meio de forças de atração ou repulsão. Cargas de sinais opostos (positiva e negativa) se atraem, enquanto cargas do mesmo sinal (ambas positivas ou ambas negativas) se repelem.
- **Movimento de Cargas:** Na maioria dos casos, a carga que se move de um corpo para outro é a carga negativa, ou seja, os elétrons. Isso ocorre porque os elétrons estão na camada externa dos átomos e podem se mover com mais facilidade do que os prótons, que estão no núcleo do átomo.
- **Conservação da Carga Elétrica:** Um princípio fundamental é que a carga elétrica não pode ser criada nem destruída, apenas transferida de um corpo para outro. Isso é conhecido como a lei da conservação da carga elétrica.
- **Efeitos Elétricos em Circuitos:** Na teoria dos circuitos, os efeitos elétricos são principalmente devidos à separação de cargas e ao movimento dessas cargas. A separação de cargas cria uma tensão elétrica, que é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos. O movimento das cargas, geralmente elétrons, constitui uma

corrente elétrica. A corrente elétrica ocorre quando há um caminho fechado, permitindo que os elétrons fluam de um ponto a outro.

Portanto, a carga elétrica e seu comportamento são essenciais para entender como a eletricidade funciona, desde as interações fundamentais em nível atômico até as aplicações práticas em circuitos elétricos e dispositivos eletrônicos.

3 - A corrente elétrica

Quando um condutor é conectado aos polos de uma fonte de energia elétrica, cria-se um campo elétrico necessário para a liberação e movimento dos elétrons. Os elétrons, que possuem carga elétrica negativa, começam a se mover ao longo do circuito fechado formado. Assim, o condutor é percorrido por essas cargas elétricas, que podem se mover continuamente em uma única direção ou alternar de direção, dependendo do tipo de corrente fornecida pela fonte. Em resumo, a conexão do condutor à fonte de energia elétrica inicia o fluxo de elétrons, essencial para a condução da eletricidade.



Em essência, a corrente elétrica é definida como o fluxo ordenado de cargas elétricas através de um condutor, como metais (por exemplo, cobre e alumínio). Nos condutores metálicos, este fluxo é composto principalmente por elétrons livres que se movem do polo negativo para o polo positivo da fonte de energia.

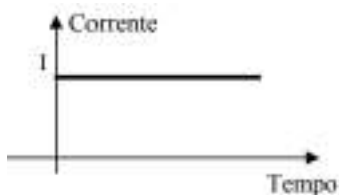
Contudo, essa descrição de "movimento ordenado" é uma simplificação. Na realidade, o movimento dos elétrons é caracterizado por frequentes colisões entre si e com os átomos do material condutor. Estas colisões fazem com que o avanço dos elétrons seja relativamente lento e intermitente, ocorrendo na direção oposta ao campo elétrico estabelecido, ou seja, do polo negativo para o polo positivo da fonte.

Importante destacar que, em diagramas e representações da corrente elétrica, utiliza-se a letra "I" (maiúscula ou minúscula) acompanhada de uma seta. Curiosamente, o sentido convencional da seta é oposto ao movimento real dos elétrons. Isto ocorre porque a convenção foi estabelecida antes de se compreender completamente o comportamento dos elétrons, assumindo-se um fluxo positivo para negativo, enquanto, na prática, os elétrons movem-se na direção contrária.

3.1 - Tipos de correntes:

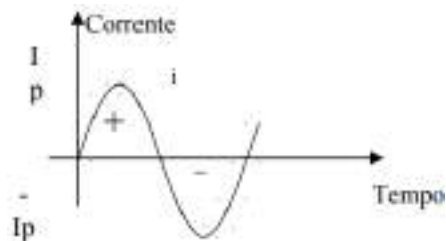
Corrente contínua (CC ou DC)

É o tipo de corrente onde o sentido e a intensidade (taxa de carga no tempo) se mantém constantes, no passar do tempo. Este tipo de corrente é produzido em circuitos alimentados por pilhas e baterias, por exemplo.



Corrente alternada (CA ou AC)

É o tipo de corrente onde o sentido e a intensidade (taxa de carga no tempo) variam de modo alternado, no passar do tempo, podendo assumir um comportamento senoidal. Neste caso a corrente será do tipo alternada senoidal. O modo "alternado" considera que sejam atingidos, periodicamente, picos positivos e negativos de igual intensidade ou amplitude, resultando numa média nula. A corrente alternada senoidal é aquela encontrada no nosso sistema elétrico residencial, comercial, etc.



4 - O que é tensão elétrica

A tensão elétrica, também conhecida como diferença de potencial elétrico (ddp), é uma importante grandeza física que descreve a capacidade de uma fonte de energia elétrica para exercer uma força sobre as cargas elétricas, como elétrons, e induzi-las a se moverem em um circuito. Ela é medida em Volts (V) e representa a energia potencial por unidade de carga disponível em um sistema elétrico.

Quando uma diferença de potencial é estabelecida entre dois pontos em um circuito, cria-se um campo elétrico que exerce uma força sobre as partículas carregadas, como elétrons. Essa força faz com que os elétrons se movam na direção do ponto de menor potencial elétrico para o ponto de maior potencial elétrico, criando um fluxo de elétrons conhecido como corrente elétrica.

Existem várias fontes de tensão elétrica que podem criar essa diferença de potencial, incluindo:

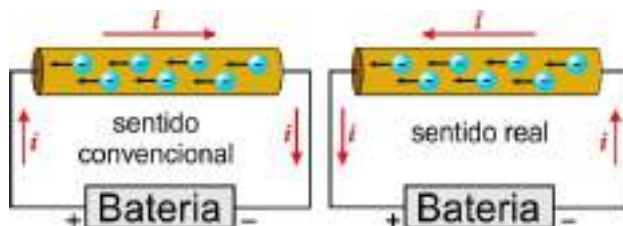
- **Pilhas e baterias:** Pilhas e baterias são dispositivos que convertem energia química em energia elétrica. Eles possuem dois terminais com potenciais elétricos diferentes, que geram uma ddp quando conectados em um circuito.
- **Geradores:** Geradores são máquinas que convertem energia mecânica em energia elétrica. Eles operam usando princípios eletromagnéticos para criar uma diferença de potencial entre seus terminais.
- **Painéis fotovoltaicos:** Painéis fotovoltaicos convertem a energia da luz solar em energia elétrica. Quando a luz solar incide sobre as células fotovoltaicas, ela gera uma ddp que permite a geração de corrente elétrica.

Quando uma carga é conectada a uma fonte de tensão, os elétrons começam a fluir através do circuito. A taxa de fluxo de elétrons, ou seja, a intensidade da corrente elétrica, depende da resistência elétrica do circuito. Quanto menor for a resistência, maior será a corrente elétrica, de acordo com a Lei de Ohm.

Em resumo, a tensão elétrica representa a diferença de potencial que impulsiona os elétrons a se moverem em um circuito elétrico, gerando assim uma corrente elétrica. É uma grandeza fundamental na eletricidade e é crucial para o funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos em nosso dia a dia.

4.1 - Comportamento da tensão elétrica no circuito

Para compreender melhor a tensão e a corrente elétrica, é importante considerar alguns conceitos básicos. Primeiramente, a corrente elétrica é o fluxo de elétrons, que são partículas carregadas negativamente. Essa corrente pode ser descrita de duas maneiras: o sentido real e o sentido convencional.



Sentido Real da Corrente Elétrica: No sentido real, a corrente flui dos pontos de menor potencial elétrico para os de maior potencial. Isso significa que, em uma fonte de tensão (como uma bateria), a corrente flui do polo negativo para o polo positivo. Este fluxo é determinado pelo movimento dos elétrons, que se movem em direção ao polo positivo, que tem um potencial mais alto.

Sentido Convencional da Corrente Elétrica: Historicamente, antes de se conhecer a natureza dos elétrons, acreditava-se que a corrente fluía do polo positivo para o polo negativo. Esse conceito ficou conhecido como sentido convencional da corrente. Apesar de sabermos agora que os elétrons se movem na direção oposta, o sentido convencional ainda é utilizado em análises de circuitos elétricos e eletrônicos por uma questão de convenção e simplicidade. Neste sentido, a corrente é considerada fluindo do polo de maior potencial elétrico (positivo) para o polo de menor potencial elétrico (negativo).

A tensão, por sua vez, é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos. Ela é o que "impulsiona" a corrente elétrica a fluir no circuito. Fontes de tensão, como baterias, têm polos positivos e negativos, indicando onde a tensão é mais alta (polo positivo) e onde é mais baixa (polo negativo).

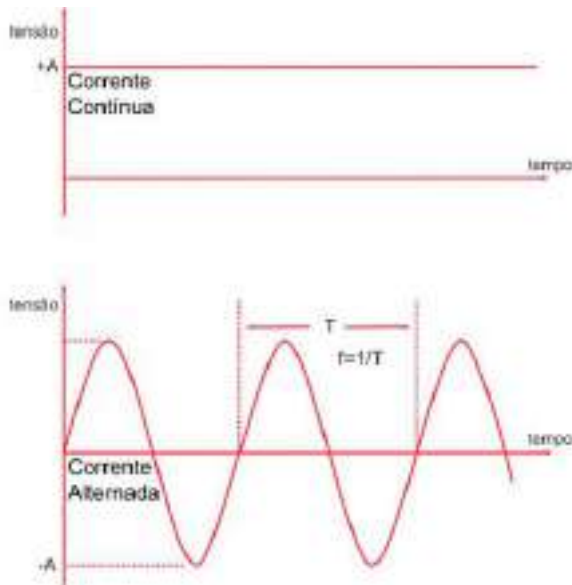
É importante destacar que, na prática, ao analisar circuitos elétricos e eletrônicos, usa-se o sentido convencional da corrente. Isso simplifica o entendimento e a análise dos circuitos, permitindo um melhor entendimento do comportamento dos componentes eletrônicos, sem perder a precisão científica.

4.2 - O que é tensão contínua e tensão alternada

Entender a diferença entre tensão contínua (DC) e tensão alternada (AC) é fundamental para compreender os sistemas elétricos e eletrônicos.

Tensão Contínua (DC - Direct Current): Na tensão contínua, a polaridade não se altera com o tempo. Isso significa que o fluxo de carga elétrica (corrente) sempre se move em uma única direção no circuito. Um exemplo clássico de fonte de tensão contínua são as pilhas e baterias. Nesses dispositivos, o polo positivo e o polo negativo são sempre fixos, proporcionando uma tensão constante e um fluxo de corrente unidirecional. A tensão contínua é amplamente usada em dispositivos eletrônicos portáteis, sistemas de telecomunicações, e em muitos componentes eletrônicos que necessitam de uma fonte de energia estável e previsível.

Tensão Alternada (AC - Alternating Current): Na tensão alternada, a polaridade se inverte periodicamente, fazendo com que a direção da corrente elétrica também se altere. Esta é a característica principal da tensão alternada: sua capacidade de mudar a direção da corrente em intervalos regulares. A frequência dessa inversão é medida em hertz (Hz), e varia conforme o sistema elétrico de cada país. Por exemplo, em muitos países, a frequência padrão é de 50 ou 60 Hz, o que significa que a direção da corrente muda 50 ou 60 vezes por segundo. A tensão alternada é usada na distribuição de energia elétrica para residências e indústrias porque é mais eficiente para transportar energia elétrica em longas distâncias, principalmente devido à possibilidade de transformar facilmente os níveis de tensão utilizando transformadores.



Portanto, a principal diferença entre as duas está na forma como a tensão e a corrente se comportam ao longo do tempo. Enquanto a tensão contínua mantém uma direção constante de fluxo de corrente, a tensão alternada tem um fluxo de corrente que varia periodicamente em direção.

4.3 - Tensão ou voltagem?

O uso correto dos termos técnicos é essencial na área de eletricidade e eletrônica, principalmente para profissionais como técnicos e engenheiros. Há uma tendência comum de usar termos coloquiais como "voltagem" e "amperagem", mas é importante entender por que esses termos não são tecnicamente precisos.

"Voltagem" vs. Tensão Elétrica: A palavra "voltagem" é frequentemente usada para se referir à tensão elétrica, mas não é a terminologia técnica correta. A tensão elétrica é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos e é medida em volts (V), em homenagem ao físico italiano Alessandro Volta. O termo "tensão elétrica" é mais preciso e é o preferido em contextos técnicos. A confusão ocorre porque em inglês, a tensão é frequentemente referida como "voltage", o que leva à tradução informal de "voltagem" em português.

"Amperagem" vs. Corrente Elétrica: De forma semelhante, o termo "amperagem" é comumente utilizado para descrever a corrente elétrica, mas não é tecnicamente correto. A corrente elétrica, que é o fluxo de carga elétrica através de um condutor, é

medida em ampères (A), em honra ao matemático e físico francês André-Marie Ampère. O termo correto a ser usado é "corrente elétrica", não "amperagem".

Para profissionais que atuam na área elétrica e eletrônica, é crucial usar os termos "tensão elétrica" e "corrente elétrica". Essa precisão na linguagem não só demonstra profissionalismo, mas também ajuda a evitar mal-entendidos e garante a clareza na comunicação técnica. Além disso, o uso correto dos termos contribui para a educação e formação de novos profissionais e estudantes na área.

4. 4 - Conceito pratico

Ao se ligar os pólos positivo/negativo de uma bateria aos terminais de um circuito elétrico, se observará o aparecimento de uma corrente elétrica, cuja intensidade dependerá diretamente da tensão entre os pólos e inversamente da dificuldade de movimento (ou resistência "R") encontrada pelos elétrons.

Percebe-se assim que a tensão elétrica é uma causa e a corrente elétrica é um efeito. Neste contexto, lembrando-se de que, na sua essência, tensão é o mesmo que energia potencial unitária (ou ainda, taxa de energia), pode-se adotar o seguinte conceito prático para a tensão elétrica, a ser adotado na análise de circuitos elétricos: Tensão Elétrica é a capacidade de produção de corrente elétrica. Assim, de um modo geral, as fontes ou geradores elétricos apresentam, entre seus pólos, a tensão elétrica, decorrente da concentração de elétrons no pólo negativo e da falta de elétrons no pólo positivo, que é, como vimos, efeito resultante da separação de cargas positivas e negativas. Se aplicada aos extremos de um elemento condutor, ou de um circuito elétrico, essa energia representada pela tensão elétrica será responsável pela aceleração e movimento de elétrons, do pólo negativo (que atua como fornecedor de elétrons) ao pólo positivo (que atua como receptor de elétrons), produzindo uma corrente elétrica, cujo sentido indicado é oposto ao real de movimento dos elétrons.

4.5 - Fórmulas de tensão elétrica

A Lei de Ohm é um princípio fundamental na eletricidade que estabelece uma relação direta entre três grandezas elétricas fundamentais: tensão elétrica, corrente elétrica e resistência elétrica. Esta lei é essencial para entender como diferentes componentes em um circuito elétrico interagem entre si.

A Lei de Ohm é expressa pela fórmula:

$$V= R.I$$

onde:

V representa a tensão elétrica, medida em Volts (V),

I é a corrente elétrica, medida em Amperes (A),

R é a resistência elétrica, medida em Ohms (Ω).

Tensão Elétrica (V): A tensão elétrica é a força que impulsiona os elétrons através de um condutor. Pode ser entendida como a "pressão" que move a carga elétrica.

Corrente Elétrica (I): A corrente elétrica é o fluxo de carga elétrica que passa através de um ponto no circuito. É o movimento dos elétrons através do condutor.

Resistência Elétrica (R): A resistência elétrica é a propriedade de um material de resistir ao fluxo de corrente. Quanto maior a resistência, menor é a corrente que pode fluir para uma dada tensão.

A Lei de Ohm mostra que a tensão é diretamente proporcional à corrente, com a resistência sendo o fator de proporcionalidade. Isso significa que se você aumentar a tensão, e a resistência permanecer constante, a corrente também aumentará. Da mesma forma, se a resistência aumentar e a tensão permanecer constante, a corrente diminuirá.

Esta lei é extremamente útil porque permite calcular uma das três grandezas se as outras duas forem conhecidas. Por exemplo, se você souber a tensão e a corrente, pode calcular a resistência. Se souber a tensão e a resistência, pode calcular a corrente. E se conhecer a corrente e a resistência, pode determinar a tensão.

A Lei de Ohm é aplicável em muitas situações práticas, como no projeto de circuitos eletrônicos, na resolução de problemas de circuitos elétricos e na compreensão do comportamento de dispositivos elétricos diversos. É uma ferramenta fundamental para engenheiros, técnicos e qualquer pessoa que trabalhe com eletricidade.

5 - O que é corrente elétrica

A corrente elétrica é uma grandeza física fundamental, definida como o fluxo ordenado de cargas elétricas, normalmente elétrons, através de um material. Este fluxo ocorre quando existe uma diferença de potencial elétrico (tensão) aplicada ao material, incentivando o movimento dessas cargas.

Unidade de Medida da Corrente Elétrica: No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de medida da corrente elétrica é o ampere, simbolizado por "A". Um ampere

é definido como o fluxo de um coulomb de carga por segundo. Em termos mais técnicos, 1 ampere é a corrente que, ao passar por dois condutores paralelos, retos, de comprimento infinito e seção transversal desprezível, e situados a um metro um do outro no vácuo, produziria uma força entre esses condutores de 2×10^{-7} newtons por metro de comprimento.

Relação entre Corrente Elétrica e Carga Elétrica: A corrente elétrica também pode ser entendida como a taxa de fluxo de carga elétrica. A quantidade de carga elétrica que passa por um ponto em um circuito ao longo do tempo é medida em coulombs (C), onde 1 coulomb é igual a aproximadamente 6.24×10^{18} elétrons. A relação entre corrente, carga e tempo é dada pela fórmula:

$$I = tQ$$

Onde:

I é a corrente em amperes, **Q** é a carga em coulombs, e **t** é o tempo em segundos.

Isso significa que, se um coulomb de carga passar por um ponto em um circuito em um segundo, a corrente será de um ampere.

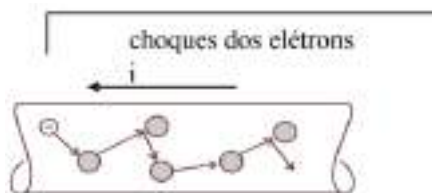
Importância da Corrente Elétrica: A corrente elétrica é essencial para o funcionamento de praticamente todos os dispositivos eletrônicos e sistemas de energia elétrica. Ela é responsável por transportar energia através dos circuitos, permitindo que os dispositivos realizem suas funções específicas, desde iluminar uma lâmpada até alimentar complexos sistemas de computadores.

Compreender a corrente elétrica é crucial para o projeto, a análise e a manutenção de circuitos elétricos e eletrônicos, sendo um conceito central na engenharia elétrica e em outras áreas relacionadas.

6 - Resistência elétrica

A resistência elétrica é uma característica intrínseca de todos os materiais, atuando como um fator de oposição à passagem da corrente elétrica. Essa propriedade determina a facilidade ou dificuldade com que a corrente elétrica pode fluir através de um material. A resistência elétrica é crucial porque ela influencia diretamente a quantidade de corrente que um circuito pode conduzir.

No fenômeno da corrente elétrica, os elétrons livres em movimento ordenado realizam sucessivos choques entre si e contra os átomos do material, resultando numa certa dificuldade para a passagem da corrente. Pode-se dizer então que: Resistência Elétrica é a grandeza que expressa a dificuldade oferecida pelo condutor à passagem da corrente elétrica.



Quando uma corrente elétrica passa por um material, ela encontra resistência devido às interações dos elétrons em movimento com os átomos do material. Quanto maior a resistência, mais difícil é para a corrente fluir, e menor será a corrente que passa pelo circuito para uma dada tensão.

A unidade de medida da resistência elétrica é o ohm, simbolizada pela letra grega ômega (Ω). O valor da resistência de um material depende de suas propriedades físicas e químicas, incluindo o tipo de material, seu comprimento, área da seção transversal e temperatura.

Por exemplo, materiais condutores como cobre e alumínio possuem baixa resistência, permitindo que a corrente flua facilmente, enquanto isolantes como borracha e vidro têm alta resistência, restringindo fortemente o fluxo de corrente. Além disso, a resistência de um condutor aumenta com o seu comprimento e diminui com o aumento da área da seção transversal. A temperatura também afeta a resistência: em muitos materiais, a resistência aumenta com o aumento da temperatura.

Portanto, a resistência elétrica representa o fator limitador da intensidade de corrente elétrica através de um condutor, de modo que: quanto maior a resistência, menor será a intensidade de corrente observada ($I = V/R$), desde que mantida a tensão constante.

Em resumo, a resistência elétrica é um fator fundamental no controle e na gestão do fluxo de corrente elétrica em circuitos, sendo determinante para o desempenho e a segurança dos sistemas elétricos.

7 - Potência Elétrica

A potência elétrica é um conceito fundamental na eletricidade, representando a taxa na qual a energia elétrica é convertida em outra forma de energia, como calor, luz ou trabalho mecânico, por um dispositivo ou sistema. Essa conversão ocorre, por exemplo, em um forno elétrico, que utiliza energia elétrica para gerar calor.

Existem três categorias principais de potência elétrica: potência ativa, potência aparente e potência reativa.

- **Potência Ativa (Watts, W):** É a potência real utilizada por equipamentos para realizar trabalho efetivo. Em dispositivos como lâmpadas ou aquecedores, essa potência é convertida em luz ou calor. A potência ativa é medida em Watts (W), e é o produto da tensão (em volts) pela corrente (em amperes) e pelo fator de potência, quando este é considerado.
- **Potência Aparente (Volt-Ampere, VA):** Representa a combinação da potência ativa e reativa em um sistema. É a potência total fornecida pela fonte de energia elétrica. Medida em Volt-Ampere (VA), é o produto da tensão (V) pela corrente total (A) no circuito, sem considerar o fator de potência.
- **Potência Reativa (Volt-Ampere Reativo, VAR):** Está relacionada aos campos elétricos e magnéticos em dispositivos como motores e transformadores. Ela não realiza trabalho efetivo, mas é necessária para manter esses campos. A potência reativa é medida em Volt-Ampere Reativo (VAR).

O "fator de potência" é outro conceito importante, representando a eficiência com que a energia elétrica é convertida em trabalho. Ele é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente. O valor ideal do fator de potência é 1, indicando que toda a potência aparente é utilizada para trabalho efetivo. Na prática, devido à presença de potência reativa, o fator de potência é geralmente menor que 1. Este fator é crucial na indústria e em sistemas de grande escala, pois influencia a eficiência energética e a capacidade de carga dos sistemas de energia.

Parte superior do formulário

7.1 - Conceito de Potência Elétrica

Potência elétrica, em termos simples, é uma medida de quão rapidamente a energia é usada (em um dispositivo consumidor) ou gerada (em uma fonte de energia). Essa taxa é medida em watts (W), onde 1 watt é igual a 1 joule por segundo ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$).

Considerando um dispositivo consumidor, como uma lâmpada incandescente de 100 W operando em uma tensão de 220 V, a potência elétrica nos dá uma noção de quão rapidamente a lâmpada consome energia. Neste caso, 100 W indica que a lâmpada consome energia a uma taxa de 100 joules por segundo. Isso significa que, a cada segundo, a lâmpada converte 100 joules de energia elétrica (fornecida pela rede elétrica) em outras formas de energia, como luz e calor.

No contexto de um resistor, um componente comum em circuitos elétricos, a potência elétrica é frequentemente referida como potência dissipada. Isso se deve ao fato de que a energia elétrica, ao passar por um resistor, é convertida em calor, que é então dissipado no ambiente. A quantidade de potência dissipada depende tanto da corrente que flui através do resistor quanto da tensão sobre ele.

Por outro lado, ao falar de uma fonte de energia, como uma bateria ou um gerador, a potência elétrica representa a taxa na qual essa fonte pode fornecer energia ao circuito. Por exemplo, se um gerador tem uma potência de 500 W, isso significa que ele é capaz de fornecer até 500 joules de energia elétrica por segundo aos dispositivos conectados a ele.

Em resumo, a potência elétrica é um conceito fundamental que nos ajuda a entender a rapidez com que a energia é transferida em sistemas elétricos, seja em dispositivos que consomem energia, como lâmpadas e resistores, ou em fontes que fornecem energia, como baterias e geradores.



Capítulo 2

Multímetro Analógico

Neste capítulo, vamos explorar o multímetro analógico, um instrumento essencial no campo da eletrônica. Começaremos definindo o que é um multímetro analógico, suas partes constituintes, e sua importância prática na manutenção de equipamentos eletrônicos.

Introdução

No mundo da manutenção de equipamentos eletrônicos, a precisão e a habilidade no manuseio de instrumentos de medição são essenciais para garantir o funcionamento correto e eficiente dos dispositivos. A complexidade crescente dos circuitos eletrônicos exige que os técnicos e engenheiros possuam um conhecimento aprofundado e sejam proficientes no uso de diversas ferramentas de medição. Esses instrumentos permitem não apenas a identificação de falhas, mas também a análise detalhada do comportamento dos componentes e dos sinais elétricos, possibilitando uma manutenção preventiva e corretiva eficaz.

A Importância dos instrumentos de Medição na Manutenção Eletrônica

A manutenção de equipamentos eletrônicos envolve uma série de processos que visam detectar, isolar e corrigir falhas em componentes ou circuitos. Cada falha pode apresentar sintomas variados, desde um simples mau funcionamento até a completa interrupção do serviço do dispositivo. A capacidade de medir corretamente tensões, correntes, resistências e outras grandezas elétricas é crucial para um diagnóstico preciso.

- **Diagnóstico Preciso:** Utilizar os instrumentos de medição adequados permite identificar a origem exata dos problemas, sejam eles causados por componentes defeituosos, conexões inadequadas ou falhas de design. Isso reduz o tempo necessário para solucionar problemas e minimiza o risco de substituir componentes desnecessariamente.
- **Eficiência na Reparação:** Com a correta identificação das falhas, os técnicos podem focar seus esforços na correção específica dos problemas, economizando tempo e recursos. A eficiência na reparação também significa menor tempo de inatividade para os equipamentos, o que é particularmente crítico em ambientes industriais e comerciais onde a continuidade operacional é vital.
- **Aumento da Confiabilidade:** A aplicação sistemática de medições durante a manutenção preventiva ajuda a detectar potenciais problemas antes que eles causem falhas significativas. Isso aumenta a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos, promovendo uma operação estável e segura.
- **Capacitação Técnica:** O uso competente dos instrumentos de medição reflete diretamente na qualificação dos profissionais de manutenção. A habilidade de interpretar dados de medição e utilizá-los para tomar decisões informadas é uma competência essencial para qualquer técnico ou engenheiro eletrônico.

Objetivo

Este material tem como objetivo explorar os principais tipos de instrumentos de medição usados na manutenção de placas eletrônicas. Cada capítulo será dedicado a um tipo específico de instrumento, detalhando suas funcionalidades, modos de uso e a importância de seu manuseio correto. Os instrumentos abordados incluem:

- **Multímetro Analógico:** Ferramenta clássica que permite medições básicas de tensão, corrente e resistência com uma interface analógica.
- **Multímetro Digital:** Equipamento moderno que oferece medições precisas e adicionais funcionalidades, como testes de diodo e continuidade.
- **Ponte LCR:** Instrumento especializado na medição de indutância, capacitância e resistência, essencial para caracterizar componentes passivos.
- **Osciloscópio:** Dispositivo avançado que permite a visualização de formas de onda, fundamental para a análise de sinais dinâmicos.
- **Fonte Regulável:** Equipamento que fornece uma tensão ou corrente ajustável, crucial para testar e alimentar circuitos sob condições controladas.

Ao longo deste livro, você aprenderá não apenas como utilizar esses instrumentos, mas também entenderá a importância de cada um no contexto da manutenção de equipamentos eletrônicos. A compreensão e o domínio dessas ferramentas são passos fundamentais para se tornar um profissional competente e eficiente na área de eletrônica.

Multímetro Analógico

O multímetro analógico é um instrumento de medição que combina diversas funções de medição elétrica em um único dispositivo. Ele é capaz de medir tensão (AC e DC), corrente (AC e DC), resistência, e, em alguns modelos, outras grandezas elétricas como capacitância e indutância. A principal característica que diferencia o multímetro analógico dos digitais é o uso de um ponteiro que se move sobre uma escala graduada, proporcionando uma leitura direta.

Importância de Saber Manusear em Reparos Eletrônicos

- **Precisão em Medições Sensíveis:** Em certas situações, o multímetro analógico pode fornecer leituras mais precisas de pequenas variações, devido à sua capacidade de refletir mudanças sutis que podem ser suavizadas em um multímetro digital.
- **Diagnóstico de Sinais Flutuantes:** A movimentação contínua do ponteiro facilita a identificação de sinais flutuantes ou instáveis, o que é crucial em diagnósticos de circuitos eletrônicos complexos.
- **Robustez e Confiabilidade:** Multímetros analógicos são geralmente mais robustos e menos suscetíveis a falhas eletrônicas, sendo uma escolha confiável em ambientes de manutenção exigentes.
- **Detecção de Oscilações Rápidas:** Em casos onde há oscilações rápidas ou ruído elétrico, o ponteiro do multímetro analógico pode responder de forma mais visível que um display digital.

Descrição do painel frontal



Diagrama do painel frontal de um multímetro analógico com 11 pontos numerados para identificação:

- 1. Ponteiro Indicador: Indica o valor da leitura.
- 2. OUTPUT/Logic 5+: Terminal para entrada positiva 5V para teste lógico.
- 3. 10ADC: Terminal positivo para conexão da ponta de prova vermelha para a medidas de corrente de 10A.
- 4. Chave Rotativa: Liga e desliga o instrumento e seleciona a função e a faixa de medida.
- 5. COM/Logic 5-: Terminal comum para conexão da ponta de prova preta para todas as medidas e para entrada negativa -5V para teste lógico.
- 6. Escala: Escalas de medidas do instrumento.
- 7. Ajuste de Zero Mecânico
- 8. Potenciômetro de Ajuste de 0Ω: Zera a escala na faixa de resistência.
- 9. Soquete hFE: Soquete para medida do hFE de transistores PNP e NPN.
- 10. P/logic test: Terminal positivo para conexão da ponta de prova vermelha para medida do teste lógico.
- 11. Leds indicadores de teste lógico.

Descrição das escalas



	Faixa	Multiplicador
1	Ω x10k	x10k
	x1k	x1k
	x100	x100
	x10	x10
	x1	x1
2	DCV 250	x1
	DCV 2,5	x0,01
	ACV 250	x1
	DCA 0,05m	x0,001
	DCA 2,5m	x0,01
	DCA 25m	x0,1
	DCA 250m	x1
3	DCV 50	x1
	DCV 0,5	x0,01
	ACV 50	x1
4	DCV 0,1	x0,01
	DCV 10	x1
	DCV 1000	x100
	ACV 1000	x100
	DCA 10	x1
5	ACV 10	x1
8	HFE	x1

	Faixa	Multiplicador
7	150mA a x1	x10(mA)
	150mA a x10	x1(mA)
	1,5mA a x100	x100(μA)
	150μA a x1k	x10μA
	1,5μA a x100k	x0,1(μA)
8	LV	x1
9	ACV 50	14dB adicionado
	ACV 250	28dB adicionado
	ACV 1000	40dB adicionado

Instruções de Operação do Multímetro

Verificações Iniciais

1. Examine o Instrumento: Verifique se há danos, contaminação (sujeira, graxa, etc.) e defeitos no multímetro.
2. Verifique as Pontas de Prova: Inspeccione as pontas de prova para ver se há rachaduras ou defeitos na isolação. Se detectar alguma condição anormal, não realize nenhuma medição.

Ajuste de ZERO Mecânico

1. Posicione o Multímetro: Coloque o multímetro na posição horizontal e selecione a chave rotativa para 0,1V.
2. Teste de Zero: Encoste uma ponta de prova na outra. O ponteiro deve indicar ZERO no lado esquerdo da escala. Se não indicar ZERO, ajuste o parafuso de zero lentamente até que o ponteiro indique ZERO na escala DCV.

Chave Seletora

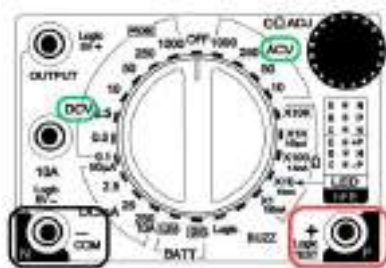
1. Função e Faixa: A chave seletora no centro do painel frontal seleciona as funções e faixas de medição.
2. Economia de Bateria: Quando não estiver em uso, coloque a chave na posição OFF para economizar bateria e proteger o instrumento.

Leitura Correta das Escalas

1. Superfície Não Metálica: Não coloque o multímetro sobre uma superfície metálica durante a medição.
2. Evitar Erro de Paralaxe: Observe o ponteiro sempre de frente para evitar o erro de paralaxe. O erro de paralaxe ocorre quando há um desvio na leitura de um instrumento de medição devido ao ângulo de visão incorreto. Esse erro é comum em instrumentos analógicos, como multímetros com ponteiros.

Medida de Tensão DC/AC

1. Conecte as Pontas de Prova: Vermelha no terminal +AVΩ e preta no terminal -COM.
2. Selecione a Faixa: Escolha a faixa e tipo de tensão (DCV ou ACV). Se não souber a magnitude do sinal, comece com a faixa maior e reduza até obter uma leitura adequada.
3. Realize a Medição: Encoste as pontas de prova nos pontos a serem medidos e leia o valor na escala correta (DCV ou ACV).



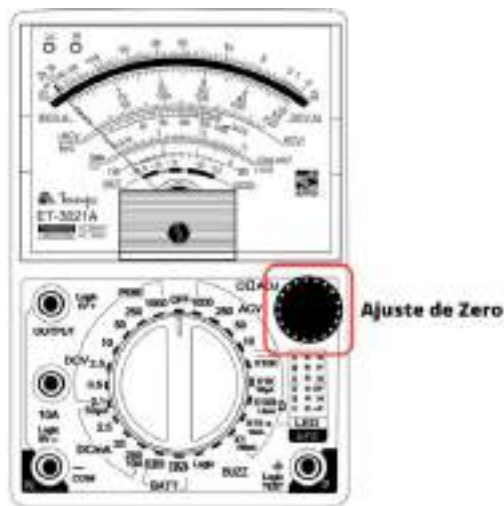
Medida de Corrente DC

1. Conecte as Pontas de Prova: Vermelha no terminal +AVΩ e preta no terminal -COM para corrente até 0,25A DC. Para correntes entre 0,25A e 10A DC, use o terminal DC 10A.
2. Selecione a Faixa: Escolha a faixa de corrente desejada. Se não souber a magnitude, comece com a faixa maior e reduza até obter uma leitura adequada.
3. Desligue a Alimentação: Desligue a alimentação do circuito e descarregue os capacitores antes de conectar o multímetro em série.
4. Realize a Medição: Ligue o circuito e leia o valor da corrente na escala DCV. Após a medição, desligue a alimentação e descarregue os capacitores antes de desconectar o multímetro.



Medida de Resistência

1. Verifique as Baterias: Certifique-se de que as baterias estão em boas condições.
2. Conecte as Pontas de Prova: Vermelha no terminal +AVΩ e preta no terminal -COM.
3. Ajuste de Zero: Encoste as pontas de prova uma na outra e ajuste o botão 0Ω ADJ até o ponteiro indicar ZERO na escala Ω. Faça isso sempre que mudar a faixa de resistência.
4. Desligue a Alimentação: Desligue a alimentação e descarregue os capacitores antes de medir a resistência. Leia o valor na escala Ω.



Teste de Continuidade

1. Conecte as Pontas de Prova: Vermelha no terminal +AVQ e preta no terminal -COM.
2. Selecione a Posição de Continuidade: Ajuste a chave rotativa para a posição de continuidade.
3. Desligue a Alimentação: Desligue a alimentação e descarregue os capacitores antes de testar.
4. Realize o Teste: Encoste as pontas de prova no circuito. Se a resistência for inferior a aproximadamente 100Ω , um sinal sonoro será emitido.





Capítulo 3

Multímetro Digital

Neste capítulo, abordaremos o multímetro digital, um instrumento de medição amplamente utilizado e essencial para qualquer profissional que trabalha com eletrônica. Vamos explorar o que é um multímetro digital, como utilizá-lo corretamente e sua importância na manutenção de equipamentos eletrônicos.

Multímetro Digital

O multímetro digital é um instrumento de medição elétrica que combina várias funções em um único dispositivo. Ele é capaz de medir tensão (AC e DC), corrente (AC e DC), resistência, capacitância, frequência, continuidade, entre outras grandezas elétricas. A principal característica que diferencia o multímetro digital do analógico é o uso de um display digital para apresentar as leituras, o que facilita a leitura precisa dos valores medidos.

Importância de Saber Manusear em Reparos Eletrônicos

Precisão e Facilidade de Leitura:

- **Leitura Direta:** O display digital fornece leituras precisas e diretas, eliminando a necessidade de interpretar a posição de um ponteiro em uma escala.
- **Menos Erros de Leitura:** A clareza dos números digitais reduz a possibilidade de erros de leitura, comum em escalas analógicas.

Funções Avançadas:

- **Multiplicidade de Funções:** Multímetros digitais modernos oferecem uma ampla gama de funções adicionais, como medição de capacitância, temperatura, frequência e teste de diodos, ampliando sua utilidade em reparos e diagnósticos.
- **Funções Automáticas:** Muitos modelos possuem recursos como auto-ranging, que ajusta automaticamente a faixa de medição adequada, facilitando o uso para usuários menos experientes.

Registro de Dados:

- **Memória e Registro:** Alguns multímetros digitais possuem memória interna para registrar medições, o que é útil para análises posteriores e para manter um histórico de diagnósticos.

Segurança:

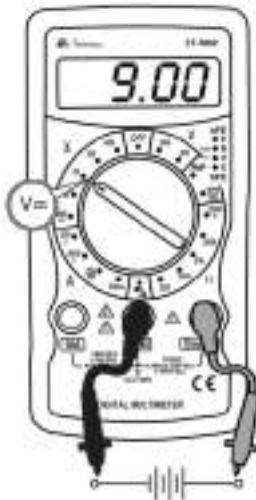
- **Proteções Internas:** Multímetros digitais geralmente incluem várias proteções internas contra sobrecargas, curto-circuitos e outras condições de falha, melhorando a segurança durante o uso.

Descrição do painel frontal



1. Display LCD.
2. Soquete hFE: Soquete para medida de hFE de transistores NPN e PNP e teste de LED's.
3. Chave Rotativa.
4. Terminal de Entrada 10A: Entrada positiva para medidas de corrente na escala de 10A.
5. Terminal de Entrada COM: Entrada negativa para as medidas de tensão, resistência e corrente, e para os testes de diodo e continuidade.
6. Terminal de Entrada V/mA/Ω: Entrada positiva para medidas de tensão resistência, corrente DC (em mA) e para os testes de diodo e continuidade.
7. Indicador de Alta Tensão.
8. Indicador de Polaridade Negativa (positiva é implícita).
9. Indicador de Bateria Fraca.
10. Dígitos do Display de Cristal Líquido.

Medida de Tensão DC



Passo 1: Preparação do Multímetro

1. Seleção da Função:

- Gire o seletor do multímetro para a função de medição de tensão DC, geralmente marcada como "V --- " ou "VDC".

- Se o multímetro não for auto-ranging, selecione uma faixa que seja maior do que a tensão esperada. Por exemplo, se você espera medir até 12V, selecione a faixa de 20V ou mais.

2. Conexão das Pontas de Prova:

- Conecte a ponta de prova preta no terminal comum (COM).

- Conecte a ponta de prova vermelha no terminal marcado como VΩmA ou apenas V (para tensão).

Passo 2: Realização da Medição**3.Posicionamento das Pontas de Prova:**

- Coloque a ponta de prova preta (COM) no ponto de referência ou terra (GND) do circuito.
- Coloque a ponta de prova vermelha no ponto onde deseja medir a tensão DC.

4.Leitura do Valor:

- Observe o valor exibido no display do multímetro. Este será o valor da tensão DC no ponto de medição em relação ao ponto de referência.
- Certifique-se de que o multímetro está configurado corretamente para medir DC, pois medir AC na configuração de DC pode resultar em leituras incorretas ou nenhuma leitura.

Passo 3: Interpretação da Medição**5.Valor Numérico:**

- O valor exibido será a tensão DC presente entre as duas pontas de prova.
- Se o valor for negativo, isso indica que a polaridade das pontas de prova está invertida (a ponta vermelha está em um ponto de potencial mais baixo que a ponta preta).

6.Faixa de Medição:

- Se a leitura estiver fora da faixa selecionada, ajuste para uma faixa maior se disponível. Se o multímetro for auto-ranging, ele ajustará automaticamente.

Passo 4: Finalização**7. Desligue o Multímetro:**

- Desligue o multímetro quando não estiver em uso para conservar a bateria.

Medida de Tensão AC**Passo 1: Preparação do Multímetro****1. Seleção da Função:**

- Gire o seletor do multímetro para a função de medição de tensão AC, geralmente marcada como "V~" ou "VAC".
- Se o multímetro não for auto-ranging, selecione uma faixa que seja maior do que a tensão esperada. Por exemplo, se você espera medir 120V, selecione a faixa de 200V ou mais.

2. Conexão das Pontas de Prova:

- Conecte a ponta de prova preta no terminal comum (COM). Conecte a ponta de prova vermelha no terminal marcado como VΩmA ou apenas V (para tensão).

Passo 2: Realização da Medição**3. Posicionamento das Pontas de Prova:**

- Coloque as pontas de prova nos pontos onde deseja medir a tensão AC. Isso pode ser em uma tomada, em terminais de um circuito AC, ou em qualquer outro ponto onde exista uma tensão AC.

4. Leitura do Valor:

- Observe o valor exibido no display do multímetro. Este será o valor da tensão AC entre os pontos de medição.

5. Faixa de Medição:

- Se a leitura estiver fora da faixa selecionada, ajuste para uma faixa maior se disponível. Se o multímetro for auto-ranging, ele ajustará automaticamente.

Medida de Resistências**Passo 1: Preparação do Multímetro**1. Seleção da Função:

- Gire o seletor do multímetro para a função de medição de resistência, geralmente marcada como " Ω " (ohms).
- Se o multímetro não for auto-ranging, selecione uma faixa que seja adequada para a resistência esperada. Por exemplo, se você espera medir uma resistência de 1000 ohms ($1k\Omega$), selecione uma faixa que cubra esse valor, como $2k\Omega$ ou $20k\Omega$.

2. Conexão das Pontas de Prova:

- Conecte a ponta de prova preta no terminal comum (COM).
- Conecte a ponta de prova vermelha no terminal marcado como $V\Omega mA$ ou apenas Ω (para resistência).

Passo 2: Realização da Medição3. Desligue o Circuito:

- Certifique-se de que o componente ou circuito a ser medido está desligado e desenergizado. Medir resistência em um circuito energizado pode danificar o multímetro e fornecer leituras incorretas.

4. Remova o Componente:

- Se possível, remova o componente do circuito para garantir uma leitura precisa. Se isso não for viável, certifique-se de que o circuito ao redor do componente não está influenciando a medição.

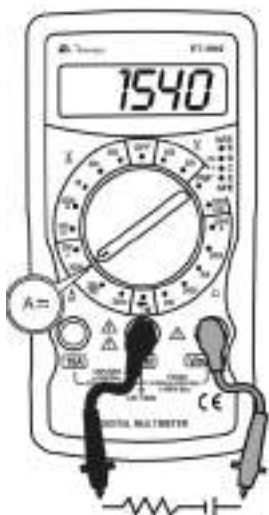
Passo 3: Interpretação da Medição5. Posicionamento das Pontas de Prova:

- Coloque as pontas de prova nos terminais do componente cuja resistência deseja medir. Não importa a polaridade das pontas de prova para medir resistência.

6. Leitura do Valor:

- Observe o valor exibido no display do multímetro. Este será o valor da resistência entre os pontos de medição.

Medida de correntes DC



Passo 1: Preparação do Multímetro

1. Seleção da Função:

- Gire o seletor do multímetro para a função de medição de corrente DC, geralmente marcada como "A=" ou "ADC".
- Se o multímetro não for auto-ranging, selecione uma faixa que seja maior do que a corrente esperada. Por exemplo, se você espera medir até 1A, selecione a faixa de 10A.

2. Conexão das Pontas de Prova:

- Conecte a ponta de prova preta no terminal comum (COM).
- Conecte a ponta de prova vermelha no terminal marcado como mA ou 10A, dependendo da corrente esperada. Use o terminal mA para correntes baixas (geralmente até 200mA) e o terminal 10A para correntes maiores (até 10 Amperes).

Passo 2: Preparação do Circuito

3. Desligue o Circuito:

- Certifique-se de que o circuito está desligado antes de fazer qualquer conexão. Isso evita danos ao multímetro e ao circuito.

4. Interrupção do Circuito:

- Para medir corrente, você precisa interromper o circuito e conectar o multímetro em série. Identifique onde você pode abrir o circuito para inserir o multímetro.

Passo 3: Realização da Medição

5. Conexão em Série

- Abra o circuito no ponto onde deseja medir a corrente.

- Conecte a ponta de prova preta no lado do circuito que está conectado à fonte de energia.
- Conecte a ponta de prova vermelha no lado que vai para a carga.

6.Ligar o Circuito:

- Ligue o circuito novamente. A corrente agora passará pelo multímetro, permitindo a medição.

7. Interpretação da medição

- Observe o valor exibido no display do multímetro. Este será o valor da corrente DC fluindo pelo circuito.

Passo 4: Interpretação da Medição

8.Valor Numérico:

- O valor exibido será a corrente DC medida em amperes (A). Se a leitura estiver fora da faixa selecionada, o multímetro pode exibir "OL" (overload). Nesse caso, selecione uma faixa maior.

9.Faixa de Medição:

- Se a corrente medida for muito baixa, mude para uma faixa menor (por exemplo, de 10A para 200mA) para obter uma leitura mais precisa.



Capítulo 4

Ponte LCR

Neste capítulo, vamos explorar a ponte LCR, um instrumento de medição essencial para a análise de componentes passivos em circuitos eletrônicos. Veremos o que é uma ponte LCR, como utilizá-la, os parâmetros de medição que ela avalia, e sua importância na manutenção e diagnóstico de sistemas eletrônicos.

Introdução

A Ponte LCR é um instrumento de medição utilizado para determinar a indutância (L), capacitância (C) e resistência (R) de componentes eletrônicos. Esses parâmetros são essenciais na análise e no diagnóstico de circuitos e sistemas eletrônicos. A Ponte LCR pode ser um dispositivo portátil ou de bancada, oferecendo medições precisas e funcionalidades avançadas que facilitam a vida dos técnicos e engenheiros eletrônicos.

Funções da Ponte LCR

1. Medição de Indutância (L): Determina a indutância de bobinas e outros componentes indutivos.
2. Medição de Capacitância (C): Mede a capacitância de capacitores, essenciais em circuitos de filtragem e armazenamento de energia.
3. Medição de Resistência (R): Avalia a resistência elétrica de resistores e outros componentes resistivos.
4. Funções Avançadas da Ponte LCR
5. Medição de Dissipação (D) e Fator de Qualidade (Q): Avalia a eficiência de capacitores e indutores.
6. Teste de ESR (Resistência Série Equivalente): Importante para verificar a saúde de capacitores eletrolíticos.
7. Medição de Impedância Complexa: Analisa a resposta de componentes em diferentes frequências.
8. Teste de Comparação: Compara valores medidos com padrões predefinidos para verificar se os componentes estão dentro das especificações.

Importância de Saber Manusear uma Ponte LCR

- Precisão nas Medições: Ferramenta essencial para garantir medições exatas, fundamentais na análise de circuitos complexos.
- Identificação de Componentes Defeituosos: Crucial para detectar componentes que não estão funcionando corretamente, como capacitores com alto ESR ou indutores com curto-circuito.
- Verificação de Especificações: Assegura que os componentes utilizados estão dentro das especificações técnicas, evitando falhas em circuitos.
- Melhoria na Qualidade dos Reparos: Contribui para reparos mais eficazes e duradouros, aumentando a confiabilidade dos equipamentos.
- Eficiência no Trabalho: Aumenta a produtividade dos técnicos, permitindo diagnósticos rápidos e precisos.

Funções Avançadas da Ponte LCR: Explicações Detalhadas

Medição de Dissipação (D) e Fator de Qualidade (Q)

Dissipação (D):

Definição: A dissipação é uma medida da eficiência de um capacitor. Representa a perda de energia na forma de calor em um capacitor.

Importância: Valores baixos de D indicam que o capacitor é eficiente e tem poucas perdas. Valores altos de D podem indicar problemas no capacitor.

Como Medir: A Ponte LCR aplica uma tensão ao capacitor e mede a corrente resultante. A relação entre a corrente real e a corrente ideal é usada para calcular a dissipação.

Fator de Qualidade (Q):

Definição: O fator de qualidade é a relação entre a energia armazenada e a energia dissipada em um ciclo de operação de um indutor ou capacitor.

Importância: Um alto valor de Q indica um componente de alta qualidade com baixa dissipação de energia. Isso é especialmente importante em aplicações de alta frequência.

Como Medir: A Ponte LCR mede a indutância e a resistência série de um indutor para calcular o fator Q.

Teste de ESR (Resistência Série Equivalente)

Definição: ESR é a resistência que um capacitor apresenta em série com sua capacitância ideal. É uma medida de perdas em capacitores, particularmente em capacitores eletrolíticos.

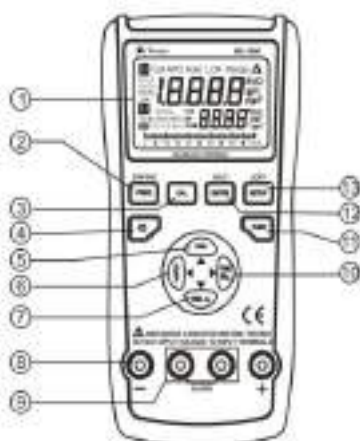
Importância: Capacitores com alto ESR podem causar problemas em circuitos de alta frequência ou em circuitos onde a eficiência é crucial, como em fontes de alimentação.

Como Medir: A Ponte LCR aplica uma pequena corrente alternada ao capacitor e mede a tensão resultante. A razão entre a tensão e a corrente dá o valor da ESR.

Exemplos Práticos de Uso

- ✓ Capacitores em Fontes de Alimentação: Verificar o ESR de capacitores eletrolíticos em fontes de alimentação para assegurar que não estão desgastados e ainda são eficientes.
- ✓ Bobinas em Filtros de RF: Medir o fator Q de bobinas usadas em filtros de RF para garantir que têm baixa dissipação e alta eficiência.
- ✓ Componentes de Precisão: Utilizar o teste de comparação para verificar que resistores e capacitores de precisão atendem às especificações antes de serem instalados em circuitos sensíveis.

Descrição do painel frontal



1. Display LCD.
2. Tecla de seleção da frequência de teste.
3. Tecla de calibração.
4. Botão Power.
5. Tecla USB.
6. Tecla de seleção de parâmetros avançados.
7. Tecla REL.
8. Terminal de Entrada.
9. Terminal terra de isolamento.
10. Tecla das funções série ou paralelo.
11. Tecla das funções L, C ou R.
12. Tecla ENTER/Hold.
13. Ajuste de Tolerância.

Descrição do Display



1. Comunicação USB
2. Calibração de circuito aberto/curto-circuito
3. Auto Desligamento (APO)
4. Modo Relativo
5. Display Principal
6. Display Auxiliar
7. Barra gráfica
8. Modo de filtro habilitado
9. Modo Hold C.

Indicações do Display:

LCR: Indicador das funções L, C ou R.

Lp: Modo de medida de indutância em paralelo.

Ls: Modo de medida de indutância em série.

Cp: Modo de medida de capacitância em paralelo.

Cs: Modo de medida de capacitância em série.

Rp: Modo de medida de resistência em paralelo.

Rs: Modo de medida de resistência em série.

DCR: Modo de medida de resistência DC

D: Fator de dissipação

Q: Fator de qualidade

θ : Ângulo de fase de localização

ESR: Resistência série equivalente

EPR: Resistência paralela equivalente

DUT: Dispositivo em teste

Como medir com uma ponte LCR

Selecionando os modos série/paralelo

Quando utilizamos uma Ponte LCR, um aspecto importante a considerar é a escolha entre o modo de medição série ou paralelo. Esta escolha pode afetar a precisão e a interpretação das medições de componentes eletrônicos, dependendo da impedância do componente sendo medido.

Definição dos Modos:

Modo Série:

- Equivalente Série: Em medições de equivalente série, o componente é representado como uma resistência em série com uma reatância (indutiva ou capacitiva).
- Aplicação: Usado principalmente para componentes de baixa impedância (menor que $10k\Omega$).

Modo Paralelo:

- Equivalente Paralelo: Em medições de equivalente paralelo, o componente é representado como uma resistência em paralelo com uma reatância.
- Aplicação: Usado principalmente para componentes de alta impedância (maior que $10k\Omega$).

Por Que Escolher o Modo Correto?

A escolha entre modo série e paralelo é baseada na natureza da impedância do componente:

Baixa Impedância ($< 10k\Omega$):

- Modo Série é recomendado porque a resistência e a reatância estão em série, o que simplifica a análise e fornece resultados mais precisos.
- Exemplo: Resistores de baixo valor, capacitores de alta capacitância e indutores de baixa indutância.

Alta Impedância ($> 10k\Omega$):

- Modo Paralelo é recomendado porque, em altas impedâncias, a resistência e a reatância são mais bem modeladas em paralelo, resultando em medições mais precisas.
- Exemplo: Resistores de alto valor, capacitores de baixa capacitância e indutores de alta indutância.

Influência no Resultado de Medição

A diferença entre os modos série e paralelo é mais significativa em componentes com características de alta impedância. Em componentes de baixa impedância, a diferença entre os modos série e paralelo é menos pronunciada e terá pouca influência no resultado da medição.

Exemplos Práticos

- ✓ Medindo um Capacitor de Baixa Capacitância (Alta Impedância):
 - Utilize o modo paralelo para obter uma leitura mais precisa.
 - Motivo: A resistência de fuga (parasitária) do capacitor é mais representativa em um circuito paralelo.
- ✓ Medindo um Indutor de Baixa Indutância (Baixa Impedância):
 - Utilize o modo série.
 - Motivo: A resistência DC do fio do indutor é mais representativa em um circuito série.

2. Medição de Indutância



1. Ligar o Instrumento:

Ação: Pressione o botão “Power” para ligar a Ponte LCR.

Descrição: Isso inicializa o instrumento, preparando-o para a medição.

2. Selecionar o Modo de Medição de Indutância:

Ação: Pressione o botão “FUNC” até que “LP” (indutância em paralelo) apareça no display.

Descrição: O modo "LP" indica que o instrumento está configurado para medir indutância. Dependendo do modelo da Ponte LCR, você pode ver diferentes modos, como "LS" (indutância em série), dependendo da impedância do indutor.

3. Inserir o Indutor:

Ação: Conecte o indutor na entrada de teste ou utilize a ponta de prova para fazer a conexão.

Descrição: Certifique-se de que as conexões estão firmes para evitar leituras errôneas. A entrada de teste pode ter garras crocodilo ou conectores tipo banana.

4. Selecionar a Frequência de Teste:

Ação: Pressione a tecla “FREQ” para escolher a frequência de teste desejada.

Descrição: A frequência de teste deve ser selecionada com base na aplicação específica do indutor. Frequências comuns são 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, etc. A escolha da frequência afeta a precisão e relevância da medição, especialmente em indutores usados em aplicações de alta frequência.

5. Selecionar o Parâmetro Auxiliar de Medição:

Ação: Pressione a tecla “D/Q/θ” para escolher um parâmetro auxiliar como Dissipação (D), Fator de Qualidade (Q) ou Ângulo de Fase (θ).

Descrição: Esses parâmetros fornecem informações adicionais sobre o desempenho do indutor.

- Dissipação (D): Indica as perdas de energia no indutor. Valores baixos de D indicam menores perdas.

- Fator de Qualidade (Q): Representa a eficiência do indutor. Valores altos de Q indicam alta eficiência.
- Ângulo de Fase (θ): Indica a diferença de fase entre a corrente e a tensão. Isso é útil para entender o comportamento reativo do indutor.

Exemplos Práticos de Uso dos Parâmetros Auxiliares

Dissipação (D):

Aplicação: Verificar a eficiência de indutores usados em fontes de alimentação ou conversores de energia.

Interpretação: Um valor alto de D pode indicar um indutor com perdas elevadas, o que pode afetar a eficiência do circuito.

Fator de Qualidade (Q):

Aplicação: Importante em circuitos de RF e filtros onde a eficiência do indutor é crítica.

Interpretação: Um valor alto de Q indica que o indutor tem baixa resistência parasítica e é eficiente.

Ângulo de Fase (θ):

Aplicação: Analisar o comportamento reativo do indutor em circuitos de AC.

Interpretação: O ângulo de fase ajuda a entender como o indutor afeta a corrente e a tensão no circuito.

Importância de Cada Passo

- ✓ Cada passo no processo de medição é crucial para obter resultados precisos e relevantes:
- ✓ Ligar e Configurar Corretamente o Instrumento: Garante que a Ponte LCR esteja pronta para operar nas condições ideais.
- ✓ Selecionar o Modo de Medição Correto: Assegura que a medição seja adequada para o tipo de componente e sua aplicação.
- ✓ Inserir o Componente Corretamente: Evita conexões soltas ou erradas que poderiam levar a leituras imprecisas.
- ✓ Escolher a Frequência Adequada: A frequência de teste deve refletir as condições reais de operação do indutor.
- ✓ Selecionar Parâmetros Auxiliares: Fornece uma análise mais completa do comportamento do indutor, permitindo diagnósticos mais detalhados.

- ✓ Seguindo esses passos detalhados, você pode garantir medições precisas e significativas de indutância usando a Ponte LCR, facilitando o diagnóstico e a manutenção de circuitos eletrônicos complexos.

3. Medição de capacitância



1. Ligar o Instrumento:

Ação: Pressione o botão “Power” para ligar a Ponte LCR.

Descrição: Isso inicializa o instrumento, preparando-o para a medição.

2. Selecionar o Modo de Medição de capacitância:

Ação: Pressione o botão “FUNC” até que “Cp” (capacitância em paralelo) apareça no display.

Descrição: O modo "Cp" indica que o instrumento está configurado para medir capacitância em paralelo. Dependendo do modelo da Ponte LCR, você pode ver

diferentes modos, como "Cs" (capacitância em série), dependendo da impedância do capacitor.

3. Inserir o capacitor:

Ação: Conecte o capacitor na entrada de teste ou utilize a ponta de prova para fazer a conexão.

Descrição: Certifique-se de que as conexões estão firmes para evitar leituras errôneas. A entrada de teste pode ter garras crocodilo ou conectores tipo banana.

4. Selecionar a Frequência de Teste:

Ação: Pressione a tecla “FREQ” para escolher a frequência de teste desejada.

Descrição: A frequência de teste deve ser selecionada com base na aplicação específica do capacitor. Frequências comuns são 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, etc. A escolha da frequência afeta a precisão e relevância da medição, especialmente em capacitores usados em aplicações de alta frequência.

5. Selecionar o Parâmetro Auxiliar de Medição:

Ação: Pressione a tecla “D/Q/θ” para escolher um parâmetro auxiliar como Dissipação (D), Fator de Qualidade (Q) ou Ângulo de Fase (θ).

Descrição: Esses parâmetros fornecem informações adicionais sobre o desempenho do capacitor.

- Dissipação (D): Indica as perdas de energia no capacitor. Valores baixos de D indicam menores perdas.
- Fator de Qualidade (Q): Representa a eficiência do capacitor. Valores altos de Q indicam alta eficiência.
- Ângulo de Fase (θ): Indica a diferença de fase entre a corrente e a tensão. Isso é útil para entender o comportamento reativo do capacitor.

4.Impedância DC (DCR)



DCR, ou Resistência em Corrente Contínua (Direct Current Resistance), é a medida da resistência de um componente eletrônico quando uma corrente contínua (DC) é aplicada. Essa medição é crucial para determinar a resistência pura de componentes como resistores, indutores e fios, sem considerar os efeitos de reatância que ocorrem com corrente alternada (AC).

1.Ligar o Instrumento:

Ação: Pressione o botão “Power” para ligar a Ponte LCR.

Descrição: Isso inicializa o instrumento, preparando-o para a medição.

2.Selecionar o Modo de Medição de Impedância DC:

Ação: Pressione o botão “FUNC” repetidamente até que “DCR” apareça no display.

Descrição: O modo "DCR" (Direct Current Resistance) indica que o instrumento está configurado para medir a resistência de componentes em corrente contínua (DC). Esse modo é utilizado para medir a resistência de resistores e outras partes de circuitos que operam em DC.

3.Inserir o Resistor:

Ação: Conecte o capacitor na entrada de teste ou utilize a ponta de prova para fazer a conexão.

Descrição: Certifique-se de que as conexões estão firmes para evitar leituras errôneas. A entrada de teste pode ter garras crocodilo ou conectores tipo banana.



Neste capítulo, exploraremos a fonte regulável de bancada, um equipamento fundamental em qualquer laboratório de eletrônica. Vamos entender o que é uma fonte regulável de bancada, como utilizá-la corretamente e sua importância na manutenção e desenvolvimento de circuitos eletrônicos.

Introdução

Uma fonte regulável de bancada é um dispositivo que fornece energia elétrica com a capacidade de ajustar a tensão e a corrente de saída de acordo com a necessidade. Este tipo de equipamento é amplamente utilizado em laboratórios de eletrônica, oficinas de manutenção e desenvolvimento de circuitos eletrônicos.



Como Funciona?

A fonte regulável de bancada opera convertendo a tensão de entrada (geralmente da rede elétrica) para uma tensão de saída ajustável. Ela possui controles, normalmente na forma de potenciômetros ou teclas, que permitem ao usuário definir a tensão e a corrente desejadas. A fonte monitora e ajusta continuamente sua saída para manter os valores selecionados.

Importância na Manutenção de Placas Eletrônicas

- ✓ **Precisão no Diagnóstico:** Com uma fonte regulável, é possível fornecer exatamente a tensão e corrente necessárias para testar componentes individuais ou seções de um circuito. Isso ajuda a identificar falhas de maneira mais precisa.
- ✓ **Proteção dos Componentes:** Ajustar a corrente máxima limita a corrente que pode passar pelo circuito, evitando danos aos componentes sensíveis durante os testes.
- ✓ **Versatilidade:** Permite testar uma ampla gama de circuitos e dispositivos com diferentes requisitos de alimentação. Uma única fonte pode ser configurada para trabalhar com diversas tensões e correntes.
- ✓ **Estabilidade e Confiabilidade:** Fontes de bancada são projetadas para fornecer uma tensão e corrente estáveis, essencial para testes precisos e repetíveis.

- ✓ Segurança: Muitas fontes possuem proteções contra sobrecarga, curto-circuito e superaquecimento, aumentando a segurança durante o uso.

Estrutura de uma fonte



Leds do Painel

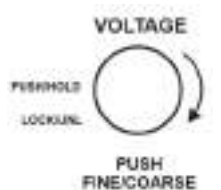
OCP – “Over Current Protection” Proteção contra Sobrecorrente. Quando o modo OCP for ativado esse LED acende.

C.C – Indicação do Modo de Operação Corrente Constante

C.V – Indicação do Modo de Operação Tensão Constante

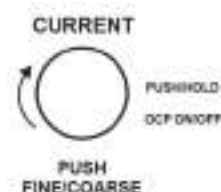
LOCK- Indicação de Ajustes Bloqueados

OPERAÇÃO



Ajuste de tensão:

Pressione o knob de Tensão e o display começará a piscar. Faça o ajuste da tensão girando o knob. Para ajuste fino basta pressionar novamente o knob e mudar de dígito do display e assim sucessivamente com os outros dígitos. Para travar o ajuste de tensão pressione e segure o knob por 3 segundos, o LED de indicação LOCK irá acender. Para destravar pressione e segure o knob por 3 segundos novamente.



2.Ajuste de Corrente:

Pressione o knob de Corrente e o display começará a piscar. Faça o ajuste de corrente girando o knob. Para ajuste fino basta pressionar novamente o knob e mudar de dígito do display e assim sucessivamente com os outros dígitos. Para determinar o

limite máximo de corrente ajuste a corrente desejada, pressione e segure o knob por 3 segundos, a corrente estará limitada ao valor ajustado e o LED de indicação OCP irá acender. Para cancelar o limite máximo de corrente basta pressionar e segurar o knob por 3 segundos novamente.

3.Tensão Constante / Corrente Constante

O cruzamento automático de tensão constante (CV) para corrente constante (CC) é uma característica fundamental das fontes reguláveis de bancada que permite uma transição suave entre esses dois modos de operação em resposta às mudanças na carga conectada.

Funcionamento

Modo Tensão Constante (CV):

- Quando a carga conectada à fonte requer menos corrente do que o limite pré-ajustado, a fonte opera no modo de tensão constante.
- A fonte regula a saída para manter uma tensão constante, independentemente das variações na carga.
- O indicador CV (Constant Voltage) é ativado, mostrando que a fonte está operando nesse modo.

Transição para Modo Corrente Constante (CC):

- À medida que a carga aumenta, a corrente fornecida pela fonte também aumenta.
- Quando a corrente atinge o limite pré-ajustado, a fonte muda automaticamente para o modo de corrente constante.
- Neste ponto, a tensão de saída começa a diminuir proporcionalmente ao aumento da carga.
- O indicador CC (Constant Current) é ativado, indicando a operação no modo de corrente constante.

Retorno ao Modo Tensão Constante:

- Se a carga diminui e a corrente cai abaixo do limite de crossover, a fonte volta automaticamente ao modo de tensão constante.
- A fonte ajusta a tensão de saída para manter o valor constante novamente.

Exemplificação

Vamos considerar um exemplo prático para ilustrar o conceito:

Operação Inicial (Tensão Constante):

- Uma fonte é configurada para fornecer 12V com um limite de corrente de 1A.
- Uma carga resistiva de 12 ohms é conectada, resultando em uma corrente de 1A ($12V / 12 \text{ ohms}$).
- A fonte opera no modo CV, mantendo a tensão de 12V.

Aumento da Carga:

- Se a carga resistiva é reduzida para 6 ohms, a corrente aumenta para 2A ($12V / 6 \text{ ohms}$).
- Como o limite de corrente é 1A, a fonte entra no modo CC, mantendo a corrente em 1A.
- A tensão de saída diminui para 6V ($1A * 6 \text{ ohms}$).

Diminuição da Carga:

- Se a carga aumenta novamente para 12 ohms, a corrente cai para 0.5A ($6V / 12 \text{ ohms}$).
- A fonte detecta que a corrente está abaixo do limite de 1A e volta ao modo CV.
- A tensão de saída retorna para 12V.



Capítulo 6

Osciloscópio

Neste capítulo, vamos explorar o osciloscópio, um dos instrumentos mais importantes no campo da eletrônica. Entenderemos o que é um osciloscópio, como utilizá-lo corretamente e sua importância crucial na manutenção e desenvolvimento de circuitos eletrônicos.

Integridade do sinal

A importância da integridade de um sinal

A integridade do sinal é um conceito crítico no design de osciloscópios, essencial para garantir a precisão na reconstrução de formas de onda. Um osciloscópio, neste contexto, funciona de maneira similar a uma câmera, capturando "imagens" de sinais eletrônicos para análise e interpretação. A qualidade dessas imagens - se estão claras ou desfocadas - e a frequência com que são capturadas são aspectos fundamentais da integridade do sinal.

A habilidade de um osciloscópio em fornecer alta integridade de sinal depende de vários sistemas e capacidades de desempenho. As sondas usadas também influenciam significativamente a qualidade do sinal medido.

Historicamente, a integridade do sinal não era uma grande preocupação para designers de circuitos digitais. Eles confiavam que seus circuitos lógicos funcionariam de acordo com os princípios booleanos simples, com problemas de sinais ruidosos ou indeterminados surgindo principalmente em projetos de alta velocidade, como aqueles em RF (Radiofrequência). No entanto, isso mudou significativamente com o aumento das taxas de clock dos processadores e a demanda por larguras de banda maiores em várias aplicações, como gráficos 3D, vídeo, servidores e telecomunicações. Dispositivos microprocessadores modernos manipulam dados em taxas gigantescas, atingindo até 5 GS/s (gigasamples por segundo), enquanto alguns dispositivos de memória DDR3 operam com clocks acima de 2 GHz.

Esse aumento de velocidade não se limita apenas a dispositivos de ponta; estende-se também a circuitos integrados (IC) comuns em automóveis, eletrônicos de consumo e controladores de máquinas. Atualmente, quase todos os projetos são considerados de alta velocidade, e mesmo um processador de 20 MHz pode ter tempos de subida de sinal comparáveis aos de um processador de 800 MHz.

Em circuitos digitais tradicionais, sem as devidas precauções, podem surgir problemas de alta velocidade. Falhas intermitentes ou erros sob condições extremas de tensão e temperatura podem indicar problemas ocultos de integridade do sinal. Isso tem implicações diretas no tempo de lançamento de produtos no mercado, na confiabilidade, na conformidade com normas de EMI (Interferência Eletromagnética) e outros aspectos. Além disso, problemas de alta velocidade podem comprometer a integridade de fluxos de dados em sistemas seriais, exigindo métodos para correlacionar padrões específicos de dados com as características observadas nas formas de onda de alta velocidade.

Por que a Integridade do Sinal é um Problema?

A degradação do sinal em projetos digitais modernos é principalmente um subproduto do aumento dramático na velocidade dos sistemas eletrônicos. Comparado com duas décadas atrás, os tempos de ciclo do barramento e as velocidades de borda dos sinais aumentaram significativamente, resultando em desafios únicos para a integridade do sinal.

No passado, manter a integridade do sinal envolvia foco em aspectos como distribuição de clock, design do caminho do sinal, margens de ruído, efeitos de carga, linhas de transmissão, terminação de barramento, desacoplamento e distribuição de energia. Embora esses fatores ainda sejam relevantes, o cenário mudou drasticamente.

Os avanços na tecnologia permitiram tempos de ciclo de barramento até mil vezes mais rápidos e velocidades de borda até cem vezes mais rápidas do que há 20 anos. No entanto, a tecnologia de placas de circuito não evoluiu na mesma velocidade, resultando em desafios significativos:

- **Tempo de Propagação dos Barramentos:** Apesar dos avanços em velocidade, o tempo de propagação nos barramentos entre chips permaneceu quase inalterado. A distância física necessária para acomodar componentes na placa cria um atraso, que se torna crítico em altas velocidades.
- **Frequências Elevadas em Taxas de Borda:** A taxa de subida rápida dos sinais digitais pode conter componentes de alta frequência, muito além da taxa de repetição do sinal. Isso leva alguns designers a escolherem deliberadamente ICs com tempos de subida mais lentos para mitigar esses efeitos.
- **Limitações do Modelo de Circuito Lumped:** Tradicionalmente, este modelo era suficiente para prever o comportamento do sinal, mas com velocidades de borda significativamente mais rápidas, ele se torna inadequado.
- **Linhas de Transmissão em Placas de Circuito:** Traços com apenas seis polegadas podem se comportar como linhas de transmissão em altas velocidades, criando caminhos de sinal não previstos que podem influenciar uns aos outros de maneiras imprevisíveis.
- **Interferências devido à Alta Velocidade:** Erros introduzidos pela combinação de sonda/instrumento em altas velocidades podem afetar significativamente a medição. Ferramentas modernas de osciloscópio utilizam técnicas de filtragem para minimizar esses efeitos.

- **Problemas com Caminhos de Sinal Previstos:** Com o aumento das velocidades, os planos de terra e de alimentação tornam-se mais indutivos e atuam como linhas de transmissão. Problemas como EMI (Interferência Eletromagnética), diafonia e rebound de terra se tornam mais pronunciados devido a correntes mais altas e comprimentos de onda mais curtos.

Esses desafios ilustram que a integridade do sinal em projetos digitais modernos é uma questão complexa, exigindo uma abordagem holística e atualizada para o design e a análise de sistemas eletrônicos.

Visualizando as Origens Analógicas dos Sinais Digitais

O desafio central na integridade do sinal em projetos digitais modernos é que, apesar de lidarmos com sistemas digitais, os problemas de integridade do sinal são essencialmente fenômenos analógicos. Para abordar esses problemas, os designers digitais precisam se aventurar no domínio analógico, e isso exige um entendimento profundo de como os sinais analógicos e digitais interagem.

Os problemas em sistemas digitais muitas vezes se originam de irregularidades analógicas. Por exemplo, um erro em um sistema digital pode ser causado por um ruído indesejado, uma borda de sinal inadequadamente formada ou problemas de timing. Para diagnosticar e corrigir essas falhas, é necessário um instrumento capaz de analisar detalhadamente o comportamento do sinal analógico. Aqui, os osciloscópios desempenham um papel vital.

Os osciloscópios modernos são ferramentas sofisticadas que podem:

- ✓ **Exibir Detalhes da Forma de Onda:** Eles mostram as características exatas da forma de onda, incluindo bordas, ruídos e qualquer outra irregularidade que possa afetar o sistema digital.
- ✓ **Detectar e Exibir Transitórios:** São capazes de capturar e mostrar eventos de curta duração que podem ser a causa de falhas em sistemas digitais.
- ✓ **Medir Relacionamentos de Tempo:** Ferramentas como osciloscópios ajudam a medir com precisão os tempos de setup e hold, cruciais para o funcionamento correto de circuitos digitais.
- ✓ **Disparo em Padrões Específicos:** Os osciloscópios mais avançados podem ser configurados para disparar em eventos específicos em fluxos de dados, seja em

comunicações paralelas ou seriais, permitindo aos usuários visualizar exatamente o que acontece no sinal analógico durante esses eventos.

Para usar um osciloscópio eficazmente, é crucial entender as capacidades do instrumento e como aplicá-las à situação de teste específica.

Isso inclui a escolha das sondas corretas, o ajuste dos parâmetros de disparo apropriadamente, e a interpretação correta dos dados apresentados pelo osciloscópio. Ao dominar essas habilidades, os designers digitais podem navegar com mais eficiência nos desafios da integridade do sinal, garantindo a confiabilidade e o desempenho de seus sistemas.

O avanço incessante da tecnologia tem nos levado a depender cada vez mais de sistemas complexos e equipamentos de precisão. Uma das peças-chave nesse intrincado quebra-cabeça é a instrumentação eletrônica. Essa ferramenta vital, muitas vezes invisível ao consumidor final, é o que garante que nossos dispositivos e sistemas funcionem de maneira eficiente e confiável.

Com origens que remontam ao início do século 20, o osciloscópio é a janela pela qual os engenheiros visualizam diretamente o comportamento dos sinais elétricos. Essa capacidade de ver e analisar esses sinais em tempo real tem impulsionado inovações, resolução de problemas e avanços em campos tão diversos quanto telecomunicações, medicina, design de produtos e pesquisa científica avançada.

Neste contexto, o osciloscópio emerge como um dos instrumentos mais fundamentais em toda a engenharia eletrônica e pesquisa. Mas, o que é um osciloscópio exatamente? E, mais importante, para que serve um osciloscópio?

Osciloscópio

Origem e Evolução Histórica

A história do osciloscópio é um fascinante capítulo no desenvolvimento da eletrônica moderna. Esta história começa no início do século 20, marcada pelo surgimento dos primeiros dispositivos de visualização que utilizavam tubos de raios catódicos. Estes tubos, que foram fundamentais na criação de televisores e monitores, permitiram a visualização de variações de sinais elétricos de uma maneira nunca antes possível.

Inicialmente, o osciloscópio era um equipamento exclusivo de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento. Era uma ferramenta essencial para cientistas e engenheiros, permitindo-lhes observar e analisar a forma de onda de sinais elétricos. Esta capacidade era crucial para o avanço de diversas áreas da eletrônica.

Com o avanço tecnológico, o osciloscópio também evoluiu. Nos primeiros modelos, a visualização era feita em escala de cinza, refletindo a tecnologia limitada da época. No entanto, com o passar do tempo, surgiram osciloscópios mais avançados, capazes de exibir sinais em cores. Esta inovação melhorou significativamente a clareza e a capacidade de distinguir entre múltiplos sinais simultâneos.

Além disso, a evolução do analógico para o digital transformou radicalmente os osciloscópios. Os modelos digitais oferecem mais precisão, recursos avançados de processamento de sinal e a capacidade de armazenar e analisar dados de forma muito mais eficiente do que seus antecessores analógicos.

Ao longo das décadas, o osciloscópio manteve-se como um instrumento padrão para a visualização e análise de sinais elétricos. Sua evolução reflete as rápidas mudanças na tecnologia eletrônica e as crescentes demandas da indústria. Hoje, o osciloscópio é mais do que uma ferramenta de laboratório; é um componente vital em muitas aplicações, desde o desenvolvimento de produtos eletrônicos até a manutenção e reparo de equipamentos.

Descrição Básica e Componentes Principais

O osciloscópio é um instrumento eletrônico crucial para visualizar e analisar sinais elétricos em forma de gráfico. A principal função do osciloscópio é capturar sinais elétricos de um circuito e convertê-los em uma representação visual na tela, fornecendo insights detalhados sobre características como amplitude, frequência e a forma de onda do sinal.

Vamos detalhar seus componentes principais:

- **Tela de Exibição:** É o elemento central do osciloscópio. Esta tela mostra o sinal elétrico em forma de gráfico, permitindo uma observação detalhada do comportamento do sinal ao longo do tempo. Em osciloscópios modernos, esta tela é frequentemente um display digital que pode mostrar várias formas de onda simultaneamente e em diferentes cores para facilitar a análise.
- **Eixos Vertical e Horizontal:** Esses eixos são cruciais para interpretar o sinal exibido. O eixo vertical representa a amplitude do sinal, geralmente em volts. Isso

indica a intensidade do sinal elétrico. O eixo horizontal, por sua vez, representa o tempo, permitindo que o usuário veja como o sinal varia ao longo do tempo.

- **Botões de Controle:** Estes botões permitem aos usuários personalizar a visualização do sinal. Isso inclui ajustar a escala dos eixos (amplitude e tempo), alterar a posição do sinal na tela para uma visualização mais clara e escolher diferentes modos de operação. Por exemplo, o usuário pode optar por visualizar um sinal contínuo ou apenas um único evento ou pulso.
- **Entrada de Sonda:** Aqui, as sondas são conectadas ao osciloscópio. Estas sondas são usadas para capturar os sinais elétricos do circuito que está sendo testado. Existem diferentes tipos de sondas para diferentes aplicações, algumas são projetadas para medir altas frequências, enquanto outras são adequadas para sinais de baixa frequência ou alta tensão.

O osciloscópio, portanto, é mais do que uma simples ferramenta de visualização. Ele é um instrumento analítico poderoso, capaz de revelar detalhes fundamentais sobre o comportamento dos sinais elétricos, essenciais para diagnósticos, pesquisa e desenvolvimento em eletrônica.

O Papel das Sondas



As sondas são componentes vitais no uso de osciloscópios, funcionando como a ponte crítica entre o circuito em teste e o próprio osciloscópio. Vamos entender em detalhes o papel e a funcionalidade das sondas:

- ✓ **Conexão:** A sonda é fisicamente conectada ao ponto específico do circuito eletrônico que precisa ser medido ou analisado. Essa conexão é fundamental para garantir que o sinal elétrico seja captado de forma precisa e confiável. A ponta da

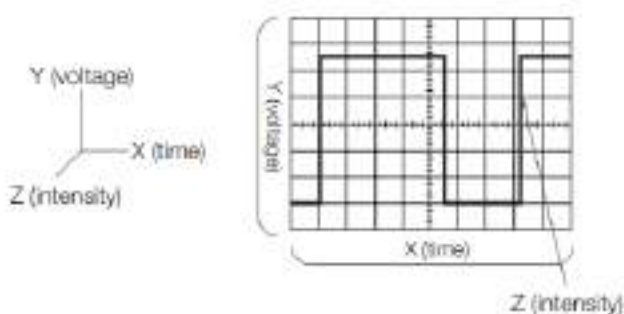
sonda é desenhada para facilitar esse contato, podendo ser adaptada para diferentes tipos de conexões em diversos circuitos.

Atenuação e Impedância:

- ✓ **Atenuação:** Algumas sondas possuem uma função de atenuação, especialmente útil para medir sinais de alta tensão. A atenuação reduz a amplitude do sinal antes que ele chegue ao osciloscópio, evitando danos ao instrumento e mantendo a segurança das medições.
- ✓ **Impedância:** A impedância da sonda é cuidadosamente projetada para não interferir ou alterar o funcionamento do circuito em teste. Uma impedância inadequada pode afetar a precisão dos resultados ou até mesmo causar mal funcionamento no circuito.
- ✓ **Transmissão do Sinal:** Após a captação do sinal pelo ponto de contato da sonda, o sinal é transmitido ao osciloscópio. Em osciloscópios analógicos, o sinal é exibido diretamente na forma como é captado. Já em osciloscópios digitais, o sinal é primeiro convertido de analógico para digital antes de ser processado e exibido na tela. Essa conversão permite uma análise mais detalhada e a possibilidade de armazenar e manipular os dados do sinal.

Portanto, a sonda é muito mais do que um simples cabo de conexão; ela é uma parte integral do processo de medição, desempenhando funções críticas na precisão e eficácia da análise realizada com um osciloscópio.

Divisões Verticais e Horizontais na Tela



A tela de um osciloscópio é cuidadosamente dividida em grades compostas por divisões verticais e horizontais, que são fundamentais para a análise precisa de

sinais elétricos. Vamos explorar detalhadamente o propósito e a funcionalidade destas divisões:

Divisões Verticais:

Estas divisões são utilizadas para representar a amplitude ou tensão do sinal elétrico.

O osciloscópio possui um controle de escala vertical, permitindo aos usuários ajustar a representação da amplitude. Esse ajuste é feito em termos de "volts por divisão".

Por exemplo, se a escala vertical estiver ajustada para 1 volt por divisão, cada divisão vertical na tela corresponderá a 1 volt de amplitude do sinal.

Divisões Horizontais:

Estas divisões representam o aspecto temporal do sinal, ou seja, como o sinal varia ao longo do tempo.

O controle de escala horizontal do osciloscópio permite ajustar a base de tempo exibida na tela, em termos de segundos, milissegundos, ou microssegundos por divisão.

Por exemplo, se a escala horizontal estiver configurada para 1 milissegundo por divisão, cada divisão horizontal na tela corresponderá a 1 milissegundo de tempo.

Ao utilizar essas divisões em conjunto, engenheiros e técnicos podem medir com precisão tanto a frequência quanto a amplitude de um sinal. Por exemplo, eles podem contar o número de divisões horizontais que um ciclo completo de uma onda ocupa para determinar a frequência do sinal, e usar as divisões verticais para medir a altura da onda, determinando assim sua amplitude. Esta capacidade de medir e analisar visualmente os sinais torna o osciloscópio uma ferramenta indispensável em diversos campos da eletrônica e da engenharia elétrica.

Para Que Serve um Osciloscópio



✓ Visualização de Sinais Elétricos

O osciloscópio é uma ferramenta indispensável no campo da eletrônica e da engenharia elétrica, cuja função primordial é converter sinais elétricos, que são intrinsecamente invisíveis, em representações visuais claras e compreensíveis. Este processo de visualização é essencial para que engenheiros, técnicos e pesquisadores realizem uma série de análises críticas:

- **Observação da Forma de Onda:** O osciloscópio exibe a forma exata do sinal elétrico, revelando sua natureza oscilatória ou pulsante. Esta visualização permite aos profissionais examinar características detalhadas do sinal, como sua periodicidade e estabilidade.
- **Identificação de Variações Temporais e de Amplitude:** Através das divisões na tela do osciloscópio, é possível medir com precisão mudanças na amplitude (altura da onda) e no tempo (largura da onda). Essas medições são cruciais para entender a intensidade do sinal e a rapidez com que ele muda.
- **Deteção de Anomalias:** Osciloscópios são extremamente úteis para identificar comportamentos anormais em sinais elétricos, como picos de tensão inesperados ou quedas súbitas. Essas anomalias podem indicar problemas ou falhas no circuito ou sistema eletrônico em análise.

A visualização direta proporcionada pelo osciloscópio não é apenas uma representação gráfica; ela oferece uma janela para compreender profundamente o comportamento e as características dos circuitos e sistemas eletrônicos. Esta compreensão é vital para diagnóstico, solução de problemas, pesquisa e

desenvolvimento, tornando o osciloscópio uma ferramenta essencial em uma vasta gama de aplicações técnicas e científicas.

✓ **Medição da Frequência e Amplitude dos Sinais**

O osciloscópio é uma ferramenta excepcionalmente precisa, essencial para medir e analisar características específicas de sinais elétricos. Suas funcionalidades permitem:

- **Determinação da Frequência de um Sinal:** A frequência de um sinal é um dos parâmetros mais importantes na análise de circuitos eletrônicos, e o osciloscópio facilita a sua determinação de maneira eficaz.
- Esta medição é feita observando o período entre as repetições na forma de onda exibida na tela. O período é o tempo que leva para um ciclo completo da onda se repetir.
- Medindo o número de divisões horizontais que um ciclo completo ocupa na tela e utilizando a escala de tempo configurada (por exemplo, milissegundos por divisão), os profissionais podem calcular precisamente a frequência do sinal.

✓ **Avaliação da Amplitude ou Tensão de um Sinal:**

- A amplitude ou tensão de um sinal é outro aspecto crítico que pode ser medido com precisão usando um osciloscópio.
- A amplitude é visualizada como a altura da onda na tela do osciloscópio. Usando as divisões verticais e a escala de tensão ajustada (como volts por divisão), os usuários podem determinar a tensão máxima e mínima do sinal.
- Essa capacidade de medir a amplitude é crucial para entender a intensidade do sinal e para verificar se ele está dentro dos parâmetros esperados para o circuito em análise.

✓ Detecção de Ruídos e Interferências

Num mundo repleto de dispositivos eletrônicos, ruídos e interferências podem ser problemáticos. O osciloscópio permite:

- Isolar e visualizar fontes de ruído, seja ele térmico, de interferência ou induzido.
- Analisar padrões de interferência em sistemas de comunicação ou circuitos sensíveis.
- A detecção precoce de ruídos pode prevenir falhas no sistema e melhorar a eficiência operacional.

✓ Comparação de Fases entre Sinais

Em muitos sistemas, a relação de fase entre sinais é crítica. Com um osciloscópio, os profissionais podem:

- Observar e comparar múltiplos sinais simultaneamente.
- Medir a diferença de tempo ou fase entre eles.
- Ajustar componentes ou parâmetros para sincronizar sinais conforme necessário.

✓ Medições de Formas de Onda

Frequência e Período

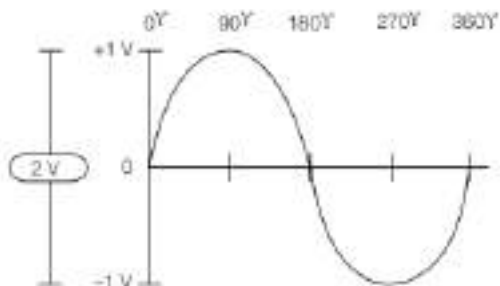
Se um sinal se repete, ele tem uma **frequência**. A frequência é medida em **Hertz (Hz)** e representa o número de vezes que o sinal se repete em um segundo, denominado **ciclos por segundo**. Um sinal repetitivo também possui um **período**, que é a quantidade de tempo que o sinal leva para completar um ciclo. Período e frequência são **recíprocos** um do outro, de modo que **$1/\text{período}$** é igual à frequência e **$1/\text{frequência}$** é igual ao período. Por exemplo, a onda senoidal na **Figura 8** tem uma frequência de **3 Hz** e um período de **$1/3$ segundo**.

Tensão

A **tensão** é a quantidade de **potencial elétrico** ou **intensidade do sinal**, entre dois pontos em um circuito. Normalmente, um desses pontos é o **terra** ou **zero volts**, mas nem sempre. Você pode querer medir a tensão do pico máximo ao pico mínimo de uma forma de onda, referido como **tensão de pico a pico**.

Amplitude

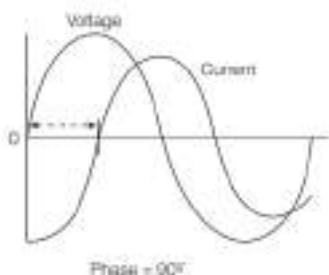
Amplitude refere-se à quantidade de **tensão** entre dois pontos em um circuito. Amplitude comumente se refere à **tensão máxima** de um sinal medida a partir do terra, ou **zero volts**. A forma de onda mostrada na **Figura** tem uma amplitude de **1 V** e uma tensão de pico a pico de **2 V**.



Fase

A fase é melhor explicada ao analisar uma onda senoidal. O nível de tensão das ondas senoidais é baseado em movimento circular. Dado que um círculo possui 360°, um ciclo de uma onda senoidal tem 360°, como mostrado na **Figura 9**. Usando graus, você pode se referir ao ângulo de fase de uma onda senoidal quando deseja descrever quanto do período já se passou.

O deslocamento de fase descreve a diferença no tempo entre dois sinais de outra forma semelhantes. A forma de onda na **Figura** rotulada como “corrente” está 90° fora de fase com a forma de onda rotulada como “tensão”, pois as ondas alcançam pontos semelhantes em seus ciclos exatamente 1/4 de um ciclo separados ($360^\circ/4 = 90^\circ$). Deslocamentos de fase são comuns em eletrônica.



Medições de Formas de Onda com Osciloscópios Digitais

Medir formas de onda com osciloscópios digitais é uma parte fundamental da análise de circuitos eletrônicos e sinais elétricos. Os osciloscópios digitais modernos são equipamentos sofisticados que tornam essa tarefa mais fácil e precisa do que nunca. Eles oferecem uma variedade de funções que podem ser acessadas por meio de botões no painel frontal ou menus na tela, permitindo a seleção de medições totalmente automatizadas. Vamos examinar com mais detalhes algumas dessas medições:

- **Frequência:** A frequência é a quantidade de ciclos por segundo de uma forma de onda. O osciloscópio digital pode calcular a frequência automaticamente e exibi-la na tela. Isso é útil para determinar a frequência de um sinal periódico.
- **Período:** O período é o inverso da frequência e representa o tempo necessário para um ciclo completo da forma de onda. O osciloscópio pode calcular isso automaticamente a partir da frequência.
- **Tempo de Subida/Descida (Rise Time e Fall Time):** O tempo de subida é o tempo que leva para o sinal subir de 10% a 90% de sua amplitude total, enquanto o tempo de descida é o tempo necessário para o sinal cair de 90% a 10% de sua amplitude. Essas medições são importantes para caracterizar a velocidade de transição de um sinal.
- **Largura de Pulso:** A largura de pulso representa a duração em que um pulso de sinal está em nível alto. Isso é relevante para a análise de sinais de pulso, como os utilizados em comunicações digitais.
- **Duty Cycle (Ciclo de Trabalho):** O ciclo de trabalho é a fração de tempo em que um sinal está em nível alto em relação ao seu período completo. É uma medida importante para sinais de onda quadrada.
- **Tensão de Pico a Pico:** Essa medição fornece a diferença entre os valores máximos e mínimos de tensão em uma forma de onda. É útil para determinar a amplitude total do sinal.
- **Valor Médio:** O valor médio é a média aritmética dos valores instantâneos da tensão em uma forma de onda durante um período de tempo. É útil para entender o nível de tensão médio de um sinal.
- **Valor Eficaz (RMS):** O valor eficaz, ou RMS, é uma medida que representa a magnitude efetiva de um sinal. É especialmente importante para sinais não sinusoidais, pois leva em consideração a amplitude ao longo do tempo.
- **Overshoot (Sobrelevação):** A sobrelevação ocorre quando uma forma de onda ultrapassa momentaneamente seu valor desejado antes de se estabilizar. Essa medição ajuda a identificar problemas de transição em sinais.

Essas medições automatizadas fornecem leituras numéricas precisas na tela do osciloscópio, o que é vantajoso em comparação com a interpretação direta da grade. Isso permite que os engenheiros e técnicos obtenham informações detalhadas sobre os sinais elétricos em seus circuitos, facilitando a análise, a depuração e a otimização de sistemas eletrônicos. Em resumo, os osciloscópios digitais modernos são ferramentas poderosas para medição e análise de formas de onda em eletrônica.

Acoplamento de Entrada

O acoplamento de entrada em um osciloscópio é uma configuração importante que determina como o sinal elétrico é conectado ao instrumento e como ele será exibido na tela. Existem três principais modos de acoplamento de entrada: DC, AC e terra, cada um com suas próprias características e utilizações específicas.

Acoplamento DC (Direct Coupling):

- Nesse modo, o osciloscópio exibe o sinal de entrada exatamente como ele é, sem nenhuma filtragem ou atenuação.
- Isso significa que o componente DC (corrente contínua) e o componente AC (corrente alternada) do sinal são exibidos na tela.
- O acoplamento DC é útil quando você precisa analisar tanto o componente DC quanto o componente AC de um sinal.
- Pode ser usado para medir com precisão a amplitude de sinais que incluem componentes de corrente contínua.

Acoplamento AC (Alternating Coupling):

- No modo de acoplamento AC, o osciloscópio bloqueia o componente DC do sinal, permitindo que você veja apenas a componente AC, que é a parte que varia em torno de zero volts.
- É útil quando o sinal de entrada possui um componente DC significativo que deslocaria a forma de onda para longe do centro da tela ou saturaria a escala vertical.
- Permite uma visualização mais detalhada das variações do sinal de AC sem ser afetado pelo nível DC.

Acoplamento Terra (Ground Coupling):

- O acoplamento de terra desconecta completamente o sinal de entrada do sistema vertical do osciloscópio.

- Quando o osciloscópio está no modo de acoplamento de terra, a tela mostrará uma linha horizontal, representando zero volts.
- Essa configuração é útil quando você deseja verificar a referência de terra ou quando precisa determinar onde o zero volts está na tela.
- Pode ser usado para medir a diferença de potencial entre o sinal de entrada e o terra.

Alternar entre as configurações de acoplamento é uma maneira prática de realizar várias medições e análises em um osciloscópio, dependendo das características do sinal que você está investigando. O acoplamento DC permite visualizar o sinal completo, o acoplamento AC ajuda a isolar o componente AC e o acoplamento de terra é útil para referência zero. Essas opções tornam o osciloscópio uma ferramenta versátil e poderosa para a análise de formas de onda em eletrônica.

Como Escolher um Osciloscópio

Escolher um osciloscópio adequado é fundamental para garantir medições precisas e eficazes. Vários parâmetros devem ser considerados para fazer uma escolha informada:

Largura de Banda:

- A largura de banda de um osciloscópio determina a faixa de frequência máxima que ele pode medir com precisão.
- É importante escolher um osciloscópio com uma largura de banda maior do que a frequência máxima do sinal de interesse. Por exemplo, para um sinal de 20 MHz, é aconselhável selecionar um osciloscópio com uma largura de banda de pelo menos 100 MHz. Isso evita distorções ou atenuações no sinal capturado e garante uma representação fiel.

Taxa de Amostragem:

- A taxa de amostragem refere-se à velocidade com que o osciloscópio captura dados do sinal.
- Uma alta taxa de amostragem é crucial para capturar detalhes precisos de sinais de alta frequência, incluindo transientes rápidos ou eventos breves.
- Deve-se buscar uma taxa de amostragem que seja suficientemente alta para capturar o nível de detalhe necessário para a aplicação em questão.

Resolução Vertical:

- A resolução do osciloscópio determina a menor variação de sinal que pode ser detectada.
- Osciloscópios com maior resolução, como 12 bits, podem discernir mudanças mais sutis em um sinal em comparação com um de 8 bits.
- Para aplicações que exigem a observação de pequenas flutuações ou detalhes finos em sinais de grande amplitude, a escolha de uma resolução mais alta é crucial.

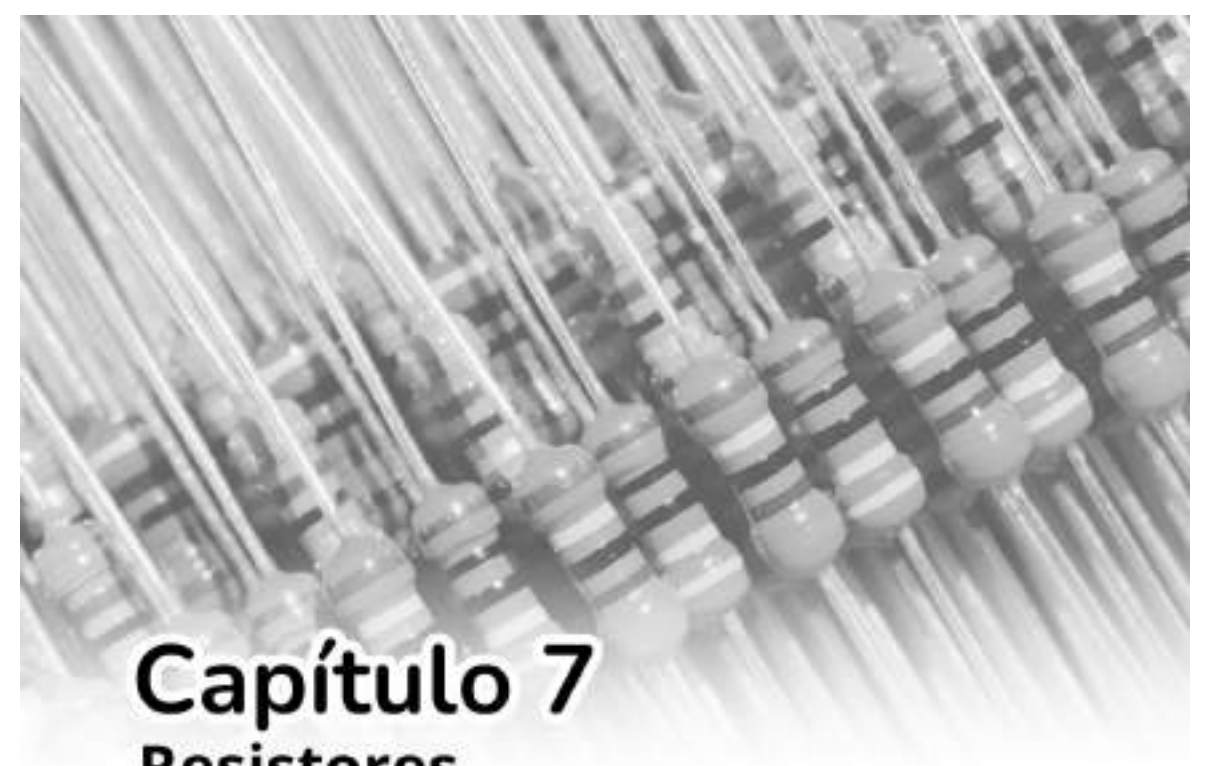
Profundidade de Memória:

- A profundidade de memória de um osciloscópio influencia quanto tempo o sinal pode ser capturado e analisado na taxa de amostragem máxima.
- Este parâmetro é vital para aplicações que requerem a observação de eventos de longa duração ou a análise detalhada de eventos raros em um sinal.

Número de Canais:

- O número de canais determina quantos sinais podem ser monitorados simultaneamente.
- Osciloscópios de dois canais são suficientes para muitas aplicações simples. No entanto, para tarefas mais complexas que envolvem a observação e comparação de vários sinais, modelos com quatro ou mais canais podem ser necessários.

Ao considerar esses parâmetros, os usuários podem selecionar um osciloscópio que não só atenda às necessidades específicas de suas aplicações, mas também forneça dados confiáveis e precisos, essenciais para análises técnicas eficazes.



Capítulo 7

Resistores

Neste capítulo, vamos explorar os resistores, componentes fundamentais em praticamente todos os circuitos eletrônicos. Vamos entender o que são os resistores, como eles funcionam, suas diferentes classificações, e sua importância na manutenção e design de circuitos eletrônicos.

Tipos de Resistores

Os resistores são os mais fundamentais e comumente usados de todos os componentes eletrônicos, a ponto de serem quase dados como garantidos, mas desempenham um papel vital dentro de um circuito

Existem muitos tipos diferentes de resistores disponíveis para o construtor de eletrônicos escolher, desde resistores de chip de montagem em superfície muito pequenos até grandes resistores de potência de fio enrolado.

A principal função de um resistor dentro de um circuito elétrico ou eletrônico é “resistir” (daí o nome Resistor), regular ou definir o fluxo de elétrons (corrente) através deles usando o tipo de material condutor do qual são compostos. Os resistores também podem ser conectados em várias combinações em série e em paralelo para formar redes de resistores que podem atuar como contadores de tensão, divisores de tensão ou limitadores de corrente dentro de um circuito.



Um resistor típico

Os resistores são os chamados “dispositivos passivos”, ou seja, não contêm fonte de energia ou amplificação, mas apenas atenuam ou reduzem a tensão ou o sinal de corrente que passa por eles. Essa atenuação resulta na perda de energia elétrica na forma de calor, pois o resistor resiste ao fluxo de elétrons através dele.

Então, uma diferença de potencial é necessária entre os dois terminais de um resistor para que a corrente flua. Essa diferença de potencial equilibra a energia perdida. Quando usado em circuitos CC, a diferença de potencial, também conhecida como queda de tensão do resistor, é medida nos terminais à medida que a corrente do circuito flui pelo resistor.

A maioria dos tipos de resistor são dispositivos lineares que produzem uma queda de tensão entre si quando uma corrente elétrica flui através deles porque obedecem à Lei de Ohm, e valores diferentes de resistência produzem valores diferentes de corrente ou tensão. Isso pode ser muito útil em circuitos eletrônicos, controlando ou reduzindo o fluxo de corrente ou a tensão produzida através deles, podemos produzir um conversor de tensão para corrente e corrente para tensão.

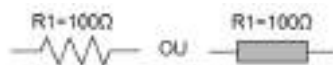
Existem muitos milhares de **tipos diferentes de resistores** e são produzidos em uma variedade de formas porque suas características particulares e precisão se adequam a certas áreas de aplicação, como alta estabilidade, alta tensão, alta corrente etc. características são menos de um problema.

Algumas das características comuns associadas ao resistor humilde são; Coeficiente de Temperatura, Coeficiente de Tensão, Ruído, Resposta de Frequência, Potência, bem como Resistores Classificação de Temperatura, Tamanho Físico e Confiabilidade.

Em todos os diagramas e esquemas de circuitos elétricos e eletrônicos, o símbolo mais comumente usados para um resistor de valor fixo é o de uma linha do tipo “zig-zag” com o valor de sua resistência dado em Ohms, Ω . Os resistores têm valores de resistência fixos de menos de um ohm, ($<1\Omega$) a bem mais de dezenas de milhões de ohms, ($>10M\Omega$) em valor.

Resistores fixos têm apenas um único valor de resistência, por exemplo 100Ω , mas resistores variáveis (potenciômetros) podem fornecer um número infinito de valores de resistência entre zero e seu valor máximo.

Símbolos de resistores padrão



Simbologia

Os símbolos comumente usados em desenhos esquemáticos e elétricos para um resistor pode ser uma linha do tipo “zig-zag” ou uma caixa retangular.

Todos os resistores de valor fixo modernos podem ser classificados em quatro grandes grupos:

Resistor de composição de carbono – Feito de pó de carbono ou pasta de grafite, valores de baixa potência

Resistor de filme – Feito de pasta de óxido metálico condutor, valores de potência muito baixos

Resistor de fio enrolado – Corpos metálicos para montagem em dissipador de calor, classificações de potência muito altas

Resistor de semiconductor – Tecnologia de filme fino de montagem em superfície de alta frequência/precisão

Há uma grande variedade de tipos de resistores fixos e variáveis com diferentes estilos de construção disponíveis para cada grupo, sendo que cada um

possui suas características particulares, vantagens e desvantagens em relação aos demais. Incluir todos os tipos tornaria esta seção muito grande, então vou limitá-la aos tipos de resistores de uso geral mais comumente usados e prontamente disponíveis.

Tipos de composição de resistor

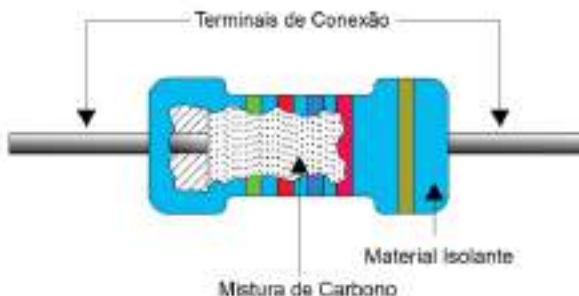
Os resistores de carbono são o tipo mais comum de resistores de composição. Resistores de carbono são um resistor barato de uso geral usado em circuitos elétricos e eletrônicos. Seu elemento resistivo é fabricado a partir de uma mistura de pó de carbono ou grafite finamente moído (semelhante à mina de lápis) e um pó cerâmico não condutor (argila) para unir tudo.



Resistor de Carbono

A proporção de pó de carbono para cerâmica (condutor para isolante) determina o valor resistivo geral da mistura e quanto maior a proporção de carbono, menor a resistência geral. A mistura é moldada em uma forma cilíndrica com fios metálicos ou condutores são anexados a cada extremidade para fornecer a conexão elétrica como mostrado, antes de ser revestido com um material isolante externo e marcações codificadas por cores para denotar seu valor resistivo.

Resistor de Carbono



Composição interna de um resistor de carbono

O **resistor composto de carbono** é um resistor de baixa a média potência que possui uma baixa indutância, tornando-o ideal para aplicações de alta frequência, mas também pode sofrer ruído e instabilidade quando quente. Resistores compostos de carbono são geralmente prefixados com uma notação “CR” (por exemplo, CR10k Ω) e estão disponíveis em pacotes E6 ($\pm 20\%$ de tolerância (precisão)), E12 ($\pm 10\%$ de tolerância) e E24 ($\pm 5\%$ de tolerância) com potência classificações de 0,250 ou 1/4 de um Watt até 5 Watts.

Os tipos de resistores compostos de carbono são muito baratos de fabricar e, portanto, são comumente usados em circuitos elétricos. No entanto, devido ao seu processo de fabricação, os resistores do tipo carbono têm tolerâncias muito grandes, portanto, para maior precisão e resistências de alto valor, são usados resistores do tipo filme.

Resistores de Tipo de Filme

O termo genérico “Filme Resistor” consiste nos tipos de resistores *Metal Film*, *Carbon Film* e *Metal Oxide Film*, que geralmente são feitos depositando metais puros, como níquel, ou um filme de óxido, como óxido de estanho, em uma haste cerâmica isolante ou substrato.



Resistor de filme

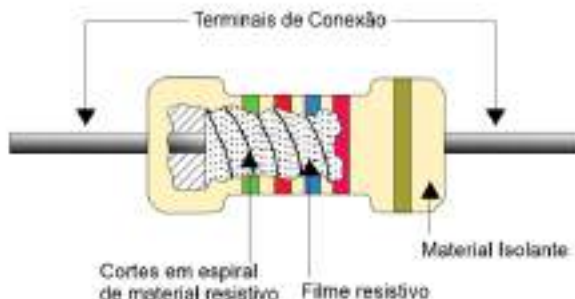
O valor resistivo do resistor é controlado aumentando a espessura desejada do filme depositado, dando-lhes os nomes de “resistores de filme espesso” ou “resistores de filme fino”.

Uma vez depositado, um laser é usado para cortar um padrão do tipo ranhura em hélice espiral de alta precisão neste filme. O corte do filme tem o efeito de aumentar o caminho condutor ou resistivo, um pouco como pegar um longo pedaço de fio reto e enrolá-lo em uma bobina.

Este método de fabricação permite resistores de tolerância muito mais próximos (1% ou menos) em comparação com os tipos de composição de carbono mais simples. A tolerância de um resistor é a diferença entre o valor preferencial (ou seja, 100 ohms) e seu valor real de fabricação, ou seja, 103,6 ohms, e é expressa em porcentagem, por exemplo, 5%, 10% etc. tolerância é de 3,6%. Os resistores do tipo

filme também atingem um valor ôhmico máximo muito mais alto em comparação com outros tipos e valores superiores a $10\text{M}\Omega$ (10 milhões de Ohms) estão disponíveis.

Resistor de filme



Composição interna de um resistor de filme

Resistores de filme metálico têm estabilidade de temperatura muito melhor do que seus equivalentes de carbono, menor ruído e geralmente são melhores para aplicações de alta frequência ou radiofrequência. Os resistores de óxido metálico têm melhor capacidade de alta corrente de surto com uma classificação de temperatura muito mais alta do que os resistores de filme metálico equivalentes.

Outro tipo de resistor de filme comumente conhecido como resistor de filme espesso é fabricado depositando uma pasta condutora muito mais espessa de CER mic e MET al, chamada Cermet, sobre um substrato cerâmico de alumina. Os resistores de cermet têm propriedades semelhantes aos resistores de filme metálico e são geralmente usados para fazer resistores do tipo chip de montagem em superfície pequenos, redes multi-resistor em um pacote para pcb e resistores de alta frequência. Eles têm boa estabilidade de temperatura, baixo ruído e boas classificações de tensão, mas propriedades de baixa corrente de surto.

Os resistores de filme metálico são prefixados com uma notação "MFR" (por exemplo, MFR100k Ω) e um CF para tipos de filme de carbono. Os resistores de filme metálico estão disponíveis nos pacotes E24 ($\pm 5\%$ e $\pm 2\%$ de tolerância), E96 ($\pm 1\%$ de tolerância) e E192 ($\pm 0,5\%$, $\pm 0,25\%$ e $\pm 0,1\%$ de tolerância) com potências de 0,05 (1/20 $^{\circ}$) de um Watt até 1/2 Watt. De um modo geral, resistores de filme e especialmente resistores de filme metálico são componentes de baixa potência de precisão.

Tipos de resistores enrolados

Outro tipo de resistor, chamado de resistor de fio enrolado, é feito enrolando um fio fino de liga metálica (Nicromo) ou fio similar em um molde cerâmico isolante na forma de uma hélice espiral semelhante ao resistor de filme acima.



Resistor de fio enrolado

Esses tipos de resistores geralmente estão disponíveis apenas em valores ôhmicos muito baixos de alta precisão (de $0,01\Omega$ a $100k\Omega$) devido à bitola do fio e número de voltas possíveis no primeiro, tornando-os ideais para uso em circuitos de medição e aplicações do tipo ponte de Wheatstone.

Eles também são capazes de lidar com correntes elétricas muito mais altas do que outros resistores do mesmo valor ôhmico com potências superiores a 300 Watts. Esses resistores de alta potência são moldados ou pressionados em um corpo de dissipador de calor de alumínio com aletas anexadas para aumentar sua área de superfície geral para promover a perda de calor e resfriamento.

Esses tipos especiais de resistores são chamados de “Resistores montados no chassi” porque são projetados para serem montados fisicamente em dissipadores de calor ou placas de metal para dissipar ainda mais o calor gerado. A montagem do resistor em um dissipador de calor aumenta ainda mais sua capacidade de transporte de corrente.

Outro tipo de resistor de fio enrolado é o resistor de fio enrolado de potência. Estes são tipos de resistores não indutivos de alta temperatura e alta potência geralmente revestidos com esmalte vítreo ou epóxi de vidro para uso em bancos de resistência ou aplicações de servocontrole/motor DC e frenagem dinâmica. Eles podem até ser usados como aquecedores de gabinete ou espaço de baixa potência.

O fio de resistência não indutivo é enrolado em torno de um tubo de cerâmica ou porcelana coberto com mica para evitar que os fios de liga se movam quando quentes. Os resistores de fio enrolado estão disponíveis em uma variedade de resistências e classificações de potência, com um uso principal do resistor de fio

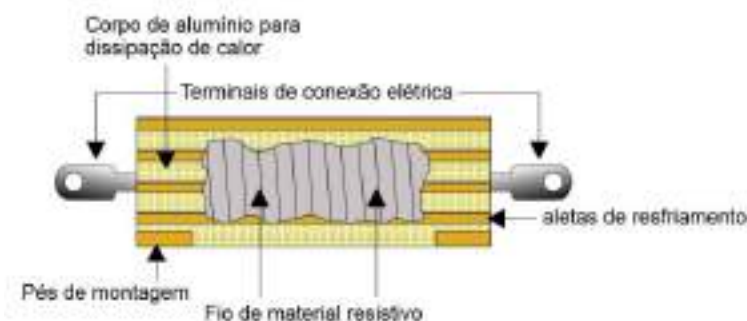
enrolado nos elementos de aquecimento elétrico de um incêndio elétrico que converte a corrente elétrica que flui através dele em calor com cada elemento dissipando até 1000 Watts, (1kW) de energia.

Como o fio dos resistores enrolados de fio padrão é enrolado em uma bobina dentro do corpo do resistor, ele age como um indutor, fazendo com que eles tenham indutância e resistência. Isso afeta a maneira como o resistor se comporta em circuitos CA, produzindo uma mudança de fase em altas frequências, especialmente nos resistores de tamanho maior. O comprimento do caminho de resistência real no resistor e nos terminais contribui com a indutância em série com a resistência DC “aparente”, resultando em um caminho de impedância geral de Z Ohms.

A impedância (Z) é o efeito combinado da resistência (R) e da indutância (X), medida em ohms e para um circuito CA em série é dada como $Z^2 = R^2 + X^2$.

Quando usado em circuitos CA, este valor de indutância muda com a frequência (reatância indutiva, $X_L = 2\pi fL$) e, portanto, o valor geral do resistor muda. A reatância indutiva aumenta com a frequência, mas é zero em DC (frequência zero). Então, os resistores de fio enrolado não devem ser projetados ou usados em circuitos do tipo CA ou amplificador onde a frequência através do resistor muda. No entanto, resistores especiais não indutivos enrolados também estão disponíveis.

Resistor de fio enrolado



Composição interna de um resistor de fio enrolado

Os tipos de resistores de fio são prefixados com uma notação “WH” ou “W” (por exemplo, WH10 Ω) e estão disponíveis no pacote WH revestido de alumínio ($\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ tolerância) ou W vítreo embalagem esmaltada ($\pm 1\%$, $\pm 2\%$ e $\pm 5\%$ de tolerância) com potências de 1W a 300W ou mais.

Resumo dos tipos de resistor

Então, para resumir, existem muitos tipos diferentes de resistores disponíveis, de baixo custo, grande tolerância, resistores de tipo carbono de uso geral até baixa tolerância, alto custo, resistores de filme de precisão, bem como resistores cerâmicos de alta potência e bobinados. Um resistor regula, impede ou define o fluxo de corrente através de um determinado caminho ou pode impor uma redução de tensão em um circuito elétrico.

O valor resistivo de um resistor, sua capacidade de limitar o fluxo de corrente é medido em Ohms (Ω) variando de menos de um Ohm cada a muitos milhões de Ohms (Mega-Ohms). Os resistores podem ser de valor fixo, por exemplo: 100 Ohms, (100Ω) ou variável como em 0 a 100Ω .

Um resistor sempre terá o mesmo valor de resistência, não importa qual seja a frequência da alimentação de CC para frequências muito altas e todos os resistores têm uma coisa em comum, seu valor resistivo em Ohms em um circuito SEMPRE será de natureza positiva e nunca negativo.

Os usos e aplicações de um resistor dentro de um circuito elétrico ou eletrônico são vastos e variados, com praticamente todos os circuitos eletrônicos já projetados usando um ou mais tipos de resistores. Resistores são comumente usados para fins como limitação de corrente, fornecendo tensões de controle apropriadas para dispositivos semicondutores, como transistores bipolares, protegendo LEDs ou outros dispositivos semicondutores de danos por sobrecorrente, bem como ajustar ou limitar a resposta de frequência em um circuito de áudio ou filtro.

Em circuitos digitais, diferentes tipos de resistores podem ser usados para aumentar ou diminuir a tensão no pino de entrada de um chip lógico digital ou para controlar uma tensão em um ponto de um circuito, colocando dois resistores em série para criar uma rede divisora de tensão. , A lista não tem fim!.

No próximo capítulo sobre Resistores, veremos as diferentes maneiras de identificar o valor resistivo dos diferentes tipos de resistores fixos, sendo o método de identificação mais comum o uso de *Códigos de Cores* e faixas de cores ao redor do corpo do resistor.

Código de cores dos resistores

A codificação de cores do resistor usa faixas coloridas para identificar facilmente o valor resistivo de um resistor e sua tolerância percentual.

Como existem muitos tipos diferentes de **resistores** disponíveis, precisamos formar um sistema de código de cores do resistor para poder identificá-los.

Os resistores podem ser usados em circuitos elétricos e eletrônicos para controlar o fluxo de corrente ou para produzir uma queda de tensão de muitas maneiras diferentes. Mas, para fazer isso, o resistor real precisa ter alguma forma de valor “resistivo” ou “resistência”. Os resistores estão disponíveis em uma variedade de diferentes valores de resistência, desde frações de um Ohm (Ω) até milhões de Ohms.

Obviamente, seria impraticável ter resistores disponíveis de todos os valores possíveis, por exemplo, 1Ω , 2Ω , 3Ω , 4Ω etc, porque literalmente dezenas de centenas de milhares, senão dezenas de milhões de resistores diferentes precisariam existir para cobrir todos os valores possíveis. Em vez disso, os resistores são fabricados nos chamados “valores preferenciais” com seu valor de resistência impresso em seu corpo com tinta colorida.



4 Faixas coloridas

O valor da resistência, tolerância e classificação de potência são geralmente impressos no corpo do resistor como números ou letras quando o corpo do resistor é grande o suficiente para ler a impressão, como resistores de grande potência. Mas quando o resistor é pequeno, como um tipo de carbono ou filme de $1/4$ watt, essas especificações devem ser mostradas de alguma outra maneira, pois a impressão seria muito pequena para ser lida.

Então, para superar isso, pequenos resistores usam faixas coloridas pintadas para indicar tanto seu valor resistivo quanto sua tolerância com o tamanho físico do resistor, indicando sua classificação de potência. Estas faixas pintadas de cor produzem um sistema de identificação geralmente conhecido como Código de Cores dos Resistores.

Um esquema de código de cores de resistores internacional e universalmente aceito foi desenvolvido há muitos anos como uma maneira simples e rápida de identificar o valor ôhmico de um resistor, independentemente de seu tamanho ou condição. Consiste em um conjunto de anéis ou faixas coloridas individuais em ordem espectral representando cada dígito do valor dos resistores.

As marcações do código de cores do resistor são sempre lidas uma faixa de cada vez, começando da esquerda para a direita, com a banda de tolerância de largura maior orientada para o lado direito, indicando sua tolerância. Ao combinar a cor da primeira faixa com seu número associado na coluna de dígitos da tabela de cores abaixo, o primeiro dígito é identificado e isso representa o primeiro dígito do valor da resistência.

Novamente, combinando a cor da segunda faixa com seu número associado na coluna de dígitos da tabela de cores, obtemos o segundo dígito do valor da resistência e assim por diante. Em seguida, o código de cores do resistor é lido da esquerda para a direita, conforme ilustrado abaixo:

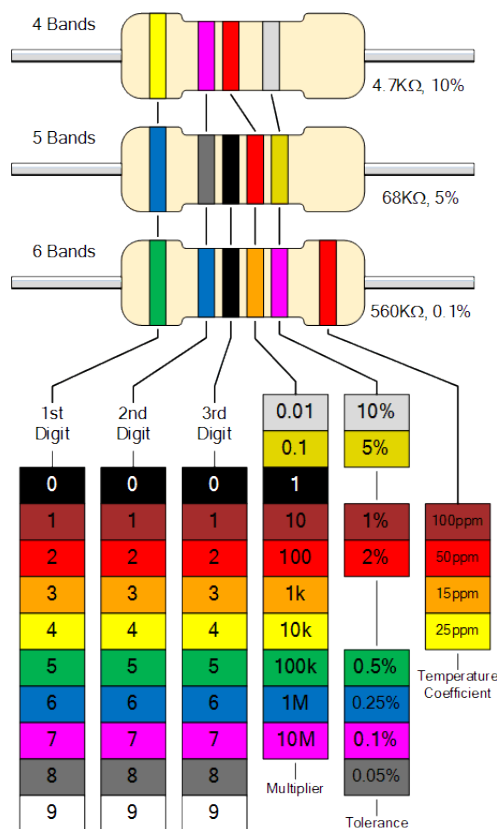


Gráfico de código de cores do resistor padrão

Tabela dos códigos dos resistores.

COR	DÍGITO	MULTIPLICADOR	TOLERÂNCIA
PRETO	0	1	
MARROM	1	10	± 1%
VERMELHO	2	100	± 2%
ARANJA	3	1000	
AMARELO	4	10000	
VERDE	5	100000	± 0,5%
AZUL	6	1000000	± 0,25%
VIOLETA	7	10000000	± 0,1%
CINZA	8		± 0,05%
BRANCO	9		
OURO		0,1	± 5%
PRATA		0,01	± 10%
NENHUM			± 20%

Então podemos ver as diferentes posições ponderadas de cada faixa colorida que compõe o código de cores dos resistores acima na tabela a seguir:

NÚMERO DE FAIXAS	3 FAIXAS (SÉRIE E6)	4 FAIXAS (SÉRIE E12)	5 FAIXAS (SÉRIE E48)	6 FAIXAS (SÉRIE E96)
1ª FAIXA	1º dígito	1º dígito	1º dígito	1º dígito
2ª FAIXA	2º dígito	2º dígito	2º dígito	2º dígito
3ª FAIXA	Multiplicador	Multiplicador	3º dígito	3º dígito
4ª FAIXA		Tolerância	Multiplicador	Multiplicador
5ª FAIXA			Tolerância	Tolerância
6ª FAIXA				Coefficiente de Temperatura

Calculando os valores do código de cores do resistor

O sistema de **código de cores do resistor** é muito bom, mas precisamos entender como aplicá-lo para obter o valor correto do resistor. A faixa colorida “à esquerda” ou mais significativa é a faixa que está mais próxima de um fio de conexão com as faixas codificadas por cores sendo lidas da esquerda para a direita da seguinte forma:

Dígito, Dígito, Multiplicador = Cor, Cor x 10^{cores} em Ohms (Ω)

Por exemplo, um resistor tem as seguintes marcações coloridas;

Amarelo **Violeta** **Vermelho** = $4\ 7\ 2 = 4\ 7 \times 10^2 = 4700\Omega$ ou **4k7 Ohm**.

A quarta e quinta bandas são usadas para determinar a tolerância percentual do resistor. A tolerância do resistor é uma medida da variação dos resistores em relação ao valor resistivo especificado e é uma consequência do processo de fabricação e é expressa como uma porcentagem de seu valor “nominal” ou preferencial.

As tolerâncias típicas para resistores de filme variam de 1% a 10%, enquanto os resistores de carbono têm tolerâncias de até 20%. Resistores com tolerâncias inferiores a 2% são chamados de resistores de precisão, sendo os resistores de tolerância inferior ou mais caros.

A maioria dos resistores de cinco bandas são resistores de precisão com tolerâncias de 1% ou 2%, enquanto a maioria dos resistores de quatro bandas tem tolerâncias de 5%, 10% e 20%. O código de cores usados para denotar a classificação de tolerância de um resistor é dado como:

Marrom = 1%, Vermelho = 2%, Dourado = 5%, Prata = 10%

Se o resistor não tiver uma quarta faixa de tolerância, a tolerância padrão será de 20%.

O Código Padrão Britânico (BS 1852).

Geralmente em resistores de potência maiores, os sistemas de código de cores do resistor não são necessários, pois o valor da resistência, a tolerância e até a classificação de potência (potência) são impressos no corpo real do resistor em vez de usar o sistema de código de cores do resistor. Porque é muito fácil “ler mal” a posição de um ponto decimal ou vírgula especialmente quando o componente está descolorido ou sujo. Foi desenvolvido um sistema mais fácil para escrever e imprimir os valores de resistência da resistência individual.

Este sistema está em conformidade com o padrão britânico BS 1852 Standard e sua substituição, BS EN 60062, método de codificação onde a posição do ponto decimal é substituída pelas letras sufixo “K” para milhares ou kilohms, a letra “M” para milhões ou megaohms ambos que denota o valor do multiplicador com a letra “R” usada onde o multiplicador é igual ou menor que um, com qualquer número vindo após essas letras significando que é equivalente a um ponto decimal.

A codificação de letras BS 1852 para resistores

Códigos BS 1852 para valores de resistores
$0,47\Omega = R47$ ou $0R47$
$1,0\Omega = 1R0$
$4,7\Omega = 4R7$
$47\Omega = 47R$
$470\Omega = 470R$ ou $0K47$
$1,0K\Omega = 1K0$
$4,7K\Omega = 4K7$
$47K\Omega = 47K$
$470K\Omega = 470K$ ou $0M47$
$1M\Omega = 1M0$

Às vezes, dependendo do fabricante, após o valor de resistência escrito, há uma letra adicional que representa o valor de tolerância dos resistores, como 4k7 J e essas letras de sufixo são dadas como:

Codificação de Letras de Tolerância para Resistores

Códigos de tolerância para resistores ($\pm$)
B = 0,1%
C = 0,25%
D = 0,5%
F = 1%
G = 2%
J = 5%
K = 10%
M = 20%

Além disso, ao ler esses códigos escritos, tenha cuidado para não confundir a letra de resistência k para quilohms com a letra de tolerância K para tolerância de 10% ou a letra de resistência M para megaohms com a letra de tolerância M para tolerância de 20%.

Código de cores do resistor para tolerância, série E e valores preferenciais

Espero que agora entendamos que os resistores vêm em uma variedade de tamanhos e valores de resistência, mas para ter um resistor disponível de todos os valores de resistência possíveis, literalmente centenas de milhares, se não milhões, de

resistores individuais precisariam existir. Em vez disso, os resistores são fabricados no que é comumente conhecido como **valores preferenciais**.

Em vez de valores sequenciais de resistência a partir de 1Ω , existem certos valores de resistores dentro de certos limites de tolerância. A tolerância de um resistor é a diferença máxima entre seu valor real e o valor necessário e geralmente é expressa como um valor percentual positivo ou negativo. Por exemplo, um resistor de tolerância de $1k\Omega \pm 20\%$ pode ter um valor resistivo máximo e mínimo de:

Valor Máximo de Resistência:

$$1k\Omega \text{ ou } 1000\Omega + 20\% = 1.200\Omega$$

Valor Mínimo de Resistência:

$$1k\Omega \text{ ou } 1000\Omega - 20\% = 800\Omega$$

Então, usando nosso exemplo acima, um resistor de tolerância de $1k\Omega \pm 20\%$ pode ter um valor máximo de 1200Ω e um valor mínimo de 800Ω resultando em uma diferença de cerca de 400Ω !! para o mesmo valor de resistor.

Na maioria dos circuitos elétricos ou eletrônicos, essa grande tolerância de 20% do mesmo resistor geralmente não é um problema, mas quando resistores de tolerância próxima são especificados para circuitos de alta precisão, como filtros, osciladores ou amplificadores, etc., o resistor de tolerância correto precisa ser usado como um resistor de tolerância de 20% geralmente não pode ser usado para substituir um tipo de tolerância de 2% ou mesmo 1%.

O código de cores do resistor de cinco e seis bandas é mais comumente associado aos tipos de filme de alta precisão de 1% e 2%, enquanto os tipos comuns de uso geral de 5% e 10% da variedade de jardim tendem a usar o código de cores do resistor de quatro bandas. Os resistores vêm em uma variedade de tolerâncias, mas os dois mais comuns são as séries E12 e E24.

A série E12 vem em doze valores de resistência por década (uma década representando múltiplos de 10, ou seja, 10, 100, 1000 etc), enquanto a série E24 vem em vinte e quatro valores por década e a série E96 noventa e seis valores por década. Uma série E192 de altíssima precisão está agora disponível com tolerâncias tão baixas quanto $\pm 0,1\%$, fornecendo 192 valores de resistores separados por década.

Tolerância do resistor e tabela da série E

Série E6 a $\pm 20\%$ Tolerância - Valores de resistores em Ω
1,0, 1,5, 2,2, 3,3, 4,7, 6,8
Série E12 a $\pm 10\%$ Tolerância - Valores de resistores em Ω
1,0, 1,2, 1,5, 1,8, 2,2, 2,7, 3,3, 3,9, 4,7, 5,6, 6,8, 8,2
Série E24 a $\pm 5\%$ de tolerância - Valores de resistores em Ω
1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,5, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4, 2,7, 3,0, 3,3, 3,6, 3,9, 4,3, 4,7, 5,1, 5,6, 6,2, 6,8, 7,2, 8,2, 9,1
Série E96 a $\pm 1\%$ Tolerância - Valores de resistores em Ω
1.00, 1.02, 1.05, 1.07, 1.10, 1.13, 1.15, 1.18, 1.21, 1.24, 1.27, 1.30, 1.33, 1.37, 1.40, 1.43, 1.47, 1.50, 1.54, 1.58, 1.62, 1.65, 1.69, 1.74, 1.78, 1.82, 1.87, 1.91, 1.96, 2.00, 2.05, 2.10, 2.15, 2.21, 2.26, 2.32, 2.37, 2.43, 2.49, 2.55, 2.61, 2.67, 2.74, 2.80, 2.87, 2.94, 3.01, 3.09, 3.16, 3.24, 3.32, 3.40, 3.48, 3.57, 3.65, 3.74, 3.83, 3.92, 4.02, 4.12, 4.22, 4.32, 4.42, 4.53, 4.64, 4.75, 4.87, 4.99, 5.11, 5.23, 5.36, 5.49, 5.62, 5.76, 5.90, 6.04, 6.19, 6.34, 6.49, 6.65, 6.81, 6.98, 7.15, 7.32, 7.50, 7.68, 7.87, 8.06, 8.25, 8.45, 8.66, 8.87, 9.09, 9.31, 9.53, 9.76

Então, usando o valor apropriado da série E para a porcentagem de tolerância necessária para o resistor, adicionando um fator de multiplicação a ele, qualquer valor ôhmico de resistência dentro dessa série pode ser encontrado. Por exemplo, tome um resistor da série E-12, tolerância de 10% com um valor preferencial de 3,3, então os valores de resistência para esta faixa são:

Valor x Multiplicador = Resistência

$$3,3 \times 1 = 3,3\Omega$$

$$3,3 \times 10 = 33\Omega$$

$$3,3 \times 100 = 330\Omega$$

$$3,3 \times 1.000 = 3,3k\Omega$$

$$3,3 \times 10.000 = 33k\Omega$$

$$3,3 \times 100.000 = 330k\Omega$$

$$3,3 \times 1.000.000 = 3,3M\Omega$$

A base matemática por trás desses valores preferenciais vem do valor da raiz quadrada da série real que está sendo usada. Por exemplo, para a série E6 20% existem seis resistores individuais ou etapas (1,0 a 6,8) e é dado como a sexta raiz de dez ($6\sqrt[10]{10}$), então para a série E12 10% existem doze resistores individuais ou etapas (1,0 a 8,2) e, portanto, é dado como a décima segunda raiz de dez ($12\sqrt[10]{10}$) e assim por diante para os valores restantes da série E.

A série de tolerâncias de **Valores Preferenciais** mostrados acima são fabricadas de acordo com o Padrão Britânico BS 2488 e são faixas de valores de resistores escolhidos de modo que na tolerância máxima ou mínima qualquer resistor se sobreponha ao seu valor vizinho. Por exemplo, tome a faixa de resistores E24 com uma tolerância de 5%. Seus valores de resistor vizinhos são 47 e 51Ω, respectivamente.

$47\Omega + 5\% = 49,35\Omega$ e $51\Omega - 5\% = 48,45\Omega$, uma sobreposição de apenas 0,9Ω.

Resistores de Montagem em Superfície



Resistor SMD de 4,7kΩ

Resistores de montagem em superfície ou resistores SMD, são resistores de filme de óxido metálico de formato retangular muito pequenos projetados para serem soldados diretamente na superfície, daí seu nome, de uma placa de circuito. Resistores de montagem em superfície geralmente têm um corpo de substrato cerâmico sobre o qual é depositada uma espessa camada de resistência ao óxido metálico.

O valor resistivo do resistor é controlado aumentando a espessura desejada, comprimento ou tipo de filme depositado sendo usado e resistores de baixa tolerância de alta precisão, até 0,1% podem ser produzidos. Eles também possuem terminais ou tampas de metal em cada extremidade do corpo, o que permite que sejam soldados diretamente nas placas de circuito impresso.

Os resistores de montagem em superfície são impressos com um código numérico de 3 ou 4 dígitos que é semelhante ao usado nos resistores do tipo axial mais comuns para denotar seu valor resistivo. Os resistores SMD padrão são marcados com um código de três dígitos, no qual os dois primeiros dígitos representam os dois primeiros números do valor da resistência com o terceiro dígito sendo o multiplicador, seja x1, x10, x100 etc.

Por exemplo:

$$“103” = 10 \times 1.000 \text{ ohms} = 10 \text{ kilo}\Omega$$

$$“392” = 39 \times 100 \text{ ohms} = 3,9 \text{ kilo}\Omega$$

$$“563” = 56 \times 1.000 \text{ ohms} = 56 \text{ kilo}\Omega$$

$$“105” = 10 \times 100.000 \text{ ohms} = 1 \text{ Mega}\Omega$$

Resistores de montagem em superfície que têm um valor inferior a 100Ω são geralmente escritos como: “390”, “470”, “560” com o zero final representando um multiplicador de 10×10^0 , que é equivalente a 1.

Por exemplo:

$$“390” = 39 \times 1\Omega = 39\Omega \text{ ou } 39R\Omega$$

$$“470” = 47 \times 1\Omega = 47\Omega \text{ ou } 47R\Omega$$

Valores de resistência abaixo de dez têm uma letra “R” para denotar a posição do ponto decimal como visto anteriormente no formulário BS1852, de modo que $4R7 = 4,7\Omega$.

Resistores de montagem em superfície que possuem marcações “000” ou “0000” são resistores de zero Ohm (0Ω) ou, em outras palavras, de curto-circuito, pois esses componentes têm resistência zero.

Resistores em Série

Diz-se que os resistores estão conectados em série quando são encadeados em série em uma única linha, resultando em uma corrente comum fluindo através deles.

Resistores individuais podem ser conectados em uma conexão em série, uma conexão em paralelo ou combinações de ambos em série e paralelo, para produzir redes de resistores mais complexas. Para resistores em série, a resistência equivalente é a combinação matemática dos resistores individuais conectados entre si na cadeia em série.

Um resistor não é apenas um componente eletrônico fundamental que pode ser usado para converter uma tensão em uma corrente ou uma corrente em uma tensão, mas ajustando corretamente seu valor, uma ponderação diferente pode ser colocada na corrente convertida e/ou na tensão que o permite. para ser usado em circuitos de referência de tensão e aplicações.

Resistores em série ou redes de resistores complicadas podem ser substituídos por um único resistor equivalente, R_{EQ} ou impedância, Z_{EQ} e não importa qual seja a combinação ou complexidade da rede de resistores, todos os resistores obedecem às mesmas regras básicas definidas pela *Lei de Ohm* e *Leis do Circuito de Kirchhoff*.

Diz-se que os resistores estão conectados em “Série”, quando são encadeados em série em uma única linha. Como toda a corrente que flui através do primeiro resistor não tem outro caminho, ela também deve passar pelo segundo resistor e pelo terceiro e assim por diante. Então, os resistores em série têm uma corrente comum fluindo através deles, pois a corrente que flui através de um resistor também deve fluir pelos outros, pois só pode seguir um caminho.

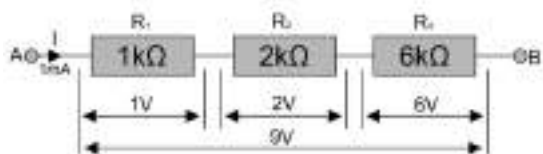
Então, a quantidade de corrente que flui através de um conjunto de resistores em série será a mesma em todos os pontos de uma rede de resistores em série.

Por exemplo:

$$I_{R1} = I_{R2} = I_{R3} = I_{AB} = 1\text{mA}$$

No exemplo a seguir, os resistores R_1 , R_2 e R_3 estão todos conectados em série entre os pontos A e B com uma corrente comum, I fluindo através deles.

Circuito Resistor em Série

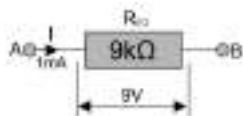


Como os resistores são conectados em série, a mesma corrente passa por cada resistor do circuito, e a resistência total R_{EQ} do circuito, deve ser igual à soma de todos os resistores individuais somados.

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

Substituindo os valores individuais dos resistores em nosso exemplo simples acima, a resistência equivalente total, R_{EQ} é, portanto, dada como:

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 + R_3 = 1k\Omega + 2k\Omega + 6k\Omega = 9k\Omega$$



Assim, vemos que podemos substituir todos os três resistores individuais acima por apenas um único resistor “equivalente” que terá um valor de $9k\Omega$.

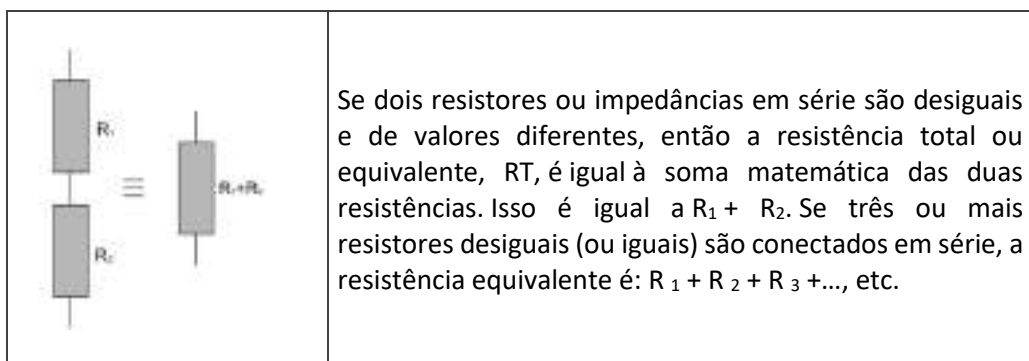
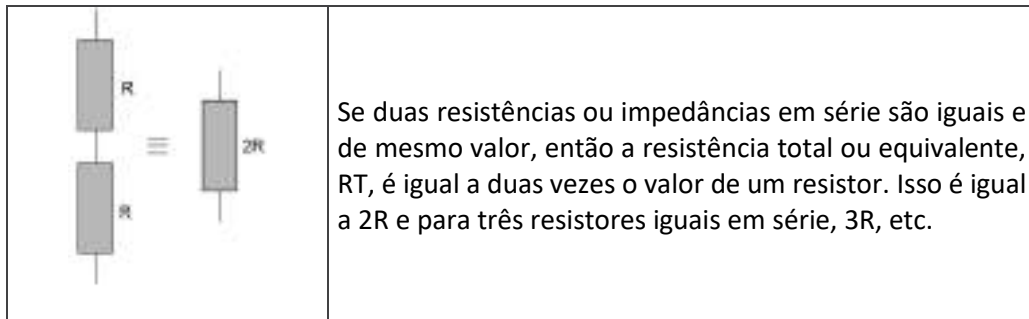
Onde quatro, cinco ou até mais resistores estão todos conectados em um circuito em série, a resistência total ou equivalente do circuito, R_T ainda seria a soma de todos os resistores individuais conectados entre si e quanto mais resistores adicionados à série, o maior a resistência equivalente (independentemente do seu valor).

Esta resistência total é geralmente conhecida como Resistência Equivalente e pode ser definida como; “um único valor de resistência que pode substituir qualquer número de resistores em série sem alterar os valores da corrente ou da tensão no circuito”. Então a equação dada para calcular a resistência total do circuito ao conectar resistores em série é dada como:

Equação de resistores em série

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

Observe então que a resistência total ou equivalente, R_T , tem o mesmo efeito no circuito que a combinação original de resistores, pois é a soma algébrica das resistências individuais.



Um ponto importante a ser lembrado sobre resistores em redes em série para verificar se sua matemática está correta. A resistência total (R_T) de quaisquer dois ou mais resistores conectados em série sempre será **MAIOR** que o valor do maior resistor da cadeia. Em nosso exemplo acima, $R_T = 9k\Omega$, onde o resistor de maior valor é de apenas $6k\Omega$.

Tensão do resistor em série

A tensão em cada resistor conectado em série segue regras diferentes daquelas da corrente em série. Sabemos pelo circuito acima que a tensão de alimentação total nos resistores é igual à soma das diferenças de potencial entre R_1 , R_2 e R_3 .

$$V_{AB} = V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} = 9V.$$

Usando a Lei de Ohm, a tensão nos resistores individuais pode ser calculada como:

$$\text{Tensão em } R_1 = IR_1 = 1\text{mA} \times 1\text{k}\Omega = 1\text{V}$$

$$\text{Tensão em } R_2 = IR_2 = 1\text{mA} \times 2\text{k}\Omega = 2\text{V}$$

$$\text{Tensão em } R_3 = IR_3 = 1\text{mA} \times 6\text{k}\Omega = 6\text{V}$$

Resultando uma tensão total V_{AB} de $(1\text{V} + 2\text{V} + 6\text{V}) = 9\text{V}$ que é igual ao valor da tensão de alimentação. Então, a soma das diferenças de potencial nos resistores é igual à diferença de potencial total na combinação e, em nosso exemplo, é 9V.

A equação dada para calcular a tensão total em um circuito em série, que é a soma de todas as tensões individuais somadas, é dada como:

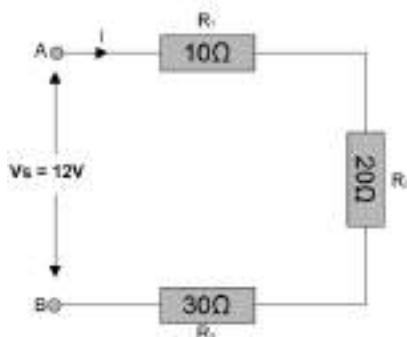
$$V_{\text{TOTAL}} = V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} + \dots + V_N$$

Então, as redes de resistores em série também podem ser pensadas como “divisores de tensão” e um circuito de resistor em série com N componentes resistivos terá N tensões diferentes ao longo dele, mantendo uma corrente comum.

Usando a Lei de Ohm, a tensão, corrente ou resistência de qualquer circuito conectado em série pode ser facilmente encontrada e o resistor de um circuito em série pode ser trocado sem afetar a resistência total, corrente ou potência de cada resistor.

Resistores em Série - Exemplo 1

Usando a Lei de Ohms, calcule a resistência em série equivalente, a corrente em série, a queda de tensão e a potência para cada resistor nos seguintes resistores no circuito em série.



Todos os dados podem ser encontrados usando a Lei de Ohm, e para facilitar um pouco a vida podemos apresentar esses dados em forma de tabela.

Resistência	Corrente	Tensão	Potência
$R_1 = 10\Omega$	$I_1 = 200\text{mA}$	$V_1 = 2\text{V}$	$P_1 = 0,4 \text{ W}$
$R_2 = 20\Omega$	$I_2 = 200\text{mA}$	$V_2 = 4\text{V}$	$P_2 = 0,8 \text{ W}$
$R_3 = 30\Omega$	$I_3 = 200\text{mA}$	$V_3 = 6\text{V}$	$P_3 = 1,2 \text{ W}$
$R_T = 60\Omega$	$I_T = 200\text{mA}$	$V_S = 12 \text{ V}$	$P_T = 2,4 \text{ w}$

Então, para o circuito acima, $R_T = 60\Omega$, $I_T = 200\text{mA}$, $V_S = 12\text{V}$ e $P_T = 2,4\text{W}$

O circuito divisor de tensão

Podemos ver no exemplo acima que, embora a tensão de alimentação seja de 12 volts, diferentes tensões ou quedas de tensão aparecem em cada resistor dentro da rede em série. Conectar resistores em série como este através de uma única fonte DC tem uma grande vantagem, diferentes voltagens aparecem em cada resistor produzindo um circuito muito útil chamado **Voltage Divider Network**.

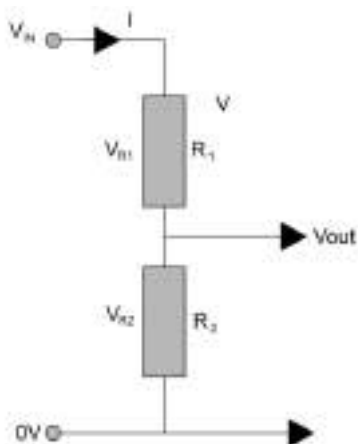
Este circuito simples divide a tensão de alimentação proporcionalmente em cada resistor na cadeia em série com a quantidade de queda de tensão sendo determinada pelo valor dos resistores e, como sabemos agora, a corrente através de um circuito de resistor em série é comum a todos os resistores. Portanto, uma resistência maior terá uma queda de tensão maior, enquanto uma resistência menor terá uma queda de tensão menor.

O circuito resistivo em série mostrado acima forma uma rede divisora de tensão simples onde três tensões 2V, 4V e 6V são produzidas a partir de uma única fonte de 12V. A Lei de Tensão de Kirchhoff afirma que “a *tensão de alimentação em um circuito fechado é igual à soma de todas as quedas de tensão ($I \cdot R$) ao redor do circuito*” e isso pode ser usado com bons resultados.

A **Regra da Divisão de Tensão**, nos permite usar os efeitos da proporcionalidade da resistência para calcular a diferença de potencial em cada

resistência, independentemente da corrente que flui através do circuito em série. Um típico “circuito divisor de tensão” é mostrado abaixo

Circuito divisor de tensão



$$V_{IN} = I * (R_1 + R_2)$$

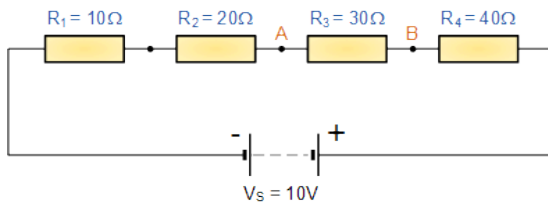
$$V_{out} = V_{IN} * \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

O circuito mostrado consiste em apenas dois resistores, R_1 e R_2 conectados em série através da tensão de alimentação V_{in} . Um lado da tensão da fonte de alimentação é conectado ao resistor, R_1 , e a saída de tensão, V_{out} é tomada do resistor R_2 . O valor desta tensão de saída é dado pela fórmula correspondente.

Se mais resistores forem conectados em série ao circuito, diferentes tensões aparecerão em cada resistor, por sua vez, em relação aos seus valores individuais de resistência R (Lei de Ohms $I * R$), fornecendo pontos de tensão diferentes, mas menores, de uma única fonte.

Portanto, se tivéssemos três ou mais resistências na cadeia em série, ainda podemos usar nossa fórmula agora familiar do divisor de potencial para encontrar a queda de tensão em cada uma.

Considere o circuito abaixo.



O *circuito divisor de potencial* acima mostra quatro resistências conectadas em série. A queda de tensão nos pontos A e B pode ser calculada usando a fórmula do divisor de potencial da seguinte forma:

$$V_{AB} = V_{R3} = V_S \times \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

$$V_{AB} = 10 \times \frac{30}{10 + 20 + 30 + 40} = 10 \times 0.3 = 3V$$

Também podemos aplicar a mesma ideia a um grupo de resistores na cadeia em série. Por exemplo, se quiséssemos encontrar a queda de tensão em R2 e R3 juntos, substituiríamos seus valores no numerador superior da fórmula e, nesse caso, a resposta resultante nos daria 5 volts (2V + 3V).

Neste exemplo muito simples, as tensões funcionam muito bem, pois a queda de tensão em um resistor é proporcional à resistência total e, como a resistência total, (R_T) neste exemplo é igual a 100Ω ou 100%, o resistor R1 é 10 % de R_T , então 10% da tensão da fonte V_S aparecerá através dele, 20% de V_S através do resistor R2, 30% através do resistor R3 e 40% da tensão de alimentação V_S através do resistor R4. A aplicação da lei de tensão de Kirchhoff (KVL) ao redor do caminho de malha fechada confirma isso.

Agora vamos supor que queremos usar nosso circuito divisor de potencial de dois resistores acima para produzir uma tensão menor a partir de uma tensão de alimentação maior para alimentar um circuito eletrônico externo. Suponha que temos uma fonte de 12V DC e nosso circuito que tem uma impedância de 50Ω requer apenas uma fonte de 6V, metade da tensão.

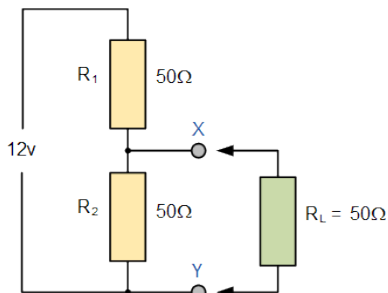
Conectar dois resistores de valor igual, digamos 50Ω cada, juntos como uma rede divisora de potencial nos 12V fará isso muito bem até conectarmos o circuito de carga à rede. Isso ocorre porque o efeito de carregamento do resistor R_L conectado em paralelo através de R_2 altera a relação das duas resistências em série alterando sua queda de tensão e isso é demonstrado a seguir.

Resistores em Série - Exemplo 2

Calcule as quedas de tensão em X e Y

a) Sem R_L conectado

b) Com R_L conectado



a) Without R_L connected

$$R_{X-Y} = 50\Omega$$

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{out} = 12V \times \frac{50}{50 + 50} = 6.0V$$

b) With R_L connected

$$R_{X-Y} = 25\Omega \quad (\text{Resistors in Parallel})$$

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{out} = 12V \times \frac{25}{50 + 25} = 4.0V$$

Como você pode ver acima, a tensão de saída V_{out} sem o resistor de carga conectado nos dá a tensão de saída necessária de 6V, mas a mesma tensão de saída em V_{out} quando a carga está conectada cai para apenas 4V (Resistores em Paralelo).

Então podemos ver que uma rede divisora de tensão carregada altera sua tensão de saída como resultado desse efeito de carregamento, uma vez que a tensão de saída V_{out} é determinada pela razão de R_1 para R_2 . No entanto, à medida que a resistência da carga, R_L aumenta até o infinito (∞), esse efeito de carga diminui e a relação de tensão de V_{out}/V_s não é afetada pela adição da carga na saída. Então, quanto maior a impedância de carga, menor é o efeito de carga na saída.

O efeito de reduzir um sinal ou nível de tensão é conhecido como Atenuação, portanto, deve-se tomar cuidado ao usar uma rede divisora de tensão. Este efeito de carga pode ser compensado usando um potenciômetro em vez de resistores de valor fixo e ajustado de acordo. Este método também compensa o divisor de potencial para tolerâncias variáveis na construção dos resistores.

Um resistor variável, potenciômetro ou potenciômetro como é mais comumente chamado, é um bom exemplo de um divisor de tensão multi-resistor dentro de um único pacote, pois pode ser pensado como milhares de mini-resistores

em série. Aqui uma tensão fixa é aplicada através das duas conexões fixas externas e a tensão de saída variável é retirada do terminal do cursor. Potenciômetros multi-voltas permitem um controle de tensão de saída mais preciso.

O **circuito divisor de tensão** é a maneira mais simples de produzir uma tensão mais baixa a partir de uma tensão mais alta e é o mecanismo básico de operação do potenciômetro.

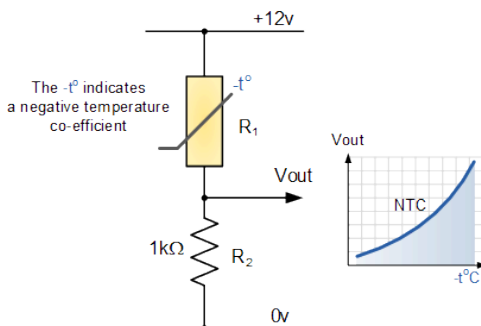
Além de ser usada para calcular uma tensão de alimentação mais baixa, a fórmula do divisor de tensão também pode ser usada na análise de circuitos resistivos mais complexos contendo ramificações em série e paralelas. A fórmula do divisor de tensão ou potencial pode ser usada para determinar as quedas de tensão em torno de uma rede CC fechada ou como parte de várias leis de análise de circuito, como os teoremas de Kirchhoff ou Thevenin.

Aplicações de Resistores em Série

Vimos que **Resistores em Série** podem ser usados para produzir diferentes tensões entre si e esse tipo de rede de resistores é muito útil para produzir uma rede divisora de tensão. Se substituirmos um dos resistores no circuito divisor de tensão acima por um *sensor*, como um termistor, resistor dependente da luz (LDR) ou mesmo um interruptor, podemos converter uma quantidade analógica sendo detectada em um sinal elétrico adequado que é capaz de ser medido.

Por exemplo, o circuito termistor a seguir tem uma resistência de $10\text{K}\Omega$ a 25°C e uma resistência de 100Ω a 100°C . Calcule a tensão de saída (V_{out}) para ambas as temperaturas.

Circuito do termistor



A 25°C

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} = \frac{1,000}{10,000 + 1,000} \times 12 = 1.09v$$

A 100°C

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} = \frac{1,000}{100 + 1,000} \times 12 = 10.9v$$

Assim, alterando o resistor fixo de 1 K Ω , R₂ em nosso circuito simples acima, para um resistor ou potenciômetro variável, um ponto de ajuste de tensão de saída específico pode ser obtido em uma faixa de temperatura mais ampla.

Resistores em Série - Resumo

Então, para resumir. Quando dois ou mais resistores são conectados de ponta a ponta em um único ramo, diz-se que os resistores estão conectados em série. **Resistores em série** carregam a mesma corrente, mas a queda de tensão entre eles não é a mesma, pois seus valores individuais de resistência criarão diferentes quedas de tensão em cada resistor, conforme determinado pela Lei de Ohm ($V = I \cdot R$). Então circuitos em série são divisores de tensão.

Em uma rede de resistores em série, os resistores individuais se somam para dar uma resistência equivalente, (R_T) da combinação em série. Os resistores em um circuito em série podem ser trocados sem afetar a resistência total, corrente ou potência para cada resistor ou circuito.

No próximo tutorial sobre Resistores, veremos como conectar resistores em paralelo e mostrar que a resistência total é a soma recíproca de todos os resistores somados e que a tensão é comum a um circuito paralelo.

Resistores em Paralelo

Diz-se que os resistores estão conectados em paralelo quando ambos os seus terminais estão conectados respectivamente a cada terminal do outro resistor ou resistores.

Ao contrário do circuito de resistor em série anterior, em uma rede de resistor paralelo a corrente do circuito pode ter mais de um caminho, pois existem vários caminhos para a corrente. Em seguida, os resistores em circuitos paralelos são classificados como divisores de corrente.

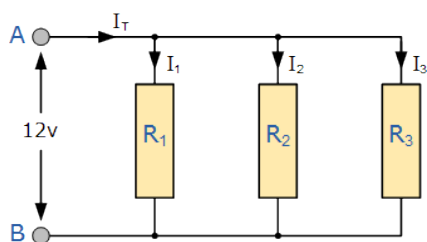
Como existem vários caminhos para a corrente de alimentação fluir, a corrente pode não ser a mesma em todos os ramos da rede paralela. No entanto, a queda de tensão em todos os resistores em uma rede resistiva paralela é a mesma. Então, os resistores em paralelo têm uma tensão comum entre eles e isso é verdade para todos os elementos conectados em paralelo.

Assim podemos definir um circuito resistivo paralelo como aquele em que os resistores estão ligados aos mesmos dois pontos (ou nós) e é identificado pelo fato de possuir mais de um caminho de corrente conectado a uma fonte de tensão comum. Então, em nosso exemplo de resistor paralelo abaixo, a tensão no resistor R_1 é igual à tensão no resistor R_2 , que é igual à tensão em R_3 e é igual à tensão de alimentação. Portanto, para uma rede de resistores em paralelo, isso é dado como:

$$V_{R1} = V_{R2} = V_{R3} = V_{AB} = 12V$$

Nos seguintes resistores em circuito paralelo os resistores R_1 , R_2 e R_3 estão todos conectados em paralelo entre os dois pontos A e B como mostrado.

Circuito Resistor Paralelo:



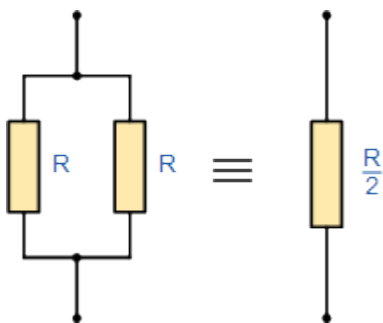
Na rede de resistores em série anterior, vimos que a resistência total, R_T do circuito, era igual à soma de todos os resistores individuais somados. Para resistores em paralelo, a resistência equivalente do circuito R_T é calculada de forma diferente.

Aqui, o valor resultante ($1/R$) das resistências individuais são todos somados em vez das próprias resistências com o inverso da soma algébrica dando a resistência equivalente como mostrado.

Equação do Resistor Paralelo

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \text{ etc}$$

Então o inverso da resistência equivalente de dois ou mais resistores conectados em paralelo é a soma algébrica dos inversos das resistências individuais.



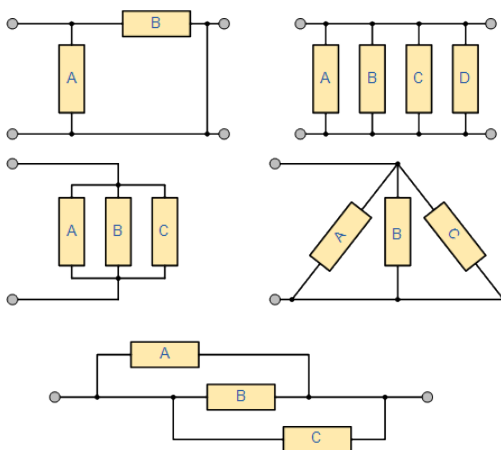
Se as duas resistências ou impedâncias em paralelo são iguais e do mesmo valor, então a resistência total ou equivalente, R_T , é igual à metade do valor de um resistor. Isso é igual a $R/2$ e para três resistores iguais em paralelo, $R/3$, etc.

Observe que a resistência equivalente é sempre menor que o menor resistor na rede paralela, de modo que a resistência total, R_T , sempre diminuirá à medida que resistores paralelos adicionais forem adicionados.

A resistência paralela nos dá um valor conhecido como **Condutância**, símbolo G com as unidades de condutância sendo a Siemens, símbolo S . A condutância é o recíproco ou o inverso da resistência, ($G = 1/R$). Para converter a condutância de volta em um valor de resistência, precisamos tomar o recíproco da condutância, dando-nos então a resistência total, R_T , dos resistores em paralelo.

Agora sabemos que os resistores que estão conectados entre os mesmos dois pontos estão em paralelo. Mas um circuito resistivo paralelo pode assumir muitas formas além da óbvia dada acima e aqui estão alguns exemplos de como os resistores podem ser conectados em paralelo.

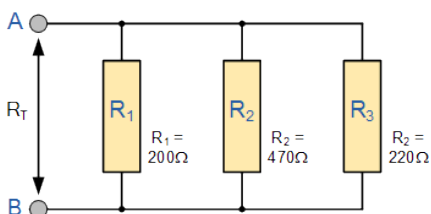
Várias redes de resistores paralelos:



As cinco redes resistivas acima podem parecer diferentes umas das outras, mas todas estão dispostas como **Resistores em Paralelo** e, como tal, as mesmas condições e equações se aplicam.

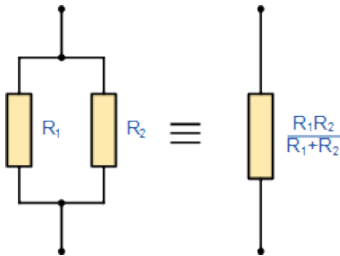
Resistores em Paralelo – Exemplo 1

Encontre a resistência total, R_T , dos seguintes resistores conectados em uma rede paralela.



A resistência total R_T através dos dois terminais A e B é calculada como:

$$\begin{aligned}\frac{1}{R_T} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \\ &= \frac{1}{200} + \frac{1}{470} + \frac{1}{220} = 0.0117 \\ \text{therefore: } R_T &= \frac{1}{0.0117} = 85.67\Omega\end{aligned}$$



Este método de cálculo recíproco pode ser usado para calcular qualquer número de resistências individuais conectadas em uma única rede paralela.

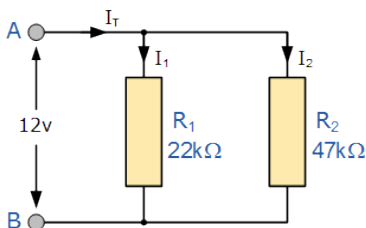
Se, no entanto, houver apenas dois resistores individuais em paralelo, podemos usar uma fórmula muito mais simples e rápida para encontrar o valor da resistência total ou equivalente, R_T e ajudar a reduzir um pouco a matemática.

Este método de produto sobre soma muito mais rápido de calcular dois resistores em paralelo, com valores iguais ou desiguais, é dado como:

$$R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Resistores em Paralelo – Exemplo 2

Considere o seguinte circuito que tem apenas dois resistores em uma combinação em paralelo.



Usando nossa fórmula acima para dois resistores conectados em paralelo, podemos calcular a resistência total do circuito, R_T como:

$$R_T = \frac{22\text{k}\Omega \times 47\text{k}\Omega}{22\text{k}\Omega + 47\text{k}\Omega} = 14,985\Omega \text{ or } 15\text{k}\Omega$$

Um ponto importante a ser lembrado sobre resistores em paralelo é que a resistência total do circuito (R_T) de quaisquer dois resistores conectados em paralelo sempre será MENOR que o valor do menor resistor nessa combinação.

No nosso exemplo acima, o valor da combinação foi calculado como: $R_T = 15\text{k}\Omega$, onde o valor do menor resistor é $22\text{k}\Omega$, muito maior. Em outras palavras, a resistência equivalente de uma rede paralela sempre será menor que o menor resistor individual na combinação.

Além disso, no caso de R_1 ser igual ao valor de R_2 , ou seja, $R_1 = R_2$, a resistência total da rede será exatamente a metade do valor de um dos resistores, $R/2$.

Da mesma forma, se três ou mais resistores, cada um com o mesmo valor, forem conectados em paralelo, a resistência equivalente será igual a R/n , onde R é o valor do resistor e n é o número de resistências individuais na combinação.

Por exemplo, seis resistores de 100Ω são conectados em uma combinação paralela. A resistência equivalente será, portanto: $R_T = R/n = 100/6 = 16,7\Omega$. Mas note que isso só funciona para resistores equivalentes. Ou seja, todos os resistores têm o mesmo valor.

Correntes em um Circuito Resistor Paralelo

A corrente total, I_T que entra em um circuito resistivo paralelo, é a soma de todas as correntes individuais que fluem em todos os ramos paralelos. Mas a quantidade de corrente que flui através de cada ramo paralelo pode não ser necessariamente a mesma, pois o valor resistivo de cada ramo determina a quantidade de corrente que flui dentro desse ramo.

Por exemplo, embora a combinação em paralelo tenha a mesma tensão através dela, as resistências podem ser diferentes, portanto, a corrente que flui através de cada resistor definitivamente seria diferente, conforme determinado pela Lei de Ohms.

Considere os dois resistores em paralelo acima. A corrente que flui através de cada um dos resistores (I_{R1} e I_{R2}) conectados em paralelo não é necessariamente o mesmo valor, pois depende do valor resistivo do resistor. No entanto, sabemos que a corrente que entra no circuito no ponto A também deve sair do circuito no ponto B.

As *Leis das Correntes de Kirchhoff* afirmam que: “a corrente total que sai de um circuito é igual à que entra no circuito – nenhuma corrente é perdida”. Assim, a corrente total que flui no circuito é dada como:

$$I_T = I_{R1} + I_{R2}$$

Usando a *Lei de Ohm*, podemos calcular a corrente que flui através de cada resistor paralelo mostrado no Exemplo No2 acima como sendo:

A corrente que flui no resistor R_1 é dada como:

$$I_{R1} = V_S \div R_1 = 12V \div 22k\Omega = 0,545mA \text{ ou } 545\mu A$$

A corrente que flui no resistor R_2 é dada como:

$$I_{R2} = V_S \div R_2 = 12V \div 47k\Omega = 0,255mA \text{ ou } 255\mu A$$

dando-nos assim uma corrente total I_T fluindo ao redor do circuito como:

$$I_T = 0,545mA + 0,255mA = 0,8mA \text{ ou } 800\mu A$$

e isso também pode ser verificado diretamente usando a Lei de Ohm como:

$$I_T = V_S \div R_T = 12 \div 15k\Omega = 0,8mA \text{ ou } 800\mu A \text{ (o mesmo)}$$

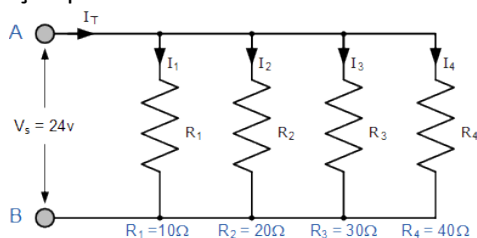
A equação dada para calcular a corrente total que flui em um circuito de resistor paralelo, que é a soma de todas as correntes individuais somadas, é dada como:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n$$

Então, as redes de resistores paralelos também podem ser consideradas “divisores de corrente” porque a corrente de alimentação se divide ou se divide entre os vários ramos paralelos. Portanto, um circuito de resistor paralelo com N redes resistivas terá N caminhos de corrente diferentes, mantendo uma tensão comum entre si. Os resistores paralelos também podem ser trocados entre si sem alterar a resistência total ou a corrente total do circuito.

Resistores em Paralelo – Exemplo 3

Calcule as correntes de ramais individuais e a corrente total extraída da fonte de alimentação para o seguinte conjunto de resistores conectados em uma combinação paralela.



Como a tensão de alimentação é comum a todos os resistores em um circuito paralelo, podemos usar a Lei de Ohms para calcular a corrente de ramo individual da seguinte forma.

$$I_1 = \frac{V_s}{R_1} = \frac{24V}{10\Omega} = 2.4\text{amps}$$

$$I_2 = \frac{V_s}{R_2} = \frac{24V}{20\Omega} = 1.2\text{amps}$$

$$I_3 = \frac{V_s}{R_3} = \frac{24V}{30\Omega} = 0.8\text{amps}$$

$$I_4 = \frac{V_s}{R_4} = \frac{24V}{40\Omega} = 0.6\text{amps}$$

Então a corrente total do circuito, I_T fluindo para a combinação do resistor paralelo, será:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$I_T = 2.4 + 1.2 + 0.8 + 0.6$$

$$I_T = 5.0\text{Amps}$$

Este valor total da corrente do circuito de 5 amperes também pode ser encontrado e verificado encontrando a resistência equivalente do circuito, R_T do ramo paralelo e dividindo-a na tensão de alimentação, V_s como segue.

Resistência equivalente do circuito:

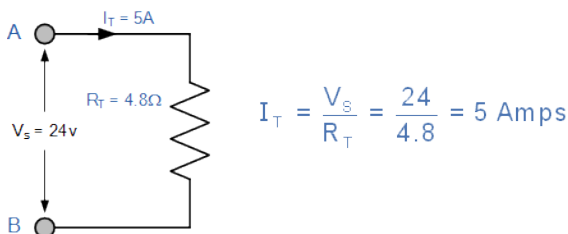
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{R_T} = 0.1 + 0.05 + 0.033 + 0.025$$

$$\therefore R_T = \frac{1}{0.2083} = 4.8\Omega$$

Então a corrente que flui no circuito será:



Resumo: Resistores em Paralelo

Então, para resumir. Quando dois ou mais resistores são conectados de modo que ambos os seus terminais estejam conectados respectivamente a cada terminal do outro resistor ou resistores, diz-se que eles estão conectados em paralelo. A tensão em cada resistor dentro de uma combinação em paralelo é exatamente a mesma, mas as correntes que fluem através deles não são as mesmas, pois isso é determinado pelo valor da resistência e pela Lei de Ohms. Então circuitos paralelos são divisores de corrente.

A resistência equivalente ou total, R_T de uma combinação paralela é encontrada através da adição recíproca e o valor da resistência total será sempre menor que o menor resistor individual na combinação. As redes de resistores paralelos podem ser trocadas dentro da mesma combinação sem alterar a resistência total ou a corrente total do circuito. Resistores conectados juntos em um circuito paralelo continuarão a operar mesmo que um resistor possa estar em circuito aberto.

Até agora, vimos redes de resistores conectadas em uma combinação em série ou em paralelo. No próximo tutorial sobre *Resistores*, veremos como conectar

resistores em uma combinação em série e em paralelo ao mesmo tempo produzindo um circuito de resistor misto ou combinacional.

Resistores em série e paralelo (misto)

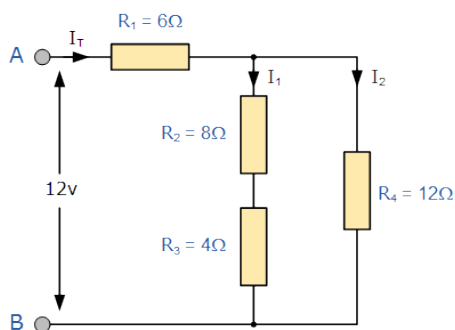
Os resistores podem ser conectados em um número ilimitado de combinações em série e paralelo para formar circuitos resistivos complexos.

Nos tutoriais anteriores, aprendemos como conectar resistores individuais juntos para formar uma rede de *resistores em série* ou uma *rede de resistores paralela* e usamos a Lei de Ohms para encontrar as várias correntes e tensões em cada combinação de resistores. Mas também podemos conectar resistores em combinações em série e em paralelo.

E se quisermos conectar vários resistores em combinações “AMBOS” em paralelo e em série dentro do mesmo circuito para produzir redes resistivas mais complexas, como calculamos a resistência, correntes e tensões combinadas ou totais do circuito para essas combinações resistivas.

Os circuitos de resistores que combinam redes de resistores em série e paralelos são geralmente conhecidos como **combinação de resistores** ou circuitos de resistores mistos. O método de calcular a resistência equivalente do circuito é o mesmo que para qualquer circuito individual em série ou paralelo e esperamos que agora saibamos que os resistores em série transportam exatamente a mesma corrente e que os resistores em paralelo têm exatamente a mesma tensão entre eles.

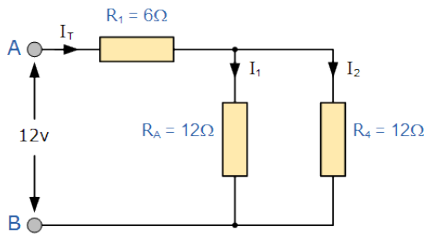
Por exemplo, no circuito a seguir, calcule a corrente total (I_T) retirada da fonte de 12v.



À primeira vista, isso pode parecer uma tarefa difícil, mas se olharmos um pouco mais de perto, podemos ver que os dois resistores, R_2 e R_3 , estão ambos conectados em uma combinação “SÉRIE” para que possamos adicioná-los para produzir uma resistência equivalente a mesma que fizemos no tutorial do resistor em série. A resistência resultante para esta combinação seria, portanto:

$$R_2 + R_3 = 8\Omega + 4\Omega = 12\Omega$$

Assim, podemos substituir o resistor R_2 e R_3 acima por um único resistor de valor de resistência 12Ω .

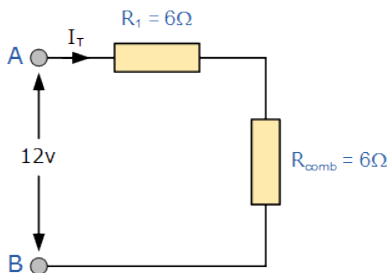


Então nosso circuito agora tem um único resistor “RA” em “PARALELO” com o resistor R_4 . Usando nossos resistores em equação paralela, podemos reduzir essa combinação paralela a um único valor de resistor equivalente de $R_{(\text{combinação})}$ usando a fórmula para dois resistores conectados em paralelo como segue.

$$R_{(\text{eq})} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{12} + \frac{1}{12}} = 0.1667$$

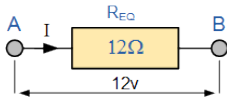
$$R_{(\text{combination})} = \frac{1}{R_{(\text{eq})}} = \frac{1}{0.1667} = 6\Omega$$

O circuito resistivo resultante agora se parece com isto:



Podemos ver que as duas resistências restantes, R_1 e $R_{(\text{combinacional})}$ estão conectadas em uma combinação “SÉRIE” e novamente podem ser somadas (resistores em série) de modo que a resistência total do circuito entre os pontos A e B é, portanto, dado como:

$$R_{(a-b)} = R_{\text{Combinacional}} + R_1 = 6\Omega + 6\Omega = 12\Omega$$



Assim, um único resistor de apenas 12Ω pode ser usado para substituir os quatro resistores originais conectados no circuito original acima.

Usando a Lei de Ohm, o valor da corrente (I) fluindo ao redor do circuito é calculado como:

$$\text{Circuit Current (I)} = \frac{V}{R} = \frac{12}{12} = 1 \text{ Ampere}$$

Então podemos ver que qualquer circuito resistivo complicado consistindo de vários resistores pode ser reduzido a um simples circuito único com apenas um resistor equivalente substituindo todos os resistores conectados em série ou em paralelo usando as etapas acima.

Podemos dar um passo adiante usando a Lei de Ohms para encontrar as duas correntes de ramificação, I_1 e I_2 , conforme mostrado.

$$V_{(R1)} = I * R_1 = 1 * 6 = 6 \text{ volts}$$

$$V_{(RA)} = V_{R4} = (12 - V_{R1}) = 6 \text{ volts}$$

Desta forma:

$$I_1 = 6V \div R_A = 6 \div 12 = 0,5A \text{ ou } 500mA$$

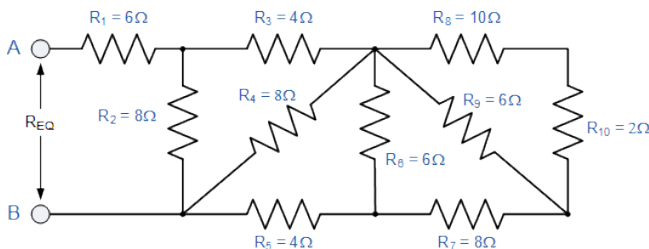
$$I_2 = 6V \div R_4 = 6 \div 12 = 0,5A \text{ ou } 500mA$$

Como os valores resistivos dos dois ramos são os mesmos em 12Ω , as duas correntes nos ramos de I_1 e I_2 também são iguais em 0,5 A (ou 500 mA) cada. Isso, portanto, fornece uma corrente de alimentação total, I_T de: $0,5 + 0,5 = 1,0$ amperes conforme calculado acima.

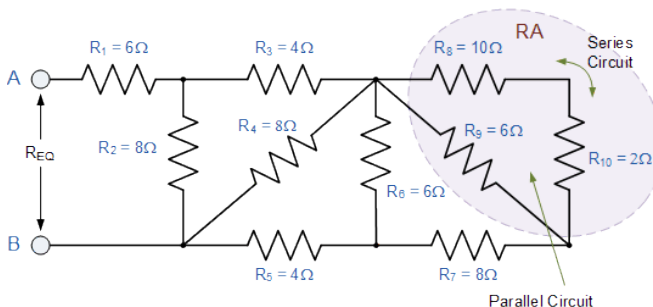
Às vezes, é mais fácil com combinações complexas de resistores e redes resistivas esboçar ou redesenhar o novo circuito após essas alterações terem sido feitas, pois isso ajuda como auxílio visual para a matemática. Em seguida, continue a substituir quaisquer combinações em série ou em paralelo até que uma resistência equivalente, R_{EQ} seja encontrada. Vamos tentar outro circuito de combinação de resistores mais complexo.

Resistores em Série e Paralelo - Exemplo 2

Encontre a resistência equivalente, R_{EQ} para o seguinte circuito de combinação de resistores.

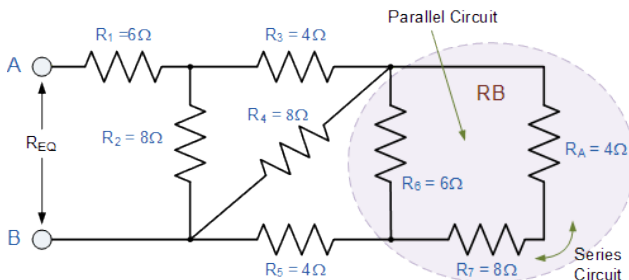


Novamente, à primeira vista, esta rede de resistores em escada pode parecer uma tarefa complicada, mas, como antes, é apenas uma combinação de resistores em série e paralelos conectados. Começando do lado direito e usando a equação simplificada para dois resistores paralelos, podemos encontrar a resistência equivalente da combinação R_8 a R_{10} e chamá-la de R_A .



$$R_A = \frac{R_9 \times (R_8 + R_{10})}{R_9 + R_8 + R_{10}} = \frac{6 \times (10 + 2)}{6 + 10 + 2} = 4\Omega$$

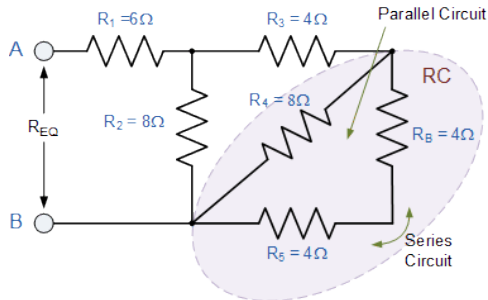
R_A está em série com R_7 , portanto, a resistência total será $R_A + R_7 = 4 + 8 = 12\Omega$ como mostrado.



Este valor resistivo de 12Ω está agora em paralelo com R_6 e pode ser calculado como R_B .

$$R_B = \frac{R_6 \times (R_A + R_7)}{R_6 + R_A + R_7} = \frac{6 \times (4 + 8)}{6 + 4 + 8} = 4\Omega$$

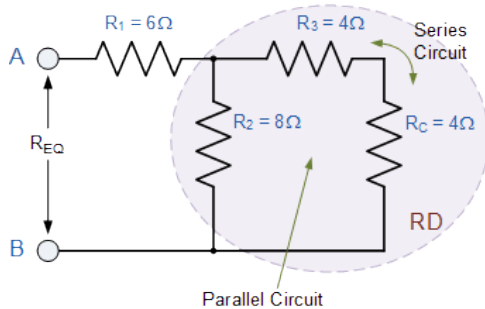
R_B está em série com R_5 portanto a resistência total será $R_B + R_5 = 4 + 4 = 8\Omega$ como mostrado.



Este valor resistivo de 8Ω está agora em paralelo com R_4 e pode ser calculado como R_C como mostrado.

$$R_C = \frac{R_4 \times (R_B + R_5)}{R_4 + R_B + R_5} = \frac{8 \times (4 + 4)}{8 + 4 + 4} = 4\Omega$$

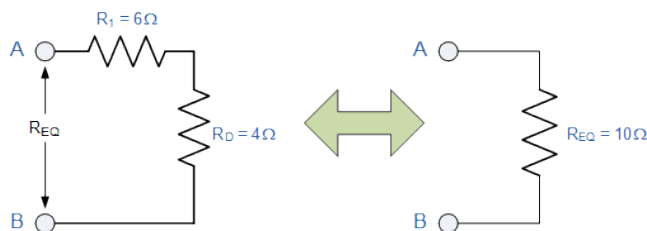
R_C está em série com R_3 portanto a resistência total será $R_C + R_3 = 8\Omega$ como mostrado.



Este valor resistivo de 8Ω está agora em paralelo com R_2 a partir do qual podemos calcular R_D como:

$$R_D = \frac{R_2 \times (R_C + R_3)}{R_2 + R_C + R_3} = \frac{8 \times (4 + 4)}{8 + 4 + 4} = 4\Omega$$

R_D está em série com R_1 portanto a resistência total será $R_D + R_1 = 4 + 6 = 10\Omega$ como mostrado.



Em seguida, a complexa rede resistiva combinatória acima, composta por dez resistores individuais conectados em série e combinações paralelas, pode ser substituída por apenas uma única resistência equivalente (R_{EQ}) de valor 10Ω .

Ao resolver qualquer circuito de resistor combinacional composto de resistores em ramais em série e paralelos, o primeiro passo que precisamos dar é identificar os ramos simples de resistores em série e paralelo e substituí-los por resistores equivalentes.

Esta etapa nos permitirá reduzir a complexidade do circuito e nos ajudar a transformar um circuito resistivo combinacional complexo em uma única resistência equivalente, lembrando que os circuitos em série são divisores de tensão e os circuitos paralelos são divisores de corrente.

No entanto, cálculos de redes mais complexas de atenuador T-pad e ponte resistiva que não podem ser reduzidas a um simples circuito paralelo ou em série usando resistências equivalentes requerem uma abordagem diferente. Esses circuitos mais complexos precisam ser resolvidos usando a Lei das Correntes de Kirchhoff e a Lei das Tensões de Kirchhoff que serão tratadas em outro tutorial.

No próximo capítulo sobre *resistores*, veremos a diferença de potencial elétrico (tensão) em dois pontos, incluindo um resistor.

Diferença potencial

A diferença de tensão entre quaisquer dois pontos em um circuito é conhecida como Diferença de Potencial e é essa diferença de potencial que faz a corrente fluir.

Ao contrário da corrente que flui em torno de um circuito elétrico fechado na forma de carga elétrica, a diferença de potencial não se move ou flui é aplicada.

A unidade de diferença de potencial gerada entre dois pontos é chamada de **Volt** e é geralmente definida como sendo a diferença de potencial lançada em uma resistência fixa de um ohm com uma corrente de um ampere fluindo através dela.

Em outras palavras, 1 Volt é igual a 1 Ampere vezes 1 Ohm, ou seja, $V = I \cdot R$.

A Lei de Ohm afirma que para um circuito linear a corrente que flui através dele é proporcional à diferença de potencial através dele, então quanto maior a diferença de potencial entre quaisquer dois pontos, maior será a corrente que flui através dele.

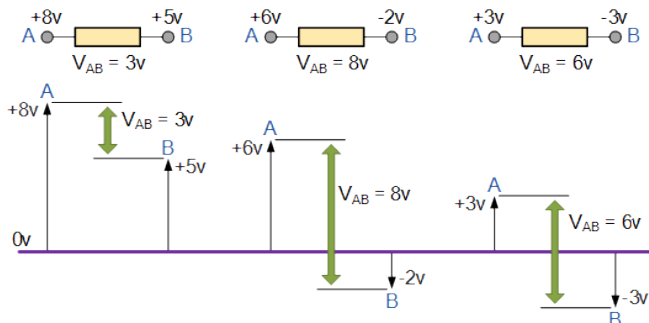
Por exemplo, se a tensão em um lado de um resistor de 10Ω mede 8V e no outro lado do resistor mede 5V, então a diferença de potencial através do resistor seria 3V ($8 - 5$) fazendo com que uma corrente de 0,3A flua.

Se, no entanto, a tensão em um lado fosse aumentada de 8V para 40V, a diferença de potencial no resistor seria agora de $40V - 5V = 35V$, causando o fluxo de uma corrente de 3,5A. A tensão em qualquer ponto de um circuito é sempre medida em relação a um ponto comum, geralmente 0V.

Para circuitos elétricos, o potencial de terra ou terra é geralmente considerado como zero volt (0V) e tudo é referenciado a esse ponto comum em um circuito. Isso é semelhante em teoria à medição de altura. Medimos a altura das colinas de maneira semelhante, dizendo que o nível do mar está a zero pé e, em seguida, comparamos outros pontos da colina ou montanha a esse nível.

De maneira muito semelhante, podemos chamar o ponto comum em um circuito de zero volts e dar-lhe o nome de terra, zero volt ou terra, então todos os outros pontos de tensão no circuito são comparados ou referenciados a esse ponto de terra. O uso de um terra comum ou ponto de referência em desenhos esquemáticos elétricos permite que o circuito seja desenhado de forma mais simples, pois entende-se que todas as conexões a este ponto têm o mesmo potencial.

Por exemplo:



Como as unidades de medida para a **Diferença de Potencial** são volts, a diferença de potencial é principalmente chamada de tensão. Tensões individuais conectadas em série podem ser somadas para nos dar uma soma de “tensão total” do circuito, como visto no tutorial de resistores em série. As tensões entre os componentes que estão conectados em paralelo sempre terão o mesmo valor visto no tutorial de resistores em paralelo, por exemplo.

Para tensões conectadas em série:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 \dots \text{etc}$$

Para tensões conectadas em paralelo:

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 \dots \text{etc}$$

Exemplo de Diferença de Potencial Nº1

Usando a Lei de Ohm, a corrente que flui através de um resistor pode ser calculada da seguinte forma:

Calcule a corrente que flui através de um resistor de 100Ω que tem um de seus terminais conectado a 50 volts e o outro terminal conectado a 30 volts.

A tensão no terminal A é igual a 50v e a tensão no terminal B é igual a 30v. Portanto, a tensão no resistor é dada como:

$$V_A = 50v, V_B = 30v, \text{ portanto, } V_A - V_B = 50 - 30 = 20v$$

A tensão através do resistor é 20v, então a corrente que flui através do resistor é dada como:

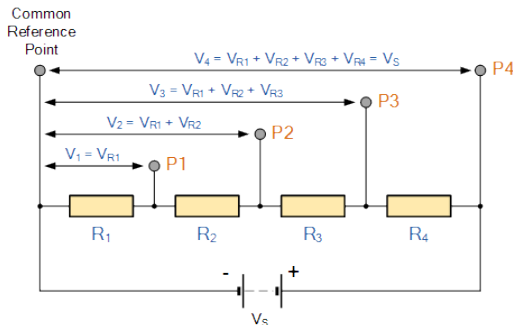
$$I = V_{AB} \div R = 20V \div 100\Omega = 200mA$$

Rede divisora de tensão

Sabemos pelos tutoriais anteriores que, conectando resistores em série através de uma diferença de potencial, podemos produzir um circuito divisor de tensão que fornecerá as razões das tensões em cada resistor em relação à tensão de alimentação na combinação total.

Isso produz o que geralmente é chamado de **Rede Divisora de Tensão** e que só se aplica a resistores conectados em série, porque como vimos no tutorial Resistores em Paralelo, resistores conectados em paralelo produzem o que é chamado de *rede divisora de corrente*. Considere o circuito em série abaixo.

Divisão de tensão



O circuito mostra o princípio de um circuito divisor de tensão onde a tensão de saída cai em cada resistor dentro da cadeia em série, com os resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 sendo referenciados a algum ponto de referência comum (geralmente zero volt).

Assim, para qualquer número de resistores conectados em série, dividindo a tensão de alimentação V_s pela resistência total, R_T dará a corrente que flui através do ramo em série como: $I = V_s / R_T$, (Lei de Ohm). Então as quedas de tensão individuais em cada resistor podem ser calculadas simplesmente como: $V = I \cdot R$ onde R representa o valor da resistência.

A tensão em cada ponto, P1, P2, P3 etc. aumenta de acordo com a soma das tensões em cada ponto até a tensão de alimentação, V_s e também podemos calcular as quedas de tensão individuais em qualquer ponto sem primeiro calcular a corrente do circuito por usando a seguinte fórmula.

Fórmula do divisor de tensão

$$V_{(x)} = \frac{R_{(x)}}{R_T} V_S$$

Onde, $V_{(x)}$ é a tensão a ser encontrada, $R_{(x)}$ é a resistência que produz a tensão, R_T é a resistência total em série e V_S é a tensão de alimentação.

Exemplo de Diferença de Potencial Nº2

No circuito acima, quatro resistores de valores, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$, $R_3 = 30\Omega$ e $R_4 = 40\Omega$ são conectados através de uma fonte de 100 volts DC. Usando a fórmula acima, calculou as quedas de tensão nos pontos P1, P2, P3 e P4 e também as quedas de tensão individuais em cada resistor dentro da cadeia em série.

1. As tensões nos vários pontos são calculadas como:

$$V_{P1} = \frac{R_1}{R_T} \times V_S = \frac{(10)100}{(10+20+30+40)} = 10 \text{ Volts}$$

$$V_{P2} = \frac{R_1 + R_2}{R_T} \times V_S = \frac{(10 + 20)100}{(10+20+30+40)} = 30 \text{ Volts}$$

$$V_{P3} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_T} \times V_S = \frac{(10+20+30)100}{(10+20+30+40)} = 60 \text{ Volts}$$

$$V_{P4} = V_S = 100 \text{ Volts}$$

2. As quedas de tensão individuais em cada resistor são calculadas como:

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{100V}{(10+20+30+40)} = \frac{100V}{100\Omega} = 1 \text{ Ampere}$$

$$V_{R1} = I \times R_1 = 1 \times 10 = 10 \text{ Volts}$$

$$V_{R2} = I \times R_2 = 1 \times 20 = 20 \text{ Volts}$$

$$V_{R3} = I \times R_3 = 1 \times 30 = 30 \text{ Volts}$$

$$V_{R4} = I \times R_4 = 1 \times 40 = 40 \text{ Volts}$$

Então, usando esta equação, podemos dizer que a queda de tensão em qualquer resistor em um circuito em série é proporcional à magnitude do resistor e a tensão total perdida em todos os resistores deve ser igual à fonte de tensão, conforme definido pela Lei de Tensão de Kirchhoff. Assim, usando a **equação do divisor de tensão**, para qualquer número de resistores em série, a queda de tensão em qualquer resistor individual pode ser encontrada.

Até agora vimos que a tensão é aplicada a um resistor ou circuito e que a corrente flui através e ao redor de um circuito. Mas há uma terceira variável que também podemos aplicar a resistores e redes de resistores. A potência é um produto de tensão e corrente e a unidade básica de medida de potência é o watt.

No próximo capítulo sobre Resistores, vamos examinar a potência dissipada (consumida) pela resistência na forma de calor e que a potência total dissipada por um circuito resistivo, seja ele série, paralelo ou uma combinação dos dois, simplesmente some as potências dissipadas por cada resistor.

Classificação de potência do resistor

A energia elétrica é absorvida por uma resistência, pois é o produto da tensão e da corrente com algumas resistências convertendo essa energia em calor.

Quando uma corrente elétrica passa por um resistor devido à presença de uma tensão através dele, a energia elétrica é perdida pelo resistor na forma de calor e quanto maior esse fluxo de corrente, mais quente o resistor ficará. Isso é conhecido como a **classificação de potência do resistor**.

Os resistores são classificados pelo valor de sua resistência e pela potência elétrica dada em watts, (W) que eles podem dissipar com segurança com base principalmente em seu tamanho. Cada resistor tem uma potência máxima que é determinada pelo seu tamanho físico como geralmente, quanto maior sua área de superfície, mais energia pode dissipar com segurança no ar ambiente ou em um dissipador de calor.

Um resistor pode ser usado em qualquer combinação de tensão (dentro do razoável) e corrente, desde que sua “classificação de potência de dissipação” não seja excedida com a classificação de potência do resistor indicando quanta potência o resistor pode converter em calor ou absorver sem nenhum dano a si mesmo. A **classificação de potência do resistor** às vezes é chamada de classificação de potência dos resistores e é definida como *a quantidade de calor que um elemento resistivo pode dissipar por um período indefinido de tempo sem degradar seu desempenho*.

A potência nominal dos resistores pode variar muito, de menos de um décimo de watt a muitas centenas de watts, dependendo de seu tamanho, construção e temperatura ambiente de operação. A maioria dos resistores tem sua potência resistiva máxima dada para uma temperatura ambiente de +70 ° C ou abaixo.

A energia elétrica é a taxa de tempo em que a energia é usada ou consumida (convertida em calor). A unidade padrão de potência elétrica é o Watt, símbolo W e a potência nominal dos resistores também é dada em Watts. Tal como acontece com outras grandezas elétricas, prefixos são anexados à palavra “Watt” quando expressam quantidades muito grandes ou muito pequenas de potência do resistor. Alguns dos mais comuns são:

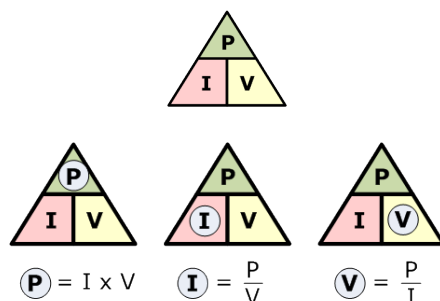
Unidades de Energia Elétrica

Unidade	Símbolo	Valor	Abreviação
miliwatt	mW	1/1.000 watts	10^{-3} W
quilowatt	kW	1.000 watts	10^3 W
megawatt	MW	1.000.000 watts	10^6 W

Potência do resistor (P)

Sabemos pela Lei de Ohm que quando uma corrente flui através de uma resistência, uma tensão cai sobre ela produzindo um produto que se relaciona com a potência.

Em outras palavras, se uma resistência é submetida a uma tensão, ou se ela conduz uma corrente, ela sempre consumirá energia elétrica e podemos sobrepor essas três grandezas de potência, tensão e corrente em um triângulo chamado **Triângulo de Potência** com a potência, que seria dissipado como calor no resistor na parte superior, com a corrente consumida e a tensão através dela na parte inferior, conforme mostrado.



O triângulo de potência acima é ótimo para calcular a potência dissipada em um resistor se soubermos os valores da tensão através dele e da corrente que flui através dele. Mas também podemos calcular a potência dissipada por uma resistência usando a Lei de Ohm.

A lei de Ohms nos permite calcular a dissipação de potência dado o valor da resistência do resistor. Usando a Lei de Ohms é possível obter duas variações alternativas da expressão acima para a potência do resistor se conhecermos os valores de apenas dois, a tensão, a corrente ou a resistência como segue:

[$P = V \times I$] Potência = Volts x Amps
[$P = I^2 \times R$] Potência = Corrente² x Ohms
[$P = V^2 \div R$] Potência = Volts² ÷ Ohms

A dissipação de energia elétrica de qualquer resistor em um circuito CC pode ser calculada usando uma das três fórmulas padrão a seguir:

$$\text{Power (P)} = V \times I = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

Onde:

- V é a tensão no resistor em Volts
- I está na corrente que flui através do resistor em Amperes
- R é a resistência do resistor em Ohms (Ω)

Como a potência dissipada do resistor está ligada ao seu tamanho físico, um resistor de 1/4 (0,250)W é fisicamente menor que um resistor de 1W, e os resistores com o mesmo valor ôhmico também estão disponíveis em diferentes potências ou potências. Resistores de carbono, por exemplo, são comumente feitos em potências de 1/8 (0,125) W, 1/4 (0,250)W, 1/2 (0,5)W, 1W e 2 Watts.

De um modo geral, quanto maior o tamanho físico, maior a classificação de potência. No entanto, é sempre melhor selecionar um resistor de tamanho específico que seja capaz de dissipar duas ou mais vezes a potência calculada. Quando são necessários resistores com classificações de potência mais altas, os resistores de fio enrolado geralmente são usados para dissipar o calor excessivo.

Modelo	Potência	Estabilidade
Filme metálico	Muito baixo em menos de 3 Watts	Alta 1%
Carbono	Baixo em menos de 5 Watts	Baixo 20%
Enrolado	Alta até 500 Watts	Alta 1%

Resistores de Energia

Os resistores de potência de fio enrolado vêm em uma variedade de designs e tipos, desde os tipos de corpo de alumínio de 25 watts montados em dissipador de calor menor padrão, como vimos anteriormente, até os resistores de potência tubulares maiores de cerâmica ou porcelana de 1000 watts usados para elementos de aquecimento.



Resistor de Energia Típico

O valor da resistência dos resistores de fio enrolado é muito baixo (valores ôhmicos baixos) em comparação com os tipos de filme de carbono ou metal. A faixa resistiva de um resistor de potência varia de menos de 1Ω (R005) até apenas $100k\Omega$, pois valores de resistência maiores exigiriam fio de calibre fino que falharia facilmente.

Resistores de baixo valor ôhmico e de baixa potência são geralmente usados para aplicações de detecção de corrente onde, usando a lei de ohm, a corrente que flui através da resistência dá origem a uma queda de tensão através dela.

Esta tensão pode ser medida para determinar o valor da corrente que flui no circuito. Este tipo de resistor é usado em equipamentos de medição de teste e fontes de alimentação controladas.

Os resistores de potência de fio enrolado maiores são feitos de fio resistente à corrosão enrolado em um molde de porcelana ou cerâmica e geralmente são usados para dissipar altas correntes de energização, como as geradas no controle do motor, eletroímã ou controle de elevador/guindaste e circuitos de frenagem do motor.

Geralmente, esses tipos de resistores têm potências padrão de até 500 Watts e geralmente são conectados entre si para formar os chamados “bancos de resistência”.

Outra característica útil dos resistores de potência de fio enrolado está no uso de elementos de aquecimento como os usados para fogos elétricos, torradeira, ferros etc. geralmente é feito de Níquel-Cromo (Nicromo) permitindo temperaturas de até 1200°C .

Todos os resistores de carbono, filme metálico ou bobinado obedecem à Lei de Ohm ao calcular seu valor de potência máxima (watts). Também vale a pena notar que quando dois resistores são conectados em paralelo, sua potência geral é aumentada. Se ambos os resistores tiverem o mesmo valor e a mesma potência nominal, a potência total será dobrada.

Exemplo de classificação de potência do resistor No1

Qual é a potência máxima em watts de um resistor fixo que tem uma tensão de 12 volts em seus terminais e uma corrente de 50 miliamperes fluindo através dele.

Dado que conhecemos os valores da tensão e da corrente acima, podemos substituir esses valores na seguinte equação: $P = V \cdot I$.

$$\begin{aligned} \text{Power (P)} &= \text{Volts (V)} \times \text{Amperes (I)} \\ \therefore P &= V \times I = 12 \times 0.05 = 600\text{mW or } 0.6\text{ Watts} \end{aligned}$$

Exemplo de classificação de potência do resistor No2

Calcule a corrente máxima segura que pode passar por um resistor de 1,8 K Ω avaliado em 0,5 Watts.

Novamente, como sabemos a potência nominal dos resistores e sua resistência, podemos agora substituir esses valores na equação de potência padrão de: $P = I^2 R$.

$$\begin{aligned} P &= I^2 R \\ \text{therefore, } I &= \sqrt{\frac{P}{R}} \\ &= \sqrt{\frac{0.5}{1800}} = 0.016\text{A or } 16\text{mA} \end{aligned}$$

Todos os resistores têm uma classificação máxima de potência dissipada, que é a quantidade máxima de potência que pode dissipar com segurança sem se danificar. Resistores que excedem sua potência máxima tendem a se tornar fumaça, geralmente muito rapidamente, e danificam o circuito ao qual estão conectados. Se um resistor for usado próximo à sua potência máxima, então é necessário algum tipo de dissipador de calor ou resfriamento.

A potência nominal do resistor é um parâmetro importante a ser considerado ao escolher um resistor para uma aplicação específica. O trabalho de um resistor é resistir ao fluxo de corrente através de um circuito e faz isso dissipando a energia indesejada como calor. A seleção de um resistor de pequeno valor de potência quando se espera uma alta dissipação de potência fará com que o resistor superaqueça, destruindo tanto o resistor quanto o circuito.

Até agora, consideramos resistores conectados a uma fonte CC estável, mas no próximo tutorial sobre *Resistores*, veremos o comportamento de resistores conectados a uma fonte CA senoidal e mostraremos que a tensão, a corrente e, portanto, a potência consumida por um resistor usado em um circuito CA estão todos em fase um com o outro.

Referência bibliográfica: https://www.electronics-tutorials.ws/resistor/res_1.html



Capítulo 8

Capacitores

Neste capítulo, vamos explorar os capacitores, componentes essenciais em muitos tipos de circuitos eletrônicos. Vamos entender o que são capacitores, como eles funcionam, suas diferentes classificações e suas aplicações e importância na manutenção de sistemas eletrônicos.

Introdução aos capacitores

Capacitores são dispositivos passivos simples que podem armazenar uma carga elétrica em suas placas quando conectados a uma fonte de tensão

Neste capítulo de introdução aos capacitores, veremos que os capacitores são componentes eletrônicos passivos que consistem em duas ou mais peças de material condutor separadas por um material isolante. O capacitor é um componente que tem a capacidade ou “capacidade” de armazenar energia na forma de uma carga elétrica produzindo uma diferença de potencial (tensão *estática*) em suas placas, bem como uma pequena bateria recarregável.

Existem muitos tipos diferentes de capacitores disponíveis, desde pequenas esferas de capacitor usadas em circuitos de ressonância até grandes capacitores de correção de fator de potência, mas todos eles fazem a mesma coisa, armazenam carga. Em sua forma básica, um capacitor consiste em duas ou mais placas condutoras paralelas (metal) que não estão conectadas ou se tocam, mas são eletricamente separadas pelo ar ou por algum tipo de material isolante bom. Este material isolante pode ser papel encerado, mica, cerâmica, plástico ou alguma forma de gel líquido usado em capacitores eletrolíticos.

Como uma boa introdução aos capacitores, vale a pena notar que a camada isolante entre as placas dos capacitores é comumente chamada de dielétrico.



Um capacitor típico

Devido a essa camada isolante, a corrente CC não pode fluir através do capacitor, pois o bloqueia, permitindo que uma tensão esteja presente nas placas na forma de uma carga elétrica.

As placas de metal condutora de um capacitor podem ser quadradas, circulares ou retangulares, ou podem ser de forma cilíndrica ou esférica com a forma geral, tamanho e construção de um capacitor de placas paralelas, dependendo de sua aplicação e tensão nominal.

Quando usado em um circuito de corrente contínua ou CC, um capacitor carrega até sua tensão de alimentação, mas bloqueia o fluxo de corrente através dele porque o dielétrico de um capacitor é não condutor e basicamente um isolante. No

entanto, quando um capacitor é conectado a uma corrente alternada ou circuito CA, o fluxo da corrente parece passar direto pelo capacitor com pouca ou nenhuma resistência.

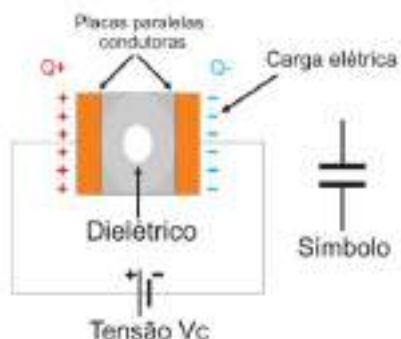
Existem dois tipos de carga elétrica, uma carga positiva na forma de prótons e uma carga negativa na forma de elétrons. Quando uma tensão CC é colocada em um capacitor, a carga positiva (+ve) se acumula rapidamente em uma placa, enquanto uma carga negativa (-ve) correspondente e oposta se acumula na outra placa. Para cada partícula de carga +ve que chega a uma placa, uma carga de mesmo sinal sairá da placa -ve.

Então as placas permanecem com carga neutra e uma diferença de potencial devido a esta carga é estabelecida entre as duas placas. Uma vez que o capacitor atinge sua condição de estado estacionário, uma corrente elétrica é incapaz de fluir através do próprio capacitor e ao redor do circuito devido às propriedades isolantes do dielétrico usado para separar as placas.

O fluxo de elétrons nas placas é conhecido como corrente de carga dos capacitores, que continua a fluir até que a tensão em ambas as placas (e, portanto, no capacitor) seja igual à tensão aplicada V_c . Neste ponto, diz-se que o capacitor está “totalmente carregado” com elétrons.

A força ou taxa desta corrente de carga está em seu valor máximo quando as placas estão totalmente descarregadas (condição inicial) e reduz lentamente em valor para zero à medida que as placas carregam até uma diferença de potencial entre as placas dos capacitores igual à tensão da fonte.

A quantidade de diferença de potencial presente no capacitor depende de quanta carga foi depositada nas placas pelo trabalho realizado pela tensão da fonte e também de quanta capacitância o capacitor possui e isso é ilustrado abaixo.



O capacitor de placas paralelas é a forma mais simples de capacitor. Pode ser construído utilizando duas chapas metálicas ou metalizadas a uma distância paralela entre si, com seu valor de capacitância em Farads, sendo fixada pela área superficial das chapas condutoras e pela distância de separação entre elas. A alteração de quaisquer dois desses valores altera o valor de sua capacitância e isso forma a base de operação dos capacitores variáveis.

Além disso, como os capacitores armazenam a energia dos elétrons na forma de uma carga elétrica nas placas, quanto maiores as placas e/ou menor sua separação, maior será a carga que o capacitor mantém para qualquer tensão entre suas placas. Em outras palavras, placas maiores, distância menor, mais capacitância.

Ao aplicar uma tensão a um capacitor e medir a carga nas placas, a razão entre a carga Q e a tensão V dará o valor da capacitância do capacitor e, portanto, é dado como: $C = Q/V$ esta equação também pode ser re-arranjado para dar a fórmula familiar para a quantidade de carga nas placas como: $Q = C \times V$

Embora tenhamos dito que a carga é armazenada nas placas de um capacitor, é mais exato dizer que a energia dentro da carga é armazenada em um “campo eletrostático” entre as duas placas. Quando uma corrente elétrica flui para o capacitor, ele carrega, então o campo eletrostático se torna muito mais forte, pois armazena mais energia entre as placas.

Da mesma forma, à medida que a corrente flui para fora do capacitor, descarregando-o, a diferença de potencial entre as duas placas diminui e o campo eletrostático diminui à medida que a energia se move para fora das placas.

A propriedade de um capacitor de armazenar carga em suas placas na forma de um campo eletrostático é chamada de Capacitância do capacitor. Não apenas isso, mas a capacitância também é a propriedade de um capacitor que resiste à mudança de tensão através dele.

A capacitância de um capacitor

Capacitância é a propriedade elétrica de um capacitor e é a medida da capacidade de um capacitor de armazenar uma carga elétrica em suas duas placas com a unidade de capacitância sendo o Farad (abreviado para F) em homenagem ao físico britânico Michael Faraday.

A capacitância é definida como sendo que um capacitor tem a capacitância de Um Farad quando uma carga de Um Coulomb é armazenada nas placas por uma tensão de um volt. Observe que a capacitância C é sempre positiva em valor e não tem

unidades negativas. No entanto, o Farad é uma unidade de medida muito grande para usar por conta própria, então submúltiplos do Farad são geralmente usados, como micro-farads, nano-farads e pico-farads, por exemplo.

Unidades padrão de capacitância

Microfarad (μF) $1\mu\text{F} = 1/1.000.000 = 0,000001 = 10^{-6} \text{ F}$

Nanofarad (nF) $1\text{nF} = 1/1.000.000.000 = 0,000000001 = 10^{-9} \text{ F}$

Picofarad (pF) $1\text{pF} = 1/1.000.000.000.000 = 0,000000000001 = 10^{-12} \text{ F}$

Em seguida, usando as informações acima, podemos construir uma tabela simples para nos ajudar a converter entre pico-Farad (pF), nano-Farad (nF), micro-Farad (μF) e Farads (F), conforme mostrado.

Pico-Farad (pF)	Nano-Farad (nF)	Micro-Farad (μF)	Farad (F)
1.000	1,0	0,001	
10.000	10,0	0,01	
1.000.000	1.000	1,0	
	10.000	10,0	
	100.000	100	
	1.000.000	1.000	0,001
		10.000	0,01
		100.000	0,1
		1.000.000	1,0

Introdução aos Capacitores - Capacitância

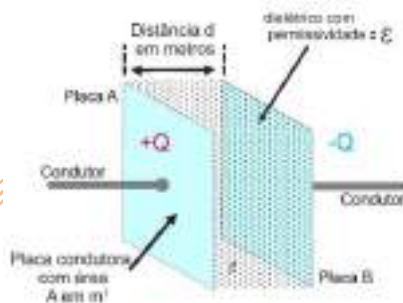
A capacitância de um capacitor de placas paralelas é proporcional à área, A em metros² da menor das duas placas e inversamente proporcional à distância ou

separação, d (ou seja, a espessura dielétrica) dada em metros entre essas duas placas condutoras.

A equação generalizada para a capacitância de um capacitor de placas paralelas é dada como: $C = \epsilon (A/d)$ onde ϵ representa a permissividade absoluta do material dielétrico que está sendo usado. A constante dielétrica, ϵ_0 também conhecida como “permissividade do espaço livre” tem o valor da constante $8,854 \times 10^{-12}$ Farads por metro.

Para tornar a matemática um pouco mais fácil, esta constante dielétrica do espaço livre, ϵ_0 , que pode ser escrita como: $1/(4\pi \times 9 \times 10^9)$, também pode ter as unidades de picofarads (pF) por metro como a constante dando: 8,85 pelo valor do espaço livre. Observe que o valor de capacitância resultante estará em picofarads e não em farads.

Geralmente, as placas condutoras de um capacitor são separadas por algum tipo de material isolante ou gel em vez de um vácuo perfeito. Ao calcular a capacitância de um capacitor, podemos considerar a permissividade do ar, e especialmente do ar seco, como sendo o mesmo valor do vácuo, pois são muito próximos.



Introdução aos Capacitores - Exemplo1

Um capacitor é construído a partir de duas placas de metal condutoras de 30 cm x 50 cm, espaçadas 6 mm uma da outra, e usa ar seco como seu único material dielétrico. Calcule a capacitância do capacitor.

Using: $C = \epsilon_o \frac{A}{d}$

where: $\epsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}$

$A = 0.3 \times 0.5 \text{ m}^2$ and $d = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$C = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times (0.3 \times 0.5)}{6 \times 10^{-3}} = 0.221 \text{ nF}$$

Então o valor do capacitor que consiste em duas placas separadas por ar é calculado como 0,221nF, ou 221pF.

Introdução aos Capacitores – O Dielétrico

Assim como o tamanho total das placas condutoras e sua distância ou espaçamento entre si, outro fator que afeta a capacitância geral do dispositivo é o tipo de material dielétrico que está sendo usado. Em outras palavras, a “Permissividade” (ϵ) do dielétrico.

As placas condutoras de um capacitor são geralmente feitas de uma folha de metal ou um filme de metal permitindo o fluxo de elétrons e carga, mas o material dielétrico usado é sempre um isolante. Os vários materiais isolantes usados como dielétrico em um capacitor diferem em sua capacidade de bloquear ou passar uma carga elétrica.

Este material dielétrico pode ser feito de vários materiais isolantes ou combinações desses materiais, sendo os tipos mais comuns: ar, papel, poliéster, polipropileno, Mylar, cerâmica, vidro, óleo ou uma variedade de outros materiais.

O fator pelo qual o material dielétrico, ou isolante, aumenta a capacitância do capacitor em relação ao ar é conhecido como constante dielétrica, k e um material dielétrico com uma constante dielétrica alta é um isolante melhor do que um material dielétrico com uma constante dielétrica mais baixa. A constante dielétrica é uma quantidade adimensional, pois é relativa ao espaço livre.

A permissividade real ou “permissividade complexa” do material dielétrico entre as placas é então o produto da permissividade do espaço livre (ϵ_o) e a permissividade relativa (ϵ_r) do material sendo usado como dielétrico e é dada como:

Permissividade Complexa

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r$$

Em outras palavras, se tomarmos a permissividade do espaço livre, ϵ_0 como nosso nível base e igualarmos a um, quando o vácuo do espaço livre for substituído por algum outro tipo de material isolante, sua permissividade de seu dielétrico é referenciada a o dielétrico de base do espaço livre dando um fator de multiplicação conhecido como “permissividade relativa”, ϵ_r . Assim, o valor da permissividade complexa ϵ , será sempre igual à permissividade relativa vezes um.

Unidades típicas de permissividade dielétrica, ϵ ou constante dielétrica para materiais comuns são: Vácuo Puro = 1,0000, Ar = 1,0006, Papel = 2,5 a 3,5, Vidro = 3 a 10, Mica = 5 a 7, Madeira = 3 a 8 e Óxido de Metal Pós = 6 a 20 etc. Isso nos dá uma equação final para a capacitância de um capacitor como:

$$\text{Capacitance, } C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \text{ Farads}$$

Um método usado para aumentar a capacitância geral de um capacitor mantendo seu tamanho pequeno é “intercalar” mais placas juntas dentro de um único corpo de capacitor. Em vez de apenas um conjunto de placas paralelas, um capacitor pode ter muitas placas individuais conectadas, aumentando assim a área da superfície, A das placas.

Para um capacitor de placas paralelas padrão como mostrado acima, o capacitor tem duas placas, rotuladas A e B. Portanto, como o número de placas do capacitor é dois, podemos dizer que $n = 2$, onde “ n ” representa o número de placas. Então nossa equação acima para um único capacitor de placas paralelas deve ser:

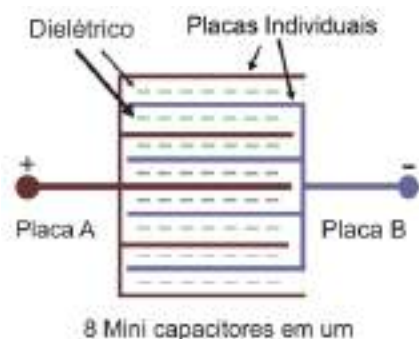
$$\text{Capacitance, } C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (n-1) A}{d} \text{ Farads}$$

No entanto, o capacitor pode ter duas placas paralelas, mas apenas um lado de cada placa está em contato com o dielétrico no meio, pois o outro lado de cada placa forma a parte externa do capacitor. Se pegarmos as duas metades das placas e as juntarmos, efetivamente teremos apenas “uma” placa inteira em contato com o dielétrico.

Quanto a um único capacitor de placa paralela, $n - 1 = 2 - 1$ que é igual a 1 como $C = (\epsilon_0 * \epsilon_r * 1 * A) / d$ é exatamente o mesmo que dizer: $C = (\epsilon_0 * \epsilon_r * A) / d$ que é a equação padrão acima.

Agora suponha que temos um capacitor composto de 9 placas intercaladas, então $n = 9$ como mostrado a seguir.

Capacitor multiplicas



Agora temos cinco placas conectadas a um fio (A) e quatro placas ao outro fio (B). Então AMBOS os lados das quatro placas conectadas ao condutor B estão em contato com o dielétrico, enquanto apenas um lado de cada uma das placas externas conectadas a A está em contato com o dielétrico. Então, como acima, a área útil da superfície de cada conjunto de placas é de apenas oito e sua capacitância é, portanto, dada como:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (n-1)A}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (9-1)A}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r 8A}{d}$$

Os capacitores modernos podem ser classificados de acordo com as características e propriedades de seu dielétrico isolante:

Baixa perda, alta estabilidade, como mica, cerâmica de baixo K, poliestireno.

Perda média, estabilidade média, como papel, filme plástico, cerâmica de alto K.

Capacitores polarizados como eletrolíticos, tântalo.

Introdução aos Capacitores - Classificação de Tensão

Todos os capacitores têm uma tensão nominal máxima e, ao selecionar um capacitor, deve-se considerar a quantidade de tensão a ser aplicada no capacitor. A quantidade máxima de tensão que pode ser aplicada ao capacitor sem danos ao seu material dielétrico é geralmente dada nas folhas de dados como: WV , (tensão de trabalho) ou como WV DC , (tensão de trabalho CC).

Se a tensão aplicada no capacitor se tornar muito grande, o dielétrico se romperá (conhecido como ruptura elétrica) e ocorrerá um arco entre as placas do capacitor, resultando em um curto-circuito. A tensão de trabalho do capacitor depende do tipo de material dielétrico que está sendo usado e sua espessura.

A tensão de trabalho CC de um capacitor é exatamente isso, a tensão CC máxima e NÃO a tensão CA máxima como um capacitor com uma tensão nominal de 100 volts CC não pode ser submetido com segurança a uma tensão alternada de 100 volts. Uma vez que uma tensão alternada com valor RMS de 100 volts terá um valor de pico superior a 141 volts! ($\sqrt{2} \times 100$).

Então, um capacitor que é necessário para operar em 100 volts AC deve ter uma tensão de trabalho de pelo menos 200 volts. Na prática, um capacitor deve ser selecionado de modo que sua tensão de trabalho seja CC ou CA seja pelo menos 50% maior do que a tensão efetiva mais alta a ser aplicada a ele.

Outro fator que afeta a operação de um capacitor é o vazamento dielétrico. O vazamento dielétrico ocorre em um capacitor como resultado de uma corrente de fuga indesejada que flui através do material dielétrico.

Geralmente, assume-se que a resistência do dielétrico é extremamente alta e um bom isolante bloqueando o fluxo de corrente contínua através do capacitor (como em um capacitor perfeito) de uma placa para a outra.

No entanto, se o material dielétrico for danificado devido a tensão excessiva ou temperatura excessiva, a corrente de fuga através do dielétrico se tornará extremamente alta, resultando em uma rápida perda de carga nas placas e um superaquecimento do capacitor, resultando em falha prematura do capacitor. Então, nunca use um capacitor em um circuito com tensões mais altas do que o capacitor é classificado, caso contrário, ele pode ficar quente e explodir.

Introdução aos Capacitores Resumo

Vimos neste tutorial que o trabalho de um capacitor é armazenar carga elétrica em suas placas. A quantidade de carga elétrica que um capacitor pode armazenar em suas placas é conhecida como valor de capacitância e depende de três fatores principais.

Área de Superfície – a área de superfície, A das duas placas condutoras que compõem o capacitor, quanto maior a área, maior a capacitância.

Distância – a distância, d entre as duas placas, quanto menor a distância, maior a capacitância.

Material dielétrico – o tipo de material que separa as duas placas chamado de “dielétrico”, quanto maior a permissividade do dielétrico maior a capacitância.

Vimos também que um capacitor consiste em placas de metal que não se tocam, mas são separadas por um material chamado dielétrico. O dielétrico de um capacitor pode ser ar, ou mesmo vácuo, mas geralmente é um material isolante não condutor, como papel encerado, vidro, mica, diferentes tipos de plásticos etc. O dielétrico oferece as seguintes vantagens:

A constante dielétrica é a propriedade do material dielétrico e varia de um material para outro aumentando a capacitância por um fator de k .

O dielétrico fornece suporte mecânico entre as duas placas, permitindo que as placas fiquem mais próximas sem se tocarem.

A permissividade do dielétrico aumenta a capacitância.

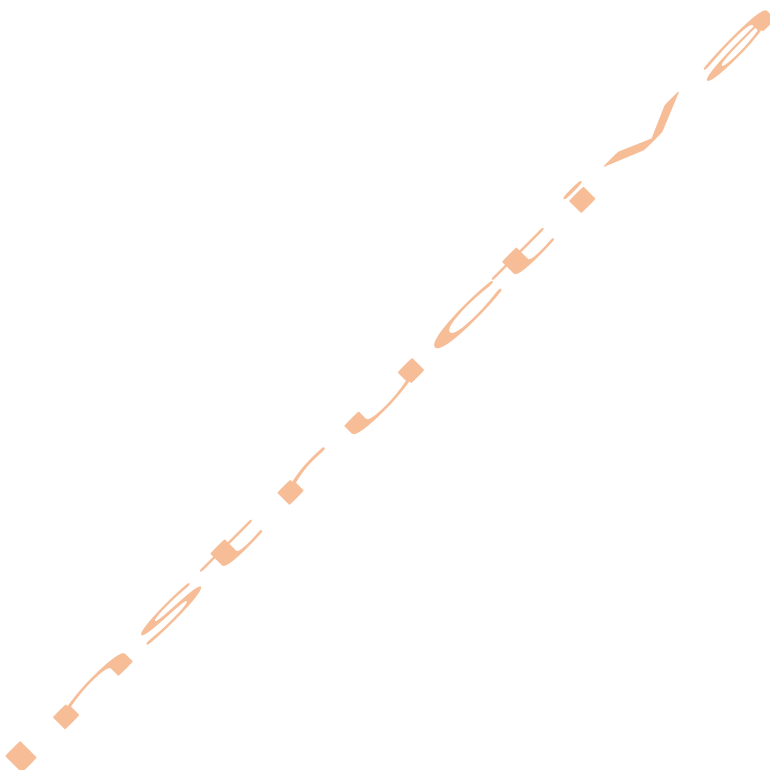
O dielétrico aumenta a tensão máxima de operação em comparação com o ar. Os capacitores podem ser usados em muitas aplicações e circuitos diferentes, como bloqueio de corrente CC durante a passagem de sinais de áudio, pulsos ou corrente alternada ou outras formas de onda que variam no tempo. Essa capacidade de bloquear correntes CC permite que os capacitores sejam usados para suavizar as tensões de saída das fontes de alimentação, para remover picos indesejados de sinais que, de outra forma, tenderiam a causar danos ou disparos falsos de semicondutores ou componentes digitais.

Os capacitores também podem ser usados para ajustar a resposta de frequência de um circuito de áudio ou para acoplar estágios de amplificador separados que devem ser protegidos da transmissão de corrente CC.

Quando usado em fontes DC um capacitor tem impedância infinita (circuito aberto), em frequências muito altas um capacitor tem impedância zero (curto-circuito). Todos os capacitores têm uma tensão nominal máxima de trabalho DC (WVDC), portanto, é aconselhável selecionar um capacitor com uma tensão nominal pelo menos 50% maior que a tensão de alimentação.

Vimos neste tutorial de introdução aos capacitores que há uma grande variedade de estilos e tipos de capacitores, cada um com suas vantagens, desvantagens e características particulares. Incluir todos os tipos tornaria esta seção

do tutorial muito grande, portanto, no próximo tutorial sobre capacitores, vou limitá-los aos tipos mais usados.



Tipos de capacitor

Existe uma grande variedade de diferentes tipos de capacitores disponíveis no mercado e cada um tem seu próprio conjunto de características e aplicações.

Os tipos de capacitores disponíveis variam de capacitores de corte delicados muito pequenos usados em osciladores ou circuitos de rádio, até capacitores do tipo lata de metal de grande potência usados em circuitos de correção e suavização de energia de alta tensão.

As comparações entre os diferentes *tipos de capacitores* geralmente são feitas em relação ao dielétrico utilizado entre as placas. Assim como os resistores, também existem tipos variáveis de capacitores que nos permitem variar seu valor de capacitância para uso em circuitos do tipo rádio ou “sintonização de frequência”.

Os tipos comerciais de capacitores são feitos de folha metálica entrelaçada com folhas finas de papel impregnado com parafina ou Mylar como material dielétrico. Alguns capacitores parecem tubos, isso ocorre porque as placas de folha de metal são enroladas em um cilindro para formar um pequeno pacote com o material dielétrico isolante entre eles.

Pequenos capacitores são geralmente construídos a partir de materiais cerâmicos e depois mergulhados em uma resina epóxi para selá-los. De qualquer forma, os capacitores desempenham um papel importante nos circuitos eletrônicos, então aqui estão alguns dos tipos mais “comuns” de capacitores disponíveis.

Capacitor dielétrico

Os capacitores dielétricos são geralmente do tipo variável, onde uma variação contínua de capacitância é necessária para sintonizar transmissores, receptores e rádios transistorizados. Os capacitores dielétricos variáveis são do tipo multiplacas espaçadas a ar que possuem um conjunto de placas fixas (as palhetas do estator) e um conjunto de placas móveis (as palhetas do rotor) que se movem entre as placas fixas.

A posição das placas móveis em relação às placas fixas determina o valor total da capacitância. A capacitância é geralmente máxima quando os dois conjuntos de placas são totalmente engrenados. Os capacitores de sintonia do tipo de alta tensão têm espaçamentos ou espaços de ar relativamente grandes entre as placas com tensões de ruptura atingindo muitos milhares de volts.

Símbolo de capacitor variável



Além dos tipos de capacitores continuamente variáveis, também estão disponíveis capacitores variáveis do tipo predefinido, chamados Trimmers . Estes são geralmente pequenos dispositivos que podem ser ajustados ou “pré-ajustados” para um determinado valor de capacitância com o auxílio de uma pequena chave de fenda e estão disponíveis em capacitâncias muito pequenas de 500pF ou menos e são não polarizados.

Tipo de capacitor de filme

Capacitores de filme são os mais comumente disponíveis de todos os tipos de capacitores, consistindo em uma família relativamente grande de capacitores com a diferença em suas propriedades dielétricas. Estes incluem poliéster (Mylar), poliestireno, polipropileno, policarbonato, papel metalizado, Teflon, etc. Os tipos de capacitores de filme estão disponíveis em faixas de capacitância de 5pF a 100uF dependendo do tipo real de capacitor e sua tensão nominal. Os capacitores de filme também vêm em uma variedade de formas e estilos de caixa que incluem:

Wrap & Fill (Oval & Round) – onde o capacitor é envolto em uma fita plástica apertada e tem as extremidades preenchidas com epóxi para selá-las.

Caixa de epóxi (retangular e redonda) - onde o capacitor é envolto em um invólucro de plástico moldado que é então preenchido com epóxi.

Metal Hermeticamente Selado (Retangular e Redondo) – onde o capacitor é envolto em um tubo ou lata de metal e novamente selado com epóxi.

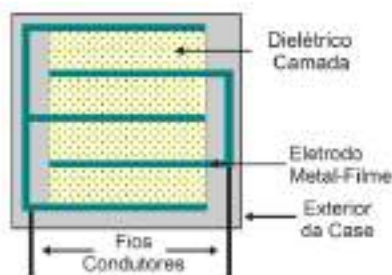
com todos os estilos de caixa acima disponíveis em derivações axiais e radiais.

Capacitores de filme que usam poliestireno, policarbonato ou teflon como seus dielétricos são às vezes chamados de “capacitores de plástico”. A construção dos

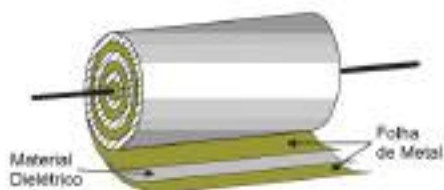
capacitores de filme plástico é semelhante à dos capacitores de filme de papel, mas usa um filme plástico em vez de papel.

A principal vantagem dos tipos de capacitores de filme plástico em comparação com os tipos de papel impregnado é que eles operam bem em condições de alta temperatura, têm tolerâncias menores, vida útil muito longa e alta confiabilidade. Exemplos de capacitores de filme são o filme metalizado retangular e os tipos de filme e folha cilíndrico, conforme mostrado abaixo.

Tipo de derivação radial



Tipo de derivação axial



Os tipos de capacitor de filme e folha são feitos de tiras longas e finas de folha de metal fina com o material dielétrico ensanduichado, que são enrolados em um rolo apertado e depois selados em papel ou tubos de metal.



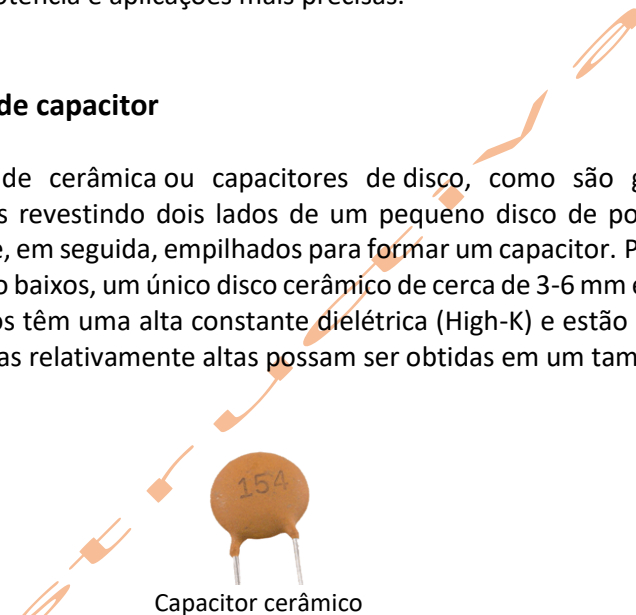
Capacitor de filme

Esses tipos de filme requerem um filme dielétrico muito mais espesso para reduzir o risco de rasgos ou perfurações no filme e, portanto, são mais adequados para valores de capacitância mais baixos e tamanhos de caixa maiores.

Os capacitores de folha metalizada têm o filme condutor metalizado pulverizado diretamente em cada lado do dielétrico, o que confere ao capacitor propriedades de autocura e, portanto, pode usar filmes dielétricos muito mais finos. Isso permite valores de capacitância mais altos e tamanhos de caixa menores para uma determinada capacitância. Capacitores de filme e folha são geralmente usados para maior potência e aplicações mais precisas.

Tipos de cerâmica de capacitor

Capacitores de cerâmica ou capacitores de disco, como são geralmente chamados, são feitos revestindo dois lados de um pequeno disco de porcelana ou cerâmica com prata e, em seguida, empilhados para formar um capacitor. Para valores de capacitância muito baixos, um único disco cerâmico de cerca de 3-6 mm é usado. Os capacitores cerâmicos têm uma alta constante dielétrica (High-K) e estão disponíveis para que capacitâncias relativamente altas possam ser obtidas em um tamanho físico pequeno.



Eles exibem grandes mudanças não lineares na capacitância em relação à temperatura e, como resultado, são usados como capacitores de desacoplamento ou by-pass, pois também são dispositivos não polarizados. Os capacitores cerâmicos têm valores que variam de alguns picofarads a um ou dois microfarads, (μF), mas suas classificações de tensão são geralmente bastante baixas.

Os tipos de capacitores cerâmicos geralmente têm um código de 3 dígitos impresso em seu corpo para identificar seu valor de capacitância em pico-farads. Geralmente os dois primeiros dígitos indicam o valor dos capacitores e o terceiro dígito indica o número de zeros a serem adicionados. Por exemplo, um capacitor de disco cerâmico com as marcações 103 indicaria 10 e 3 zeros em pico-farads, o que equivale a 10.000 pF ou 10nF.

Da mesma forma, os dígitos 104 indicariam 10 e 4 zeros em pico-farads, o que equivale a 100.000 pF ou 100nF e assim por diante. Assim, na imagem do capacitor cerâmico acima os números 154 indicam 15 e 4 zeros em pico-farads, o que equivale a 150.000 pF ou 150nF ou 0,15μF. Os códigos de letras são usados às vezes para indicar seu valor de tolerância, como: J = 5%, K = 10% ou M = 20% etc.

Tipos eletrolíticos de capacitor

Capacitores eletrolíticos são geralmente usados quando são necessários valores de capacitância muito grandes. Aqui, em vez de usar uma camada de filme metálico muito fino para um dos eletrodos, é usada uma solução eletrolítica semilíquida na forma de uma geleia ou pasta que serve como segundo eletrodo (geralmente o cátodo).

O dielétrico é uma camada muito fina de óxido que é cultivada eletroquimicamente na produção com a espessura do filme sendo inferior a dez microns. Essa camada isolante é tão fina que é possível fazer capacitores com um grande valor de capacitância para um tamanho físico pequeno, pois a distância entre as placas, d , é muito pequena.



Capacitor eletrolítico

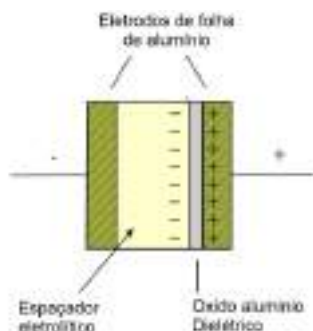
A maioria dos tipos de capacitores eletrolíticos são polarizados, ou seja, a tensão CC aplicada aos terminais do capacitor deve ser da polaridade correta, ou seja, positivo para o terminal positivo e negativo para o terminal negativo, pois uma polarização incorreta quebrará a camada de óxido isolante e podem ocorrer danos permanentes.

Todos os capacitores eletrolíticos polarizados têm sua polaridade claramente marcada com um sinal negativo para indicar o terminal negativo e esta polaridade deve ser seguida.

Capacitores eletrolíticos são geralmente usados em circuitos de fonte de alimentação CC devido à sua grande capacitância e tamanho pequeno para ajudar a reduzir a tensão de ondulação ou para aplicações de acoplamento e desacoplamento. Uma das principais desvantagens dos capacitores eletrolíticos é sua

classificação de tensão relativamente baixa e, devido à polarização dos capacitores eletrolíticos, segue-se que eles não devem ser usados em fontes CA. Os eletrolíticos geralmente vêm em duas formas básicas; Capacitores eletrolíticos de alumínio e capacitores eletrolíticos de tântalo.

Capacitor eletrolítico



1. Tipos de capacitor eletrolítico de alumínio

Existem basicamente dois tipos de capacitor eletrolítico de alumínio, o tipo folha simples e o tipo folha gravada. A espessura do filme de óxido de alumínio e a alta tensão de ruptura dão a esses capacitores valores de capacitância muito altos para seu tamanho.

As placas de alumínio do capacitor são anodizadas com uma corrente contínua. Este processo de anodização configura a polaridade do material da placa e determina qual lado da placa é positivo e qual lado é negativo.

O tipo de folha gravada difere do tipo de folha simples, pois o óxido de alumínio nas folhas de ânodo e cátodo foi quimicamente gravado para aumentar sua área de superfície e permissividade. Isso fornece um capacitor de tamanho menor do que um tipo de folha simples de valor equivalente, mas tem a desvantagem de não ser capaz de suportar altas correntes CC em comparação com o tipo simples. Além disso, sua faixa de tolerância é bastante grande em até 20%. Os valores típicos de capacitância para um capacitor eletrolítico de alumínio variam de 1uF até 47.000uF.

Os eletrolíticos de folha gravada são mais usados em circuitos de acoplamento, bloqueio CC e by-pass, enquanto os tipos de folha simples são mais adequados como capacitores de suavização em fontes de alimentação. Mas os eletrolíticos de alumínio são dispositivos “polarizados”, então inverter a tensão

aplicada nos terminais fará com que a camada isolante dentro do capacitor seja destruída junto com o capacitor. No entanto, o eletrólito usado dentro do capacitor ajuda a curar uma placa danificada se o dano for pequeno.

Como o eletrólito tem as propriedades de autocurar uma placa danificada, ele também tem a capacidade de reanodizar a placa de alumínio. Como o processo de anodização pode ser revertido, o eletrólito tem a capacidade de remover o revestimento de óxido da folha, como aconteceria se o capacitor fosse conectado com polaridade reversa. Como o eletrólito tem a capacidade de conduzir eletricidade, se a camada de óxido de alumínio fosse removida ou destruída, o capacitor permitiria que a corrente passasse de uma placa para a outra destruindo o capacitor, “então fique atento”.

2. Tipos de capacitor eletrolítico de tântalo

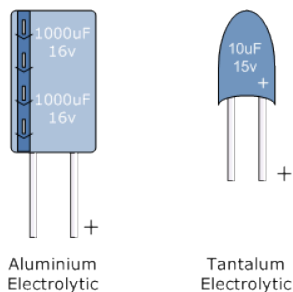
Capacitores eletrolíticos de tântalo e esferas de tântalo, estão disponíveis nos tipos eletrolítico úmido (folha) e seco (sólido), sendo o tântalo seco ou sólido o mais comum. Os capacitores de tântalo sólido usam dióxido de manganês como seu segundo terminal e são fisicamente menores que os capacitores de alumínio equivalentes.

As propriedades dielétricas do óxido de tântalo também são muito melhores do que as do óxido de alumínio, proporcionando correntes de fuga mais baixas e melhor estabilidade de capacitância, o que os torna adequados para uso em aplicações de bloqueio, desvio, desacoplamento, filtragem e temporização.

Além disso, os capacitores de tântalo, embora polarizados, podem tolerar ser conectados a uma tensão reversa muito mais facilmente do que os tipos de alumínio, mas são classificados em tensões de trabalho muito mais baixas. Os capacitores sólidos de tântalo são geralmente usados em circuitos onde a tensão CA é pequena em comparação com a tensão CC.

No entanto, alguns tipos de capacitores de tântalo contêm dois capacitores em um, conectados de negativo a negativo para formar um capacitor “não polarizado” para uso em circuitos CA de baixa tensão como um dispositivo não polarizado. Geralmente, o condutor positivo é identificado no corpo do capacitor por uma marca de polaridade, com o corpo de um capacitor de esferas de tântalo tendo uma forma geométrica oval. Os valores típicos de capacitância variam de 47nF a 470uF.

Capacitor eletrolítico de alumínio e tântalo



Os capacitores eletrolíticos são amplamente utilizados devido ao seu baixo custo e tamanho pequeno, mas existem três maneiras fáceis de destruir um capacitor eletrolítico:

Sobretensão – tensão excessiva fará com que a corrente vaze através do dielétrico, resultando em uma condição de curto-circuito.

Polaridade reversa – a tensão reversa causará autodestruição da camada de óxido e falha.

Sobret temperatura – o calor excessivo resseca o eletrolítico e reduz a vida útil de um capacitor eletrolítico.

No próximo capítulo sobre Capacitores, veremos algumas das principais características para mostrar que há mais no Capacitor do que apenas tensão e capacitância.

Características do capacitor

As características de um capacitor definem sua temperatura, tensão nominal e faixa de capacitância, bem como seu uso em uma aplicação específica.

Há uma variedade desconcertante de características e especificações de capacitores associadas ao humilde capacitor e ler as informações impressas no corpo de um capacitor às vezes pode ser difícil de entender, especialmente quando cores ou códigos numéricos são usados.

Cada família ou tipo de capacitor usa seu próprio conjunto exclusivo de características de capacitor e sistema de identificação, sendo alguns sistemas fáceis de entender e outros que usam letras, cores ou símbolos enganosos.

A melhor maneira de descobrir quais características do capacitor o rótulo significa é primeiro descobrir a que tipo de família o capacitor pertence se é de cerâmica, filme, plástico ou eletrolítico e, a partir disso, pode ser mais fácil identificar as características específicas do capacitor.

Mesmo que dois capacitores possam ter exatamente o mesmo valor de capacitância, eles podem ter diferentes classificações de tensão. Se um capacitor de tensão nominal menor for substituído por um capacitor de tensão nominal mais alta, o aumento da tensão pode danificar o capacitor menor.

Também lembramos do último tutorial que com um capacitor eletrolítico polarizado, o fio positivo deve ir para a conexão positiva e o fio negativo para a conexão negativa, caso contrário pode ser danificado novamente. Portanto, é sempre melhor substituir um capacitor antigo ou danificado pelo mesmo tipo do especificado. Um exemplo de marcações de capacitor é dado abaixo.

Características do capacitor



O capacitor, como qualquer outro componente eletrônico, vem definido por uma série de características. Essas **características do capacitor** sempre podem ser encontradas nas folhas de dados que o fabricante do capacitor nos fornece, então aqui estão apenas algumas das mais importantes.

Características do capacitor - Capacitância nominal, (C)

O valor nominal da **Capacitância**, C de um capacitor é a mais importante de todas as características do capacitor. Este valor é medido em pico-Farads (pF), nano-Farads (nF) ou micro-Farads (μF) e é marcado no corpo do capacitor como números, letras ou faixas coloridas.

A capacitância de um capacitor pode mudar de valor com a frequência do circuito (Hz) e com a temperatura ambiente. Os capacitores cerâmicos menores podem ter um valor nominal tão baixo quanto um pico-Farad, (1pF), enquanto os eletrolíticos maiores podem ter um valor nominal de capacitância de até um Farad, (1F).

Todos os capacitores têm uma classificação de tolerância que pode variar de -20% a +80% para eletrolíticos de alumínio afetando seu valor real ou real. A escolha da capacitância é determinada pela configuração do circuito, mas o valor lido na lateral de um capacitor pode não ser necessariamente seu valor real.

Características do capacitor - Tensão de trabalho, (WV)

A tensão de trabalho é outra característica importante do capacitor que define a tensão contínua máxima CC ou CA que pode ser aplicada ao capacitor sem falhas durante sua vida útil. Geralmente, a tensão de trabalho impressa na lateral do corpo de um capacitor refere-se à sua tensão de trabalho CC (WVDC).

Os valores de tensão CC e CA geralmente não são os mesmos para um capacitor, pois o valor da tensão CA se refere ao valor rms e NÃO ao valor máximo ou de pico que é 1,414 vezes maior. Além disso, a tensão de trabalho DC especificada é válida dentro de uma certa faixa de temperatura, normalmente -30°C a +70°C.

Qualquer tensão CC em excesso de sua tensão de trabalho ou uma corrente de ondulação CA excessiva pode causar falha. Segue-se, portanto, que um capacitor terá uma vida útil mais longa se operado em ambiente fresco e dentro de sua tensão

nominal. As tensões CC de trabalho comuns são 10V, 16V, 25V, 35V, 50V, 63V, 100V, 160V, 250V, 400V e 1000V e são impressas no corpo do capacitor.

Características do capacitor - Tolerância, ($\pm\%$)

Tal como acontece com os resistores, os capacitores também têm uma classificação de **tolerância** expressa como um valor mais ou menos em picofarads ($\pm\text{pF}$) para capacitores de baixo valor geralmente menores que 100pF ou como uma percentagem ($\pm\%$) para capacitores de maior valor geralmente maiores que 100pF.

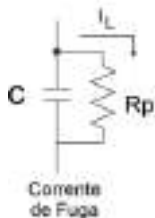
O valor de tolerância é a extensão em que a capacitância real pode variar de seu valor nominal e pode variar de -20% a +80%. Assim, um capacitor de 100 μF com uma tolerância de $\pm 20\%$ pode variar legitimamente de 80 μF a 120 μF e ainda permanecer dentro da tolerância.

Os capacitores são classificados de acordo com o quão próximo de seus valores reais eles são comparados à capacitância nominal com bandas coloridas ou letras usadas para indicar sua tolerância real. A variação de tolerância mais comum para capacitores é de 5% ou 10%, mas alguns capacitores de plástico são classificados em até $\pm 1\%$.

Características do capacitor - Corrente de fuga

O dielétrico usado dentro do capacitor para separar as placas condutoras não é um isolante perfeito, resultando em uma corrente muito pequena fluindo ou “vazando” através do dielétrico devido à influência dos poderosos campos elétricos formados pela carga nas placas quando aplicadas a uma tensão de alimentação constante.

Este pequeno fluxo de corrente DC na região de nanoamps (nA) é chamado de **corrente de fuga** dos capacitores . A corrente de fuga é o resultado de elétrons percorrendo fisicamente o meio dielétrico, em torno de suas bordas ou através de seus terminais e que, com o tempo, descarregarão completamente o capacitor se a tensão de alimentação for removida.



Quando o vazamento é muito baixo, como em capacitores do tipo filme ou folha, geralmente é referido como “resistência de isolamento” (R_p) e pode ser expresso como uma resistência de alto valor em paralelo com o capacitor, conforme mostrado. Quando a corrente de fuga é alta, como nos eletrolíticos, ela é chamada de “corrente de fuga”, pois os elétrons fluem diretamente através do eletrólito.

A corrente de fuga do capacitor é um parâmetro importante em circuitos de acoplamento de amplificadores ou em circuitos de fonte de alimentação, sendo as melhores escolhas para aplicações de acoplamento e/ou armazenamento o Teflon e os outros tipos de capacitores plásticos (polipropileno, poliestireno, etc) porque quanto menor a constante dielétrica, quanto maior a resistência de isolamento.

Capacitores do tipo eletrolítico (tântalo e alumínio), por outro lado, podem ter capacitâncias muito altas, mas também têm correntes de fuga muito altas (tipicamente da ordem de cerca de $5\text{--}20\ \mu\text{A}$ por μF) devido à sua baixa resistência de isolamento e são portanto, não é adequado para aplicações de armazenamento ou acoplamento. Além disso, o fluxo de corrente de fuga para eletrolíticos de alumínio aumenta com a temperatura.

Características do capacitor - Temperatura de trabalho, (T)

Mudanças na temperatura ao redor do capacitor afetam o valor da capacitância devido a mudanças nas propriedades dielétricas. Se o ar ou a temperatura ambiente ficar muito quente ou frio, o valor da capacitância do capacitor pode mudar tanto a ponto de afetar a operação correta do circuito. A faixa de trabalho normal para a maioria dos capacitores é de $-30\ ^\circ\text{C}$ a $+125\ ^\circ\text{C}$ com tensões nominais dadas para uma **temperatura** de trabalho não superior a $+70\ ^\circ\text{C}$, especialmente para os tipos de capacitores de plástico.

Geralmente para capacitores eletrolíticos e especialmente capacitor eletrolítico de alumínio, em altas temperaturas (acima de $+85\ ^\circ\text{C}$ os líquidos dentro do eletrólito podem ser perdidos por evaporação, e o corpo do capacitor (especialmente os tamanhos pequenos) pode ficar deformado devido à pressão

interna Além disso, capacitores eletrolíticos não podem ser usados em baixas temperaturas, abaixo de cerca de -10°C , pois a geleia eletrolítica congela.

Coeficiente de Temperatura, (TC)

O **coeficiente** de temperatura de um capacitor é a mudança máxima em sua capacitância em uma faixa de temperatura especificada. O coeficiente de temperatura de um capacitor é geralmente expresso linearmente como partes por milhão por grau centígrado (PPM/ $^{\circ}\text{C}$), ou como uma variação percentual em uma determinada faixa de temperaturas. Alguns capacitores são não lineares (capacitores de classe 2) e aumentam seu valor à medida que a temperatura aumenta, dando-lhes um coeficiente de temperatura que é expresso como um “P” positivo.

Alguns capacitores diminuem seu valor à medida que a temperatura aumenta, dando-lhes um coeficiente de temperatura que é expresso como um “N” negativo. Por exemplo “P100” é $+100\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ou “N200”, que é $-200\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ etc. coeficiente de temperatura ou “NPO”. Esses tipos de capacitores, como Mica ou Poliéster, são geralmente chamados de capacitores Classe 1.

A maioria dos capacitores, especialmente os eletrolíticos, perdem sua capacitância quando aquecem, mas os capacitores de compensação de temperatura estão disponíveis na faixa de pelo menos P1000 a N5000 ($+1000\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ a $-5000\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$). Também é possível conectar um capacitor com um coeficiente de temperatura positivo em série ou paralelo com um capacitor com um coeficiente de temperatura negativo. Outra aplicação útil dos capacitores de coeficiente de temperatura é usá-los para cancelar o efeito da temperatura em outros componentes dentro de um circuito, como indutores ou resistores, etc.

Polarização

Polarização de capacitores geralmente se refere aos capacitores do tipo eletrolítico, mas principalmente aos eletrolíticos de alumínio, no que diz respeito à sua conexão elétrica. A maioria dos capacitores eletrolíticos são do tipo polarizado, ou seja, a tensão conectada aos terminais do capacitor deve ter a polaridade correta, ou seja, positivo com positivo e negativo com negativo.



A polarização incorreta pode causar a quebra da camada de óxido dentro do capacitor, resultando em correntes muito grandes fluindo através do dispositivo, resultando em destruição, como mencionamos anteriormente.

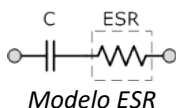
A maioria dos capacitores eletrolíticos tem seu terminal negativo, -ve claramente marcado com uma faixa preta, faixa, setas ou chevrons em um lado de seu corpo, como mostrado, para evitar qualquer conexão incorreta com a alimentação CC.

Alguns eletrolíticos maiores têm sua lata de metal ou corpo conectado ao terminal negativo, mas os tipos de alta tensão têm sua lata de metal isolada com os eletrodos sendo trazidos para separar os terminais de pá ou parafuso para segurança.

Além disso, ao usar eletrolíticos de alumínio em circuitos de alisamento de fonte de alimentação, deve-se tomar cuidado para evitar que a soma do pico de tensão CC e da tensão de ondulação CA se torne uma “tensão reversa”.

Resistência equivalente em série, (ESR)

A **Resistência Equivalente em Série** ou ESR, de um capacitor é a impedância CA do capacitor quando usado em altas frequências e inclui a resistência do material dielétrico, a resistência CC dos terminais, a resistência CC das conexões ao dielétrico e a resistência da placa do capacitor todos medidos em uma determinada frequência e temperatura.



De certa forma, ESR é o oposto da resistência de isolamento que é apresentada como uma resistência pura (sem reatância capacitiva ou indutiva) em paralelo com o capacitor. Um capacitor ideal teria apenas capacitância, mas ESR é apresentado como uma resistência pura (menos de $0,1\Omega$) em série com o capacitor

(daí o nome de Resistência Equivalente em Série), e que é dependente da frequência, tornando-se uma quantidade “DINÂMICA”.

Como o ESR define as perdas de energia da resistência em série “equivalente” de um capacitor, ele deve, portanto, determinar as perdas globais de aquecimento $I^2 R$ do capacitor, especialmente quando usado em circuitos de potência e comutação.

Capacitores com um ESR relativamente alto têm menos capacidade de passar corrente de e para suas placas para o circuito externo devido à sua constante de tempo RC de carga e descarga mais longa. A ESR de capacitores eletrolíticos aumenta ao longo do tempo à medida que seu eletrólito seca. Capacitores com classificações de ESR muito baixas estão disponíveis e são mais adequados ao usar o capacitor como filtro.

Como nota final, capacitores com capacitâncias pequenas (menos de $0,01\mu\text{F}$) geralmente não representam muito perigo para os seres humanos. No entanto, quando sua capacitância começa a exceder $0,1\mu\text{F}$, tocar nos terminais do capacitor pode ser uma experiência chocante.

Os capacitores têm a capacidade de armazenar uma carga elétrica na forma de uma tensão entre si mesmo quando não há corrente de circuito fluindo, dando-lhes uma espécie de memória com grandes capacitores de reservatório do tipo eletrolítico encontrados em aparelhos de televisão, flashes fotográficos e bancos de capacitores potencialmente armazenando uma carga letal.

Como regra geral, nunca toque nos terminais de capacitores de grande valor depois que a fonte de alimentação for removida. Se você não tiver certeza sobre sua condição ou o manuseio seguro desses grandes capacitores, procure ajuda ou aconselhamento especializado antes de manuseá-los.

Listamos aqui apenas algumas das muitas características de capacitores disponíveis para identificar e definir suas condições de operação e no próximo tutorial em nossa seção sobre capacitores, veremos como os capacitores armazenam carga elétrica em suas placas e a usamos para calcular sua capacitância valor.

Capacitância e Carga

Os capacitores armazenam energia elétrica em suas placas na forma de uma carga elétrica.

Capacitância é o valor medido da capacidade de um capacitor para armazenar uma carga elétrica. Este valor de capacitância também depende da constante dielétrica do material dielétrico usado para separar as duas placas paralelas. A capacitância é medida em unidades do Farad (F), assim chamado em homenagem a *Michael Faraday*.

Os capacitores consistem em duas placas condutoras paralelas (geralmente um metal) que são impedidas de se tocarem (separadas) por um material isolante chamado “dielétrico”. Quando uma tensão é aplicada a essas placas, uma corrente elétrica flui carregando uma placa com carga positiva em relação à tensão de alimentação e a outra placa com carga negativa igual e oposta.

Então, um capacitor tem a capacidade de armazenar uma carga elétrica Q (unidades em **Coulombs**) de elétrons. Quando um capacitor está totalmente carregado existe uma diferença de potencial, (pd) entre suas placas, e quanto maior a área das placas e/ou quanto menor a distância entre elas (conhecida como separação) maior será a carga que o capacitor pode conter e maior será sua **Capacitância**.

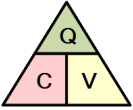
A capacidade dos capacitores de armazenar essa carga elétrica (Q) entre suas placas é proporcional à tensão aplicada, V para um capacitor de capacitância conhecida em Farads. Observe que a capacitância C é SEMPRE positiva e nunca negativa.

Quanto maior a tensão aplicada, maior será a carga armazenada nas placas do capacitor. Da mesma forma, quanto menor a tensão aplicada, menor a carga. Portanto, a carga real Q nas placas do capacitor e pode ser calculada como:

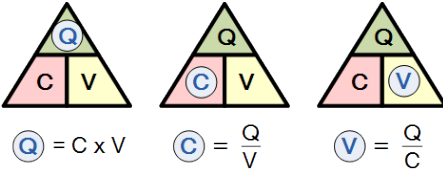
Carga em um capacitor

$$Q = C \times V$$

Onde: Q (Carga, em Coulombs) = C (Capacitância, em Farads) x V (Tensão, em Volts)
Às vezes é mais fácil lembrar dessa relação usando imagens. A seguir as três quantidades de Q , C e V foram sobrepostas em um triângulo dando carga na parte superior com capacitância e tensão na parte inferior. Este arranjo representa a posição real de cada quantidade nas fórmulas de *carga do capacitor*.



e transpondo a equação acima nos dá as seguintes combinações da mesma equação:



Unidades: Q medido em Coulombs, V em volts e C em Farads.

Então, podemos definir a unidade de **Capacitância** como sendo uma constante de proporcionalidade sendo igual ao coulomb/volt que também é chamado de **Farad**, unidade F.

Como a capacitância representa a capacidade do capacitor (capacidade) de armazenar uma carga elétrica em suas placas, podemos definir um Farad como a “capacitância de um capacitor que requer uma carga de um coulomb para estabelecer uma diferença de potencial de um volt entre suas placas” como primeiramente descrito por Michael Faraday. Portanto, quanto maior a capacitância, maior é a quantidade de carga armazenada em um capacitor para a mesma quantidade de tensão.

A capacidade de um capacitor de armazenar uma carga em suas placas condutoras lhe dá seu valor de **Capacitância**. A capacitância também pode ser determinada a partir das dimensões ou área, A das placas e as propriedades do material dielétrico entre as placas. Uma medida do material dielétrico é dada pela permissividade, (ϵ), ou a constante dielétrica. Então, outra maneira de expressar a capacitância de um capacitor é:

Capacitor com ar como seu dielétrico

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

Capacitor com um sólido como seu dielétrico

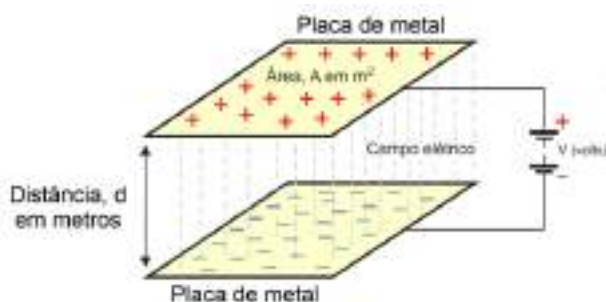
$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Onde A é a área das placas em metros quadrados, m^2 com quanto maior a área, mais carga o capacitor pode armazenar. d é a distância ou separação entre as duas placas.

Quanto menor essa distância, maior é a capacidade das placas de armazenar carga, uma vez que a carga $-Q$ na placa carregada $-Q$ tem um efeito maior na placa carregada $+Q$, resultando em mais elétrons sendo repelidos da placa $+Q$ placa carregada, aumentando assim a carga total.

ϵ_0 (épsilon) é o valor da permissividade para o ar que é $8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, e ϵ_r é a permissividade do meio dielétrico usado entre as duas placas.

Capacitor de placa paralela



Dissemos anteriormente que a capacitância de um capacitor de placas paralelas é proporcional à área da superfície A e inversamente proporcional à distância d entre as duas placas e isso é verdade para o meio dielétrico do ar. No entanto, o valor da capacitância de um capacitor pode ser aumentado pela inserção de um meio sólido entre as placas condutoras que tem uma constante dielétrica maior que a do ar.

Os valores típicos de epsilon ϵ para vários materiais dielétricos comumente usados são: Ar = 1,0, Papel = 2,5 – 3,5, Vidro = 3 – 10, Mica = 5 – 7 etc.

O fator pelo qual o material dielétrico, ou isolante, aumenta a capacitância do capacitor em relação ao ar é conhecido como Constante Dielétrica, (k). " k " é a razão da permissividade do meio dielétrico sendo usado para a permissividade do espaço livre também conhecido como vácuo.

Portanto, todos os valores de capacitância estão relacionados à permissividade do vácuo. Um material dielétrico com uma constante dielétrica alta é

um isolante melhor do que um material dielétrico com uma constante dielétrica mais baixa. A constante dielétrica é uma quantidade adimensional, pois é relativa ao espaço livre.

Exemplo 1 de Capacitância

Um capacitor de placas paralelas consiste em duas placas com uma área de superfície total de 100 cm^2 . Qual será a capacitância em pico-Farads, (pF) do capacitor se a separação das placas for de 0,2 cm e o meio dielétrico utilizado for o ar.

$$C = \epsilon \frac{A}{d}, \quad \epsilon = 8.85 \text{ pF/m}$$

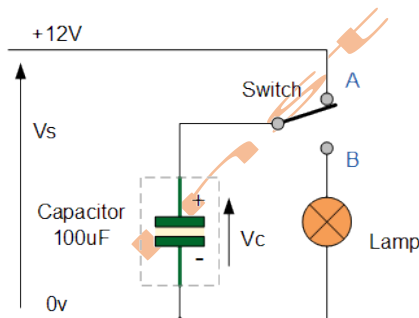
$$A = 100 \text{ cm}^2 = 0.01 \text{ m}^2, \quad d = 0.2 \text{ cm} = 0.002 \text{ m}$$

$$\therefore C = 8.85 \times 10^{-12} \times \frac{0.01 \text{ m}^2}{0.002 \text{ m}} = 44 \text{ pF}$$

então o valor do capacitor é 44pF.

Carga e descarga de um capacitor

Considere o circuito a seguir.



Circuito 1

Suponha que o capacitor esteja totalmente descarregado e a chave conectada ao capacitor tenha acabado de ser movida para a posição A. A tensão no capacitor de 100uF é zero neste ponto e uma corrente de carga (i) começa a fluir carregando o capacitor exponencialmente até que a tensão nas placas seja quase igual à tensão de alimentação de 12V. Após 5 constantes de tempo, a corrente se torna uma carga lenta e diz que o capacitor está “totalmente carregado”. Então, $V_C = V_S = 12$ volts.

Uma vez que o capacitor esteja “totalmente carregado” em teoria, ele manterá seu estado de carga de tensão mesmo quando a tensão de alimentação for desconectada, pois eles atuam como uma espécie de dispositivo de armazenamento temporário. No entanto, embora isso possa ser verdade para um capacitor “ideal”, um capacitor real se descarregará lentamente por um longo período de tempo devido às correntes de fuga internas que fluem através do dielétrico.

Este é um ponto importante a ser lembrado, pois capacitores de grande valor conectados em fontes de alta tensão ainda podem manter uma quantidade significativa de carga, mesmo quando a tensão de alimentação é desligada.

Se a chave fosse desconectada neste ponto, o capacitor manteria sua carga indefinidamente, mas devido às correntes de fuga internas fluindo através de seu dielétrico, o capacitor começaria a se descarregar muito lentamente à medida que os elétrons passassem pelo dielétrico. O tempo necessário para o capacitor descarregar até 37% de sua tensão de alimentação é conhecido como **constante de tempo**.

Se o interruptor for movido da posição A para a posição B, o capacitor totalmente carregado começará a descarregar através da lâmpada agora conectada a ele, iluminando a lâmpada até que o capacitor esteja totalmente descarregado, pois o elemento da lâmpada tem um valor resistivo.

O brilho da lâmpada e a duração da iluminação dependeriam, em última análise, do valor da capacitância do capacitor e da resistência da lâmpada ($t = R \cdot C$). Quanto maior o valor do capacitor, mais brilhante e mais longa será a iluminação da lâmpada, pois ela pode armazenar mais carga.

Exemplo 2 de Capacitância

Calcule a carga no circuito do capacitor acima.

$$Q = C \times V$$

$$Q = 100\mu\text{F} \times 12\text{V} = 1.2 \times 10^{-3} = 1.2\text{mC}$$

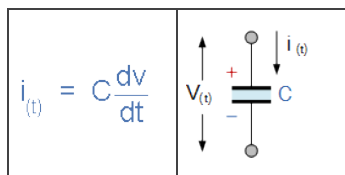
então a carga do capacitor é 1,2 milicoulombs.

Corrente através de um capacitor

A corrente elétrica não pode realmente fluir através de um capacitor como faz um resistor ou indutor devido às propriedades isolantes do material dielétrico entre as duas placas. No entanto, o carregamento e descarregamento das duas placas dá o efeito de que a corrente está fluindo.

A corrente que flui através de um capacitor está diretamente relacionada à carga nas placas, pois a corrente é a taxa de fluxo de carga em relação ao tempo. Como a capacidade dos capacitores de armazenar carga (Q) entre suas placas é proporcional à tensão aplicada (V), a relação entre a corrente e a tensão aplicada às placas de um capacitor se torna:

Relação Corrente-Tensão (IV)



À medida que a tensão nas placas aumenta (ou diminui) ao longo do tempo, a corrente que flui através da capacitância deposita (ou remove) carga de suas placas com a quantidade de carga sendo proporcional à tensão aplicada. Então, tanto a corrente quanto a tensão aplicada a uma capacitância são funções do tempo e são denotadas pelos símbolos $i(t)$ e $V(t)$.

No entanto, a partir da equação acima, também podemos ver que se a tensão permanecer constante, a carga se tornará constante e, portanto, a corrente será zero! Em outras palavras, nenhuma mudança na voltagem, nenhum movimento de carga e nenhum fluxo de corrente. É por isso que um capacitor parece “bloquear” o fluxo de corrente quando conectado a uma tensão CC de estado estacionário.

Valor de Capacitância - O Farad

Agora sabemos que a capacidade de um capacitor de armazenar uma carga lhe dá seu valor de capacitância C , que tem a unidade de Farad, F. Mas o farad é uma unidade extremamente grande por si só, tornando-o impraticável de usar, então submúltiplos ou frações da unidade Farad padrão são usados.

Para se ter uma ideia do tamanho real de um Farad, a área de superfície das placas necessária para produzir um capacitor com um valor de apenas um Farad com

uma separação razoável de placas de apenas 1 mm operando no vácuo. Se reorganizarmos a equação para capacitância acima, isso nos daria uma área de placa de:

$$A = C d \div 8,85 \text{ pF/m} = (1 \times 0,001) \div 8,85 \times 10^{-12} = 112.994.350 \text{ m}^2$$

ou 113 milhões de m^2 o que equivaleria a uma placa de mais de 10 quilômetros x 10 quilômetros quadrados. Aquilo é enorme.

Capacitores que têm um valor de um Farad ou mais tendem a ter um dielétrico sólido e como “One Farad” é uma unidade tão grande para usar, prefixos são usados em fórmulas eletrônicas com valores de capacitor dados em micro-Farads (μF), nano-Farads (nF) e os pico-Farads (pF). Por exemplo:

Sub unidades de Capacitância do Farad

$$\text{microfarad, } (\mu\text{F}) = \frac{1}{1,000,000} \text{ F} = 1 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$\text{nanofarad, } (\text{nF}) = \frac{1}{1,000,000,000} \text{ F} = 1 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$\text{picofarad, } (\text{pF}) = \frac{1}{1,000,000,000,000} \text{ F} = 1 \times 10^{-12} \text{ F}$$

Converta os seguintes valores de capacitância:

- a) 22nF a μF ,
- b) 0,2 μF a nF
- c) 550pF a μF

Respostas:

- a) 22nF = 0,022 μF
- b) 0,2 μF = 200nF
- c) 550pF = 0,00055 μF

Embora um Farad seja um valor grande por si só, os capacitores agora estão comumente disponíveis com valores de capacitância de muitas centenas de Farads e têm nomes para refletir isso de “Supercapacitores” ou “Ultra-capacitores”.

Esses capacitores são dispositivos de armazenamento de energia eletroquímica que utilizam uma alta área de superfície de seu dielétrico de carbono

para fornecer densidades de energia muito mais altas do que os capacitores convencionais e, como a capacitância é proporcional à área de superfície do carbono, quanto mais espesso o carbono, mais capacitância ele tem.

Supercapacitores de baixa tensão (de cerca de 3,5V a 5,5V) são capazes de armazenar grandes quantidades de carga devido aos seus altos valores de capacitância, pois a energia armazenada em um capacitor é igual a $\frac{1}{2}(C \times V^2)$.

Os supercapacitores de baixa tensão são comumente usados em dispositivos portáteis para substituir baterias grandes, caras e pesadas do tipo lítio, pois fornecem características de armazenamento e descarga semelhantes a baterias, tornando-os ideais para uso como fonte de energia alternativa ou para backup de memória. Os supercapacitores usados em dispositivos portáteis geralmente são carregados usando células solares instaladas no dispositivo.

Ultracapacitor estão sendo desenvolvidos para uso em carros elétricos híbridos e aplicações de energia alternativa para substituir grandes baterias convencionais, bem como aplicações de suavização de CC em sistemas de áudio e vídeo de veículos. Os ultracapacitores podem ser recarregados rapidamente e têm densidades de armazenamento de energia muito altas, tornando-os ideais para uso em aplicações de veículos elétricos.

Energia em um capacitor

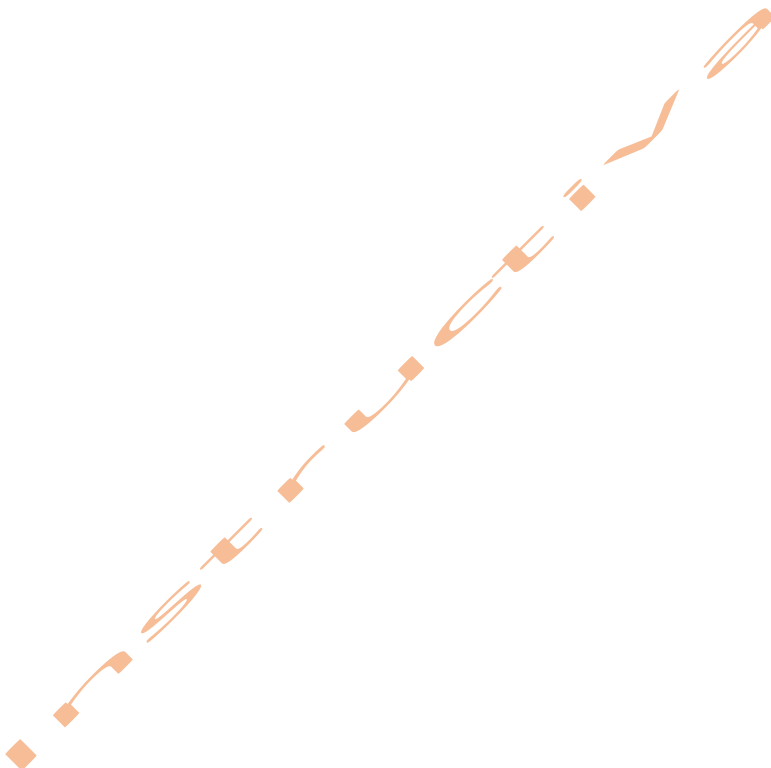
Quando um capacitor carrega da fonte de alimentação conectada a ele, um campo eletrostático é estabelecido que armazena energia no capacitor. A quantidade de energia em Joules que é armazenada neste campo eletrostático é igual à energia que a fonte de tensão exerce para manter a carga nas placas do capacitor e é dada pela fórmula:

$$\text{Energy, } W = \frac{1}{2}CV^2 \text{ or } \frac{CV^2}{2} \text{ in Joules, (j)}$$

então a energia armazenada no circuito do capacitor de 100uF acima é calculada como:

$$\text{Energy, } W = \frac{CV^2}{2} = \frac{100 \times 10^{-6} \times 12^2}{2} = 7.2 \text{ mJ}$$

No próximo capítulo em nossa seção sobre capacitores, veremos os códigos de cores dos capacitores e veremos as diferentes maneiras pelas quais os valores de capacitância e tensão do capacitor são marcados em seu corpo.



Códigos de cores do capacitor

Os códigos de cores do capacitor são uma maneira visual simples e eficaz de identificar o valor da capacitância de um capacitor

Existem duas maneiras comuns de saber o valor capacitivo de um capacitor, medindo-o usando um multímetro digital ou lendo os códigos de cores do capacitor impressos nele. Essas faixas coloridas representam o valor da capacitância de acordo com o código de cores, incluindo a classificação de tensão e a tolerância.

Às vezes, os valores reais de capacitância, tensão ou tolerância são marcados no corpo de um capacitor na forma de caracteres alfanuméricos. No entanto, quando o valor da capacitância é um valor decimal, surgem problemas com a marcação do “Ponto Decimal”, pois isso pode facilmente não ser percebido, resultando em uma leitura incorreta do valor real da capacitância.

Em vez disso, letras como p (pico) ou n (nano) são usadas no lugar do ponto decimal para identificar sua posição e o peso do número. Por exemplo, um capacitor pode ser rotulado como n47 = 0,47nF, 4n7 = 4,7nF ou 47n = 47nF e assim por diante. Além disso, às vezes os capacitores são marcados com a letra maiúscula K para significar um valor de mil pico-Farads, então, por exemplo, um capacitor com as marcações de 100K seria 100 x 1000pF ou 100nF.

Para reduzir a confusão em relação a letras, números e pontos decimais, um esquema de codificação de cores internacional foi desenvolvido há muitos anos como uma maneira simples de identificar valores e tolerâncias de capacitores. Consiste em faixas coloridas (em ordem espectral) conhecidas comumente como sistema de Códigos de Cores de Capacitor e cujos significados são ilustrados a seguir:

Tabela de códigos de cores do capacitor

Cor da faixa	Dígito A	Dígito B	Multiplicador D	Tolerância (T) > 10pf	Tolerância (T) < 10pf	Coefficiente de Temperatura (TC)
Preto	0	0	x1	± 20%	± 2,0pF	
Marrom	1	1	x10	± 1%	± 0,1pF	-33×10 ⁻⁶
Vermelho	2	2	x100	± 2%	± 0,25pF	-75×10 ⁻⁶
Laranja	3	3	x1.000	± 3%		-150×10 ⁻⁶
Amarelo	4	4	x10.000	± 4%		-220×10 ⁻⁶
Verde	5	5	x100.000	± 5%	± 0,5pF	-330×10 ⁻⁶
Azul	6	6	x1.000.000			-470×10 ⁻⁶
Violeta	7	7				-750×10 ⁻⁶
Cinza	8	8	x0,01	+80%,-20%		
Branco	9	9	x0,1	± 10%	± 1,0pF	
Ouro			x0,1	± 5%		
Prata			x0,01	± 10%		

Tabela de códigos de cores de tensão do capacitor

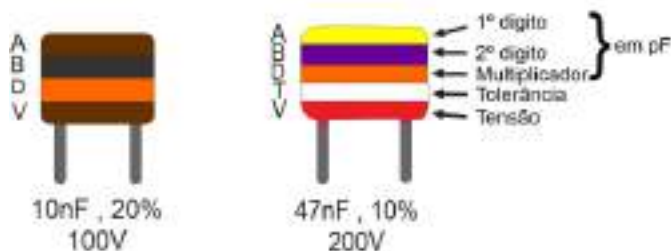
Cor da faixa	Classificação de tensão (V)				
	Tipo J	Tipo K	Tipo L	Tipo M	Tipo N
Preto	4	100		10	10
Marrom	6	200	100	1,6	
Vermelho	10	300	250	4	35
Laranja	15	400		40	
Amarelo	20	500	400	6,3	6
Verde	25	600		16	15
Azul	35	700	630		20
Violeta	50	800			
Cinza		900		25	25
Branco	3	1000		2,5	3
Ouro		2000			
Prata					

Referência de tensão do capacitor

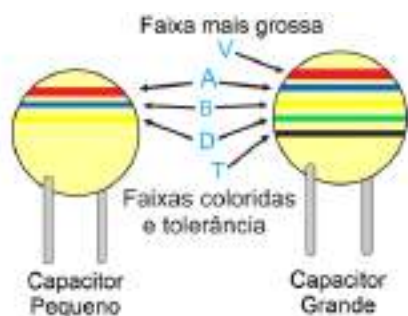
- Tipo J – Capacitores de Tântalo Mergulhados.
- Tipo K – Capacitores de mica.
- Tipo L – Capacitores de Poliéster/Poliestireno.
- Tipo M – Capacitores eletrolíticos de 4 bandas.
- Tipo N – Capacitores eletrolíticos de 3 bandas.

Um exemplo do uso de códigos de cores do capacitor é dado como:

Capacitor de poliéster metalizado



Capacitor de disco e cerâmica



O sistema Capacitor de código de cores, foi usado por muitos anos em capacitores moldados de poliéster e mica não polarizados. Este sistema de codificação de cores agora está obsoleto, mas ainda existem muitos capacitores "antigos". Atualmente, pequenos capacitores como filme ou disco estão em conformidade com a norma BS1852 e sua nova substituição, BS EN 60062, onde as cores foram substituídas por um sistema codificado por letras ou números.

Geralmente o código consiste em 2 ou 3 números e um código de letra de tolerância opcional para identificar a tolerância. Quando um código de dois números é usado, o valor do capacitor é fornecido apenas em picofarads, por exemplo, 47 = 47 pF e 100 = 100pF etc. Um código de três letras consiste em dois dígitos de valor e um multiplicador muito parecido com os códigos de cores do resistor na seção de resistores.

Por exemplo, os dígitos 471 = $47 \cdot 10 = 470\text{pF}$. Os códigos de três dígitos são frequentemente acompanhados por um código de letra de tolerância adicional, conforme indicado abaixo.

Tabela de Códigos de Letras de Tolerância do Capacitor

Carta		B	C	D	F	G	J	K	M	Z
Tolerância	C <10pF ±pF	0,1	0,25	0,5	1	2				
	C > 10pF ±%			0,5	1	2	5	10	20	+80 -20

Considere o capacitor abaixo:



O capacitor da esquerda é um capacitor tipo disco cerâmico que possui o código 473J impresso em seu corpo. Então o 4 = 1º dígito, o 7 = 2º dígito, o 3 é o multiplicador em pico-Farads, pF e a letra J é a tolerância e isso se traduz em: $47\text{pF} \cdot 1.000$ (3 zeros) = 47.000 pF , 47nF ou $0,047\mu\text{F}$ o J indica uma tolerância de +/- 5%

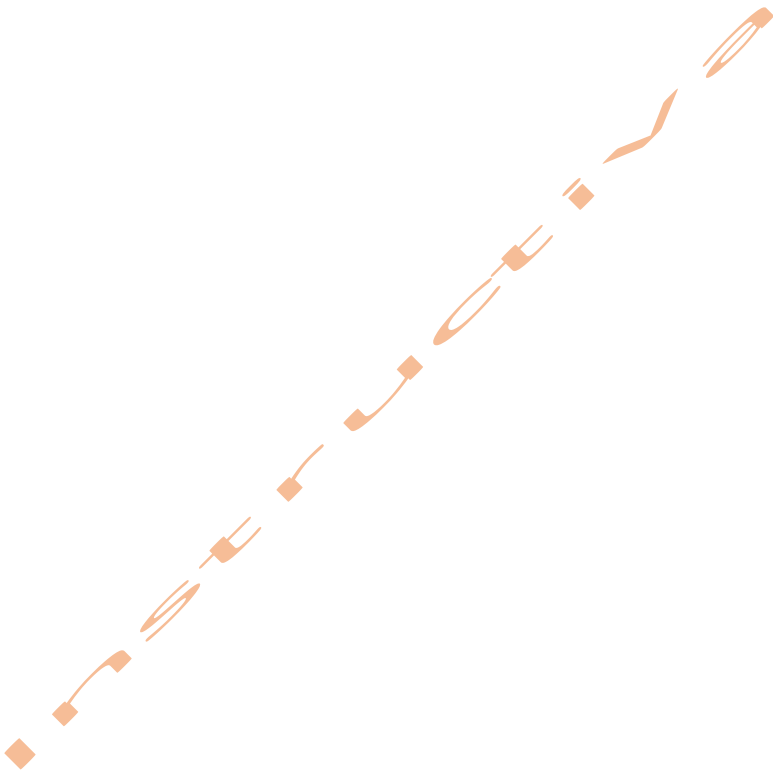
Então, usando apenas números e letras como códigos no corpo do capacitor, podemos determinar facilmente o valor de sua capacitância em Pico-farad's, Nano-farads ou Micro-farads e uma lista desses códigos "internacionais" é fornecida na tabela a seguir junto com suas capacitâncias equivalentes.

Tabela de Códigos de Letras do Capacitor

Picofarad (pF)	Nanofarad (nF)	Microfarad (uF)	Código	Picofarad (pF)	Nanofarad (nF)	Microfarad (uF)	Código
10	0,01	0,00001	100	4700	4.7	0,0047	472
15	0,015	0,000015	150	5000	5,0	0,005	502
22	0,022	0,000022	220	5600	5.6	0,0056	562
33	0,033	0,000033	330	6800	6,8	0,0068	682
47	0,047	0,000047	470	10.000	10	0,01	103
100	0,1	0,0001	101	15.000	15	0,015	153
120	0,12	0,00012	121	22.000	22	0,022	223
130	0,13	0,00013	131	33.000	33	0,033	333
150	0,15	0,00015	151	47.000	47	0,047	473
180	0,18	0,00018	181	68.000	68	0,068	683
220	0,22	0,00022	221	100.000	100	0,1	104
330	0,33	0,00033	331	150.000	150	0,15	154
470	0,47	0,00047	471	200000	200	0,2	254
560	0,56	0,00056	561	220000	220	0,22	224
680	0,68	0,00068	681	330000	330	0,33	334
750	0,75	0,00075	751	470000	470	0,47	474
820	0,82	0,00082	821	680000	680	0,68	684
1000	1,0	0,001	102	1.000.000	1000	1,0	105
1500	1,5	0,0015	152	1500000	1500	1,5	155
2000	2,0	0,002	202	2.000.000	2000	2,0	205
2200	2.2	0,0022	222	2200000	2200	2.2	225

3300	3.3	0,0033	332	3300000	3300	3.3	335
------	-----	--------	-----	---------	------	-----	-----

O próximo tutorial em nossa seção sobre Capacitores, veremos como conectar capacitores em paralelo e veremos que a capacitância total é a soma dos capacitores individuais.



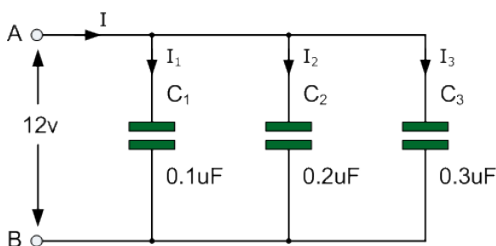
Capacitores em paralelo

Capacitores são conectados em paralelo quando ambos os seus terminais estão conectados a cada terminal de outro capacitor

A tensão (V_c) conectada em todos os capacitores conectados em paralelo é A MESMA . Então, os Capacitores em Paralelo têm uma alimentação de “tensão comum” entre eles, fornecendo:

$$V_{C1} = V_{C2} = V_{C3} = V_{AB} = 12V$$

No circuito a seguir, os capacitores C_1 , C_2 e C_3 estão todos conectados em um ramo paralelo entre os pontos A e B, conforme mostrado.



Quando os capacitores são conectados em paralelo, a capacitância total ou equivalente, C_T no circuito é igual à soma de todos os capacitores individuais somados. Isso ocorre porque a placa superior do capacitor, C_1 , está conectada à placa superior de C_2 , que está conectada à placa superior de C_3 e assim por diante.

O mesmo vale para as placas inferiores dos capacitores. Então é o mesmo que se os três conjuntos de placas estivessem se tocando e fossem iguais a uma única placa grande, aumentando assim a área efetiva da placa em m^2 .

Como a capacitância, C está relacionada à área da placa ($C = \epsilon(A/d)$), o valor da capacitância da combinação também aumentará. Em seguida, o valor da capacitância total dos capacitores conectados em paralelo é calculado pela soma da área da placa. Em outras palavras, a capacitância total é igual à soma de todas as capacitâncias individuais em paralelo. Você deve ter notado que a capacitância total dos capacitores paralelos é encontrada da mesma forma que a resistência total dos resistores em série.

As correntes que passam por cada capacitor e como vimos no tutorial anterior estão relacionadas à tensão. Então, aplicando a Lei das Correntes de Kirchoff, (KCL) ao circuito acima, temos

$$i_1 = C_1 \frac{dv}{dt}, \quad i_2 = C_2 \frac{dv}{dt}, \quad i_3 = C_3 \frac{dv}{dt}$$

$$i_T = i_1 + i_2 + i_3$$

$$\therefore i_T = C_1 \frac{dv}{dt} + C_2 \frac{dv}{dt} + C_3 \frac{dv}{dt}$$

e isso pode ser reescrito como:

$$i_T = (C_1 + C_2 + C_3) \frac{dv}{dt}$$

$$\text{or } i_T = C_T \frac{dv}{dt}$$

Então podemos definir a capacitância total ou equivalente do circuito, C_T como sendo a soma de todas as capacitâncias individuais somadas nos dando a equação generalizada de:

Equação de Capacitores Paralelos

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \text{etc}$$

Ao adicionar capacitores em paralelo, todos eles devem ser convertidos nas mesmas unidades de capacitância, seja μF , nF ou pF . Além disso, podemos ver que a corrente que flui através do valor da capacitância total, C_T , é a mesma que a corrente total do circuito, i_T .

Também podemos definir a capacitância total do circuito paralelo a partir da carga coulombiana total armazenada usando a equação $Q = CV$ para carga em placas de capacitores. A carga total Q_T armazenada em todas as placas é igual à soma das cargas individuais armazenadas em cada capacitor, portanto,

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \text{but, } Q = CV$$

$$\therefore Q_T = CV_T = CV_1 + CV_2 + CV_3$$

$$\text{or } C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

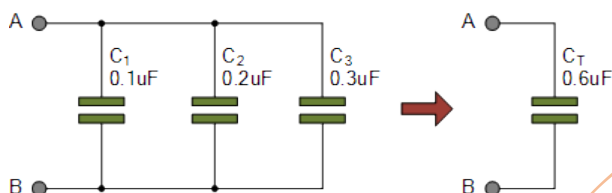
Como a tensão, (V) é comum para capacitores conectados em paralelo, podemos dividir ambos os lados da equação acima pela tensão deixando apenas a

capacitância e simplesmente somando o valor das capacitâncias individuais dá a capacitância total, C_T . Além disso, esta equação não depende do número de capacitores em paralelo no ramo e, portanto, pode ser generalizada para qualquer número de N capacitores paralelos conectados entre si.

Exemplo 1

Assim, tomando os valores dos três capacitores do exemplo acima, podemos calcular a capacitância equivalente total do circuito C_T como sendo:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = 0,1\mu\text{F} + 0,2\mu\text{F} + 0,3\mu\text{F} = 0,6\mu\text{F}$$



Um ponto importante a ser lembrado sobre circuitos de capacitores conectados em paralelo, a capacitância total (C_T) de quaisquer dois ou mais capacitores conectados em paralelo sempre será **MAIOR** que o valor do maior capacitor do grupo à medida que somamos valores. Portanto, em nosso exemplo acima, $C_T = 0,6\mu\text{F}$, enquanto o capacitor de maior valor é de apenas $0,3\mu\text{F}$.

Quando 4, 5, 6 ou até mais capacitores são conectados juntos, a capacitância total do circuito C_T ainda seria a soma de todos os capacitores individuais somados e, como sabemos agora, a capacitância total de um circuito paralelo é sempre maior que o capacitor de maior valor.

Isso ocorre porque aumentamos efetivamente a área de superfície total das placas. Se fizermos isso com dois capacitores idênticos, dobramos a área da superfície das placas que, por sua vez, dobra a capacitância da combinação e assim por diante.

Exemplo 2

Calcule a capacitância combinada em micro-Farads (μF) dos seguintes capacitores quando eles são conectados em uma combinação paralela:

- dois capacitores cada um com uma capacitância de 47nF
- um capacitor de 470nF conectado em paralelo a um capacitor de $1\mu\text{F}$

a) Capacitância Total,

$$C_T = C_1 + C_2 = 47\text{nF} + 47\text{nF} = 94\text{nF} \text{ ou } 0,094\mu\text{F}$$

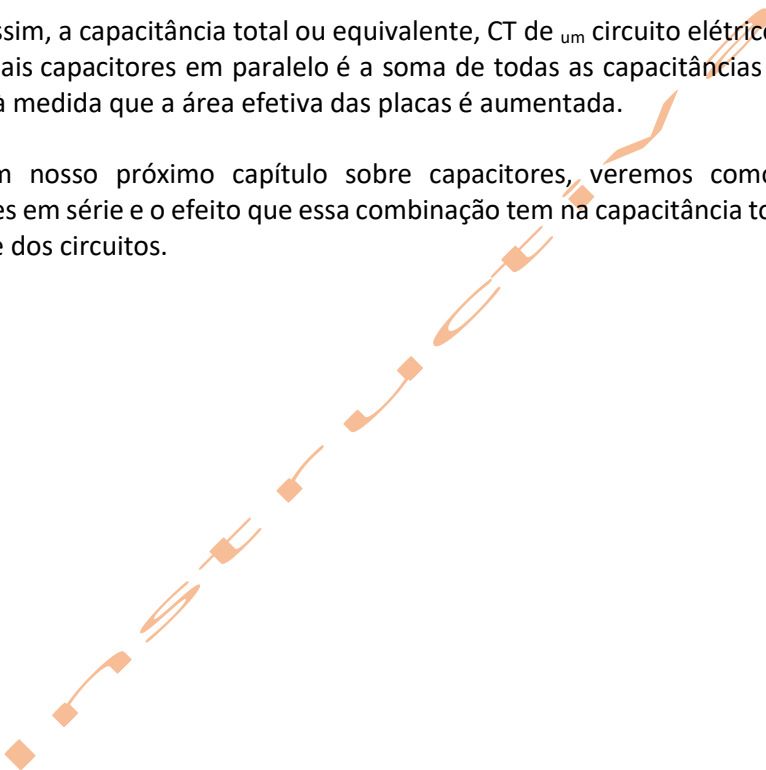
b) Capacitância Total,

$$C_T = C_1 + C_2 = 470\text{nF} + 1\mu\text{F}$$

portanto, $C_T = 470\text{nF} + 1000\text{nF} = 1470\text{nF} \text{ ou } 1,47\mu\text{F}$

Assim, a capacitância total ou equivalente, C_T de um circuito elétrico contendo dois ou mais capacitores em paralelo é a soma de todas as capacitâncias individuais somadas à medida que a área efetiva das placas é aumentada.

Em nosso próximo capítulo sobre capacitores, veremos como conectar capacitores em série e o efeito que essa combinação tem na capacitância total, tensão e corrente dos circuitos.



Capacitores em série

Os capacitores são conectados em série quando são encadeados em uma única linha

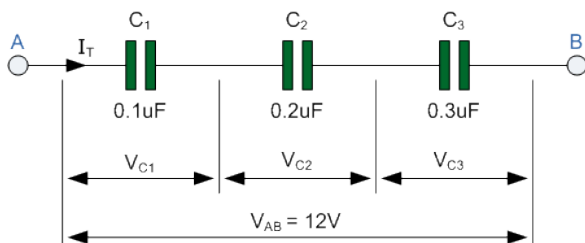
Com capacitores em série, a corrente de carga (i_c) que flui através dos capacitores é A MESMA para todos os capacitores, pois só tem um caminho a seguir.

Então, todos os capacitores em série têm a mesma corrente fluindo através deles como $i_T = i_1 = i_2 = i_3$ etc. Portanto, cada capacitor armazenará a mesma quantidade de carga elétrica, Q em suas placas, independentemente de sua capacitância. Isso ocorre porque a carga armazenada por uma placa de qualquer capacitor deve ter vindo da placa de seu capacitor adjacente. Portanto, capacitores conectados em série devem ter a mesma carga.

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 \dots \text{Etc}$$

Considere o circuito a seguir no qual os três capacitores, C_1 , C_2 e C_3 estão todos conectados em um ramal em série através de uma tensão de alimentação entre os pontos A e B.

Capacitores em uma conexão em série



No circuito paralelo anterior, vimos que a capacitância total, C_T do circuito, era igual à soma de todos os capacitores individuais somados. No entanto, em um circuito conectado em série, a capacitância total ou equivalente C_T é calculada de forma diferente.

No circuito em série acima a placa direita do primeiro condensador, C_1 está ligada à placa esquerda do segundo condensador, C_2 cuja placa direita está ligada à placa esquerda do terceiro condensador, C_3 . Então, esta conexão em série significa que em um circuito conectado em CC, o capacitor C_2 é efetivamente isolado do circuito.

O resultado disso é que a área efetiva da placa diminuiu para a menor capacitância individual conectada na cadeia em série. Portanto, a queda de tensão em cada capacitor será diferente dependendo dos valores das capacitâncias individuais. Então, aplicando a Lei de Tensão de Kirchhoff, (KVL) ao circuito acima, obtemos:

$$V_{AB} = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} = 12V$$

$$V_{C1} = \frac{Q_T}{C_1}, \quad V_{C2} = \frac{Q_T}{C_2}, \quad V_{C3} = \frac{Q_T}{C_3}$$

Como $Q = C \cdot V$ e rearranjando para $V = Q/C$, substituindo Q/C para cada tensão de capacitor VC na equação KVL acima nos dará:

$$V_{AB} = \frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_T}{C_1} + \frac{Q_T}{C_2} + \frac{Q_T}{C_3}$$

dividindo cada termo por Q dá

Equação de capacitores em série

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \text{etc}$$

Ao somar capacitores em série, o recíproco ($1/C$) dos capacitores individuais são todos somados (assim como os resistores em paralelo) em vez da própria capacitância. Então o valor total para capacitores em série é igual ao recíproco da soma dos recíprocos das capacitâncias individuais.

Exemplo 1

Tomando os três valores de capacitores do exemplo acima, podemos calcular a capacitância equivalente total, C_T para os três capacitores em série como sendo:

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

$$\left(\frac{1}{0.1 \mu F} + \frac{1}{0.2 \mu F} + \frac{1}{0.3 \mu F} \right) = 18.33 \times 10^6$$

$$\frac{1}{C_T} = 18.33 \times 10^6 \quad \therefore C_T = \frac{1}{18.33 \times 10^6} = 0.055 \mu F$$

Um ponto importante a ser lembrado sobre capacitores conectados em uma configuração em série. A capacitância total do circuito (C_T) de qualquer número de capacitores conectados em série sempre será MENOR que o valor do menor capacitor na série em série. Em nosso exemplo acima, a capacitância total C_T foi calculada como sendo $0,055\mu\text{F}$, mas o valor do menor capacitor na cadeia em série é de apenas $0,1\mu\text{F}$.

Este método recíproco de cálculo pode ser usado para calcular qualquer número de capacitores individuais conectados em uma única rede em série. Se, no entanto, houver apenas dois capacitores em série, uma fórmula muito mais simples e rápida pode ser usada. Isso é dado como:

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

Se os dois capacitores conectados em série forem iguais e do mesmo valor, ou seja: $C_1 = C_2$, podemos simplificar ainda mais a equação acima da seguinte forma para encontrar a capacitância total da combinação em série.

$$C_T = \frac{C^2}{2C} = \frac{C}{2} = \frac{1}{2}C$$

Então podemos ver que se e somente se os dois capacitores conectados em série são iguais e iguais, então a capacitância total, C_T será exatamente igual a metade do valor da capacitância, ou seja: $C/2$.

Com resistores conectados em série, a soma de todas as quedas de tensão no circuito em série será igual à tensão aplicada V_S (Lei de Tensão de Kirchhoff) e isso também é verdade para capacitores em série.

Com capacitores conectados em série, a reatância capacitiva do capacitor atua como uma impedância devido à frequência da alimentação. Essa reatância capacitiva produz uma queda de tensão em cada capacitor, portanto, os capacitores conectados em série atuam como uma rede divisora de tensão capacitiva.

O resultado é que a fórmula do divisor de tensão aplicada aos resistores também pode ser usada para encontrar as tensões individuais para dois capacitores em série. Então:

$$V_{CX} = V_S \frac{C_T}{C_X}$$

Onde: C_X é a capacitância do capacitor em questão, V_S é a tensão de alimentação na cadeia em série e V_{CX} é a queda de tensão no capacitor alvo.

Exemplo 2

Encontre a capacitância total e as quedas de tensão rms individuais nos seguintes conjuntos de dois capacitores em série quando conectados a uma fonte de 12 V CA.

- a) dois capacitores cada um com uma capacitância de 47nF
 b) um capacitor de 470nF conectado em série a um capacitor de 1μF
 a) Capacitância Igual Total,

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{47\text{nF} \times 47\text{nF}}{47\text{nF} + 47\text{nF}} = 23.5\text{nF}$$

Queda de tensão nos dois capacitores idênticos de 47nF ,

$$V_{C1} = \frac{C_T}{C_1} \times V_T = \frac{23.5\text{nF}}{47\text{nF}} \times 12\text{V} = 6\text{volts}$$

$$V_{C2} = \frac{C_T}{C_2} \times V_T = \frac{23.5\text{nF}}{47\text{nF}} \times 12\text{V} = 6\text{volts}$$

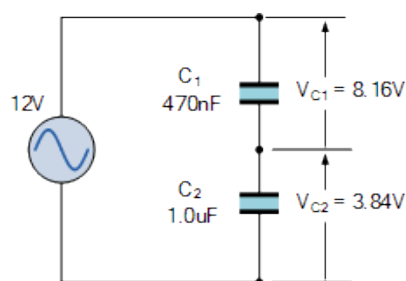
b) Capacitância Total Desigual,

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{470\text{nF} \times 1\mu\text{F}}{470\text{nF} + 1\mu\text{F}} = 320\text{nF}$$

Queda de tensão entre os dois capacitores não idênticos: $C_1 = 470\text{nF}$ e $C_2 = 1\mu\text{F}$.

$$V_{C1} = \frac{C_T}{C_1} \times V_T = \frac{320\text{nF}}{470\text{nF}} \times 12 = 8.16\text{volts}$$

$$V_{C2} = \frac{C_T}{C_2} \times V_T = \frac{320\text{nF}}{1\mu\text{F}} \times 12 = 3.84\text{volts}$$



Como a lei de tensão de Kirchhoff se aplica a este e a todos os circuitos conectados em série, a soma total das quedas de tensão individuais será igual em valor à tensão de alimentação, V_s . Então $8,16 + 3,84 = 12\text{V}$.

Observe também que se os valores dos capacitores forem os mesmos, 47nF em nosso primeiro exemplo, a tensão de alimentação será dividida igualmente em cada capacitor, conforme mostrado. Isso ocorre porque cada capacitor na cadeia em série compartilha uma quantidade igual e exata de carga ($Q = C \times V = 0,564\mu\text{C}$) e, portanto, tem metade (ou fração percentual para mais de dois capacitores) da tensão aplicada, V_s .

No entanto, quando os valores dos capacitores em série são diferentes, o capacitor de maior valor se carregará com uma tensão mais baixa e o capacitor de menor valor com uma tensão mais alta, e em nosso segundo exemplo acima isso foi mostrado como 3,84 e 8,16 volts, respectivamente. Essa diferença de tensão permite que os capacitores mantenham a mesma quantidade de carga, Q nas placas de cada capacitor, conforme mostrado.

$$Q_{C1} = V_{C1} \times C_1 = 8.16\text{V} \times 470\text{nF} = 3.84\mu\text{C}$$

$$Q_{C2} = V_{C2} \times C_2 = 3.84\text{V} \times 1\mu\text{F} = 3.84\mu\text{C}$$

Observe que as relações das quedas de tensão nos dois capacitores conectados em série sempre permanecerão as mesmas, independentemente da frequência de alimentação como sua reatância, X_c permanecerá proporcionalmente o mesmo.

Então as duas quedas de tensão de 8,16 volts e 3,84 volts acima em nosso exemplo simples permanecerão as mesmas, mesmo que a frequência de alimentação seja aumentada de 100Hz para 100kHz.

Embora as quedas de tensão em cada capacitor sejam diferentes para diferentes valores de capacitância, a carga coulombiana nas placas será igual porque a mesma quantidade de fluxo de corrente existe em um circuito em série, pois todos os capacitores estão sendo fornecidos com o mesmo número ou quantidade de elétrons.

Em outras palavras, se a carga nas placas de cada capacitor é a mesma, como Q é constante, então, à medida que sua capacitância diminui, a queda de tensão nas placas dos capacitores aumenta, porque a carga é grande em relação à capacitância. Da mesma forma, uma capacitância maior resultará em uma queda de tensão menor em suas placas porque a carga é pequena em relação à capacitância.

Resumo do tutorial

Então, para resumir, a capacitância total ou equivalente, C_T de um circuito contendo capacitores em série é o recíproco da soma dos recíprocos de todas as capacitâncias individuais somadas.

Também para capacitores conectados em série, todos os capacitores conectados em série terão a mesma corrente de carga fluindo através deles como $i_T = i_1 = i_2 = i_3$ etc. Dois ou mais capacitores em série sempre terão quantidades iguais de carga coulomb através suas placas.

Como a carga (Q) é igual e constante, a queda de tensão no capacitor é determinada pelo valor do capacitor apenas como $V = Q \div C$. Um valor pequeno de capacitância resultará em uma tensão maior, enquanto um valor grande de capacitância resultará em uma queda de tensão menor.

Capacitância em circuitos CA

Capacitores conectados a uma fonte senoidal produzem reatância dos efeitos da frequência de alimentação e do tamanho do capacitor

A capacitância em circuitos CA resulta em uma corrente dependente do tempo que é deslocada de fase em 90° em relação à tensão de alimentação, produzindo um efeito conhecido como reatância capacitiva.

Quando os capacitores são conectados através de uma tensão de alimentação CC de corrente contínua, suas placas são carregadas até que o valor da tensão através do capacitor seja igual ao da tensão aplicada externamente. O capacitor manterá essa carga indefinidamente, agindo como um dispositivo de armazenamento temporário enquanto a tensão aplicada for mantida.

Durante este processo de carregamento, uma corrente elétrica (i) flui para o capacitor, o que faz com que suas placas comecem a manter uma carga eletrostática. Este processo de carregamento não é instantâneo ou linear, pois a intensidade da corrente de carregamento é máxima quando as placas dos capacitores estão descarregadas, diminuindo exponencialmente ao longo do tempo até que o capacitor esteja totalmente carregado.

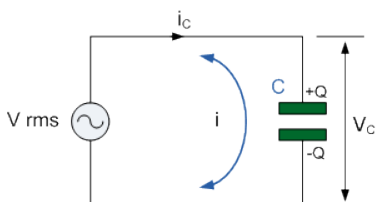
Isso ocorre porque o campo eletrostático entre as placas se opõe a qualquer mudança na diferença de potencial entre as placas a uma taxa que é igual à taxa de variação da carga elétrica nas placas. A propriedade de um capacitor de armazenar uma carga em suas placas é chamada de capacitância, (C).

Assim, uma corrente de carga de capacitores pode ser definida como: $i = Cdv/dt$. Uma vez que o capacitor está “totalmente carregado”, o capacitor bloqueia o fluxo de mais elétrons em suas placas à medida que ficam saturados. No entanto, se aplicarmos uma corrente alternada ou alimentação CA, o capacitor carregará e descarregará alternadamente a uma taxa determinada pela frequência da alimentação. Então, a **capacitância em circuitos CA** varia com a frequência à medida que o capacitor está sendo constantemente carregado e descarregado.

Sabemos que o fluxo de elétrons nas placas de um capacitor é diretamente proporcional à taxa de variação da voltagem através dessas placas. Então, podemos ver que, para capacitância em circuitos CA, eles gostam de passar corrente quando a tensão em suas placas está mudando constantemente em relação ao tempo, como em sinais CA.

No entanto, eles não gostam de passar corrente quando a tensão aplicada é de um valor constante de estado estacionário, como em sinais CC. Considere o circuito abaixo.

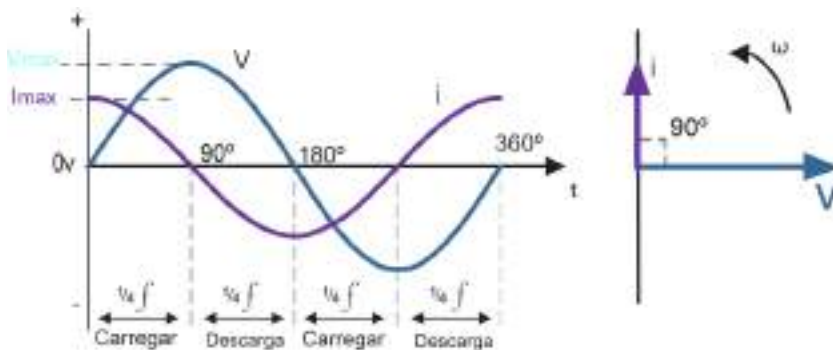
Circuito do capacitor CA



No circuito puramente capacitivo acima, o capacitor é conectado diretamente através da tensão de alimentação CA. À medida que a tensão de alimentação aumenta e diminui, o capacitor carrega e descarrega em relação a essa mudança. Sabemos que a corrente de carga é diretamente proporcional à taxa de variação da tensão através das placas com esta taxa de variação no seu máximo à medida que a tensão de alimentação passa do meio ciclo positivo para o meio ciclo negativo ou vice-versa nos pontos, 0° e 180° ao longo da onda senoidal.

Consequentemente, a menor taxa de variação de tensão ocorre quando a onda senoidal AC cruza em seu pico positivo máximo ($+V_{MAX}$) e seu pico negativo mínimo, ($-V_{MAX}$). Nestas duas posições dentro do ciclo, a tensão senoidal é constante, portanto, sua taxa de variação é zero, então dv/dt é zero, resultando em variação zero da corrente dentro do capacitor. Assim, quando $dv/dt = 0$, o capacitor atua como um circuito aberto, então $i = 0$ e isso é mostrado abaixo.

Diagrama Fasorial do Capacitor CA



Em 0° , a taxa de variação da tensão de alimentação está aumentando em uma direção positiva, resultando em uma corrente de carga máxima naquele instante de tempo. À medida que a tensão aplicada atinge seu valor de pico máximo em 90° por um breve instante de tempo, a tensão de alimentação não aumenta nem diminui, de modo que não há corrente fluindo pelo circuito.

À medida que a tensão aplicada começa a diminuir para zero em 180° , a inclinação da tensão é negativa, de modo que o capacitor descarrega na direção negativa. No ponto de 180° ao longo da linha, a taxa de variação da tensão está novamente em seu máximo, de modo que a corrente máxima flui naquele instante e assim por diante.

Então podemos dizer que para capacitores em circuitos CA a corrente instantânea está em seu mínimo ou zero sempre que a tensão aplicada está em seu máximo e da mesma forma o valor instantâneo da corrente está em seu valor máximo ou de pico quando a tensão aplicada está em seu mínimo ou zero.

A partir da forma de onda acima, podemos ver que a corrente está adiantando a tensão em $1/4$ de ciclo ou 90° , conforme mostrado pelo diagrama vetorial. Então podemos dizer que em um circuito puramente capacitivo a tensão alternada está atrasada em 90° .

Sabemos que a corrente que flui através da capacitância em circuitos CA está em oposição à taxa de variação da tensão aplicada. Mas, assim como os resistores, os capacitores também oferecem alguma forma de resistência contra o fluxo de corrente. Para capacitores em circuitos CA, a oposição é conhecida como **Reatância** e, como estamos lidando com circuitos de capacitores, é conhecida como **Reatância Capacitiva**. Assim, a capacitância em circuitos CA sofre de **Reatância Capacitiva**.

Capacitância em circuitos CA – Reatância

A **reatância capacitiva** em um circuito puramente capacitivo é a oposição ao fluxo de corrente apenas em circuitos CA. Como a resistência, a reatância também é medida em Ohms, mas recebe o símbolo X para distingui-la de um valor puramente resistivo. Como a reatância é uma quantidade que também pode ser aplicada a indutores e capacitores, quando usada com capacitores é mais comumente conhecida como **reatância capacitiva**.

Para capacitores em circuitos CA, a reatância capacitiva recebe o símbolo X_c . Então podemos realmente dizer que a **Reatância Capacitiva** é um valor resistivo dos capacitores que varia com a frequência. Além disso, a reatância

capacitiva depende da capacitância do capacitor em Farads, bem como da frequência da forma de onda CA e a fórmula usada para definir a reatância capacitiva é dada como:

Reatância capacitiva

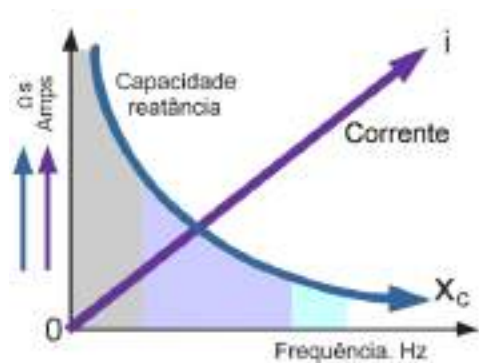
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C}$$

Onde: F está em Hertz e C está em Farads. $2\pi f$ também pode ser expresso coletivamente como a letra grega Omega, ω para denotar uma frequência angular.

A partir da fórmula de reatância capacitiva acima, pode-se ver que, se a frequência ou a **capacitância** forem aumentadas, a reatância capacitiva geral diminuirá. À medida que a frequência se aproxima do infinito, a reatância dos capacitores se reduz a zero, agindo como um condutor perfeito.

No entanto, à medida que a frequência se aproxima de zero ou CC, a reatância dos capacitores aumentaria até o infinito, agindo como uma resistência muito grande. Isso significa então que a reatância capacitiva é “inversamente proporcional” à frequência para qualquer valor de capacitância e isso é mostrado abaixo:

Reatância capacitiva contra frequência



A reatância capacitiva do capacitor diminui à medida que a frequência através dele aumenta, portanto, a reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência.

A oposição ao fluxo de corrente, a carga eletrostática nas placas (seu valor de capacitância AC) permanece constante à medida que se torna mais fácil para o capacitor absorver totalmente a mudança na carga em suas placas durante cada meio ciclo.

Além disso, à medida que a frequência aumenta, a corrente que flui através do capacitor aumenta de valor porque a taxa de mudança de tensão em suas placas aumenta.

Então podemos ver que em DC um capacitor tem reatância infinita (circuito aberto), em frequências muito altas um capacitor tem reatância zero (curto-circuito).

Capacitância em Circuitos CA - Exemplo 1

Encontre a corrente rms que flui em um circuito capacitivo CA quando um capacitor de 4μF é conectado a uma fonte de 880V, 60Hz.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times (4 \times 10^{-6})} = 663 \Omega$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{X_C} = \frac{880V}{663 \Omega} = 1.33 \text{ Amperes}$$

Em circuitos CA, a corrente senoidal através de um capacitor, que adianta a tensão em 90°, varia com a frequência à medida que o capacitor está sendo constantemente carregado e descarregado pela tensão aplicada. A impedância AC de um capacitor é conhecida como **Reatância** e como estamos lidando com circuitos de capacitores, mais comumente chamados de **Reatância Capacitiva**, X_C

Capacitância em Circuitos CA - Exemplo 2.

Quando um capacitor de placas paralelas foi conectado a uma fonte de 60 Hz CA, descobriu-se que ele tinha uma reatância de 390 ohms. Calcule o valor do capacitor em micro-farads.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \therefore C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

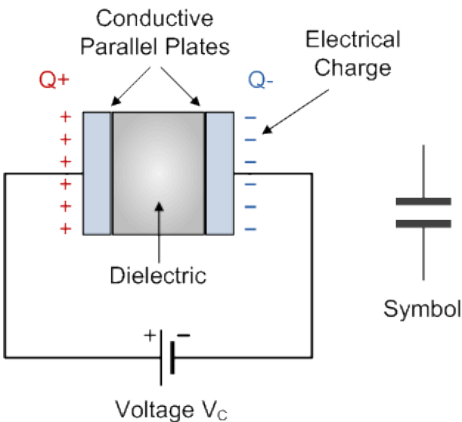
$$C = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 390} = 6.8 \mu F$$

Essa reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência e produz a oposição ao fluxo de corrente em torno de um circuito CA capacitivo, como vimos no tutorial de Capacitância CA na seção Teoria

Resumo do tutorial do capacitor

- Um capacitor consiste em duas placas de metal separadas por um dielétrico
- Como veremos neste tutorial sobre capacitores, os capacitores são dispositivos de armazenamento de energia que têm a capacidade de armazenar uma carga elétrica em suas placas. Assim, os capacitores armazenam energia como resultado de sua capacidade de armazenar carga e um capacitor ideal não perderia sua energia armazenada.
- A construção mais simples de um capacitor é usando duas placas metálicas condutoras paralelas separadas por uma distância por um material isolante. Este material isolante é chamado de “dielétrico”. o dielétrico desempenha um papel importante na operação elétrica de um capacitor e para este tutorial de capacitor podemos resumir os principais pontos abaixo.
- Um capacitor consiste em duas placas metálicas separadas por um dielétrico.
- O dielétrico pode ser feito de muitos materiais isolantes, como ar, vidro, papel, plástico, etc.
- Um capacitor é capaz de armazenar carga elétrica e energia.
- Quanto maior o valor da capacitância, mais carga o capacitor pode armazenar.
- Quanto maior a área das placas ou quanto menor sua separação, mais carga o capacitor pode armazenar.
- Diz-se que um capacitor está “totalmente carregado” quando a tensão em suas placas é igual à tensão de alimentação.
- O símbolo da carga elétrica é Q e sua unidade é o Coulomb.
- Os capacitores eletrolíticos são polarizados. Eles têm um terminal +ve e -ve .
- A capacitância é medida em Farads , que é uma unidade muito grande, então micro-Farad (μF), nano-Farad (nF) e pico-Farad (pF) são geralmente usados.
- Os capacitores que são encadeados em série em uma linha são chamados de conectados em série.
- Capacitores que têm seus respectivos terminais conectados a cada terminal de outro capacitor são ditos conectados em paralelo.
- Os capacitores conectados em paralelo têm uma tensão de alimentação comum entre eles.
- Os capacitores conectados em série têm uma corrente comum fluindo através deles.
- A reatância capacitiva, X_C é a oposição ao fluxo de corrente em circuitos CA.
- Em circuitos capacitivos CA, a tensão “atrasa” a corrente em 90° .

A construção básica e símbolo para um capacitor de placas paralelas é dado como:



Divisor de tensão capacitivo

Os circuitos divisores de tensão podem ser construídos a partir de componentes reativos tão facilmente quanto podem ser construídos a partir de resistores de valor fixo

Mas, assim como os circuitos resistivos, uma rede divisora de tensão capacitiva não é afetada por mudanças na frequência de alimentação, embora use capacitores, que são elementos reativos, pois cada capacitor na cadeia em série é afetado igualmente por alterações na frequência de alimentação.

Mas antes que possamos olhar para um circuito divisor de tensão capacitivo com mais detalhes, precisamos entender um pouco mais sobre reatância capacitiva e como ela afeta os capacitores em diferentes frequências.

Em nosso primeiro capítulo sobre capacitores, vimos que um capacitor consiste em duas placas condutoras paralelas separadas por um isolante, e possui uma carga positiva (+) em uma placa e uma carga oposta negativa (–) na outra. Vimos também que quando conectado a uma fonte DC (corrente contínua), uma vez que o capacitor está totalmente carregado, o isolante (chamado de dielétrico) bloqueia o fluxo de corrente através dele.



Capacitor típico

Um capacitor se opõe ao fluxo de corrente como um resistor, mas ao contrário de um resistor que dissipa sua energia indesejada na forma de calor, um capacitor armazena energia em suas placas quando carrega e libera ou devolve a energia ao circuito conectado quando descarrega.

Essa capacidade de um capacitor de se opor ou “reagir” contra o fluxo de corrente armazenando carga em suas placas é chamada de “reatância” e, como essa reatância se relaciona a um capacitor, é chamada de Reatância Capacitiva (X_c) e, como a resistência, a reatância é também medido em Ohms.

Quando um capacitor totalmente descarregado é conectado a uma fonte CC, como uma bateria ou fonte de alimentação, a reatância do capacitor é inicialmente

extremamente baixa e a corrente máxima do circuito flui através do capacitor por um período muito curto, à medida que as placas dos capacitores carregam exponencialmente.

Após um período de tempo igual a cerca de “5RC” ou 5 constantes de tempo, as placas do capacitor estão totalmente carregadas igualando a tensão de alimentação e não há mais fluxos de corrente. Neste ponto, a reatância do capacitor ao fluxo de corrente CC está em seu máximo na região de mega-ohms, quase um circuito aberto, e é por isso que os capacitores bloqueiam a CC.

Agora, se conectarmos o capacitor a uma fonte CA (corrente alternada) que está continuamente revertendo a polaridade, o efeito sobre o capacitor é que suas placas estão continuamente carregando e descarregando em relação à tensão de alimentação alternada aplicada. Isso significa que uma corrente de carga e descarga está sempre fluindo para dentro e para fora das placas dos capacitores, e se tivermos um fluxo de corrente também devemos ter um valor de reatância para se opor a isso. Mas qual seria o valor e quais fatores determinam o valor da reatância capacitiva. No tutorial sobre Capacitância e Carga, vimos que a quantidade de carga, (Q) presente nas placas de um capacitor é proporcional à tensão aplicada e ao valor da capacitância do capacitor. Como a tensão de alimentação alternada aplicada, (Vs) está constantemente mudando de valor, a carga nas placas também deve estar mudando de valor.

Se o capacitor tiver um valor de capacitância maior, então, para uma determinada resistência, R, leva mais tempo para carregar o capacitor como $\tau = RC$, o que significa que a corrente de carga está fluindo por um longo período de tempo. Uma capacitância mais alta resulta em um valor pequeno de reatância, X_c para uma determinada frequência.

Da mesma forma, se o capacitor tiver um valor de capacitância pequeno, uma constante de tempo RC mais curta será necessária para carregar o capacitor, o que significa que a corrente fluirá por um período de tempo mais curto. Uma capacitância menor resulta em um valor mais alto de reatância, X_c . Então podemos ver que correntes maiores significam reatâncias menores, e correntes menores significam reatâncias maiores. Portanto, a reatância capacitiva é inversamente proporcional ao valor da capacitância do capacitor, $X_c \propto \frac{1}{C}$.

A capacitância, no entanto, não é o único fator que determina a reatância capacitiva. Se a corrente alternada aplicada estiver em baixa frequência, a reatância tem mais tempo para se acumular para uma determinada constante de tempo RC e se opor à corrente indicando um grande valor de reatância. Da mesma forma, se a frequência aplicada for alta, há pouco tempo entre os ciclos de carga e descarga para

que a reatância se acumule e se oponha à corrente resultando em um fluxo de corrente maior, indicando uma reatância menor.

Então podemos ver que um capacitor é uma impedância e a magnitude dessa impedância é dependente da frequência. Portanto, frequências maiores significam reatância menor, e frequências menores significam reatância maior. Portanto, a reatância capacitiva, X_c (sua impedância complexa) é inversamente proporcional à capacitância e à frequência e a equação padrão para reatância capacitiva é dada como:

Fórmula de Reatância Capacitiva

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

Onde:

X_c = Reatância Capacitiva em Ohms, (Ω)

π (pi) = uma constante numérica de 3,142

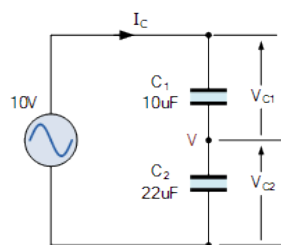
f = Frequência em Hertz, (Hz)

C = Capacitância em Farads, (F)

Distribuição de tensão em capacitores em série

Agora que vimos como a oposição às correntes de carga e descarga de um capacitor é determinada não apenas pelo seu valor de capacitância, mas também pela frequência da alimentação, vamos ver como isso afeta dois capacitores conectados em série formando um divisor de tensão capacitivo o circuito.

Divisor de tensão capacitivo



Considere os dois capacitores, C_1 e C_2 , conectados em série através de uma fonte alternada de 10 volts. Como os dois capacitores estão em série, a carga Q sobre eles é a mesma, mas a tensão sobre eles será diferente e relacionada aos seus valores de capacitância, pois $V = Q/C$.

Os circuitos divisores de tensão podem ser construídos a partir de componentes reativos tão facilmente quanto podem ser construídos a partir de resistores, pois ambos seguem a regra do divisor de tensão. Tome este circuito divisor de tensão capacitivo, por exemplo.

A tensão em cada capacitor pode ser calculada de várias maneiras. Uma dessas maneiras é encontrar o valor da reatância capacitiva de cada capacitor, a impedância total do circuito, a corrente do circuito e usá-los para calcular a queda de tensão, por exemplo:

Exemplo 1 - divisor de tensão capacitivo

Usando os dois capacitores de 10uF e 22uF no circuito em série acima, calcule as quedas de tensão rms em cada capacitor quando submetido a uma tensão senoidal de 10 volts rms a 80Hz.

Reatância capacitiva do capacitor de 10uF

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 80 \times 10 \times 10^{-6}} = 200\Omega$$

Reatância capacitiva do capacitor de 22uF

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 80 \times 22 \times 10^{-6}} = 90\Omega$$

Reatância capacitiva total do circuito em série – Observe que as reatâncias em série são somadas como resistores em série.

$$\begin{aligned} X_{C(\text{total})} &= X_{C1} + X_{C2} \\ &= 200\Omega + 90\Omega = 290\Omega \end{aligned}$$

ou:

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{10\mu\text{F} \times 22\mu\text{F}}{10\mu\text{F} + 22\mu\text{F}} = 6.88\mu\text{F}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_T} = \frac{1}{2\pi \times 80 \times 6.88\mu\text{F}} = 290\Omega$$

Corrente do circuito

$$I = \frac{E}{X_C} = \frac{10\text{V}}{290\Omega} = 34.5\text{mA}$$

Então a queda de tensão em cada capacitor no divisor de tensão capacitivo em série será:

$$V_{C1} = I \times X_{C1} = 34.5\text{mA} \times 200\Omega = 6.9\text{V}$$

$$V_{C2} = I \times X_{C2} = 34.5\text{mA} \times 90\Omega = 3.1\text{V}$$

Quando os valores do capacitor são diferentes, o capacitor de menor valor se carregará com uma tensão mais alta do que o capacitor de maior valor e, em nosso exemplo acima, isso foi de 6,9 e 3,1 volts, respectivamente. Como a lei de tensão de Kirchhoff se aplica a este e a todos os circuitos conectados em série, a soma total das quedas de tensão individuais será igual em valor à tensão de alimentação, V_s e 6,9 + 3,1 de fato é igual a 10 volts.

Observe que as relações das quedas de tensão nos dois capacitores conectados em um circuito divisor de tensão capacitivo em série sempre permanecerão as mesmas, independentemente da frequência de alimentação. Em seguida, as duas quedas de tensão de 6,9 volts e 3,1 volts acima em nosso exemplo simples permanecerão as mesmas, mesmo que a frequência de alimentação seja aumentada de 80Hz para 8000Hz, conforme mostrado.

Exemplo 2 - divisor de tensão capacitivo

Usando os mesmos dois capacitores, calcule a queda de tensão capacitiva em 8.000Hz (8kHz).

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 8000 \times 10\mu\text{F}} = 2\Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 8000 \times 22\mu\text{F}} = 0.9\Omega$$

$$I = \frac{V}{X_{C(\text{Total})}} = \frac{10}{2.9} = 3.45\text{Amps}$$

$$\therefore V_{C1} = I \times X_{C1} = 3.45\text{A} \times 2\Omega = 6.9\text{V}$$

and

$$V_{C2} = I \times X_{C2} = 3.45\text{A} \times 0.9\Omega = 3.1\text{V}$$

Embora as relações de tensão entre os dois capacitores possam permanecer as mesmas, à medida que a frequência de alimentação aumenta, a reatância capacitiva

combinada diminui e, portanto, também diminui a impedância total do circuito. Essa redução na impedância faz com que mais corrente flua. Por exemplo, em 80Hz, calculamos a corrente do circuito acima em cerca de 34,5mA, mas em 8kHz, a corrente de alimentação aumentou para 3,45A, 100 vezes mais. Portanto, a corrente que flui através de um divisor de tensão capacitivo é proporcional à frequência ou $I \propto f$.

Vimos aqui que um divisor de capacitores é uma rede de capacitores conectados em série, cada um com uma queda de tensão CA através dele. Como os divisores de tensão capacitivos usam o valor da reatância capacitiva de um capacitor para determinar a queda de tensão real, eles só podem ser usados em fontes acionadas por frequência e, portanto, não funcionam como divisores de tensão CC. Isso se deve principalmente ao fato de que os capacitores bloqueiam a CC e, portanto, nenhuma corrente flui.

Os circuitos divisores de tensão capacitivos são usados em uma variedade de aplicações eletrônicas, desde osciladores Colpitts, até telas capacitivas sensíveis ao toque que alteram sua tensão de saída quando tocadas pelo dedo de uma pessoa, sendo usados como substitutos baratos para transformadores de rede na queda de altas tensões, como em circuitos conectados à rede que usam eletrônicos de baixa tensão ou ICs, etc.

Porque, como sabemos agora, a reatância de ambos os capacitores muda com a frequência (na mesma taxa), de modo que a divisão de tensão em um circuito divisor de tensão capacitivo sempre permanecerá a mesma, mantendo um divisor de tensão constante.

Referência bibliográfica: https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap_1.html



Capítulo 9

Indutores

Neste capítulo, exploraremos os indutores, componentes cruciais em muitos circuitos eletrônicos e elétricos. Vamos entender o que são os indutores, como funcionam, suas diferentes classificações e a importância de suas aplicações na manutenção e no design de sistemas eletrônicos.

O indutor

Um indutor é um componente elétrico passivo que consiste em uma bobina de fio que é projetada para aproveitar a relação entre magnetismo e eletricidade como resultado de uma corrente elétrica que passa pela bobina

Neste tutorial, veremos que o indutor é um componente elétrico usado para introduzir indutância em um circuito que se opõe à mudança do fluxo de corrente, tanto em magnitude quanto em direção, e que mesmo um pedaço reto de fio condutor pode ter alguma quantidade de indutância nele.

Quando uma corrente elétrica flui através de um fio condutor, um fluxo magnético é desenvolvido em torno desse condutor. Esse efeito produz uma relação entre a direção do fluxo magnético, que está circulando ao redor do condutor, e a direção da corrente que flui através do mesmo condutor. Isso resulta em uma relação entre a direção da corrente e do fluxo magnético chamada de “Regra da Mão Direita de Fleming”.

Mas há também outra propriedade importante relacionada a uma bobina enrolada que também existe, que é que uma tensão secundária é induzida na mesma bobina pelo movimento do fluxo magnético à medida que se opõe ou resiste a quaisquer mudanças na corrente elétrica que a flui.



Um indutor típico

Em sua forma mais básica, um **indutor** nada mais é do que uma bobina de fio enrolada em torno de um núcleo central. Para a maioria das bobinas, a corrente (i) fluindo através da bobina produz um fluxo magnético ($N\Phi$) em torno dela que é proporcional a esse fluxo de corrente elétrica.

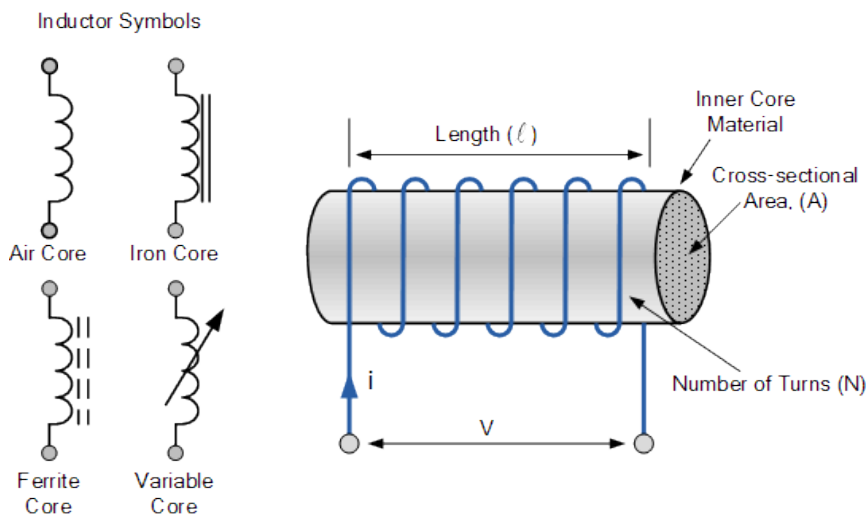
Um **indutor**, também chamado de choke, é outro componente elétrico do tipo passivo que consiste em uma bobina de fio projetada para aproveitar essa relação induzindo um campo magnético em si mesmo ou dentro de seu núcleo como resultado da corrente que flui através da bobina de fio. Transformar uma bobina de fio em um

indutor resulta em um campo magnético muito mais forte do que aquele que seria produzido por uma simples bobina de fio.

Os indutores são formados com fio firmemente enrolado em torno de um núcleo central sólido que pode ser uma haste cilíndrica reta ou um anel ou anel contínuo para concentrar seu fluxo magnético.

O símbolo esquemático para um indutor é o de uma bobina de fio, portanto, uma bobina de fio também pode ser chamada de **indutor**. Os indutores geralmente são categorizados de acordo com o tipo de núcleo interno em que são enrolados, por exemplo, núcleo oco (ar livre), núcleo de ferro sólido ou núcleo de ferrite macia com os diferentes tipos de núcleo sendo distinguidos pela adição de linhas paralelas contínuas ou pontilhadas próximas ao bobina de fio como mostrado abaixo.

Símbolo do indutor



A corrente i que flui através de um indutor produz um fluxo magnético que é proporcional a ele. Mas, ao contrário de um capacitor que se opõe a uma mudança de voltagem em suas placas, um indutor se opõe à taxa de mudança de corrente que flui através dele devido ao acúmulo de energia auto-induzida dentro de seu campo magnético.

Em outras palavras, os indutores resistem ou se opõem às mudanças de corrente, mas passarão facilmente uma corrente CC de estado estacionário. Essa capacidade de um indutor de resistir a mudanças na corrente e que também relaciona

a corrente, i com sua ligação de fluxo magnético, $N\Phi$ como constante de proporcionalidade, é chamada de **indutância**, que recebe o símbolo **L** com unidades de **Henry**, (H) depois de Joseph Henry.

Como o Henry é uma unidade de indutância relativamente grande por si só, as subunidades menores dos indutores do Henry são usadas para denotar seu valor. Por exemplo:

Prefixos de indutância

Prefixo	Símbolo	Multiplicador	Poder de dez
mili	m	1/1.000	10^{-3}
micro	μ	1/1.000.000	10^{-6}
nano	n	1/1.000.000.000	10^{-9}

Então, para exibir as subunidades do Henry, usá-íamos como exemplo:

1mH = 1 mili-Henry – que é igual a milésimos (1/1000) de um Henry.

100 μ H = 100 micro-Henries – que é igual a 100 milionésimos (1/1.000.000) de um Henry.

Indutores ou bobinas são muito comuns em circuitos elétricos e existem muitos fatores que determinam a indutância de uma bobina, como a forma da bobina, o número de voltas do fio isolado, o número de camadas de fio, o espaçamento entre as voltas, a permeabilidade do material do núcleo, o tamanho ou a área da seção transversal do núcleo, etc., para citar alguns.

Uma bobina indutora tem uma área de núcleo central, (A) com um número constante de espiras de fio por unidade de comprimento, (l). Então, se uma bobina de N espiras está ligada por uma quantidade de fluxo magnético, Φ então a bobina tem uma ligação de fluxo de $N\Phi$ e qualquer corrente, (i) que flui através da bobina produzirá um fluxo magnético induzido na direção oposta à da bobina. fluxo de corrente. Então, de acordo com a Lei de Faraday, qualquer mudança nesta ligação de fluxo magnético produz uma tensão auto-induzida na bobina única de:

$$V_L = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu N^2 A}{\ell} \frac{di}{dt}$$

Onde:

N é o número de voltas

A é a área da seção transversal em m^2

Φ é a quantidade de fluxo em Webers

μ é a permeabilidade do material do núcleo

l é o comprimento da bobina em metros

di/dt é a taxa de variação das correntes em amperes/segundo

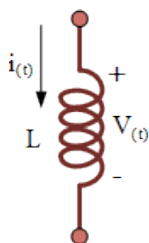
Um campo magnético variável no tempo induz uma tensão que é proporcional à taxa de variação da corrente produzindo-a com um valor positivo indicando um aumento na fem e um valor negativo indicando uma diminuição na fem. A equação que relaciona esta tensão, corrente e indutância auto-induzida pode ser encontrada substituindo o $\mu N^2 A/l$ por L denotando a constante de proporcionalidade chamada de **Indutância** da bobina.

A relação entre o fluxo no indutor e a corrente que flui através do indutor é dada como: $N\Phi = Li$. Como um indutor consiste em uma bobina de fio condutor, isso reduz a equação acima para fornecer a fem auto-induzida, às vezes chamada de **fem traseira** induzida na bobina também:

Força contra -eletromotriz gerado por um indutor

$$V_L(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{dLi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

Onde: L é a auto-indutância e di/dt a taxa de variação da corrente.



Bobina Indutora

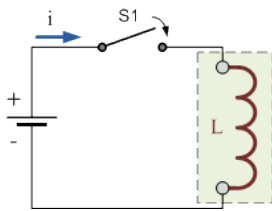
Então, a partir desta equação, podemos dizer que a “fem auto-induzida é igual à indutância vezes a taxa de variação da corrente” e um circuito tem uma indutância de um Henry terá uma fem de um volt induzida no circuito quando a corrente fluindo através do circuito muda a uma taxa de um ampere por segundo.

Um ponto importante a ser observado sobre a equação acima. Ele apenas relaciona a fem produzida através do indutor com as mudanças na corrente porque se o fluxo de corrente do indutor for constante e não mudar, como em uma corrente contínua de estado estacionário, então a tensão fem induzida será zero porque a taxa instantânea de variação da corrente é zero, $di/dt = 0$.

Com uma corrente contínua de estado estacionário fluindo através do indutor e, portanto, com tensão induzida zero através dele, o indutor atua como um curto-circuito igual a um pedaço de fio, ou pelo menos uma resistência de valor muito baixo. Em outras palavras, a oposição ao fluxo de corrente oferecido por um indutor é muito diferente entre circuitos CA e CC.

A constante de tempo de um indutor

Sabemos agora que a corrente não pode mudar instantaneamente em um indutor porque, para que isso ocorra, a corrente precisaria mudar por uma quantidade finita em tempo zero, o que resultaria na taxa de variação da corrente sendo infinita, $di/dt = \infty$, tornando a fem induzida infinita também e tensões infinitas não existem. No entanto, se a corrente que flui através de um indutor muda muito rapidamente, como na operação de uma chave, altas tensões podem ser induzidas na bobina do indutor.



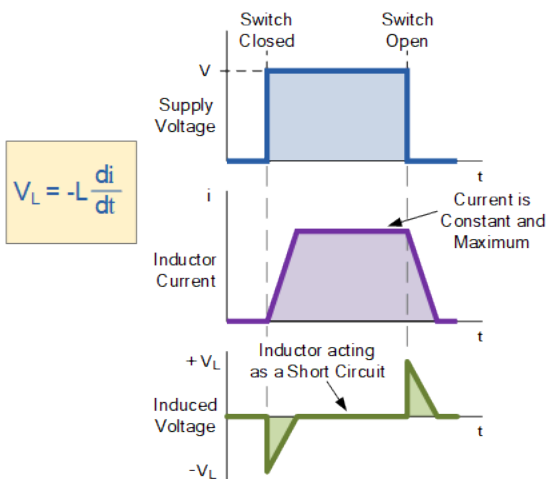
Considere o circuito de um indutor puro à direita. Com a chave ($S1$) aberta, nenhuma corrente flui pela bobina do indutor. Como nenhuma corrente flui através do indutor, a taxa de variação da corrente (di/dt) na bobina será zero. Se a taxa de variação da corrente for zero, não há contra-fem auto-induzida, ($V_L = 0$) dentro da bobina do indutor.

Se agora fecharmos a chave ($t = 0$), uma corrente fluirá pelo circuito e subirá lentamente até seu valor máximo a uma taxa determinada pela indutância do indutor. Esta taxa de corrente que flui através do indutor multiplicada pela indutância dos indutores em Henry, resulta em algum valor fixo de fem auto-induzida sendo produzido através da bobina conforme determinado pela equação de Faraday acima, $V_L = -L di/dt$.

Esta fem auto-induzida através da bobina dos indutores, (V_L) luta contra a tensão aplicada até que a corrente atinja seu valor máximo e uma condição de estado estacionário seja alcançada. A corrente que agora flui através da bobina é determinada apenas pela resistência DC ou “pura” dos enrolamentos das bobinas, pois o valor da reatância da bobina diminuiu para zero porque a taxa de variação da corrente (di/dt) é zero em uma condição de estado estacionário. Em outras palavras, em uma bobina real apenas a resistência CC da bobina existe para se opor ao fluxo de corrente através dela mesma.

Da mesma forma, se a chave (S1) for aberta, a corrente que flui pela bobina começará a cair, mas o indutor lutará novamente contra essa mudança e tentará manter a corrente fluindo em seu valor anterior, induzindo uma outra tensão na outra direção. A inclinação da queda será negativa e relacionada à indutância da bobina conforme mostrado abaixo.

Corrente e tensão em um indutor



Quanta tensão induzida será produzida pelo indutor depende da taxa de variação da corrente. Em nosso tutorial sobre Indução Eletromagnética, a **Lei de Lenz** afirmou que: “a direção de uma fem induzida é tal que sempre se opõe à mudança que a está causando”. Em outras palavras, uma fem induzida sempre se opõe ao movimento ou mudança que iniciou a fem induzida em primeiro lugar.

Assim, com uma corrente decrescente, a polaridade da tensão atuará como fonte e com uma corrente crescente, a polaridade da tensão atuará como uma

carga. Assim, para a mesma taxa de variação de corrente através da bobina, aumentar ou diminuir a magnitude da fem induzida será a mesma.

Exemplo 1

Uma corrente contínua de estado estacionário de 4 amperes passa por uma bobina solenóide de 0,5 H. Qual seria a tensão média de volta emf induzida na bobina se a chave no circuito acima fosse aberta por 10 ms e a corrente que flui através da bobina caísse para zero ampere.

$$V_L = L \frac{di}{dt} = 0.5 \frac{4}{0.01} = 200 \text{ volts}$$

Potência em um indutor

Sabemos que um indutor em um circuito se opõe ao fluxo de corrente, (i) através dele porque o fluxo dessa corrente induz uma fem que se opõe a ele, a Lei de Lenz. Então, o trabalho deve ser feito pela fonte externa da bateria para manter a corrente fluindo contra essa fem induzida. A potência instantânea usada para forçar a corrente, (i) contra esta fem auto-induzida, (V_L) é dada de cima como:

$$V_{L(t)} = -L \frac{di}{dt}$$

A potência em um circuito é dada como $P = V \cdot I$, portanto:

$$P = v \cdot i = \left(L \frac{di}{dt} \right) \times i = \frac{1}{2} L \frac{di^2}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L i^2 \right]$$

Um indutor ideal não tem resistência apenas indutância, então $R = 0 \, \Omega$ e, portanto, nenhuma potência é dissipada dentro da bobina, então podemos dizer que um indutor ideal tem perda de potência zero.

A energia armazenada

Quando a energia flui para um indutor, a energia é armazenada em seu campo magnético. Quando a corrente que flui através do indutor está aumentando e di/dt se torna maior que zero, a potência instantânea no circuito também deve ser maior que zero, ($P > 0$), ou seja, positiva o que significa que a energia está sendo armazenada no indutor.

Da mesma forma, se a corrente através do indutor estiver diminuindo e di/dt for menor que zero, então a potência instantânea também deve ser menor que zero, ($P < 0$), ou seja, negativa, o que significa que o indutor está retornando energia de volta ao circuito. Então, integrando a equação da potência acima, a energia magnética total que é sempre positiva, sendo armazenada no indutor é dada como

Energia armazenada

$$W_{(t)} = \frac{1}{2} Li_{(t)}^2$$

Onde: W está em joules, L está em Henries e i está em Amperes

A energia está realmente sendo armazenada dentro do campo magnético que envolve o indutor pela corrente que flui através dele. Em um indutor ideal que não tem resistência ou capacitância, à medida que a corrente aumenta, a energia flui para o indutor e é armazenada lá dentro de seu campo magnético sem perda, ela não é liberada até que a corrente diminua e o campo magnético entre em colapso.

Então, em um circuito de corrente alternada, um indutor está constantemente armazenando e fornecendo energia em cada ciclo. Se a corrente que flui através do indutor é constante como em um circuito CC, então não há variação na energia armazenada como $P = Li(di/dt) = 0$.

Portanto, os indutores podem ser definidos como componentes passivos, pois podem armazenar e fornecer energia ao circuito, mas não podem gerar energia. Um indutor ideal é classificado como com menos perda, o que significa que ele pode armazenar energia indefinidamente, pois nenhuma energia é perdida.

No entanto, indutores reais sempre terão alguma resistência associada aos enrolamentos da bobina e sempre que a corrente flui através de uma resistência energia é perdida na forma de calor devido à Lei de Ohms, ($P = I^2 R$) independentemente de a corrente ser alternada ou constante.

Então o uso primário para indutores é em circuitos de filtragem, circuitos de ressonância e para limitação de corrente. Um indutor pode ser usado em circuitos para bloquear ou remodelar a corrente alternada ou uma faixa de frequências senoidais e, nessa função, um indutor pode ser usado para “sintonizar” um simples receptor de rádio ou vários tipos de osciladores. Ele também pode proteger equipamentos sensíveis contra picos de tensão destrutivos e altas correntes de partida.

No próximo tutorial sobre Indutores, veremos que a resistência efetiva de uma bobina é chamada de Indutância, e essa indutância que como sabemos agora é a característica de um condutor elétrico que “se opõe a uma mudança na corrente”, pode ser internamente induzida, chamada de auto-indutância ou induzida externamente, chamada de indutância mútua.

Indutância de uma bobina

Indutância é o nome dado à propriedade de um componente que se opõe à mudança da corrente que flui através dele e mesmo um pedaço reto de fio terá alguma indutância

A indutância de uma bobina refere-se à propriedade elétrica que a bobina indutiva tem de se opor a qualquer mudança na corrente que flui através dela. Segue-se, portanto, que a indutância só está presente em um circuito elétrico quando a corrente está mudando.

Os indutores geram uma fem auto-induzida dentro de si como resultado de seu campo magnético variável. Em um circuito elétrico, quando a fem é induzida no mesmo circuito em que a corrente está mudando, esse efeito é chamado de **auto-indução**, (L), mas às vezes é comumente chamado de fem de volta, pois sua polaridade está na direção oposta à da tensão aplicada.

Quando a fem é induzida em um componente adjacente situado dentro do mesmo campo magnético, diz-se que a fem é induzida por **indução mútua**, (M) e a indução mútua é o princípio básico de operação de transformadores, motores, relés etc. um caso especial de indutância mútua, e porque é produzido dentro de um único circuito isolado, geralmente chamamos de auto-indutância simplesmente, **Indutância**.

A unidade básica de medida da indutância é chamada de **Henry**, (H) em homenagem a Joseph Henry, mas também possui as unidades de **Webers por Ampere** ($1H = 1 \text{ Wb/A}$).

A Lei de Lenz nos diz que uma fem induzida gera uma corrente em uma direção que se opõe à mudança no fluxo que causou a fem em primeiro lugar, o princípio da ação e reação. Então podemos definir com precisão a **indutância** como sendo: “uma bobina terá um valor de indutância de um Henry quando uma fem de um volt é induzida na bobina onde a corrente que flui através da referida bobina muda a uma taxa de um ampere/segundo”.

Em outras palavras, uma bobina tem uma indutância, (L) de um Henry, ($1H$) quando a corrente que flui através da bobina muda a uma taxa de um ampere/segundo, (A/s). Esta mudança induz uma tensão de um volt, (V_L) nele. Assim, a representação matemática da taxa de variação da corrente através de uma bobina enrolada por unidade de tempo é dada como:

$$\frac{di}{dt} \quad (A/s)$$

Onde: di é a variação da corrente em Amperes e dt é o tempo que essa corrente leva para variar em segundos. Então a tensão induzida em uma bobina, (V_L) com uma indutância de L Henries como resultado desta mudança na corrente é expressa como:

$$V_L = -L \frac{di}{dt} \quad (V)$$

Observe que o sinal negativo indica que a tensão induzida se opõe à mudança na corrente através da bobina por unidade de tempo (di/dt).

Da equação acima, a indutância de uma bobina pode, portanto, ser apresentada como:

Indutância de uma bobina

$$L = \frac{V_L}{(di/dt)} = \frac{1\text{volt}}{1\text{A/s}} = 1\text{Henry}$$

Onde: L é a indutância em Henries, V_L é a tensão na bobina e di/dt é a taxa de variação da corrente em Amperes por segundo, A/s.

Indutância, L é na verdade uma medida da “resistência” de um indutor à mudança da corrente que flui através do circuito e quanto maior for seu valor em Henries, menor será a taxa de mudança de corrente.

Sabemos pelo tutorial anterior sobre o indutor, que os indutores são dispositivos que podem armazenar sua energia na forma de um campo magnético. Os indutores são feitos de loops individuais de fio combinados para produzir uma bobina e, se o número de loops dentro da bobina for aumentado, para a mesma quantidade de corrente que flui através da bobina, o fluxo magnético também aumentará.

Então, aumentando o número de voltas ou voltas dentro de uma bobina, aumenta a indutância das bobinas. Então a relação entre a auto-indutância, (L) e o número de voltas, (N) e para uma bobina simples de camada única pode ser dada como:

Auto-indutância de uma bobina

$$L = N \frac{\Phi}{I}$$

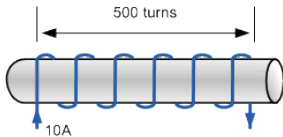
Onde:

- L está em Henries
- N é o número de voltas
- Φ é o fluxo magnético
- I está em Amperes

Esta expressão também pode ser definida como a ligação de fluxo magnético, ($N\Phi$) dividida pela corrente, pois efetivamente o mesmo valor de corrente flui através de cada espira da bobina. Observe que esta equação só se aplica a materiais magnéticos lineares.

Exemplo 1 de indutância

Uma bobina indutora com núcleo de ar oco consiste em 500 espiras de fio de cobre que produz um fluxo magnético de 10mWb ao passar uma corrente CC de 10 amperes. Calcule a auto-indutância da bobina em mili-Henries.



$$L = N \frac{\Phi}{I} = 500 \frac{0.01}{10} = 500 \text{mH}$$

Exemplo 2 de indutância

Calcule o valor da fem auto-induzida produzida na mesma bobina após um período de 10 milissegundos (10ms).

$$\text{emf} = L \frac{di}{dt} = 0.5 \frac{10}{0.01} = 500 \text{V}$$

A auto-indutância de uma bobina ou para ser mais preciso, o coeficiente de auto-indutância também depende das características de sua construção. Por exemplo,

tamanho, comprimento, número de voltas, etc. Assim, é possível ter indutores com coeficientes de auto-indução muito altos usando núcleos de alta permeabilidade e um grande número de voltas da bobina. Então, para uma bobina, o fluxo magnético que é produzido em seu núcleo interno é igual a:

$$\Phi = B.A$$

Onde: Φ é o fluxo magnético, B é a densidade de fluxo e A é a área.

Se o núcleo interno de uma bobina de solenoide longa com número N de voltas por metro de comprimento é oco, “com núcleo de ar”, então a indução magnética dentro de seu núcleo será dada como:

$$B = \mu_o H = \mu_o \frac{N.I}{\ell}$$

Então, substituindo essas expressões na primeira equação acima por Indutância nos dará:

$$L = N \frac{\Phi}{I} = N \frac{B.A}{I} = N \frac{\mu_o \cdot N.I}{\ell.I} . A$$

Ao cancelar e agrupar termos semelhantes, a equação final para o coeficiente de autoindutância para uma bobina com núcleo de ar (solenóide) é dada como:

$$L = \mu_o \frac{N^2 . A}{\ell}$$

Onde:

L está em Henries

μ_o é a Permeabilidade do Espaço Livre ($4.\pi.10^{-7}$)

N é o número de voltas

A é a Área do Núcleo Interno (πr^2) em m^2

ℓ é o comprimento da bobina em metros

Como a indutância de uma bobina é devida ao fluxo magnético ao seu redor, quanto mais forte for o fluxo magnético para um determinado valor de corrente, maior será a indutância. Assim, uma bobina de muitas espiras terá um valor de indutância maior do que uma de apenas algumas espiras e, portanto, a equação acima dará a indutância L como sendo proporcional ao número de espiras ao quadrado N^2 .

Além de aumentar o número de voltas da bobina, também podemos aumentar a indutância aumentando o diâmetro das bobinas ou tornando o núcleo mais longo. Em ambos os casos, é necessário mais fio para construir a bobina e, portanto, existem mais linhas de força para produzir a força eletromotriz necessária.

A indutância de uma bobina pode ser aumentada ainda mais se a bobina for enrolada em um núcleo ferromagnético, que é feito de um material de ferro macio, do que uma bobina em um núcleo de ar não ferromagnético ou oco



Núcleo de ferrite

Se o núcleo interno for feito de algum material ferromagnético, como ferro macio, cobalto ou níquel, a indutância da bobina aumentaria muito porque para a mesma quantidade de fluxo de corrente o fluxo magnético gerado seria muito mais forte. Isso ocorre porque o material concentra as linhas de força mais fortemente através do material do núcleo ferromagnético mais macio, como vimos no tutorial Eletroímãs.

Por exemplo, se o material do núcleo tiver uma permeabilidade relativa 1000 vezes maior que o espaço livre, $1000\mu_0$, como ferro macio ou aço, a indutância da bobina seria 1000 vezes maior, então podemos dizer que a indutância de uma bobina aumenta proporcionalmente à medida que a permeabilidade do núcleo aumenta.

Então, para uma bobina enrolada em torno de um molde ou núcleo, a equação de indutância acima precisaria ser modificada para incluir a permeabilidade relativa μ_r do novo material do molde.

Se a bobina for enrolada em um núcleo ferromagnético, uma maior indutância resultará, pois a permeabilidade do núcleo mudará com a densidade do fluxo. No entanto, dependendo do tipo de material ferromagnético, o fluxo magnético dos núcleos internos pode atingir rapidamente a saturação, produzindo um valor de indutância não linear. Como a densidade de fluxo em torno de uma bobina de fio depende da corrente que flui através dela, a indutância L , também se torna uma função desse fluxo de corrente, i .

Indutância mútua

A indutância mútua é a interação do campo magnético de uma bobina em outra bobina, uma vez que induz uma tensão na bobina adjacente

A indutância mútua é um parâmetro de circuito entre duas bobinas acopladas magneticamente e define a razão de um fluxo magnético variável no tempo criado por uma bobina sendo induzida em uma segunda bobina vizinha.

Anteriormente, vimos que um indutor gera uma fem auto-induzida como resultado de um campo magnético variável em torno de suas próprias espiras de bobina. Quando esta fem é induzida no mesmo circuito em que a corrente está mudando, esse efeito é chamado **de auto-indução (L)**.

No entanto, quando a fem é induzida em uma bobina adjacente situada dentro do mesmo campo magnético, diz-se que a fem é induzida magneticamente, indutivamente ou por **indução mútua**, símbolo (M). Então, quando duas ou mais bobinas são ligadas magneticamente por um fluxo magnético comum, diz-se que elas têm a propriedade de **indutância mútua**.

A indutância mútua é o princípio básico de funcionamento do transformador, motores, geradores e qualquer outro componente elétrico que interage com outro campo magnético. Então podemos definir indução mútua como a corrente que flui em uma bobina que induz uma tensão em uma bobina adjacente.

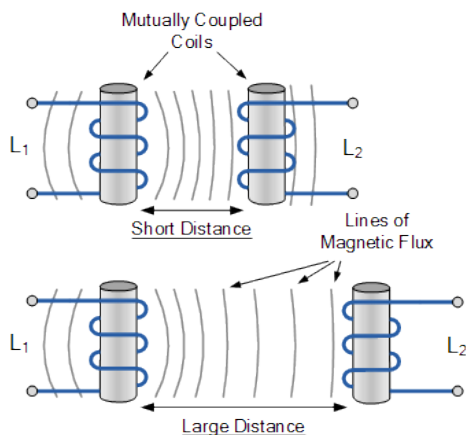
Mas a indutância mútua também pode ser uma coisa ruim, pois a indutância “dispersa” ou de “vazamento” de uma bobina pode interferir na operação de outro componente adjacente por meio de indução eletromagnética, portanto, pode ser necessária alguma forma de blindagem elétrica para um potencial de terra.

A quantidade de indutância mútua que liga uma bobina a outra depende muito do posicionamento relativo das duas bobinas. Se uma bobina for posicionada ao lado da outra bobina de modo que sua distância física seja pequena, então quase todo o fluxo magnético gerado pela primeira bobina irá interagir com as espiras da segunda bobina, induzindo uma fem relativamente grande e, portanto, produzindo uma grande valor de indutância mútua.

Da mesma forma, se as duas bobinas estiverem mais afastadas uma da outra ou em ângulos diferentes, a quantidade de fluxo magnético induzido da primeira bobina para a segunda será mais fraca, produzindo uma fem induzida muito menor e, portanto, um valor de indutância mútua muito menor. Portanto, o efeito da indutância

mútua é muito dependente das posições ou espaçamentos relativos (S) das duas bobinas e isso é demonstrado abaixo.

Indutância mútua entre bobinas



A indutância mútua que existe entre as duas bobinas pode ser grandemente aumentada posicionando-as em um núcleo de ferro macio comum ou aumentando o número de voltas de cada bobina como seria encontrado em um transformador.

Se as duas bobinas estiverem firmemente enroladas uma em cima da outra sobre uma unidade de núcleo de ferro macio comum, diz-se que existe um acoplamento entre elas, pois quaisquer perdas devido ao vazamento de fluxo serão extremamente pequenas. Então, assumindo uma ligação de fluxo perfeita entre as duas bobinas, a indutância mútua que existe entre elas pode ser dada como.

$$M = \frac{\mu_0 \mu_r N_1 N_2 A}{\ell}$$

Onde:

μ_0 é a permeabilidade do espaço livre ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$)

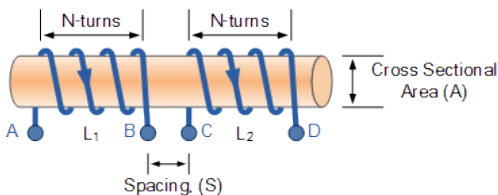
μ_r é a permeabilidade relativa do núcleo de ferro macio

N está no número de voltas da bobina

A está na área da seção transversal em m^2

ℓ é o comprimento das bobinas em metros

Indução mútua



Aqui, a corrente que flui na bobina um, L_1 cria um campo magnético em torno de si mesma com algumas dessas linhas de campo magnético passando pela bobina dois, L_2 nos dando indutância mútua. A bobina um tem uma corrente de I_1 e N_1 voltas, enquanto a bobina dois tem N_2 voltas. Portanto, a indutância mútua, M_{12} da bobina dois que existe em relação à bobina um depende de suas posições em relação uma à outra e é dada como:

$$M_{12} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{I_1}$$

Da mesma forma, a bobina de ligação de fluxo um, L_1 quando uma corrente flui em torno da bobina dois, L_2 é exatamente o mesmo que a bobina de ligação de fluxo dois quando a mesma corrente flui em torno da bobina um acima, então a indutância mútua da bobina um em relação a a bobina dois é definida como M_{21} . Esta indutância mútua é verdadeira independentemente do tamanho, número de voltas, posição relativa ou orientação das duas bobinas. Por causa disso, podemos escrever a indutância mútua entre as duas bobinas como: $M_{12} = M_{21} = M$.

Então podemos ver que a auto indutância caracteriza um indutor como um único elemento de circuito, enquanto a indutância mútua significa alguma forma de acoplamento magnético entre dois indutores ou bobinas, dependendo de sua distância e disposição, e esperamos lembrar de nossos tutoriais sobre eletroímãs que o auto indutância de cada bobina individual é dada como:

$$L_1 = \frac{\mu_0 \mu_r N_1^2 A}{\ell} \quad \text{e} \quad L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r N_2^2 A}{\ell}$$

Multiplicando as duas equações acima, a indutância mútua M que existe entre as duas bobinas pode ser expressa em termos da autoindutância de cada bobina.

$$M^2 = L_1 L_2$$

dando-nos uma expressão final e mais comum para a indutância mútua entre as duas bobinas de:

Indutância mútua entre bobinas

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad H$$

No entanto, a equação acima assume vazamento de fluxo zero e 100% de acoplamento magnético entre as duas bobinas, L_1 e L_2 . Na realidade sempre haverá alguma perda por vazamento e posição, então o acoplamento magnético entre as duas bobinas nunca pode atingir ou ultrapassar 100%, mas pode chegar muito próximo a este valor em algumas bobinas indutivas especiais.

Se parte do fluxo magnético total se ligar às duas bobinas, essa quantidade de ligação de fluxo pode ser definida como uma fração do fluxo total de ligação possível entre as bobinas. Esse valor fracionário é chamado **de coeficiente de acoplamento** e recebe a letra k .

Coeficiente de Acoplamento

Geralmente, a quantidade de acoplamento indutivo que existe entre as duas bobinas é expressa como um número fracionário entre 0 e 1 em vez de um valor percentual (%), onde 0 indica zero ou nenhum acoplamento indutivo e 1 indica acoplamento indutivo total ou máximo.

Em outras palavras, se $k = 1$ as duas bobinas estão perfeitamente acopladas, se $k > 0,5$ as duas bobinas são ditas fortemente acopladas e se $k < 0,5$ as duas bobinas são ditas fracamente acopladas. Então a equação acima que assume um acoplamento perfeito pode ser modificada para levar em conta este coeficiente de acoplamento, k e é dado como:

Fator de acoplamento entre bobinas

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \text{ou} \quad M = k \sqrt{L_1 L_2}$$

Quando o coeficiente de acoplamento, k é igual a 1, (unidade) tal que todas as linhas de fluxo de uma bobina cortam todas as espiras da segunda bobina, ou seja, as duas bobinas estão firmemente acopladas, a indutância mútua resultante será ser igual à média geométrica das duas indutâncias individuais das bobinas.

Além disso, quando as indutâncias das duas bobinas são iguais e iguais, L_1 é igual a L_2 , a indutância mútua que existe entre as duas bobinas será igual ao valor de uma única bobina, pois a raiz quadrada de dois valores iguais é a mesma como um único valor, como mostrado.

$$M = \sqrt{L_1 L_2} = L$$

Exemplo 1 de Indutância Mútua

Dois indutores cujas autoindutâncias são dadas como 75mH e 55mH respectivamente, são posicionados próximos um do outro em um núcleo magnético comum de modo que 75% das linhas de fluxo da primeira bobina cortam a segunda bobina. Calcule a indutância mútua total que existe entre as duas bobinas.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

$$M = 0.75 \sqrt{75\text{mH} \times 55\text{mH}} = 48.2\text{mH}$$

Exemplo 2 de indutância mútua

Quando duas bobinas com indutâncias de 5H e 4H respectivamente foram enroladas uniformemente em um núcleo não magnético, verificou-se que sua indutância mútua era de 1,5H. Calcule o coeficiente de acoplamento que existe entre.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{1.5}{\sqrt{5 \times 4}} = 0.335 = 33.5\%$$

No próximo tutorial sobre indutores, veremos como conectar indutores em série e o efeito que essa combinação tem na indutância mútua dos circuitos, indutância total e suas tensões induzidas.

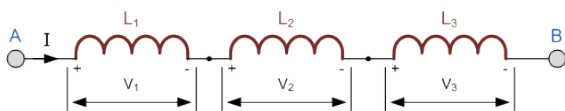
Indutores em Série

Os indutores podem ser conectados juntos em uma conexão em série quando são encadeados em série compartilhando uma corrente elétrica comum

Essas interconexões de indutores produzem redes mais complexas cuja indutância geral é uma combinação dos indutores individuais. No entanto, existem certas regras para conectar indutores em série ou paralelo e elas se baseiam no fato de que não existe indutância mútua ou acoplamento magnético entre os indutores individuais.

Diz-se que os indutores estão conectados em “Série” quando são encadeados em linha reta, de ponta a ponta. No tutorial Resistores em Série vimos que os diferentes valores das resistências conectadas em série apenas “somam” e isso também é verdade para a indutância. Indutores em série são simplesmente “somados” porque o número de voltas da bobina é efetivamente aumentado, com a indutância total do circuito LT_{sendo} igual à soma de todas as indutâncias individuais somadas.

Indutor no circuito em série



A corrente, (I) que flui através do primeiro indutor, L_1 não tem outro caminho a não ser passar pelo segundo indutor e pelo terceiro e assim por diante. Então, os indutores em série têm uma **corrente comum** fluindo através deles, por exemplo:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_{AB} \dots \text{etc.}$$

No exemplo acima, os indutores L_1 , L_2 e L_3 estão todos conectados em série entre os pontos A e B. A soma das quedas de tensão individuais em cada indutor pode ser encontrada usando a Lei de Tensão de Kirchhoff (KVL), onde $V_T = V_1 + V_2 + V_3$ e sabemos dos tutoriais anteriores sobre indutância que a fem auto-induzida em um indutor é dado como: $V = L \, di/dt$.

Assim, tomando os valores das quedas de tensão individuais em cada indutor em nosso exemplo acima, a indutância total para a combinação em série é dada como:

$$L_T \frac{di}{dt} = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + L_3 \frac{di}{dt}$$

Ao dividir a equação acima por di/dt , podemos reduzi-la para obter uma expressão final para calcular a indutância total de um circuito ao conectar indutores em série e isso é dado como:

Indutores na Equação da Série

$$L_{\text{total}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \text{ etc.}$$

Então, a indutância total da cadeia em série pode ser encontrada simplesmente somando as indutâncias individuais dos indutores em série, assim como somar resistores em série. No entanto, a equação acima só é verdadeira quando há indutância mútua “NÃO” ou acoplamento magnético entre dois ou mais dos indutores (eles são magneticamente isolados um do outro).

Um ponto importante a ser lembrado sobre indutores em circuitos em série, a indutância total (L_T) de quaisquer dois ou mais indutores conectados em série sempre será **MAIOR** que o valor do maior indutor na cadeia em série.

Indutores em Série Exemplo 1

Três indutores de 10mH, 40mH e 50mH são conectados em série sem indutância mútua entre eles. Calcule a indutância total da combinação em série.

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 = 10\text{mH} + 40\text{mH} + 50\text{mH} = 100\text{mH}$$

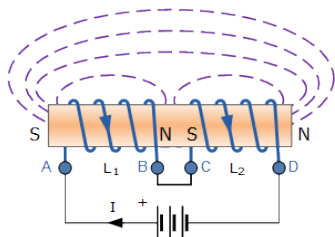
Indutores mutuamente conectados em série

Quando os indutores são conectados em série, de modo que o campo magnético de um se ligue ao outro, o efeito da indutância mútua aumenta ou diminui a indutância total, dependendo da quantidade de acoplamento magnético. O efeito dessa indutância mútua depende da distância entre as bobinas e sua orientação entre si.

Indutores em série mutuamente conectados podem ser classificados como “Ajudando” ou “Opondo-se” à indutância total. Se o fluxo magnético produzido pela

corrente flui através das bobinas na mesma direção, diz-se que as bobinas estão **acopladas cumulativamente**. Se a corrente flui através das bobinas em direções opostas, diz-se que as bobinas estão **Acopladas Diferencialmente**, como mostrado a seguir.

Indutores em Série Acoplados Cumulativamente



Enquanto a corrente que flui entre os pontos A e D através das duas bobinas cumulativamente acopladas está na mesma direção, a equação acima para as quedas de tensão em cada uma das bobinas precisa ser modificada para levar em conta a interação entre as duas bobinas devido à efeito da indutância mútua. A auto-indutância de cada bobina individual, L_1 e L_2 , respectivamente, será a mesma de antes, mas com a adição de M denotando a indutância mútua.

Então a fem total induzida nas bobinas cumulativamente acopladas é dada como:

$$L_T \frac{di}{dt} = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + 2 \left(M \frac{di}{dt} \right)$$

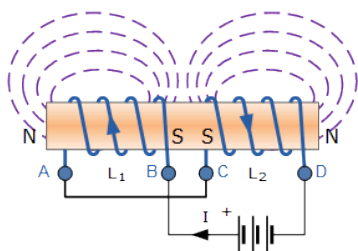
Onde: $2M$ representa a influência da bobina L_1 em L_2 e da mesma forma a bobina L_2 em L_1 .

Ao dividir a equação acima por di/dt , podemos reduzi-la para obter uma expressão final para calcular a indutância total de um circuito quando os indutores estão cumulativamente conectados e isso é dado como:

$$L_{\text{total}} = L_1 + L_2 + 2M$$

Se uma das bobinas for invertida de modo que a mesma corrente flua através de cada bobina, mas em direções opostas, a indutância mútua M que existe entre as duas bobinas terá um efeito de cancelamento em cada bobina, conforme mostrado a seguir.

Indutores em Série Acoplados Diferencialmente



A fem que é induzida na bobina 1 pelo efeito da indutância mútua da bobina dois está em oposição à fem auto-induzida na bobina um, pois agora a mesma corrente passa por cada bobina em direções opostas. Para levar em conta esse efeito de cancelamento, um sinal de menos é usado com M quando o campo magnético das duas bobinas está conectado diferencialmente, dando-nos a equação final para calcular a indutância total de um circuito quando os indutores estão conectados diferencialmente como:

$$L_{\text{total}} = L_1 + L_2 - 2M$$

Então a equação final para indutores acoplados indutivamente em série é dada como:

$$L_T = L_1 + L_2 \pm 2M$$

Exemplo 2

Dois indutores de 10mH, respectivamente, são conectados em uma combinação em série, de modo que seus campos magnéticos auxiliam um ao outro, proporcionando acoplamento cumulativo. Sua indutância mútua é dada como 5mH. Calcule a indutância total da combinação em série.

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_T = 10\text{mH} + 10\text{mH} + 2(5\text{mH})$$

$$L_T = 30\text{mH}$$

Exemplo 3

Duas bobinas conectadas em série têm uma auto-indutância de 20mH e 60mH, respectivamente. A indutância total da combinação foi de 100mH. Determine a quantidade de indutância mútua que existe entre as duas bobinas supondo que elas estejam ajudando uma à outra.

$$L_T = L_1 + L_2 \pm 2M$$

$$100 = 20 + 60 + 2M$$

$$2M = 100 - 20 - 60$$

$$\therefore M = \frac{20}{2} = 10\text{mH}$$

Resumo do tutorial

Agora sabemos que podemos conectar **indutores em série** para produzir um valor de indutância total, L_T igual à soma dos valores individuais, eles somam, semelhante a conectar resistores em série. No entanto, ao conectar indutores, eles podem ser influenciados pela indutância mútua.

Os indutores em série mutuamente conectados são classificados como “auxiliares” ou “opostos” à indutância total, dependendo se as bobinas são acopladas cumulativamente (na mesma direção) ou acopladas diferencialmente (na direção oposta).

No próximo tutorial sobre Indutores, veremos que a posição das bobinas ao conectar Indutores em Paralelo também afeta a indutância total, L_T do circuito.

Indutores em paralelo

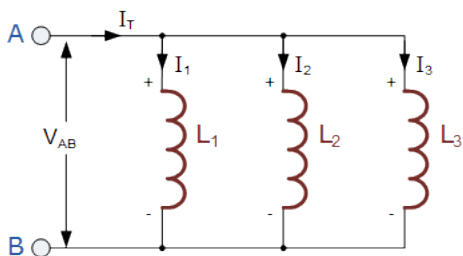
Diz-se que os indutores estão conectados em paralelo quando ambos os seus terminais estão conectados respectivamente a cada terminal de outro indutor ou indutores.

A queda de tensão em todos os indutores em paralelo será a mesma. Então, os **indutores em paralelo** têm uma **tensão comum** entre eles e, em nosso exemplo abaixo, a tensão nos indutores é dada como:

$$V_{L1} = V_{L2} = V_{L3} = V_{AB} \dots \text{etc}$$

No circuito a seguir, os indutores L_1 , L_2 e L_3 estão todos conectados em paralelo entre os dois pontos A e B.

Indutores em circuito paralelo



No tutorial de indutores da série anterior, vimos que a indutância total, L_T do circuito era igual à soma de todos os indutores individuais somados. Para indutores conectados em paralelo, a indutância do circuito equivalente L_T é calculada de forma diferente.

A soma das correntes individuais que fluem através de cada indutor pode ser encontrada usando a Lei das Correntes de Kirchoff (KCL) onde, $I_T = I_1 + I_2 + I_3$ e sabemos dos tutoriais anteriores sobre indutância que a fem auto-induzida através de um indutor é dado como: $V = L \, di/dt$

Então, tomando os valores das correntes individuais que fluem através de cada indutor em nosso circuito acima, e substituindo a corrente i por $i_1 + i_2 + i_3$ a tensão através da combinação paralela é dada como:

$$V_{AB} = L_T \frac{d}{dt} (i_1 + i_2 + i_3) = L_T \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} \right)$$

Substituindo di/dt na equação acima com v/L dá:

$$V_{AB} = L_T \left(\frac{v}{L_1} + \frac{v}{L_2} + \frac{v}{L_3} \right)$$

Podemos reduzi-lo para dar uma expressão final para calcular a indutância total de um circuito paralelo, e isso é dado como:

Equação do Indutor Paralelo

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \dots\dots + \frac{1}{L_N}$$

Aqui, como os cálculos para resistores paralelos, o valor recíproco ($1/L_n$) das indutâncias individuais são todos somados em vez das próprias indutâncias. Mas, novamente, como com indutâncias conectadas em série, a equação acima só é verdadeira quando há indutância mútua “NÃO” ou acoplamento magnético entre dois ou mais indutores (eles são magneticamente isolados um do outro). Onde há acoplamento entre as bobinas, a indutância total também é afetada pela quantidade de acoplamento.

Este método de cálculo pode ser usado para calcular qualquer número de indutâncias individuais conectadas em uma única rede paralela. Se, no entanto, houver apenas duas indutâncias individuais conectadas em paralelo, uma fórmula muito mais simples e rápida pode ser usada para encontrar o valor da indutância total, e isso é:

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2}$$

Um ponto importante a ser lembrado sobre circuitos indutivos paralelos, a indutância total (L_T) de quaisquer dois ou mais indutores conectados em paralelo sempre será **MENOR** que o valor da menor indutância no ramo paralelo.

Exemplo 1

Três indutores de 60mH, 120mH e 75mH respectivamente, são conectados em uma combinação paralela sem indutância mútua entre eles. Calcule a indutância total da combinação paralela em milhenries.

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

$$\therefore L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}} = \frac{1}{\frac{1}{60\text{mH}} + \frac{1}{120\text{mH}} + \frac{1}{75\text{mH}}}$$

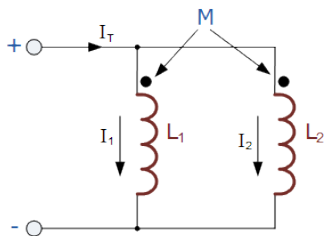
$$L_T = \frac{1}{38.333} = 26\text{mH}$$

Indutores paralelos mutuamente acoplados

Quando os indutores são conectados em paralelo de modo que o campo magnético de um se ligue ao outro, o efeito da indutância mútua aumenta ou diminui a indutância total, dependendo da quantidade de acoplamento magnético que existe entre as bobinas. O efeito dessa indutância mútua depende da distância entre as bobinas e sua orientação entre si.

Indutores paralelos mutuamente conectados podem ser classificados como "auxiliando" ou "opostos" à indutância total com bobinas conectadas auxiliando em paralelo aumentando a indutância equivalente total e bobinas opostas paralelas diminuindo a indutância equivalente total em comparação com bobinas que têm indutância mútua zero.

Bobinas paralelas acopladas mútuas podem ser mostradas como conectadas em uma configuração auxiliar ou oposta pelo uso de pontos de polaridade ou marcadores de polaridade, conforme mostrado abaixo.

Indutores Auxiliares Paralelos

A tensão entre os dois indutores auxiliares paralelos acima deve ser igual, pois eles estão em paralelo, de modo que as duas correntes, i_1 e i_2 , devem variar para que a tensão entre eles permaneça a mesma. Então a indutância total, L_T para dois indutores auxiliares paralelos é dada como:

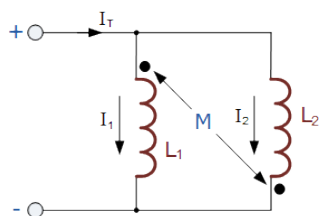
$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

Onde: $2M$ representa a influência da bobina L_1 em L_2 e da mesma forma a bobina L_2 em L_1 .

Se as duas indutâncias são iguais e o acoplamento magnético é perfeito como em um circuito toroidal, então a indutância equivalente dos dois indutores em paralelo é L como $L_T = L_1 = L_2 = M$. No entanto, se a indutância mútua entre eles for zero, a indutância equivalente seria $L \div 2$ a mesma de dois indutores auto-induzidos.

Se uma das duas bobinas fosse invertida em relação à outra, teríamos então dois indutores opostos paralelos e a indutância mútua, M que existe entre as duas bobinas, terá um efeito de cancelamento em cada bobina em vez de um efeito auxiliar, como mostrado abaixo.

Indutores opostos paralelos



Então a indutância total, L_T para dois indutores opostos paralelos é dada como:

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$$

Desta vez, se as duas indutâncias forem iguais em valor e o acoplamento magnético for perfeito entre elas, a indutância equivalente e também a fem auto-induzida nos indutores serão zero, pois os dois indutores se cancelam.

Isso ocorre porque como as duas correntes, i_1 e i_2 fluem através de cada indutor, por sua vez, o fluxo mútuo total gerado entre eles é zero porque os dois fluxos produzidos por cada indutor são iguais em magnitude, mas em direções opostas.

Em seguida, as duas bobinas efetivamente se tornam um curto-circuito para o fluxo de corrente no circuito, de modo que a indutância equivalente, L_T torna-se igual a $(L \pm M) \div 2$.

Exemplo 2

Dois indutores cujas auto-indutâncias são de 75mH e 55mH, respectivamente, são conectados em paralelo auxiliando. Sua indutância mútua é dada como 22,5mH. Calcule a indutância total.

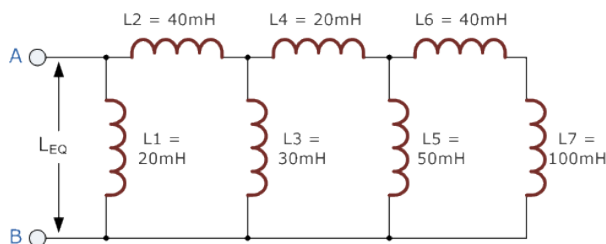
$$L_T = \frac{L_1 \times L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

$$L_T = \frac{75\text{mH} \times 55\text{mH} - 22.5\text{mH}^2}{75\text{mH} + 55\text{mH} - 2 \times 22.5\text{mH}}$$

$$L_T = 42.6\text{mH}$$

Exemplo 3

Calcule a indutância equivalente do seguinte circuito indutivo.



Calcule o primeiro ramo do indutor L_A , (Indutor L_5 paralelos aos indutores L_6 e L_7)

$$L_A = \frac{L_5 \times (L_6 + L_7)}{L_5 + L_6 + L_7} = \frac{50\text{mH} \times (40\text{mH} + 100\text{mH})}{50\text{mH} + 40\text{mH} + 100\text{mH}} = 36.8\text{mH}$$

Calcule o segundo ramo do indutor LB (Indutor L₃ em paralelo com os indutores L₄ e L_A)

$$L_B = \frac{L_3 \times (L_4 + L_A)}{L_3 + L_4 + L_A} = \frac{30\text{mH} \times (20\text{mH} + 36.8\text{mH})}{30\text{mH} + 20\text{mH} + 36.8\text{mH}} = 19.6\text{mH}$$

Calcule a indutância do circuito equivalente L_{EQ}, (Indutor L₁ em paralelo com os indutores L₂ e L_B)

$$L_{EQ} = \frac{L_1 \times (L_2 + L_B)}{L_1 + L_2 + L_B} = \frac{20\text{mH} \times (40\text{mH} + 19.6\text{mH})}{20\text{mH} + 40\text{mH} + 19.6\text{mH}} = 15\text{mH}$$

Então a indutância equivalente para o circuito acima foi encontrada: 15mH.

Resumo do tutorial

Tal como acontece com o resistor, os indutores conectados em paralelo têm a mesma tensão, V através deles. Também conectar indutores em paralelo diminui a indutância efetiva do circuito com a indutância equivalente de “N” indutores conectados em paralelo sendo o recíproco da soma dos recíprocos das indutâncias individuais.

Assim como os indutores conectados em série, os indutores paralelos mutuamente conectados são classificados como “auxiliando” ou “opondo-se” a essa indutância total, dependendo se as bobinas são acopladas cumulativamente (na mesma direção) ou acopladas diferencialmente (na direção oposta).

Até agora examinamos o indutor como um componente passivo puro ou ideal.

Circuito da Série RL

Todas as bobinas, indutores, bobinas e transformadores criam um campo magnético em torno de si consistindo de uma Indutância em série com uma Resistência formando um Circuito Série RL

Bobinas indutivas e solenóides não são dispositivos puramente indutivos, mas consistem em uma indutância e uma resistência conectadas para formar um circuito básico em série RL.

No primeiro tutorial desta seção sobre indutores, analisamos brevemente a constante de tempo de um indutor afirmando que a corrente que flui através de um indutor não pode mudar instantaneamente, mas aumentaria a uma taxa constante determinada pela força eletromotriz auto-induzida dentro de a bobina indutiva.

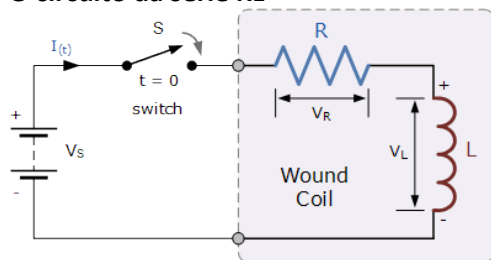
Em outras palavras, um indutor em um circuito elétrico se opõe ao fluxo de corrente, (i) através dele. Embora isso esteja perfeitamente correto, assumimos no tutorial que era um indutor ideal que não tinha resistência ou capacitância associada aos enrolamentos da bobina.

No entanto, no mundo real, “TODAS” as bobinas, sejam bobinas, solenóides, relés ou qualquer componente enrolado, sempre terão uma certa resistência, não importa quão pequena. Isso ocorre porque as voltas reais das bobinas do fio que estão sendo usadas para fazê-lo usam fio de cobre que tem um valor resistivo.

Então, para fins do mundo real, podemos considerar nossa bobina simples como sendo uma “Indutância”, L em série com uma “Resistência”, R . Em outras palavras formando um **Circuito Série RL**.

Um **Circuito Série RL** consiste basicamente em um indutor de indutância, L conectado em série com um resistor de resistência, R . A resistência “ R ” é o valor resistivo DC das voltas ou espiras do fio que vai compor a bobina dos indutores. Considere o circuito em série RL a seguir.

O circuito da série RL



O circuito em série RL está conectado através de uma fonte de tensão constante (a bateria) e um interruptor. Suponha que a chave S esteja aberta até ser fechada em um instante $t = 0$, e então permaneça permanentemente fechada produzindo uma entrada de tensão do tipo “resposta ao degrau”. A corrente i começa a fluir através do circuito, mas não sobe rapidamente até seu valor máximo de $I_{\max}$ determinado pela razão V/R (Lei de Ohms).

Este fator limitante é devido à presença da fem auto-induzida dentro do indutor como resultado do crescimento do fluxo magnético (Lei de Lenz). Depois de um tempo a fonte de tensão neutraliza o efeito da fem auto-induzida, o fluxo de corrente torna-se constante e a corrente e o campo induzidos são reduzidos a zero.

Podemos usar a Lei de Tensão de Kirchhoff, (KVL) para definir as quedas de tensão individuais que existem ao redor do circuito e depois usá-la para nos dar uma expressão para o fluxo de corrente.

A lei das tensões de Kirchhoff (KVL) nos dá:

$$V_{(t)} - (V_R + V_L) = 0$$

A queda de tensão no resistor, R é $I \cdot R$ (Lei de Ohms).

$$V_R = I \cdot R$$

A queda de tensão no indutor L , é agora nossa expressão familiar $L(di/dt)$

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

Então a expressão final para as quedas de tensão individuais ao redor do circuito série RL pode ser dada como:

$$V_{(t)} = I \times R + L \frac{di}{dt}$$

Podemos ver que a queda de tensão no resistor depende da corrente i , enquanto a queda de tensão no indutor depende da taxa de variação da corrente, di/dt . Quando a corrente é igual a zero, ($i = 0$) no tempo $t = 0$ a expressão acima, que também é uma equação diferencial de primeira ordem, pode ser reescrita para dar o valor da corrente em qualquer instante de tempo como:

Expressão para a corrente em um circuito da série RL

$$I_{(t)} = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-Rt/L} \right) \text{ (A)}$$

Onde:

V está em Volts

R está em Ohms

L está em Henries

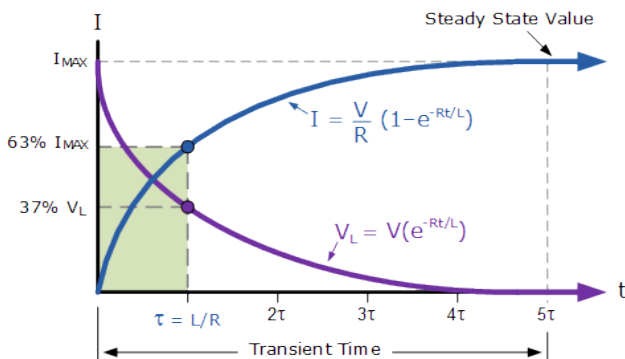
t está em segundos

e é a base do Logaritmo Natural = 2,71828

A **constante de tempo**, (τ) do circuito em série RL é dada como L/R e na qual V/R representa o valor final da corrente de estado estacionário após cinco valores de constante de tempo. Uma vez que a corrente atinge este valor máximo de estado estacionário em 5τ , a indutância da bobina foi reduzida a zero agindo mais como um curto-circuito e efetivamente removendo-a do circuito.

Portanto, a corrente que flui através da bobina é limitada apenas pelo elemento resistivo em Ohms dos enrolamentos das bobinas. Uma representação gráfica do crescimento da corrente representando as características de tensão/tempo do circuito pode ser apresentada como.

Curvas de características transitórias



Como a queda de tensão no resistor, V_R é igual a $I \cdot R$ (Lei de Ohms), ele terá o mesmo crescimento exponencial e formato da corrente. No entanto, a queda de tensão no indutor V_L , terá um valor igual a: $V e^{(-Rt/L)}$. Então, a tensão no indutor, V_L , terá um valor inicial igual à tensão da bateria no instante $t = 0$ ou quando a chave for fechada pela primeira vez e então decai exponencialmente para zero, conforme representado nas curvas acima.

O tempo necessário para a corrente que flui no circuito série LR atingir seu valor máximo de regime permanente é equivalente a cerca de **5 constantes de tempo** ou 5τ . Esta constante de tempo τ , é medida por $\tau = L/R$, em segundos, onde R é o valor do resistor em ohms e L é o valor do indutor em Henries. Isso então forma a base de um circuito de carregamento RL onde 5τ também pode ser pensado como “ $5 \cdot (L/R)$ ” ou o *tempo transitório* do circuito.

O tempo transitório de qualquer circuito indutivo é determinado pela relação entre a indutância e a resistência. Por exemplo, para uma resistência de valor fixo, quanto maior a indutância, mais lento será o tempo transitório e, portanto, uma constante de tempo mais longa para o circuito série LR. Da mesma forma, para uma indutância de valor fixo, quanto menor o valor da resistência, maior o tempo de transiente.

No entanto, para uma indutância de valor fixo, aumentando o valor da resistência o tempo transitório e, portanto, a constante de tempo do circuito se torna menor. Isso ocorre porque, à medida que a resistência aumenta, o circuito se torna cada vez mais resistivo, pois o valor da indutância se torna insignificante em comparação com a resistência. Se o valor da resistência for aumentado suficientemente grande em comparação com a indutância, o tempo transitório seria efetivamente reduzido para quase zero.

Exemplo 1

Uma bobina que tem uma indutância de 40mH e uma resistência de 2Ω é conectada para formar um circuito LR em série. Se estiverem conectados a uma fonte de 20V DC. **uma).**

Qual será o valor final de estado estacionário da corrente.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{20}{2} = 10A$$

b) Qual será a constante de tempo do circuito série RL.

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.04}{2} = 0.02s \text{ or } 20ms$$

c) Qual será o tempo transitório do circuito série RL.

$$5\tau = 5 \times 0.02s = 100ms$$

d) Qual será o valor da fem induzida após 10ms.

$$V_L = V e^{(-Rt/L)} = 20e^{(-2 \times 0.01/0.04)}$$

$$V_L = 20 \times 0.6065 = 12.13V$$

e) Qual será o valor da corrente do circuito uma constante de tempo após a chave ser fechada.

$$I_{(t)} = \frac{V_S}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

A Constante de Tempo, τ do circuito foi calculada na questão b) como sendo 20ms. Então a corrente do circuito neste momento é dada como:

$$I_{(t)} = \frac{20}{2} (1 - e^{-2 \times 0.02/0.04})$$

$$I_{(t)} = 10(1 - 0.368) = 6.32A$$

Você deve ter notado que a resposta para a questão (e) que dá um valor de 6,32 A em uma constante de tempo, é igual a 63,2% do valor final da corrente de estado estacionário de 10 A que calculamos na questão (a). Este valor de 63,2% ou $0,632 \times I_{\text{MAX}}$ também corresponde às curvas transientes mostradas acima.

Potência em um circuito da série RL

Então, de cima, a taxa instantânea na qual a fonte de tensão fornece energia ao circuito é dada como:

$$P = V \times I \quad \text{in Watts}$$

A taxa instantânea na qual a potência é dissipada pelo resistor na forma de calor é dada como:

$$P = I^2 \times R \quad \text{in Watts}$$

A taxa na qual a energia é armazenada no indutor na forma de energia potencial magnética é dada como:

$$P = Vi = Li \frac{di}{dt} \quad \text{in Watts}$$

Então podemos encontrar a potência total em um circuito em série RL multiplicando por i e é, portanto:

$$P = I^2 R + Li \frac{di}{dt} \quad (\text{Watts})$$

Onde o primeiro termo $I^2 R$ representa a potência dissipada pelo resistor em calor, e o segundo termo representa a potência absorvida pelo indutor, sua energia magnética.

Reatância indutiva

A reatância indutiva de uma bobina depende da frequência da tensão aplicada, pois a reatância é diretamente proporcional à frequência

A reatância indutiva é a propriedade de uma bobina indutiva que resiste à mudança na corrente alternada (CA) através dela e é semelhante à oposição à corrente contínua (CC) em uma resistência.

Até agora, analisamos o comportamento de indutores conectados a fontes CC e esperamos que agora saibamos que quando uma tensão CC é aplicada em um indutor, o crescimento da corrente através dele não é instantâneo, mas é determinado pelos indutores auto-induzidos. ou valor de volta emf.

Também vimos que a corrente dos indutores continua a subir até atingir sua condição de regime permanente máximo após cinco constantes de tempo. A corrente máxima que flui através de uma bobina indutiva é limitada apenas pela parte resistiva dos enrolamentos das bobinas em Ohms, e como sabemos pela lei de Ohms, isso é determinado pela relação tensão sobre corrente, V/R .

Quando uma tensão alternada ou CA é aplicada através de um indutor, o fluxo de corrente através dele se comporta de maneira muito diferente daquela de uma tensão CC aplicada. O efeito de uma alimentação senoidal produz uma diferença de fase entre as formas de onda de tensão e corrente. Agora, em um circuito CA, a oposição ao fluxo de corrente através dos enrolamentos das bobinas não depende apenas da indutância da bobina, mas também da frequência da forma de onda CA.

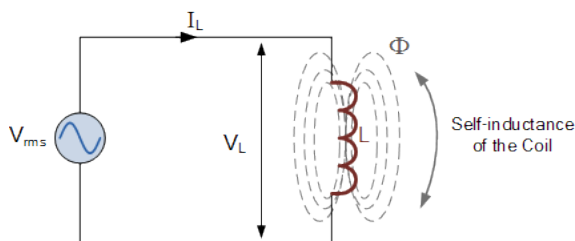
A oposição à corrente que flui através de uma bobina em um circuito CA é determinada pela resistência CA, mais comumente conhecida como **Impedância** (Z), do circuito. Mas a resistência está sempre associada a circuitos CC, portanto, para distinguir a resistência CC da resistência CA, o termo **Reatância** é geralmente usado. Assim como a resistência, o valor da reatância também é medido em Ohms, mas recebe o símbolo X , (letra maiúscula “X”), para distingui-lo de um valor puramente resistivo.

Como o componente em que estamos interessados é um indutor, a reatância de um indutor é, portanto, chamada de “Reatância Indutiva”. Em outras palavras, uma resistência elétrica indutora quando usada em um circuito AC é chamada de **Reatância Indutiva**.

A Reatância Indutiva, que recebe o símbolo X_L , é a propriedade em um circuito CA que se opõe à mudança na corrente. Em nossos tutoriais sobre Capacitores em

Circuitos CA, vimos que em um circuito puramente capacitivo, a corrente I_C “LEADS” a tensão em 90° . Em um circuito CA puramente indutivo ocorre exatamente o oposto, a corrente I_L “ATRASA” a tensão aplicada em 90° , ou $(\pi/2 \text{ rads})$.

Circuito Indutor CA

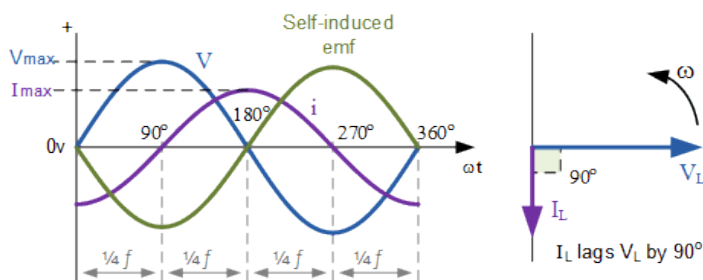


No circuito puramente indutivo acima, o indutor é conectado diretamente através da tensão de alimentação CA. À medida que a tensão de alimentação aumenta e diminui com a frequência, a fem traseira auto-induzida também aumenta e diminui na bobina em relação a essa mudança.

Sabemos que esta fem auto-induzida é diretamente proporcional à taxa de variação da corrente através da bobina e é máxima quando a tensão de alimentação passa de seu semiciclo positivo para seu semiciclo negativo ou vice-versa em pontos, 0° e 180° ao longo da onda senoidal.

Consequentemente, a taxa mínima de variação da tensão ocorre quando a onda senoidal CA cruza em seu nível de tensão de pico máximo ou mínimo. Nessas posições do ciclo, as correntes máximas ou mínimas estão fluindo através do circuito do indutor e isso é mostrado abaixo.

Diagrama Fasorial do Indutor CA



Essas formas de onda de tensão e corrente mostram que, para um circuito puramente indutivo, a corrente está atrasada em relação à tensão em 90° . Da mesma

forma, também podemos dizer que a tensão está adiantada em 90° . De qualquer forma, a expressão geral é que a corrente está atrasada conforme mostrado no diagrama vetorial. Aqui o vetor de corrente e o vetor de tensão são mostrados deslocados de 90° . *A corrente está atrasada em relação à tensão.*

Também podemos escrever esta afirmação como $V_L = 0^\circ$ e $I_L = -90^\circ$ em relação à tensão V_L . Se a forma de onda de tensão é classificada como uma onda senoidal, então a corrente, I_L pode ser classificada como um cosseno negativo e podemos definir o valor da corrente em qualquer ponto no tempo como sendo:

$$I_L = I_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

Onde: ω está em radianos por segundo e t está em segundos.

Como a corrente sempre está atrasada em relação à tensão em 90° em um circuito puramente indutivo, podemos encontrar a fase da corrente conhecendo a fase da tensão ou vice-versa. Então, se sabemos o valor de V_L , então I_L deve estar atrasado em 90° . Da mesma forma, se soubermos o valor de I_L , então V_L deve, portanto, adiantar 90° . Então esta relação de tensão para corrente em um circuito indutivo produzirá uma equação que define a **Reatância Indutiva**, X_L da bobina.

Reatância indutiva

$$X_L = \frac{V_L}{I_L} = \omega L \ (\Omega)$$

Podemos reescrever a equação acima para reatância indutiva em uma forma mais familiar que usa a frequência ordinária da fonte em vez da frequência angular em radianos, ω e isso é dado como:

$$X_L = 2\pi f L$$

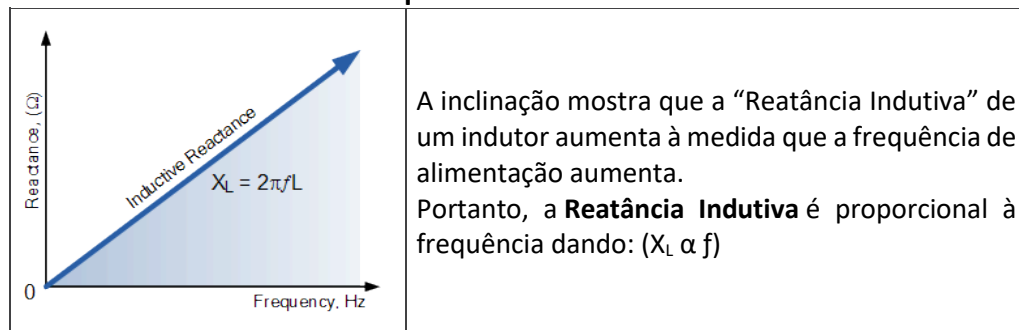
Onde: f é a Frequência e L é a Indutância da Bobina e $2\pi f = \omega$.

A partir da equação acima para reatância indutiva, pode-se ver que, se a **frequência** ou a **indutância** forem aumentadas, o valor geral da reatância indutiva também aumentará. À medida que a frequência se aproxima do infinito, a reatância dos indutores também aumenta para o infinito, agindo como um circuito aberto.

No entanto, à medida que a frequência se aproxima de zero ou CC, a reatância dos indutores diminuiria para zero, agindo como um curto-circuito. Isso significa então que a reatância indutiva é “proporcional” à frequência.

Em outras palavras, a reatância indutiva aumenta com a frequência, resultando em X_L sendo pequeno em baixas frequências e X_L sendo alto em altas frequências e isso demonstrado no gráfico a seguir:

Reatância indutiva contra frequência



Então podemos ver que em DC um indutor tem reatância zero (curto-circuito), em altas frequências um indutor tem reatância infinita (circuito aberto).

Exemplo 1

Uma bobina de indutância de 150mH e resistência zero é conectada a uma fonte de 100V, 50Hz. Calcule a reatância indutiva da bobina e a corrente que flui através dela.

Inductive Reactance:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 0.15 = 47.12\Omega$$

Current:

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{100}{47.12} = 2.12A$$

Alimentação CA através de um Circuito da Série LR

Até agora, consideramos uma bobina puramente indutiva, mas é impossível ter uma indutância pura, pois todas as bobinas, relés ou solenóides terão uma certa quantidade de resistência, não importa quão pequena seja associada às espiras das bobinas do fio que estão sendo usadas. Então podemos considerar nossa bobina simples como sendo uma resistência em série com uma indutância.

Em um circuito CA que contém indutância, L e resistência, R a tensão, V será a soma fasorial das duas tensões componentes, V_R e V_L . Isso significa então que a corrente que flui através da bobina ainda estará atrasada em relação à tensão, mas por um valor inferior a 90° , dependendo dos valores de V_R e V_L .

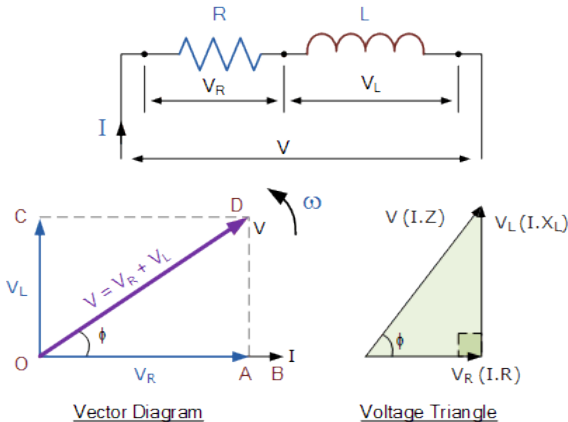
O novo ângulo de fase entre a tensão e a corrente é conhecido como ângulo de fase do circuito e recebe o símbolo grego phi, Φ .

Para poder produzir um diagrama vetorial da relação entre a tensão e a corrente, uma referência ou componente comum deve ser encontrado. Em um circuito RL conectado em série, a corrente é comum, pois a mesma corrente flui através de cada componente. O vetor desta grandeza de referência é geralmente desenhado horizontalmente da esquerda para a direita.

De nossos tutoriais sobre resistores e capacitores, sabemos que a corrente e a tensão em um circuito resistivo CA estão “em fase” e, portanto, vetoriais, V_R é desenhado sobreposto em escala na linha de corrente ou referência.

Também sabemos de cima, que a corrente “atrasa” a tensão em um circuito puramente indutivo e, portanto, o vetor V_L é desenhado 90° na frente da referência de corrente e na mesma escala que V_R e isso é mostrado a seguir.

Circuito CA Série RL



No diagrama vetorial acima pode-se ver que a linha OB representa a linha de referência de corrente, a linha OA é a tensão do componente resistivo e que está em fase com a corrente. A linha OC mostra a tensão indutiva que está 90° à frente da corrente, portanto, pode-se ver que a corrente está atrasada em 90°. A linha OD nos dá a tensão resultante ou de alimentação no circuito. O triângulo de tensão é derivado do teorema de Pitágoras e é dado como:

$$V^2 = V_R^2 + V_L^2$$

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$

$$\text{and } \tan \Phi = \frac{V_L}{V_R}$$

$$\text{Since } V_R = I \times R, \quad \text{and} \quad V_L = I \times X_L$$

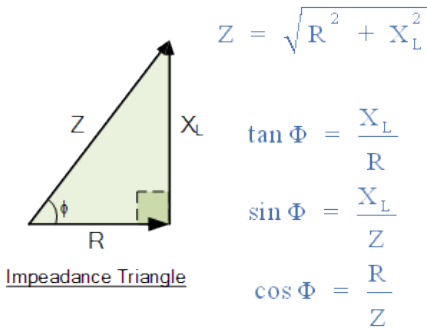
$$V = \sqrt{(I \times R)^2 + (I \times X_L)^2}$$

$$\therefore I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{V}{Z} \quad (\text{A})$$

Em um circuito DC, a razão entre tensão e corrente é chamada de resistência. No entanto, em um circuito AC essa relação é conhecida como **Impedância, Z** com unidades novamente em Ohms. Impedância é a resistência total ao fluxo de corrente em um “circuito CA” contendo resistência e reatância indutiva.

Se dividirmos os lados do triângulo de tensão acima pela corrente, obtém-se outro triângulo cujos lados representam a resistência, reatância e impedância da bobina. Este novo triângulo é chamado de “Triângulo de Impedância”

O triângulo de impedância



Exemplo 2 Reatância Indutiva

Uma bobina solenóide tem uma resistência de 30 Ohms e uma indutância de 0,5H. Se a corrente que flui através da bobina é de 4 amperes. Calcular,

a) A tensão da alimentação se a frequência for 50Hz.

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0.5$$

$$X_L = 157 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{30^2 + 157^2}$$

$$Z = 160 \Omega$$

$$V = I \times Z = 4 \times 160 = 640 \text{ V}$$

b) O ângulo de fase entre a tensão e a corrente.

$$\tan \Phi = \frac{X_L}{R}$$

$$\therefore \Phi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = \frac{157}{30} = 79.2^\circ \text{ lagging}$$

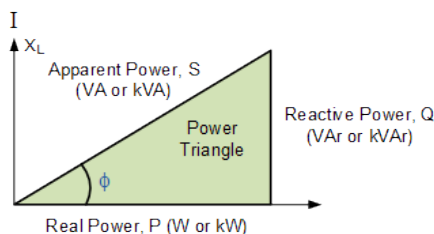
Triângulo de potência de um indutor CA

Existe um outro tipo de configuração triangular que podemos usar para um circuito indutivo e que é o “Triângulo de Potência”. A potência em um circuito indutivo é conhecida como **potência reativa** ou **volt-amps reativo**, símbolo **Var** que é medido em volt-amps. Em um circuito CA série RL, a corrente está atrasada em relação à tensão de alimentação em um ângulo de Φ° .

Em um circuito CA puramente indutivo, a corrente estará fora de fase em 90° completos em relação à tensão de alimentação. Como tal, a potência reativa total consumida pela bobina será igual a zero, pois qualquer potência consumida é cancelada pela potência emf auto-induzida gerada. Em outras palavras, a potência líquida em watts consumida por um indutor puro no final de um ciclo completo é zero, pois a energia é retirada da fonte e devolvida a ela.

A Potência Reativa, (Q) de uma bobina pode ser dada como: $I^2 \times X_L$ (semelhante a $I^2 \times R$ em um circuito DC). Em seguida, os três lados de um triângulo de potência em um circuito CA são representados pela potência aparente, (S), potência real, (P) e a potência reativa, (Q), como mostrado.

Triângulo da potência



$$P = VI \cos \phi, \quad S = VI, \quad Q = VI \sin \phi$$

$$VA = \sqrt{P^2 + VAR^2}$$

Observe que um indutor ou bobina real consumirá energia em watts devido à resistência dos enrolamentos criando uma impedância, Z.

Referência bibliográfica: <https://www.electronics-tutorials.ws/inductor/inductor.html>



Capítulo 10

Diodo

Neste capítulo, vamos explorar os diodos, componentes fundamentais em uma vasta gama de circuitos eletrônicos. Vamos entender o que são os diodos, como funcionam, suas diferentes classificações e suas aplicações e importância na manutenção de sistemas eletrônicos.

Noções básicas de semicondutores

Os materiais semicondutores são os blocos de construção básicos de todos os dispositivos eletrônicos, desde transistores, telefones, computadores e internet. Aqui neste tutorial veremos os conceitos por trás dos conceitos básicos de semicondutores, a física e as diferenças entre isolantes e condutores.

Se o resistor é o componente passivo mais básico em circuitos elétricos ou eletrônicos, então temos que considerar o diodo semicondutor como sendo o componente ativo mais básico. No entanto, ao contrário de um resistor, um diodo não se comporta linearmente em relação à tensão aplicada, pois possui uma relação IV exponencial e, portanto, não pode ser descrito simplesmente usando a lei de Ohm como fazemos para resistores.

Os diodos são dispositivos semicondutores unidirecionais básicos que só permitem que a corrente flua através deles apenas em uma direção, agindo mais como uma válvula elétrica unidirecional (condição de polarização direta). Mas, antes de dar uma olhada em como funcionam os diodos de sinal ou potência, primeiro precisamos entender os conceitos básicos de construção e conceito de semicondutores.

Os diodos são feitos de uma única peça de material semicondutor que possui uma “região P” positiva em uma extremidade e uma “região N” negativa na outra, e que possui um valor de resistividade em algum lugar entre o de um condutor e um isolante. Mas o que é um material “Semicondutor”. Em primeiro lugar, vamos ver o que torna algo um condutor ou um isolante.

Resistividade

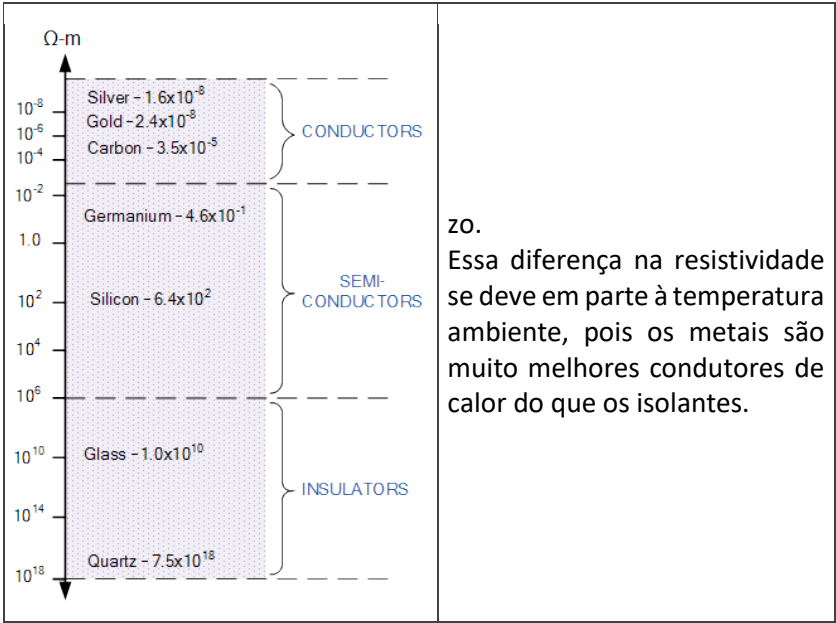
A resistência elétrica de um componente ou dispositivo elétrico ou eletrônico é geralmente definida como sendo a razão da diferença de tensão através dele para a corrente que flui através dele, princípios básicos da Lei de Ohm. O problema de usar a resistência como medida é que ela depende muito do tamanho físico do material que está sendo medido, bem como do material do qual é feito. Por exemplo, se aumentarmos o comprimento do material (tornando-o mais longo) sua resistência também aumentaria proporcionalmente.

Da mesma forma, se aumentarmos seu diâmetro ou tamanho (tornando-o mais espesso), seu valor de resistência diminuiria. Portanto, queremos ser capazes de definir o material de forma a indicar sua capacidade de conduzir ou se opor ao fluxo de corrente elétrica através dele, independentemente de seu tamanho ou forma.

A quantidade que é usada para indicar essa resistência específica é chamada de Resistividade e recebe o símbolo grego de ρ , (Rho). A resistividade é medida em Ohm-metros, ($\Omega.m$). A resistividade é o inverso da condutividade.

Se a resistividade de vários materiais for comparada, eles podem ser classificados em três grupos principais, Condutores, Isoladores e Semicondutores, conforme mostrado abaixo.

Gráfico de resistividade



zo.
Essa diferença na resistividade se deve em parte à temperatura ambiente, pois os metais são muito melhores condutores de calor do que os isolantes.

Condutores

De cima sabemos agora que Condutores são materiais que têm valores muito baixos de resistividade, geralmente na casa dos micro-ohms por metro. Esse baixo valor permite que eles passem facilmente uma corrente elétrica devido à existência de muitos elétrons livres fluuando dentro de sua estrutura básica de átomos. Mas esses elétrons só fluirão através de um condutor se houver algo para estimular seu movimento, e esse algo é uma voltagem elétrica.

Quando um potencial de voltagem positivo é aplicado ao material, esses “elétrons livres” deixam seu átomo pai e viajam juntos através do material formando

um desvio de elétrons, mais comumente conhecido como corrente. Quão “livremente” esses elétrons podem se mover através de um condutor depende da facilidade com que eles podem se libertar de seus átomos constituintes quando uma voltagem é aplicada. Então a quantidade de elétrons que flui depende da quantidade de resistividade que o condutor tem.

Exemplos de bons condutores são geralmente metais como cobre, alumínio, prata ou não metais, como carbono, porque esses materiais têm muitos poucos elétrons em sua “camada de valência” ou anel externo, resultando em serem facilmente eliminados da órbita do átomo.



Um cabo elétrico usa condutores e isolantes

Isso permite que eles fluam livremente pelo material até se unirem a outros átomos, produzindo um “Efeito Dominó” através do material, criando assim uma corrente elétrica. Cobre e Alumínio é o condutor principal usado em cabos elétricos como mostrado.

De um modo geral, a maioria dos metais são bons condutores de eletricidade, pois possuem valores de resistência muito pequenos, geralmente na região de micro-ohms por metro ($\mu\Omega.m$).

Embora metais como cobre e alumínio sejam muito bons condutores de eletricidade, eles ainda têm alguma resistência ao fluxo de elétrons e, consequentemente, não conduzem perfeitamente.

A energia que é perdida no processo de passagem de uma corrente elétrica aparece na forma de calor e é por isso que os condutores e especialmente os resistores ficam quentes à medida que a resistividade dos condutores aumenta com a temperatura ambiente.

Isoladores

Os isolantes, por outro lado, são exatamente o oposto dos condutores. Eles são feitos de materiais, geralmente não-metais, que têm muito poucos ou nenhum “elétron livre” fluando dentro de sua estrutura atômica básica porque os elétrons na camada de valência externa são fortemente atraídos pelo núcleo interno carregado positivamente.

Em outras palavras, os elétrons estão presos ao átomo pai e não podem se mover livremente, portanto, se uma tensão potencial for aplicada ao material, nenhuma corrente fluirá, pois não há “elétrons livres” disponíveis para se mover e que dá a esses materiais seu isolamento. propriedades.

Os isoladores também têm resistências muito altas, milhões de ohms por metro, e geralmente não são afetados por mudanças normais de temperatura (embora em temperaturas muito altas a madeira se torne carvão e mude de isolante para condutor). Exemplos de bons isolantes são mármore, quartzo fundido, plásticos de PVC, borracha, etc.

Os isoladores desempenham um papel muito importante dentro dos circuitos elétricos e eletrônicos, porque sem eles os circuitos elétricos entrariam em curto e não funcionariam. Por exemplo, isolantes feitos de vidro ou porcelana são usados para isolar e suportar cabos de transmissão aéreos, enquanto materiais de resina epóxi-vidro são usados para fazer placas de circuito impresso, PCBs, etc., enquanto o PVC é usado para isolar cabos elétricos, como mostrado.

Noções básicas de semicondutores

Materiais semicondutores como silício (Si), germânio (Ge) e arseneto de gálio (GaAs), têm propriedades elétricas em algum lugar no meio, entre as de um “condutor” e um “isolante”. Eles não são bons condutores nem bons isolantes (daí o nome “semi”-condutores). Eles têm muito poucos “elétrons livres” porque seus átomos estão agrupados em um padrão cristalino chamado “rede de cristal”, mas os elétrons ainda são capazes de fluir, mas apenas sob condições especiais.

A capacidade dos semicondutores de conduzir eletricidade pode ser muito melhorada substituindo ou adicionando certos átomos doadores ou aceitadores a essa estrutura cristalina, produzindo mais elétrons livres do que lacunas ou vice-versa. Isso é adicionando uma pequena porcentagem de outro elemento ao material base, silício ou germânio.

Por si só, o Silício e o Germânio são classificados como semicondutores intrínsecos, ou seja, são quimicamente puros, contendo nada além de material semicondutor. Mas controlando a quantidade de impurezas adicionadas a esse material semicondutor intrínseco é possível controlar sua condutividade. Várias impurezas chamadas doadores ou aceitadores podem ser adicionadas a esse material intrínseco para produzir elétrons livres ou lacunas, respectivamente.

Este processo de adição de átomos doadores ou aceitadores a átomos semicondutores (a ordem de 1 átomo de impureza por 10 milhões (ou mais) átomos do semicondutor) é chamado de Doping. Como o silício dopado não é mais puro, esses átomos doadores e receptores são chamados coletivamente de “impurezas” e, dopando esse material de silício com um número suficiente de impurezas, podemos transformá-lo em um tipo N ou tipo P. material semicondutor.

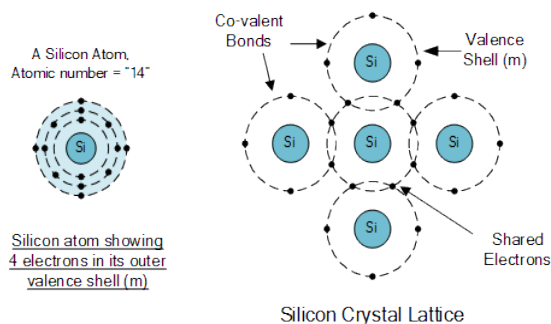
De longe, o material básico de semicondutor mais usado é o silício . O silício tem quatro elétrons de valência em sua camada mais externa que compartilha com seus átomos de silício vizinhos para formar orbitais completos de oito elétrons. A estrutura da ligação entre os dois átomos de silício é tal que cada átomo compartilha um elétron com seu vizinho, tornando a ligação muito estável.

Como há muito poucos elétrons livres disponíveis para se mover ao redor do cristal de silício, os cristais de silício puro (ou germânio) são, portanto, bons isolantes ou, no mínimo, resistores de valor muito alto.

Os átomos de silício estão dispostos em um padrão simétrico definido, tornando-os uma estrutura sólida cristalina. Um cristal de sílica pura (dióxido de silício ou vidro) é geralmente considerado um cristal intrínseco (não possui impurezas) e, portanto, não possui elétrons livres.

Mas simplesmente conectar um cristal de silício a uma bateria não é suficiente para extrair uma corrente elétrica dele. Para fazer isso, precisamos criar um pólo “positivo” e um “negativo” dentro do silício, permitindo que os elétrons e, portanto, a corrente elétrica flua para fora do silício. Esses pólos são criados dopando o silício com certas impurezas.

Uma estrutura de átomo de silício



O diagrama acima mostra a estrutura e a rede de um cristal puro 'normal' de Silício.

Noções básicas de semicondutores tipo N

Para que nosso cristal de silício conduza eletricidade, precisamos introduzir um átomo de impureza, como Arsênico, Antimônio ou Fósforo, na estrutura cristalina, tornando-a extrínseca (são adicionadas impurezas). Esses átomos têm cinco elétrons externos em seu orbital mais externo para compartilhar com átomos vizinhos e são comumente chamados de impurezas "pentavalentes".

Isso permite que quatro dos cinco elétrons orbitais se liguem aos átomos de silício vizinhos, deixando um "elétron livre" para se tornar móvel quando uma tensão elétrica é aplicada (fluxo de elétrons). Como cada átomo de impureza "doa" um elétron, os átomos pentavalentes são geralmente conhecidos como "doadores".

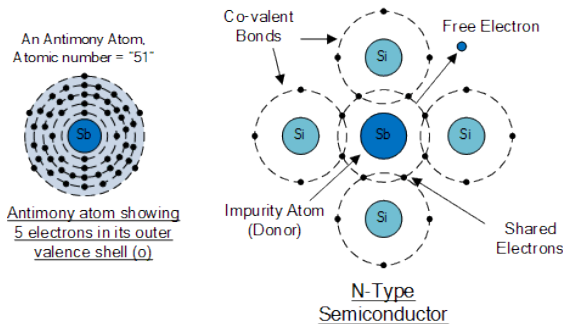
O antimônio (símbolo Sb), bem como o fósforo (símbolo P), são frequentemente usados como aditivo pentavalente ao silício. O antimônio tem 51 elétrons dispostos em cinco camadas ao redor de seu núcleo, com o orbital mais externo com cinco elétrons. O material básico de semicondutor resultante tem um excesso de elétrons que transportam corrente, cada um com uma carga negativa e, portanto, é referido como um material do tipo N com os elétrons chamados de "portadores majoritários", enquanto os buracos resultantes são chamados de "portadores minoritários".

Quando estimulados por uma fonte de energia externa, os elétrons liberados dos átomos de silício por essa estimulação são rapidamente substituídos pelos elétrons livres disponíveis dos átomos de Antimônio dopados. Mas essa ação ainda

deixa um elétron extra (o elétron liberado) fluando ao redor do cristal dopado, tornando-o carregado negativamente.

Então um material semiconductor é classificado como tipo N quando sua densidade doadora é maior que sua densidade aceptora, ou seja, tem mais elétrons do que buracos criando assim um polo negativo como mostrado.

Noções básicas de semicondutores - O átomo de antimônio e doping



O diagrama acima mostra a estrutura e a rede do átomo de impureza doador Antimônio.

Noções básicas de semicondutores tipo P

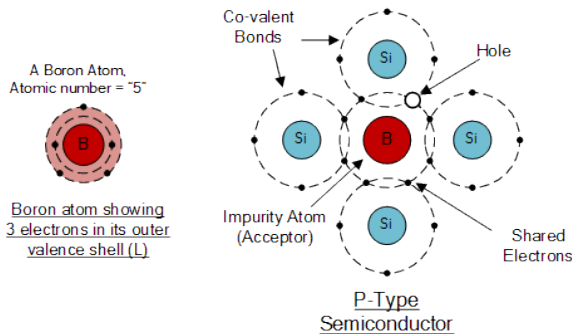
Se formos para o outro lado e introduzirmos uma impureza "trivalente" (3 elétrons) na estrutura cristalina, como alumínio, boro ou índio, que têm apenas três elétrons de valência disponíveis em seu orbital mais externo, a quarta ligação fechada não pode ser formada. Portanto, uma conexão completa não é possível, dando ao material semiconductor uma abundância de portadores carregados positivamente conhecidos como buracos na estrutura do cristal onde os elétrons estão efetivamente ausentes.

Como agora há um buraco no cristal de silício, um elétron vizinho é atraído por ele e tentará se mover para o buraco para preenchê-lo. No entanto, o elétron que preenche o buraco deixa outro buraco atrás dele enquanto se move. Este, por sua vez, atrai outro elétron que, por sua vez, cria outro buraco atrás dele, e assim por diante, dando a aparência de que os buracos estão se movendo como uma carga positiva através da estrutura cristalina (fluxo de corrente convencional).

Esse movimento de buracos resulta em uma escassez de elétrons no silício, transformando todo o cristal dopado em um polo positivo. Como cada átomo de impureza gera um buraco, as impurezas trivalentes são geralmente conhecidas como “Aceitadores”, pois estão continuamente “aceitando” elétrons extras ou livres.

O boro (símbolo B) é comumente usado como aditivo trivalente, pois possui apenas cinco elétrons dispostos em três camadas ao redor de seu núcleo, com o orbital mais externo tendo apenas três elétrons. A dopagem de átomos de boro faz com que a condução consista principalmente em portadores de carga positiva, resultando em um material do tipo P com os buracos positivos sendo chamados de “portadores majoritários”, enquanto os elétrons livres são chamados de “portadores minoritários”. Então, um material básico de semiconductor é classificado como tipo P quando sua densidade de aceitador é maior que sua densidade de doador. Portanto, um semiconductor do tipo P tem mais buracos do que elétrons.

Noções básicas de semicondutores - O átomo de boro e doping



O diagrama acima mostra a estrutura e a rede do átomo aceitador de impurezas Boro.

Resumo de Noções Básicas de Semicondutores

Tipo N (por exemplo, dopado com antimônio)

Estes são materiais que possuem átomos de impureza pentavalente (Doadores) adicionados e conduzem por movimento de “elétron” e são, portanto, chamados de Semicondutores do tipo N.

Nos semicondutores do tipo N existem:

1. Os Doadores são carregados positivamente.
2. Há um grande número de elétrons livres.
3. Um pequeno número de lacunas em relação ao número de elétrons livres.
4. O doping dá: doadores carregados positivamente.
elétrons livres carregados negativamente.
5. O fornecimento de energia fornece: elétrons livres carregados negativamente.
buracos carregados positivamente.

Tipo P (por exemplo, dopado com Boro)

Estes são materiais que possuem átomos de impurezas trivalentes (Aceptores) adicionados e conduzem por movimento de “buraco” e são, portanto, chamados de Semicondutores do tipo P.

Nestes tipos de materiais estão:

1. Os Aceitadores são carregados negativamente.
2. Há um grande número de furos.
3. Um pequeno número de elétrons livres em relação ao número de lacunas.
4. O doping dá: aceitadores carregados negativamente.
buracos carregados positivamente.
5. O fornecimento de energia fornece: buracos carregados positivamente.
elétrons livres carregados negativamente.

e ambos os tipos P e N como um todo, são eletricamente neutros por conta própria. O antimônio (Sb) e o boro (B) são dois dos agentes de dopagem mais usados, pois são mais sensíveis em comparação com outros tipos de materiais. Eles também são classificados como “metalóides”. No entanto, a tabela periódica agrupa vários outros elementos químicos diferentes, todos com três ou cinco elétrons em sua camada orbital mais externa, tornando-os adequados como material de dopagem.

Esses outros elementos químicos também podem ser usados como agentes de dopagem para um material base de Silício (Si) ou Germânio (Ge) para produzir diferentes tipos de materiais semicondutores básicos para uso em componentes

eletrônicos semicondutores, microprocessadores e aplicações de células solares. Esses materiais semicondutores adicionais são fornecidos a seguir.

Tabela Periódica de Semicondutores

Grupo de Elementos 13	Grupo de Elementos 14	Grupo de Elementos 15
3-Elétrons no invólucro externo (carregado positivamente)	4-Elétrons no invólucro externo (carregado de forma neutra)	5-Elétrons no invólucro externo (carregado negativamente)
(5) Boro (B)	(6) Carbono (C)	
(13) Alumínio (Al)	(14) Silício (Si)	(15) Fósforo (P)
(31) Gálio (Ga)	(32) Germânio (Gê)	(33) Arsênico (As)
		(51) Antimônio (Sb)

No próximo tutorial sobre semicondutores e diodos, veremos como unir os dois materiais básicos de semicondutores, os materiais tipo P e tipo N para formar uma *junção PN* que pode ser usada para produzir diodos.

Noções básicas de semicondutores

Os materiais semicondutores são os blocos de construção básicos de todos os dispositivos eletrônicos, desde transistores, telefones, computadores e internet.

Aqui neste tutorial veremos os conceitos por trás dos conceitos básicos de semicondutores, a física e as diferenças entre isolantes e condutores.

Se o resistor é o componente passivo mais básico em circuitos elétricos ou eletrônicos, então temos que considerar o diodo semicondutor como sendo o componente ativo mais básico. No entanto, ao contrário de um resistor, um diodo não se comporta linearmente em relação à tensão aplicada, pois possui uma relação IV exponencial e, portanto, não pode ser descrito simplesmente usando a lei de Ohm como fazemos para resistores.

Os diodos são dispositivos semicondutores unidirecionais básicos que só permitem que a corrente flua através deles apenas em uma direção, agindo mais como uma válvula elétrica unidirecional (condição de polarização direta). Mas, antes de dar uma olhada em como funcionam os diodos de sinal ou potência, primeiro precisamos entender os conceitos básicos de construção e conceito de semicondutores.

Os diodos são feitos de uma única peça de material semicondutor que possui uma “região P” positiva em uma extremidade e uma “região N” negativa na outra, e que possui um valor de resistividade em algum lugar entre o de um condutor e um isolante. Mas o que é um material “Semicondutor”. Em primeiro lugar, vamos ver o que torna algo um condutor ou um isolant

Teoria da junção PN

Uma junção PN é formada quando um material do tipo N é fundido com um material do tipo P criando um diodo semicondutor

Este tutorial sobre a teoria da junção PN mostra que quando o silício é dopado com pequenas quantidades de antimônio, um material semicondutor tipo N é formado e quando o mesmo material de silício é dopado com pequenas quantidades de boro, um material semicondutor tipo P é formado.

Tudo isso é muito bom, mas esses materiais semicondutores do tipo N e do tipo P recentemente dopados fazem muito pouco por conta própria, pois são eletricamente neutros. No entanto, se juntarmos (ou fundirmos) esses dois materiais semicondutores, eles se comportam de maneira muito diferente, pois se fundem, produzindo o que geralmente é conhecido como “junção PN”, permitindo-nos estudar o efeito da teoria da junção PN.

Quando os materiais semicondutores do tipo N e semicondutores do tipo P são unidos pela primeira vez, existe um gradiente de densidade muito grande entre os dois lados da junção PN. O resultado é que alguns dos elétrons livres dos átomos de impureza doadores começam a migrar através dessa junção recém-formada para preencher as lacunas no material do tipo P, produzindo íons negativos.

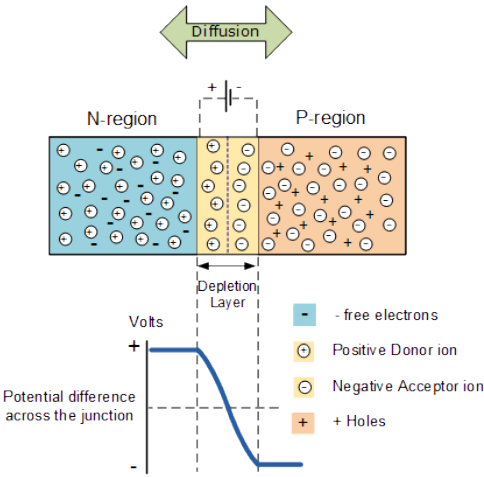
No entanto, como os elétrons se moveram através da junção PN do silício tipo N para o silício tipo P, eles deixaram íons doadores carregados positivamente (N_D^+) no lado negativo e agora os buracos da impureza aceitadora migram através da junção na direção oposta para a região onde há um grande número de elétrons livres.

Como resultado, a densidade de carga do tipo P ao longo da junção é preenchida com íons receptores carregados negativamente (N_A^-), e a densidade de carga do tipo N ao longo da junção torna-se positiva. Essa transferência de carga de elétrons e lacunas através da junção PN é conhecida como difusão. A largura dessas camadas P e N depende de quão fortemente cada lado é dopado com a densidade do acceptor N_A e a densidade do doador N_D , respectivamente.

Esse processo continua para frente e para trás até que o número de elétrons que cruzaram a junção tenha uma carga elétrica grande o suficiente para repelir ou impedir que mais portadores de carga atravessem a junção. Eventualmente, ocorrerá um estado de equilíbrio (situação eletricamente neutra) produzindo uma zona de “barreira de potencial” ao redor da área da junção, pois os átomos doadores repelem as lacunas e os átomos aceitadores repelem os elétrons.

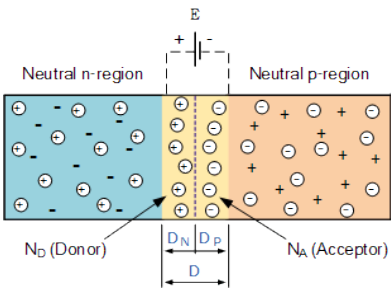
Uma vez que nenhum portador de carga livre pode ficar em uma posição onde haja uma barreira de potencial, as regiões em ambos os lados da junção agora ficam completamente esgotadas de mais portadores livres em comparação com os materiais do tipo N e P mais distantes da junção. Esta área ao redor da **junção PN** agora é chamada de Camada de Depleção.

A junção PN



A carga total em cada lado de uma *junção PN* deve ser igual e oposta para manter uma condição de carga neutra ao redor da junção. Se a região da camada de depleção tem uma distância D , ela deve, portanto, penetrar no silício por uma distância de D_p para o lado positivo e uma distância de D_n para o lado negativo, dando uma relação entre os dois de: $D_p \cdot N_A = D_n \cdot N_D$ para manter a neutralidade de carga também chamada de equilíbrio.

Distância da Camada de Depleção



Como o material do tipo N perdeu elétrons e o tipo P perdeu buracos, o material do tipo N tornou-se positivo em relação ao tipo P. Então, a presença de íons de impureza em ambos os lados da junção faz com que um campo elétrico seja estabelecido através desta região com o lado N com uma tensão positiva em relação ao lado P. O problema agora é que uma carga gratuita requer uma energia extra para superar a barreira que agora existe para que ela possa atravessar a junção da região de depleção.

Este campo elétrico criado pelo processo de difusão criou uma “diferença de potencial embutida” através da junção com um potencial de circuito aberto (polarização zero) de:

$$E_o = V_T \ln \left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2} \right)$$

Onde: E_o é a tensão de junção de polarização zero, V_T a tensão térmica de 26mV à temperatura ambiente, N_D e N_A são as concentrações de impurezas e n_i é a concentração intrínseca.

Uma tensão positiva adequada (polarização direta) aplicada entre as duas extremidades da junção PN pode fornecer energia extra aos elétrons e lacunas livres. A tensão externa necessária para superar essa barreira de potencial que existe agora depende muito do tipo de material semiconductor usado e de sua temperatura real.

Normalmente, à temperatura ambiente, a tensão na camada de depleção para silício é de cerca de 0,6 a 0,7 volts e para germânio é de cerca de 0,3 a 0,35 volts. Essa barreira de potencial sempre existirá mesmo que o dispositivo não esteja conectado a nenhuma fonte de alimentação externa, como visto nos diodos.

O significado deste potencial embutido através da junção é que ele se opõe tanto ao fluxo de buracos quanto de elétrons através da junção e é por isso que é chamado de barreira de potencial. Na prática, uma **junção PN** é formada dentro de um único cristal de material, em vez de simplesmente unir ou fundir duas peças separadas.

O resultado deste processo é que a junção PN tem características retificadoras de corrente-tensão (IV ou I-V). Os contatos elétricos são fundidos em ambos os lados do semiconductor para permitir que uma conexão elétrica seja feita a um circuito externo. O dispositivo eletrônico resultante que foi feito é comumente chamado de Diodo de junção PN ou simplesmente Diodo de Sinal.

Então vimos aqui neste tutorial sobre a teoria da junção PN, que as junções PN podem ser feitas juntando ou difundindo materiais semicondutores dopados de forma diferente para produzir um dispositivo eletrônico chamado diodo que pode ser usado como a estrutura básica de semicondutores de retificadores, todos os tipos de transistores, LEDs, células solares e muitos outros dispositivos de estado sólido.

No próximo tutorial sobre a junção PN, veremos uma das aplicações mais interessantes da **junção PN** é seu uso em circuitos como diodo. Adicionando conexões a cada extremidade dos materiais do tipo P e do tipo N, podemos produzir um dispositivo de dois terminais chamado Diodo de Junção PN, que pode ser polarizado por uma tensão externa para bloquear ou permitir o fluxo de corrente através dele.

Diodo de junção PN

Um diodo de junção PN é formado quando um semicondutor do tipo p é fundido a um semicondutor do tipo n criando uma tensão de barreira de potencial através da junção do diodo

O diodo de junção PN consiste em uma região p e uma região n separadas por uma região de depleção onde a carga é armazenada. O efeito descrito no tutorial anterior é alcançado sem que nenhuma tensão externa seja aplicada à junção PN real, resultando na junção em estado de equilíbrio.

No entanto, se fizermos conexões elétricas nas extremidades dos materiais do tipo N e do tipo P e depois conectá-los a uma fonte de bateria, agora existe uma fonte de energia adicional para superar a barreira de potencial.

O efeito de adicionar esta fonte de energia adicional faz com que os elétrons livres sejam capazes de atravessar a região de depleção de um lado para o outro. O comportamento da junção PN em relação à largura da barreira de potencial produz um dispositivo de dois terminais condutores assimétricos, mais conhecido como Diodo de Junção PN.

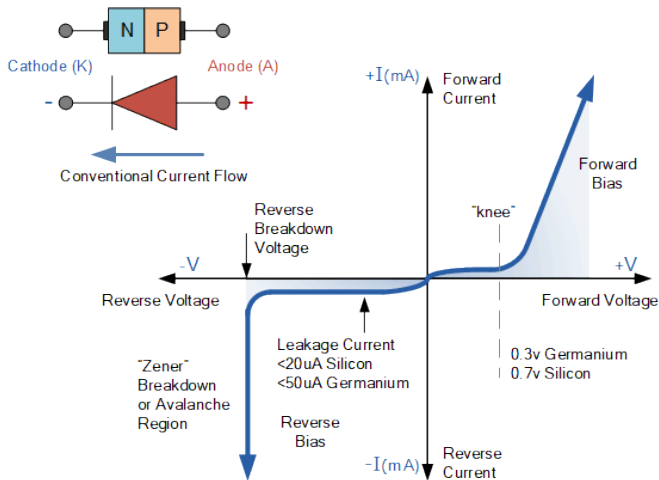
Um *Diodo de Junção PN* é um dos dispositivos semicondutores mais simples do mercado, e que tem a característica elétrica de passar a corrente através de si mesmo em apenas uma direção. No entanto, ao contrário de um resistor, um diodo não se comporta linearmente em relação à tensão aplicada. Em vez disso, ele tem uma relação exponencial corrente-tensão (IV) e, portanto, não podemos descrever sua operação simplesmente usando uma equação como a lei de Ohm.

Se uma tensão positiva adequada (polarização direta) for aplicada entre as duas extremidades da junção PN, ela pode fornecer elétrons e lacunas livres com a energia extra necessária para cruzar a junção à medida que a largura da camada de depleção ao redor da junção PN é diminuída .

Ao aplicar uma tensão negativa (polarização reversa), as cargas livres são puxadas para longe da junção, resultando no aumento da largura da camada de depleção. Isso tem o efeito de aumentar ou diminuir a resistência efetiva da própria junção permitindo ou bloqueando o fluxo de corrente através da junção pn dos diodos. Em seguida, a camada de depleção se alarga com o aumento da aplicação de uma tensão reversa e se estreita com o aumento da aplicação de uma tensão direta. Isso se deve às diferenças nas propriedades elétricas nos dois lados da junção PN, resultando em mudanças físicas. Um dos resultados produz retificação como visto nas características estáticas dos diodos de junção PN IV (corrente-tensão). A retificação é

mostrada por um fluxo de corrente assimétrico quando a polaridade da tensão de polarização é alterada conforme mostrado abaixo.

Símbolo do diodo de junção e características estáticas IV



Mas antes que possamos usar a junção PN como um dispositivo prático ou como um dispositivo de retificação, precisamos primeiro polarizar a junção, ou seja, conectar um potencial de tensão através dela. No eixo de tensão acima, "Reverse Bias" refere-se a um potencial de tensão externo que aumenta a barreira de potencial. Diz-se que uma tensão externa que diminui a barreira de potencial atua na direção "Forward Bias".

Existem duas regiões de operação e três possíveis condições de "polarização" para o Diodo de Junção padrão e estas são:

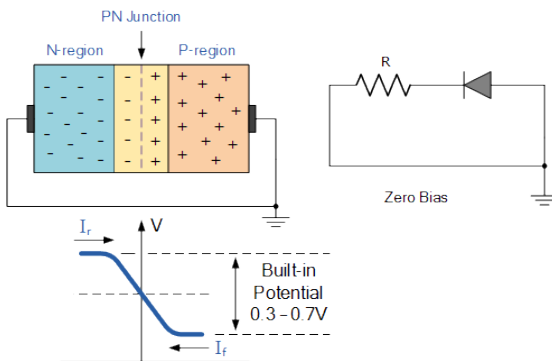
1. Zero Bias – Nenhum potencial de tensão externa é aplicado ao diodo de junção PN.
2. Reverse Bias – O potencial de tensão é conectado negativo, (-ve) ao material tipo P e positivo, (+ve) ao material tipo N através do diodo que tem o efeito de aumentar a largura do diodo de junção PN.
3. Forward Bias – O potencial de tensão é conectado positivo, (+ve) ao material tipo P e negativo, (-ve) ao material tipo N através do diodo que tem o efeito de diminuir a largura dos diodos de junção PN.

Diodo de junção com polarização zero

Quando um diodo é conectado em uma condição Zero Bias, nenhuma energia potencial externa é aplicada à junção PN. No entanto, se os terminais dos diodos estiverem em curto, alguns orifícios (portadores majoritários) no material do tipo P com energia suficiente para superar a barreira de potencial se moverão através da junção contra essa barreira de potencial. Isso é conhecido como “corrente direta” e é referenciado como I_F .

Da mesma forma, buracos gerados no material do tipo N (portadores minoritários), encontram esta situação favorável e se movem através da junção na direção oposta. Isso é conhecido como “Corrente Reversa” e é referenciado como I_R . Essa transferência de elétrons e buracos para frente e para trás através da junção PN é conhecida como difusão, conforme mostrado abaixo.

Diodo de junção PN com polarização zero



A barreira potencial que agora existe desencoraja a difusão de mais portadores majoritários através da junção. No entanto, a barreira de potencial ajuda os portadores minoritários (poucos elétrons livres na região P e poucos buracos na região N) a se deslocarem pela junção.

Então um “Equilíbrio” ou equilíbrio será estabelecido quando as portadoras majoritárias forem iguais e ambas se moverem em direções opostas, de modo que o resultado líquido seja corrente zero fluindo no circuito. Quando isso ocorre, diz-se que a junção está em um estado de “Equilíbrio Dinâmico”.

Os portadores minoritários são gerados constantemente devido à energia térmica, de modo que este estado de equilíbrio pode ser quebrado aumentando a temperatura da junção PN causando um aumento na geração de portadores

minoritários, resultando em um aumento na corrente de fuga, mas uma corrente elétrica não pode fluir já que nenhum circuito foi conectado à junção PN.

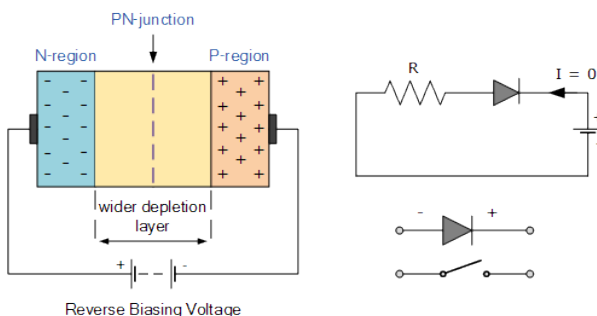
Diodo de junção PN com polarização reversa

Quando um diodo é conectado em uma condição de polarização reversa, uma tensão positiva é aplicada ao material tipo N e uma tensão negativa é aplicada ao material tipo P.

A tensão positiva aplicada ao material do tipo N atrai elétrons para o eletrodo positivo e para longe da junção, enquanto os orifícios na extremidade do tipo P também são atraídos para longe da junção em direção ao eletrodo negativo.

O resultado líquido é que a camada de depleção cresce devido à falta de elétrons e lacunas e apresenta um caminho de alta impedância, quase um isolante e uma barreira de alto potencial é criada através da junção, evitando assim que a corrente flua através do material semiconductor.

Aumento na camada de depleção devido ao Reverse Bias

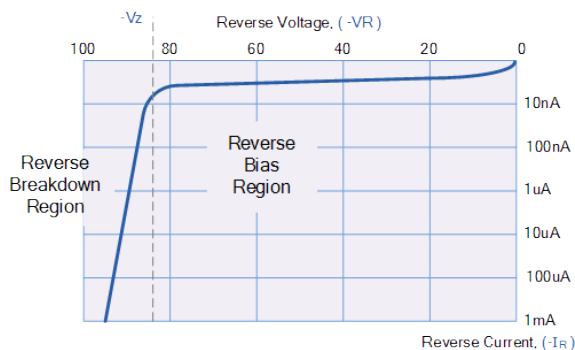


Esta condição representa um alto valor de resistência para a junção PN e corrente praticamente nula flui através do diodo de junção com um aumento na tensão de polarização. No entanto, uma corrente de fuga reversa muito pequena flui através da junção, que normalmente pode ser medida em microamperes (μA).

Um ponto final, se a tensão de polarização reversa V_r aplicada ao diodo for aumentada para um valor suficientemente alto, fará com que a junção PN do diodo superaqueça e falhe devido ao efeito de avalanche ao redor da junção. Isso pode fazer com que o diodo fique em curto e resultará no fluxo de corrente máxima do circuito,

e isso é mostrado como uma inclinação descendente na curva de características estáticas reversas a seguir.

Curva de características reversas para um diodo de junção



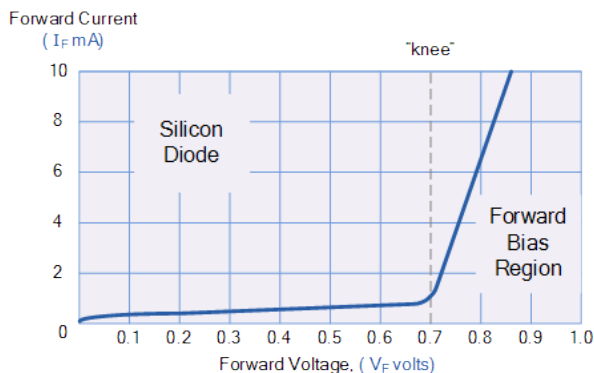
Às vezes, esse efeito de avalanche tem aplicações práticas em circuitos de estabilização de tensão, onde um resistor limitador em série é usado com o diodo para limitar essa corrente de ruptura reversa a um valor máximo predefinido, produzindo assim uma saída de tensão fixa através do diodo. Esses tipos de diodos são comumente conhecidos como diodos Zener e são discutidos em um tutorial posterior.

Diodo de junção PN com polarização direta

Quando um diodo é conectado em uma condição de polarização direta, uma tensão negativa é aplicada ao material tipo N e uma tensão positiva é aplicada ao material tipo P. Se esta tensão externa for superior ao valor da barreira de potencial, aprox. 0,7 volts para silício e 0,3 volts para germânio, a oposição das barreiras potenciais será superada e a corrente começará a fluir.

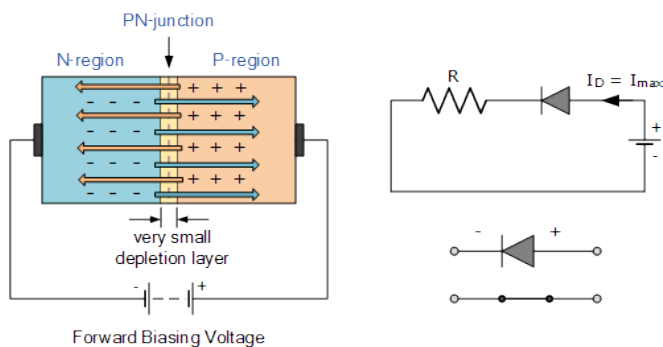
Isso ocorre porque a tensão negativa empurra ou repele os elétrons em direção à junção, dando-lhes a energia para cruzar e combinar com os buracos sendo empurrados na direção oposta em direção à junção pela tensão positiva. Isso resulta em uma curva característica de corrente zero fluindo até este ponto de tensão, chamada de “joelho” nas curvas estáticas e, em seguida, um fluxo de alta corrente através do diodo com pequeno aumento na tensão externa, conforme mostrado a seguir.

Curva de características diretas para um diodo de junção



A aplicação de uma tensão de polarização direta no diodo de junção resulta na camada de depleção tornando-se muito fina e estreita, o que representa um caminho de baixa impedância através da junção, permitindo assim o fluxo de altas correntes. O ponto em que esse aumento súbito de corrente ocorre é representado na curva de características estáticas IV acima como o ponto “joelho”.

Redução na Camada de Depleção devido ao Viés de Frente



Esta condição representa o caminho de baixa resistência através da junção PN, permitindo que correntes muito grandes fluam através do diodo com apenas um pequeno aumento na tensão de polarização. A diferença de potencial real através da junção ou diodo é mantida constante pela ação da camada de depleção em aproximadamente 0,3 V para germânio e aproximadamente 0,7 V para diodos de junção de silício.

Como o diodo pode conduzir corrente “infinita” acima desse ponto de joelho, pois efetivamente se torna um curto-circuito, os resistores são usados em série com o

diodo para limitar seu fluxo de corrente. Exceder sua especificação de corrente direta máxima faz com que o dispositivo dissipe mais energia na forma de calor do que foi projetado para resultar em uma falha muito rápida do dispositivo.

Resumo do tutorial

A região de junção PN de um Diodo de Junção tem as seguintes características importantes:

Os semicondutores contêm dois tipos de portadores de carga móvel, “buracos” e “elétrons”.

Os buracos são carregados positivamente, enquanto os elétrons são carregados negativamente.

Um semicondutor pode ser dopado com impurezas doadoras, como Antimônio (dopagem do tipo N), de modo que contenha cargas móveis que são principalmente elétrons.

Um semicondutor pode ser dopado com impurezas aceitadoras, como Boro (dopagem do tipo P), de modo que contenha cargas móveis que são principalmente buracos.

A região de junção em si não possui portadores de carga e é conhecida como região de depleção.

A região de junção (depleção) tem uma espessura física que varia com a tensão aplicada.

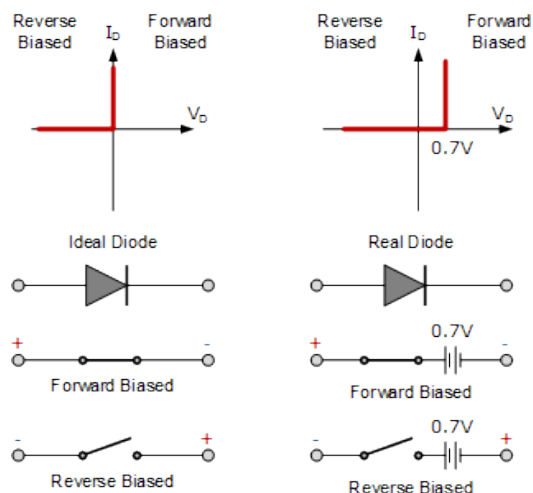
Quando um diodo é Zero Biased nenhuma fonte de energia externa é aplicada e uma barreira de potencial natural é desenvolvida através de uma camada de depleção que é de aproximadamente 0,5 a 0,7v para diodos de silício e aproximadamente 0,3 volt para diodos de germânio.

Quando um diodo de junção é polarizado para frente, a espessura da região de depleção reduz e o diodo age como um curto-circuito, permitindo que a corrente de circuito completo flua.

Quando um diodo de junção é polarizado reversamente, a espessura da região de depleção aumenta e o diodo age como um circuito aberto bloqueando qualquer fluxo de corrente (apenas uma corrente de fuga muito pequena fluirá).

Também vimos acima que o diodo é um dispositivo não linear de dois terminais cuja característica IV é dependente da polaridade da tensão aplicada, V_D o diodo é *polarizado diretamente*, $V_D > 0$ ou *polarizado inversamente*, $V_D < 0$. De qualquer forma, podemos modelar essas características de corrente-tensão tanto para um diodo ideal quanto para um diodo de silício real, conforme mostrado:

Características ideais e reais





Capítulo 11

Transistor BJT

Neste capítulo, vamos explorar o transistor BJT (Transistor Bipolar de Junção), um dos componentes mais importantes e versáteis na eletrônica moderna. Vamos entender o que é um transistor BJT, como ele funciona, suas diferentes configurações e sua importância na manutenção e desenvolvimento de circuitos eletrônicos.

Transistor bipolar

O transistor de junção bipolar é um dispositivo semicondutor que pode ser usado para comutação ou amplificação

Ao contrário dos diodos semicondutores que são feitos de dois pedaços de material semicondutor para formar uma junção pn simples. O *transistor bipolar* utiliza mais uma camada de material semicondutor para produzir um dispositivo com propriedades e características de um amplificador.

Se juntarmos dois diodos de sinal individuais lado a lado, isso nos dará duas junções PN conectadas em série que compartilhariam um terminal comum *Positivo*, (P) ou *negativo*, (N). A fusão desses dois diodos produz um dispositivo de três camadas, duas junções e três terminais, formando a base de um transistor de junção bipolar, ou BJT, abreviado.

Transistores são dispositivos ativos de três terminais feitos de diferentes materiais semicondutores que podem atuar como isolante ou condutor pela aplicação de uma pequena tensão de sinal. A capacidade do transistor de alternar entre esses dois estados permite que ele tenha duas funções básicas: “comutação” (eletrônica digital) ou “amplificação” (eletrônica analógica). Então os transistores bipolares têm a capacidade de operar em três regiões diferentes:

Região Ativa – o transistor funciona como um amplificador e $I_c = \beta \cdot I_b$

Saturação – o transistor está “Totalmente LIGADO” operando como uma chave e $I_c = I(\text{saturação})$

Corte – o transistor está “Fully-OFF” operando como chave e $I_c = 0$



Um transistor bipolar típico

A palavra Transistor é uma combinação das duas palavras **Trans** **fer** **Var** **istor**, que descreve seu modo de operação nos primórdios do desenvolvimento da eletrônica. Existem dois tipos básicos de construção de transistor bipolar, PNP e NPN,

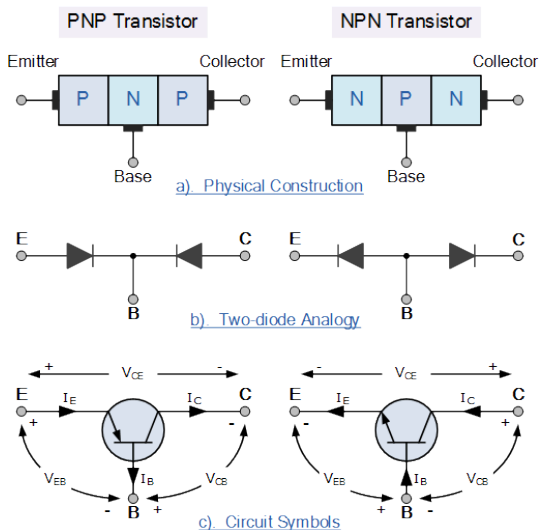
que basicamente descrevem o arranjo físico dos materiais semicondutores do tipo P e do tipo N dos quais são feitos.

A construção básica do transistor bipolar consiste em duas junções PN produzindo três terminais de conexão com cada terminal recebendo um nome para identificá-lo dos outros dois. Esses três terminais são conhecidos e rotulados como Emissor (E), Base (B) e coletor (C), respectivamente.

Transistores bipolares são dispositivos reguladores de corrente que controlam a quantidade de corrente que flui através deles dos terminais do Emissor para o Coletor em proporção à quantidade de tensão de polarização aplicada ao seu terminal base, agindo assim como uma chave controlada por corrente. Como uma pequena corrente fluindo para o terminal de base controla uma corrente de coletor muito maior formando a base da ação do transistor.

O princípio de funcionamento dos dois tipos de transistores PNP e NPN é exatamente o mesmo, sendo a única diferença na polarização e na polaridade da fonte de alimentação para cada tipo.

Construção de transistor bipolar



A construção e os símbolos do circuito para o transistor bipolar PNP e NPN são fornecidos acima com a seta no símbolo do circuito sempre mostrando a direção do “fluxo de corrente convencional” entre o terminal base e seu terminal emissor. A direção da seta sempre aponta da região positiva do tipo P para a região negativa do

tipo N para ambos os tipos de transistor, exatamente o mesmo que para o símbolo de diodo padrão.

Configurações de transistor bipolar

Como o transistor bipolar é um dispositivo de três terminais, existem basicamente três maneiras possíveis de conectá-lo dentro de um circuito eletrônico com um terminal sendo comum aos sinais de entrada e saída. Cada método de conexão responde de maneira diferente ao seu sinal de entrada dentro de um circuito, pois as características estáticas do transistor variam com cada arranjo do circuito.

Configuração de base comum – tem ganho de tensão, mas não tem ganho de corrente.

Configuração de emissor comum – tem ganho de corrente e tensão.

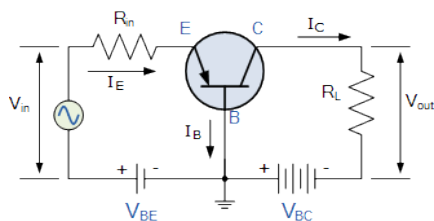
Configuração do Coletor Comum – tem Ganho de Corrente, mas não tem Ganho de Tensão.

A configuração de base comum (BC)

Como o próprio nome sugere, na configuração Base Comum ou base aterrada, a conexão BASE é comum tanto para o sinal de entrada quanto para o sinal de saída. O sinal de entrada é aplicado entre a base do transistor e os terminais do emissor, enquanto o sinal de saída correspondente é obtido entre a base e os terminais do coletor, conforme mostrado. O terminal base é aterrado ou pode ser conectado a algum ponto de tensão de referência fixo.

A corrente de entrada que flui para o emissor é bastante grande, pois é a soma da corrente de base e da corrente do coletor, respectivamente, portanto, a saída da corrente do coletor é menor que a entrada da corrente do emissor, resultando em um ganho de corrente para este tipo de circuito de "1" (unidade) ou menos, ou seja, a configuração de base comum "atenua" o sinal de entrada.

O Circuito Transistor de Base Comum



Este tipo de configuração de amplificador é um circuito amplificador de tensão não inversor, em que as tensões de sinal V_{in} e V_{out} estão “em fase”. Este tipo de arranjo de transistor não é muito comum devido às suas características de ganho de tensão excepcionalmente altas. Suas características de entrada representam as de um diodo com polarização direta, enquanto as características de saída representam as de um fotodiodo iluminado.

Além disso, este tipo de configuração de transistor bipolar tem uma alta proporção de resistência de saída para entrada ou, mais importante, resistência de “carga” (R_L) para resistência de “entrada” (R_{IN}) dando-lhe um valor de “Ganho de Resistência”. Então o ganho de tensão (A_v) para uma configuração de base comum é dado como:

Ganho de Tensão Base Comum

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_C \times R_L}{I_E \times R_{IN}}$$

Onde: I_C/I_E é o ganho de corrente, alfa (α) e R_L/R_{IN} é o ganho de resistência.

O circuito de base comum é geralmente usado apenas em circuitos amplificadores de estágio único, como pré-amplificador de microfone ou amplificadores de radiofrequência (Rf) devido à sua resposta de alta frequência muito boa.

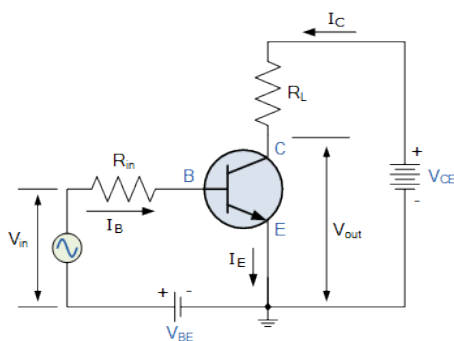
A configuração do emissor comum (EC)

Na configuração de emissor comum ou emissor aterrado, o sinal de entrada é aplicado entre a base e o emissor, enquanto a saída é tomada entre o coletor e o emissor, conforme mostrado. Este tipo de configuração é o circuito mais comumente

usado para amplificadores baseados em transistores e que representa o método “normal” de conexão de transistores bipolares.

A configuração do amplificador emissor comum produz o maior ganho de corrente e potência de todas as três configurações de transistor bipolar. Isso ocorre principalmente porque a impedância de entrada é BAIXA, pois está conectada a uma junção PN com polarização direta, enquanto a impedância de saída é ALTA, pois é tomada de uma junção PN com polarização reversa.

O Circuito Amplificador Emissor Comum



Neste tipo de configuração, a corrente que sai do transistor deve ser igual às correntes que entram no transistor, pois a corrente do emissor é dada como $I_E = I_C + I_B$.

Como a resistência de carga (R_L) está ligada em série com o coletor, o ganho de corrente da configuração do transistor emissor comum é bastante grande, pois é a relação I_C/I_B . O ganho de corrente de um transistor recebe o símbolo grego de Beta, (β).

Como a corrente de emissor para uma configuração de emissor comum é definida como $I_E = I_C + I_B$, a razão de I_C/I_E é chamada de Alpha, dado o símbolo grego de α . Nota: que o valor de Alpha sempre será menor que a unidade.

Como a relação elétrica entre essas três correntes, I_B , I_C e I_E , é determinada pela construção física do próprio transistor, qualquer pequena mudança na corrente de base (I_B), resultará em uma mudança muito maior na corrente de coletor (I_C).

Então, pequenas mudanças na corrente que flui na base controlarão a corrente no circuito emissor-coletor. Normalmente, Beta tem um valor entre 20 e 200

para a maioria dos transistores de uso geral. Então, se um transistor tem um valor Beta de digamos 100, então um elétron fluirá do terminal base para cada 100 elétrons fluindo entre o terminal emissor-coletor.

Combinando as expressões tanto para Alpha, α e Beta, β a relação matemática entre esses parâmetros e, portanto, o ganho de corrente do transistor pode ser dado como:

$$\text{Alpha}, (\alpha) = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{and} \quad \text{Beta}, (\beta) = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\therefore I_C = \alpha \cdot I_E = \beta \cdot I_B$$

$$\text{as: } \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

Onde: “ I_C ” é a corrente que flui para o terminal do coletor, “ I_B ” é a corrente que flui para o terminal base e “ I_E ” é a corrente que sai do terminal do emissor.

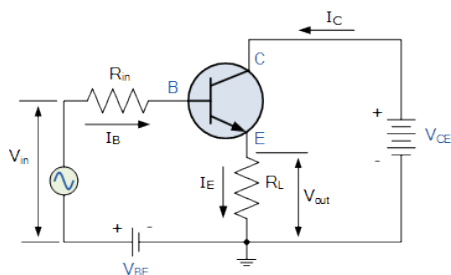
Então resumindo um pouco. Este tipo de configuração de transistor bipolar tem uma impedância de entrada, corrente e ganho de potência maiores do que a configuração de base comum, mas seu ganho de tensão é muito menor. A configuração de emissor comum é um circuito amplificador inversor. Isso significa que o sinal de saída resultante tem um deslocamento de fase de 180° em relação ao sinal de tensão de entrada.

A configuração do coletor comum (CC)

Na configuração Coletor Comum ou coletor aterrado, o coletor é conectado ao terra através da alimentação, assim o terminal do coletor é comum tanto na entrada quanto na saída. O sinal de entrada é conectado diretamente ao terminal base, enquanto o sinal de saída é obtido através do resistor de carga do emissor, conforme mostrado. Esse tipo de configuração é comumente conhecido como circuito Seguidor de Tensão ou Seguidor de Emissor.

A configuração de coletor comum ou seguidor de emissor é muito útil para aplicações de casamento de impedância devido à sua impedância de entrada muito alta, na região de centenas de milhares de Ohms, ao mesmo tempo em que possui uma impedância de saída relativamente baixa.

O Circuito Transistor do Coletor Comum



A configuração de emissor comum tem um ganho de corrente aproximadamente igual ao valor β do próprio transistor. No entanto, na configuração do coletor comum, a resistência de carga é conectada em série com o terminal do emissor, de modo que sua corrente é igual à corrente do emissor.

Como a corrente do emissor é a combinação do coletor e da corrente da base combinada, a resistência de carga neste tipo de configuração de transistor também tem tanto a corrente do coletor quanto a corrente de entrada da base fluindo através dela. Então o ganho de corrente do circuito é dado como:

O Ganho de Corrente do Coletor Comum

$$I_E = I_C + I_B$$

$$A_i = \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_C + I_B}{I_B}$$

$$A_i = \frac{I_C}{I_B} + 1$$

$$A_i = \beta + 1$$

Este tipo de configuração de transistor bipolar é um circuito não inversor em que as tensões de sinal de V_{in} e V_{out} estão “em fase”. A configuração do coletor comum tem um ganho de tensão de cerca de “1” (ganho unitário). Assim, pode ser considerado como um buffer de tensão, uma vez que o ganho de tensão é unitário.

A resistência de carga do transistor de coletor comum recebe as correntes de base e de coletor, dando um grande ganho de corrente (como na configuração de emissor comum), proporcionando uma boa amplificação de corrente com muito pouco ganho de tensão.

Tendo examinado os três tipos diferentes de configurações de transistores bipolares, podemos agora resumir as várias relações entre as correntes DC individuais dos transistores que fluem através de cada perna e seus ganhos de corrente DC fornecidos acima na tabela a seguir.

Relação entre Correntes DC e Ganhos

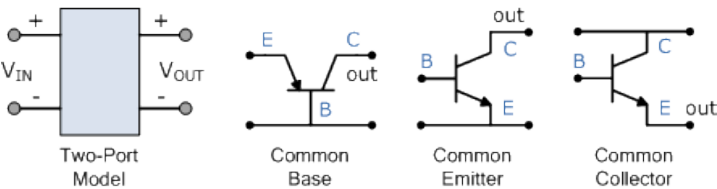
$I_E = I_B + I_C$ $I_C = I_E - I_B$ $I_B = I_E - I_C$	$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{1 + \beta}$ $\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$
$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{I_E}{1 + \beta} = I_E (1 - \alpha)$	
$I_C = \beta I_B = \alpha I_E$	$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = I_B (1 + \beta)$

Observe que, embora tenhamos analisado as configurações *do transistor bipolar NPN* aqui, os transistores PNP são tão válidos para usar em cada configuração quanto os cálculos serão todos os mesmos, quanto à não inversão do sinal amplificado. A única diferença estará nas polaridades da tensão e nas direções da corrente.

Resumo do transistor bipolar

Então, para resumir, o comportamento do transistor bipolar em cada uma das configurações de circuito acima é muito diferente e produz diferentes características de circuito em relação à impedância de entrada, impedância de saída e ganho, seja ganho de tensão, ganho de corrente ou ganho de potência e isso é resumidas na tabela abaixo.

Configurações de transistor bipolar



com as características generalizadas das diferentes configurações de transistor dadas na tabela a seguir:

Característica	Base comum	Emissor Comum	Coletor Comum
Impedância de entrada	Baixo	Médio	Alto
Impedância de saída	Muito alto	Alto	Baixo
Mudança de fase	0 °	180º -	0 °
Ganho de tensão	Alto	Médio	Baixo
Ganho atual	Baixo	Médio	Alto
Ganho de Potência	Baixo	Muito alto	Médio

No próximo tutorial sobre Transistores Bipolares, veremos com mais detalhes o Transistor NPN quando usado na configuração de emissor comum como amplificador, pois esta é a configuração mais utilizada devido à sua flexibilidade e alto ganho. Também traçaremos as curvas de características de saída comumente associadas a circuitos amplificadores em função da corrente de coletor para a corrente de base.

Transistor NPN

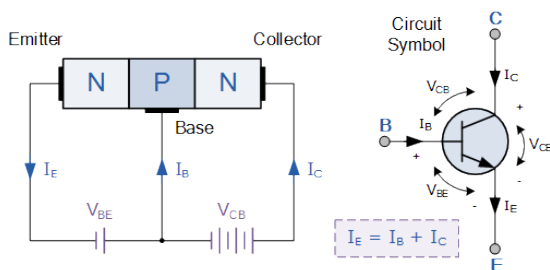
Os transistores NPN são dispositivos de três terminais e três camadas que podem funcionar como amplificadores ou interruptores eletrônicos

No tutorial anterior vimos que o **transistor bipolar** padrão ou BJT, vem em duas formas básicas. Uma configuração **NPN** (Negativo - **Positivo** - Negativo) e uma configuração **PNP** (**Positivo** - **Negativo** - Positivo). Ou seja: um transistor NPN e um tipo de transistor PNP.

A configuração de transistor mais comumente usada é o **transistor NPN**. Também aprendemos que as junções do transistor bipolar podem ser polarizadas de três maneiras diferentes – **Base Comum**, **Emissor Comum** e **Coletor Comum**.

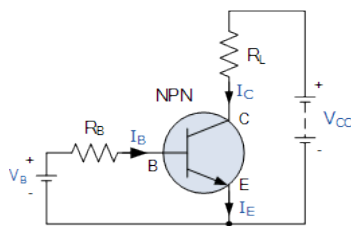
Neste tutorial sobre transistores bipolares, veremos mais de perto a configuração do “Emissor Comum” usando o **Transistor NPN Bipolar** com um exemplo da construção de um transistor NPN juntamente com as características de fluxo de corrente dos transistores são fornecidas abaixo.

Uma configuração bipolar do transistor NPN



(Nota: A seta define o emissor e o fluxo de corrente convencional, “out” para um transistor NPN bipolar.)

A construção e as tensões terminais para um transistor NPN bipolar são mostradas acima. A tensão entre a Base e o Emissor (V_{BE}), é positiva na Base e negativa no Emissor porque para um transistor NPN, o terminal da Base é sempre positivo em relação ao Emissor. Também a tensão de alimentação do Coletor é positiva em relação ao Emissor (V_{CE}). Assim, para um transistor NPN bipolar conduzir o Coletor é sempre mais positivo em relação tanto à Base quanto ao Emissor.



Conexão do transistor NPN

Em seguida, as fontes de tensão são conectadas a um transistor NPN, conforme mostrado. O Coletor é conectado à tensão de alimentação V_{CC} através do resistor de carga, R_L que também atua para limitar a corrente máxima que flui através do dispositivo. A tensão de alimentação da Base V_B é conectada ao resistor da Base R_B , que novamente é usado para limitar a corrente máxima da Base.

Assim, em um Transistor NPN é o movimento de portadores de corrente negativos (elétrons) através da região da Base que constitui a ação do transistor, uma vez que esses elétrons móveis fornecem a ligação entre os circuitos Coletor e Emissor. Esta ligação entre os circuitos de entrada e saída é a principal característica da ação do transistor, pois as propriedades amplificadoras dos transistores vêm do consequente controle que a Base exerce sobre a corrente Coletor-Emissor.

Então podemos ver que o transistor é um dispositivo operado por corrente (modelo Beta) e que uma grande corrente (I_C) flui livremente através do dispositivo entre os terminais do coletor e do emissor quando o transistor é ligado “totalmente”. No entanto, isso só acontece quando uma pequena corrente de polarização (I_B) está fluindo para o terminal da base do transistor ao mesmo tempo, permitindo que a Base atue como uma espécie de entrada de controle de corrente.

A corrente em um transistor NPN bipolar é a relação dessas duas correntes (I_C/I_B), chamada de *Ganho de Corrente CC* do dispositivo e recebe o símbolo de h_{fe} ou atualmente Beta, (β).

O valor de β pode ser grande até 200 para transistores padrão, e é essa grande relação entre I_C e I_B que torna o transistor NPN bipolar um dispositivo amplificador útil quando usado em sua região ativa, pois I_B fornece a entrada e I_C fornece a saída. Observe que Beta não possui unidades, pois é uma proporção.

Além disso, o ganho de corrente do transistor do terminal Coletor para o terminal Emissor I_C/I_E , é chamado de Alpha, (α), e é uma função do próprio transistor (elétrons se difundindo pela junção). Como a corrente de emissor I_E é a soma de uma corrente de base muito pequena mais uma corrente de coletor muito grande, o valor

de alfa (α) é muito próximo da unidade, e para um transistor de sinal de baixa potência típico esse valor varia de cerca de 0,950 para 0,999.

Relação α e β em um transistor NPN

$$\text{DC Current Gain} = \frac{\text{Output Current}}{\text{Input Current}} = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_E = I_B + I_C \dots (\text{KCL}) \quad \text{and} \quad \frac{I_C}{I_E} = \alpha$$

$$\text{Thus: } I_B = I_E - I_C$$

$$I_B = I_E - \alpha I_E$$

$$I_B = I_E (1 - \alpha)$$

$$\therefore \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E (1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Combinando os dois parâmetros α e β podemos produzir duas expressões matemáticas que dão a relação entre as diferentes correntes que circulam no transistor.

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{or} \quad \alpha = \beta(1 - \alpha)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \text{or} \quad \beta = \alpha(1 + \beta)$$

$$\text{If } \alpha = 0.99 \quad \beta = \frac{0.99}{0.01} = 99$$

Os valores de Beta variam de cerca de 20 para transistores de potência de alta corrente a bem mais de 1000 para transistores bipolares de baixa potência de alta frequência. O valor de Beta para a maioria dos transistores NPN padrão pode ser encontrado nas folhas de dados dos fabricantes, mas geralmente varia entre 50 e 200.

A equação acima para Beta também pode ser rearranjada para tornar I_C o sujeito, e com uma corrente de base zero ($I_B = 0$) a corrente de coletor resultante I_C também será zero, ($\beta * 0$). Além disso, quando a corrente de base é alta, a corrente de coletor correspondente também será alta, resultando na corrente de base controlando a corrente de coletor. Uma das propriedades mais importantes do **transistor de junção bipolar** é que uma pequena corrente de base pode controlar uma corrente de coletor muito maior. Considere o exemplo a seguir.

Exemplo 1 de transistor NPN

Um transistor NPN bipolar tem um ganho de corrente CC, valor (Beta) de 200. Calcule a corrente de base I_B necessária para comutar uma carga resistiva de 4mA.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{4 \times 10^{-3}}{200} = 20 \mu A$$

Portanto, $\beta = 200$, $I_C = 4mA$ e $I_B = 20 \mu A$.

Um outro ponto a ser lembrado sobre **transistores NPN bipolares**. A tensão do coletor, (V_C) deve ser maior e positiva em relação à tensão do emissor, (V_E) para permitir que a corrente flua através do transistor entre as junções coletor-emissor. Além disso, há uma queda de tensão entre a Base e o terminal Emissor de cerca de 0,7 V (queda de volt de um diodo) para dispositivos de silício, pois as características de entrada de um transistor NPN são de um diodo polarizado diretamente.

Então a tensão de base, (V_{BE}) de um transistor NPN deve ser maior que 0,7V, caso contrário o transistor não conduzirá com a corrente de base dada como.

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B}$$

Onde: I_B é a corrente de base, V_B é a tensão de polarização de base, V_{BE} é a queda de tensão do emissor de base (0,7v) e R_B é o resistor de entrada de base. Aumentando I_B , V_{BE} aumenta lentamente para 0,7V, mas I_C aumenta exponencialmente.

Exemplo 2 de transistor NPN

Um transistor NPN tem uma tensão de polarização de base CC, V_B de 10v e um resistor de base de entrada, R_B de 100kΩ. Qual será o valor da corrente de base no transistor.

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} = \frac{10 - 0.7}{100k\Omega} = 93 \mu A$$

Portanto, $I_B = 93 \mu A$.

A configuração do emissor comum.

Além de ser usado como uma chave semicondutora para ligar ou desligar as correntes de carga, controlando o sinal de base para o transistor em suas regiões de saturação ou corte, os **transistores NPN bipolares** também podem ser usados em sua região ativa para produzir um circuito que amplificará qualquer pequeno sinal AC aplicado ao seu terminal Base com o Emissor aterrado.

Se uma tensão de “polarização” CC adequada for primeiramente aplicada ao terminal base do transistor, permitindo assim que ele opere sempre dentro de sua região ativa linear, um circuito amplificador inversor chamado amplificador emissor comum de estágio único é produzido.

Uma dessas configurações de *amplificador emissor comum* de um transistor NPN é chamada de amplificador classe A. Uma operação de “Amplificador Classe A” é aquela em que o terminal Base do transistor é polarizado de forma a polarizar diretamente a junção Base-emissor.

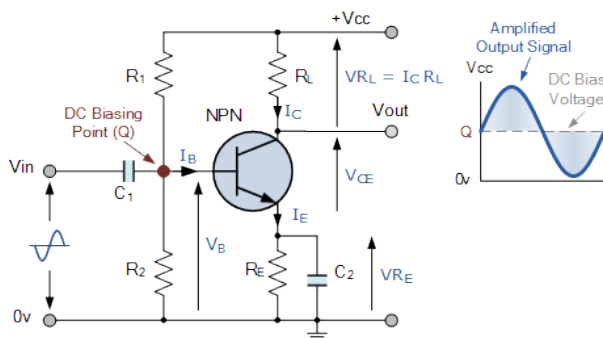
O resultado é que o transistor está sempre operando a meio caminho entre suas regiões de corte e saturação, permitindo assim que o amplificador do transistor reproduza com precisão a metade positiva e negativa de qualquer sinal de entrada CA sobreposto a essa tensão de polarização CC.

Sem esta “tensão de polarização” apenas metade da forma de onda de entrada seria amplificada. Essa configuração comum de amplificador emissor usando um transistor NPN tem muitas aplicações, mas é comumente usada em circuitos de áudio, como estágios de pré-amplificador e amplificador de potência.

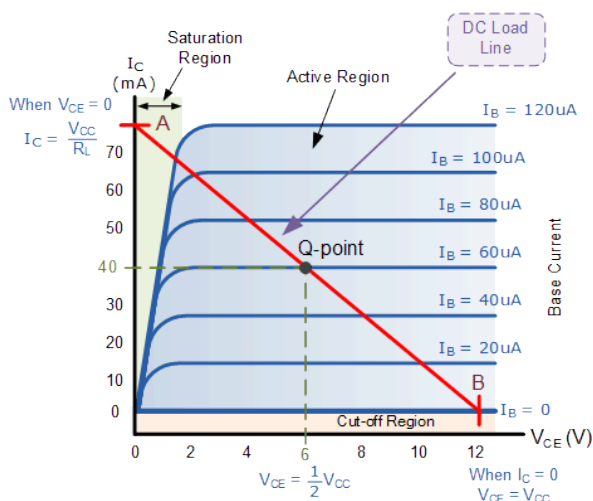
Com referência à configuração de emissor comum mostrada abaixo, uma família de curvas conhecidas como **Curvas de Características de Saída**, relaciona a corrente de coletor de saída, (I_C) à tensão de coletor, (V_{ce}) quando diferentes valores de corrente de base, (I_B). As curvas de características de saída são aplicadas ao transistor para transistores com o mesmo valor de β .

Uma “Linha de Carga” CC também pode ser desenhada nas curvas de características de saída para mostrar todos os pontos de operação possíveis quando diferentes valores de corrente de base são aplicados. É necessário definir o valor inicial de V_{ce} corretamente para permitir que a tensão de saída varie tanto para cima quanto para baixo ao amplificar os sinais de entrada CA e isso é chamado de ajuste do ponto de operação ou Ponto Quiescente, ponto **Q** para abreviar e isso é mostrado abaixo.

Circuito Amplificador Emissor Comum de Estágio Único



Curvas de características de saída de um transistor bipolar típico



O fator mais importante a ser observado é o efeito de V_{ce} sobre a corrente de coletor I_C quando V_{ce} é maior que cerca de 1,0 volts. Podemos ver que I_C não é afetado em grande parte por mudanças em V_{ce} acima desse valor e, em vez disso, é quase inteiramente controlado pela corrente de base, I_B . Quando isso acontece, podemos dizer então que o circuito de saída representa o de uma “Fonte de Corrente Constante”.

Também pode ser visto no circuito emissor comum acima que a corrente de emissor I_E é a soma da corrente de coletor, I_C e a corrente de base, I_B , somadas, então também podemos dizer que $I_E = I_C + I_B$ para o emissor comum (configuração EC).

Usando as curvas de características de saída em nosso exemplo acima e também a Lei de Ohm, a corrente que flui através do resistor de carga, (R_L), é igual à corrente do coletor, I_C entrando no transistor que por sua vez corresponde à tensão de alimentação, (V_{CC}) menos a queda de tensão entre o coletor e os terminais do emissor, (V_{CE}) e é dado como:

$$\text{Collector Current, } I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L}$$

Além disso, uma linha reta representando a **Linha de Carga Dinâmica** do transistor pode ser desenhada diretamente no gráfico de curvas acima do ponto de “Saturação” (A) quando $V_{CE} = 0$ até o ponto de “Corte” (B) quando $I_C = 0$ dando-nos assim o “Operating” ou **Q-point** do transistor. Esses dois pontos são unidos por uma linha reta e qualquer posição ao longo dessa linha reta representa a “Região Ativa” do transistor. A posição real da linha de carga nas curvas características pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{When: } (V_{CE} = 0) \quad I_C = \frac{V_{CC} - 0}{R_L}, \quad I_C = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

$$\text{When: } (I_C = 0) \quad 0 = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L}, \quad V_{CC} = V_{CE}$$

Então, as curvas de características de coletor ou saída para **transistores NPN de emissor comum** podem ser usadas para prever a corrente do coletor I_C , quando dada V_{CE} e a corrente de base, I_B . Uma linha de carga também pode ser construída nas curvas para determinar um ponto de operação ou **Q** adequado que pode ser definido pelo ajuste da corrente de base. A inclinação desta linha de carga é igual ao recíproco da resistência de carga que é dada como: $-1/R_L$

Então podemos definir um **transistor NPN** como sendo normalmente “OFF”, mas uma pequena corrente de entrada e uma pequena tensão positiva em sua Base (B) em relação ao seu Emissor (E) irá ligá-lo “ON” permitindo uma corrente Coletor-Emissor muito grande Fluir. Os transistores NPN conduzem quando V_C é muito maior que V_E .

No próximo tutorial sobre **transistores bipolares**, veremos a forma oposta ou complementar do *transistor NPN* chamada de transistor PNP e mostraremos que o transistor PNP possui características muito semelhantes ao transistor NPN bipolar, exceto que as polaridades (ou polarização) do transistor as direções da corrente e da tensão são invertidas.

Transistor PNP

O transistor PNP é exatamente o oposto do dispositivo transistor NPN que vimos no tutorial anterior.

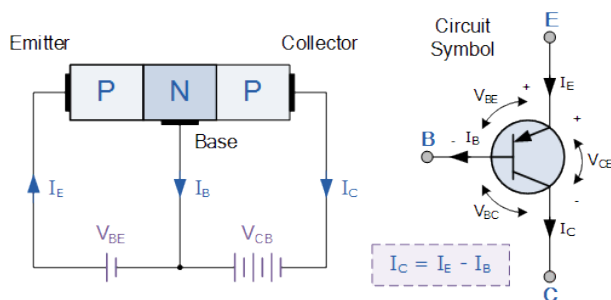
Basicamente, neste tipo de construção de transistor PNP, os dois diodos interligados são invertidos em relação ao transistor NPN anterior. Isso produz uma configuração do tipo Positivo - Negativo - Positivo, com a seta que também define o terminal Emissor apontando para dentro no símbolo do transistor PNP.

Além disso, todas as polaridades de um *transistor PNP* são invertidas, o que significa que ele “afunda” a corrente em sua base, em oposição ao transistor NPN que “fonte” de corrente através de sua base. A principal diferença entre os dois tipos de transistores é que os buracos são os portadores mais importantes para os transistores PNP, enquanto os elétrons são os portadores importantes para os transistores NPN.

Então, os transistores PNP usam uma pequena corrente de base e uma tensão de base negativa para controlar uma corrente de emissor-coletor muito maior. Ou seja, para um transistor PNP, o Emissor é mais positivo em relação à Base e também em relação ao Coletor.

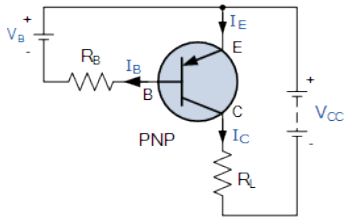
A construção de um “transistor PNP” consiste em dois materiais semicondutores do tipo P de cada lado de um material do tipo N, conforme mostrado abaixo.

Uma configuração de transistor PNP



(Nota: A seta define o emissor e o fluxo de corrente convencional, “in” para um transistor PNP.)

A construção e as tensões terminais para um transistor NPN são mostradas acima. O transistor PNP tem características muito semelhantes aos seus primos bipolares NPN, exceto que as polaridades (ou polarização) das direções de corrente e tensão são invertidas para qualquer uma das três configurações possíveis vistas no primeiro tutorial, base comum, emissor comum e Coletor Comum.



Conexão do transistor PNP

A tensão entre a Base e o Emissor (V_{BE}), agora é negativa na Base e positiva no Emissor porque para um transistor PNP, o terminal da Base é sempre polarizado negativo em relação ao Emissor.

Também a tensão de alimentação do Emissor é positiva em relação ao Coletor (V_{CE}). Então para um transistor PNP conduzir o Emissor é sempre mais positivo em relação tanto à Base quanto ao Coletor.

As fontes de tensão são conectadas a um transistor PNP conforme mostrado. Desta vez o Emissor é conectado à tensão de alimentação V_{CC} com o resistor de carga, R_L que limita a corrente máxima que flui através do dispositivo conectado ao terminal Coletor. A tensão de Base V_B que é polarizada negativamente em relação ao Emissor e é conectada ao resistor de Base R_B , que novamente é usado para limitar a corrente de Base máxima.

Para fazer com que a corrente da Base flua em um transistor PNP, a Base precisa ser mais negativa que o Emissor (a corrente deve deixar a base) em aproximadamente 0,7 volts para um dispositivo de silício ou 0,3 volts para um dispositivo de germânio com as fórmulas usadas para calcular a Resistor de base, corrente de base ou corrente de coletor são os mesmos usados para um transistor NPN equivalente e são dados como.

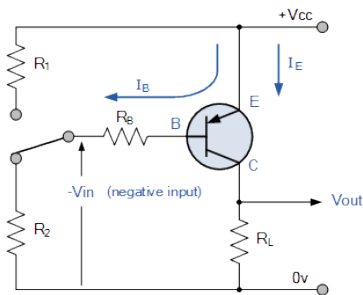
$$I_C = I_E - I_B$$

$$I_C = \beta I_B \quad I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

Podemos ver que as diferenças fundamentais entre um transistor NPN e um transistor PNP é a polarização adequada das junções dos transistores, pois as direções da corrente e as polaridades da tensão são sempre opostas. Então para o circuito acima: $I_C = I_E - I_B$ como corrente deve sair da Base.

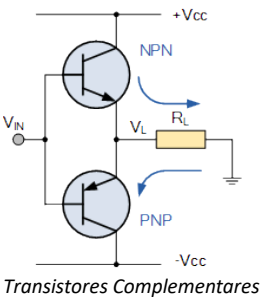
Geralmente, o transistor PNP pode substituir os transistores NPN na maioria dos circuitos eletrônicos, a única diferença são as polaridades das tensões e as direções do fluxo de corrente. Os transistores PNP também podem ser usados como dispositivos de comutação e um exemplo de uma chave de transistor PNP é mostrado abaixo.

Um circuito transistorizado PNP



As curvas de características de saída para um transistor PNP são muito semelhantes às de um transistor NPN equivalente, exceto que elas são giradas em 180 ° para levar em conta as tensões e correntes de polaridade reversa (ou seja, para um transistor PNP, a corrente de elétrons flui a base e o coletor em direção à bateria). A mesma linha de carga dinâmica pode ser desenhada nas curvas IV para encontrar os pontos de operação dos transistores PNP.

Correspondência de transistores



Você pode pensar qual é o sentido de ter um transistor PNP, quando há muitos transistores NPN disponíveis que podem ser usados como amplificador ou switch de estado sólido? Bem, ter dois tipos diferentes de transistores “PNP” e “NPN”, pode ser uma grande vantagem ao projetar circuitos amplificadores de potência como o Amplificador Classe B.

Os amplificadores classe B usam transistores “complementares” ou “par combinado” (ou seja, um PNP e um NPN conectados juntos) em seu estágio de saída ou em circuitos reversíveis de controle de motor H-Bridge onde queremos controlar o fluxo de corrente uniformemente através do motor em ambas as direções em momentos diferentes para movimento para frente e para trás.

Um par de transistores NPN e PNP correspondentes com características quase idênticas entre si são chamados de transistores complementares, por exemplo, um TIP3055 (transistor NPN) e o TIP2955 (transistor PNP) são bons exemplos de transistores de potência de silício de pares complementares ou combinados. Ambos têm um ganho de corrente DC, Beta, (I_C/I_B) dentro de 10% e alta corrente de coletor de cerca de 15A, tornando-os ideais para controle geral de motores ou aplicações robóticas.

Além disso, os amplificadores classe B usam NPN e PNP complementares em seu projeto de estágio de saída de potência. O transistor NPN conduz apenas a metade positiva do sinal, enquanto o transistor PNP conduz a metade negativa do sinal.

Isso permite que o amplificador conduza a potência necessária através do alto-falante de carga em ambas as direções na impedância e potência nominal indicadas, resultando em uma corrente de saída que provavelmente será da ordem de vários amperes compartilhada uniformemente entre os dois transistores complementares.

Identificando o transistor PNP

Vimos no primeiro tutorial desta seção de transistores, que os transistores são basicamente compostos de dois diodos conectados lado a lado.

Podemos usar essa analogia para determinar se um transistor é do tipo PNP ou do tipo NPN testando sua resistência entre os três terminais diferentes, Emissor, Base e Coletor. Ao testar cada par de terminais de transistor em ambas as direções com um multímetro, resultará em seis testes no total com os valores de resistência esperados em Ohms fornecidos abaixo.

- 1. Terminais da Base do Emissor – O Emissor para a Base deve agir como um diodo normal e conduzir somente em uma direção.
- 2. Terminais Coletor-Base – A junção Coletor-Base deve atuar como um diodo normal e conduzir somente em uma direção.
- 3. Terminais Emissor-Coletor – O Emissor-Coletor não deve conduzir em nenhuma direção.

Valores de resistência do terminal para transistores PNP e NPN

Entre os terminais do transistor		PNP	NPN
Colecionador	Emissor	R ALTO	R ALTO
Colecionador	Base	R BAIXO	R ALTO
Emissor	Colecionador	R ALTO	R ALTO
Emissor	Base	R BAIXO	R ALTO
Base	Colecionador	R ALTO	R BAIXO
Base	Emissor	R ALTO	R BAIXO

Então podemos definir um Transistor PNP como sendo normalmente “OFF”, mas uma pequena corrente de saída e tensão negativa em sua Base (B) em relação ao seu Emissor (E) irá ligá-lo “ON” permitindo que uma corrente de Emissor-Coletor muito grande flua. Os transistores PNP conduzem quando V_E é muito maior que V_C .

Em outras palavras, um transistor PNP bipolar só conduzirá se os terminais da base e do coletor forem negativos em relação ao emissor.

No próximo tutorial sobre transistores bipolares em vez de usar o transistor como um dispositivo amplificador, veremos o funcionamento do transistor em suas regiões de saturação e corte quando usado como chave de estado sólido.

Chaves de transistor bipolares são usadas em muitas aplicações para ligar ou desligar uma corrente CC, de LEDs que requerem apenas alguns miliampêres de corrente de comutação em baixas tensões CC, ou motores e relés que podem exigir correntes mais altas em tensões mais altas.

Transistor como interruptor

As chaves de transistor podem ser usadas para ligar ou desligar um dispositivo CC de baixa tensão (por exemplo, LEDs) usando um transistor em seu estado saturado ou de corte

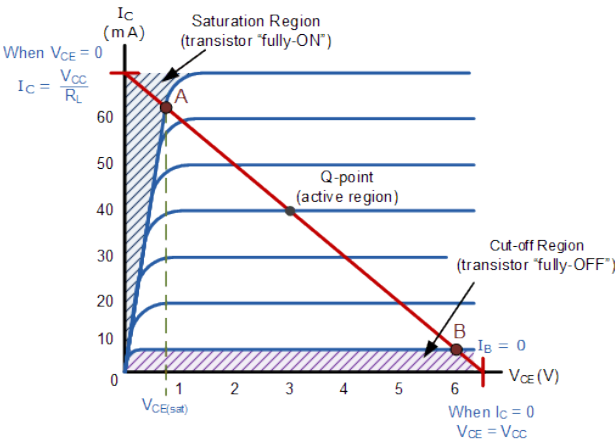
Quando utilizado como amplificador de sinal AC, a tensão de polarização da base dos transistores é aplicada de forma que sempre opere dentro de sua região “ativa”, ou seja, a parte linear das curvas características de saída são utilizadas. No entanto, ambos os transistores bipolares do tipo NPN e PNP podem ser feitos para operar como chave de estado sólido do tipo “ON/OFF”, polarizando o terminal Base do transistor de maneira diferente operando o transistor como uma chave.

Chaves de estado sólido são uma das principais aplicações para o uso de transistores para chavear uma saída DC “ON” ou “OFF”. Alguns dispositivos de saída, como os LEDs, requerem apenas alguns miliampères em tensões CC de nível lógico e, portanto, podem ser acionados diretamente pela saída de uma porta lógica. No entanto, dispositivos de alta potência, como motores, solenóides ou lâmpadas, geralmente exigem mais energia do que a fornecida por uma porta lógica comum, de modo que as chaves de transistor são usadas.

Se o circuito usa o transistor bipolar como um interruptor, então a polarização do transistor, NPN ou PNP, é organizada para operar o transistor em ambos os lados das curvas características “IV” que vimos anteriormente.

As áreas de operação de uma chave de transistor são conhecidas como Região de Saturação e Região de Corte. Isso significa que podemos ignorar os circuitos operacionais de polarização do ponto Q e divisor de tensão necessários para a amplificação e usar o transistor como um interruptor, movendo-o para frente e para trás entre seu “totalmente desligado” (corte) e “totalmente desligado”. ON” (saturação) como mostrado abaixo.

Regiões operacionais



A área sombreada em rosa na parte inferior das curvas representa a região “Cut-off” enquanto a área azul à esquerda representa a região “Saturation” do transistor. Ambas as regiões do transistor são definidas como:

1. Região de corte

Aqui as condições de operação do transistor são corrente de base de entrada zero (I_B), corrente de coletor de saída zero (I_C) e tensão de coletor máxima (V_{CE}), o que resulta em uma grande camada de depleção e nenhuma corrente fluindo através do dispositivo. Portanto, o transistor é comutado “Totalmente OFF”.

Características de corte

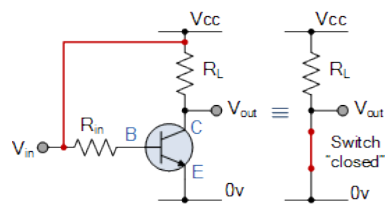
	• A entrada e a Base são aterradas (0v) • Tensão base-emissor $V_{BE} < 0,7v$ • A junção base-emissor é polarizada reversa • A junção Base-Coletor é polarizada reversa • O transistor está “totalmente desligado” (região de corte) • Nenhum fluxo de corrente do coletor ($I_C = 0$) • $V_{OUT} = V_{CE} = V_{CC} = “1”$ • O transistor opera como um “interruptor aberto”
--	--

Então podemos definir a “região de corte” ou “modo OFF” ao usar um transistor bipolar como chave como sendo, ambas as junções polarizadas reversamente, $V_B < 0,7v$ e $I_C = 0$. Para um transistor PNP, o potencial do Emissor deve ser negativo em relação à Base.

2. Região de saturação

Aqui, o transistor será polarizado de modo que a quantidade máxima de corrente de base seja aplicada, resultando em corrente máxima de coletor resultando na queda de tensão mínima no emissor do coletor, o que resulta na camada de depleção sendo a menor possível e a corrente máxima fluindo através do transistor. Portanto, o transistor é comutado “Totalmente LIGADO”.

Características de saturação



- A entrada e a Base estão conectadas a V_{CC}
- Tensão base-emissor $V_{BE} > 0,7v$
- A junção base-emissor é polarizada diretamente
- A junção Base-Coletor é polarizada diretamente
- O transistor está "totalmente ligado" (região de saturação)
- Fluxos de corrente máxima do coletor ($I_C = V_{CC}/R_L$)
- $V_{CE} = 0$ (saturação ideal)
- $V_{OUT} = V_{CE} = "0"$
- O transistor opera como um "interruptor fechado"

Então podemos definir a “região de saturação” ou “modo LIGADO” ao usar um transistor bipolar como chave como sendo, ambas as junções polarizadas diretamente, $V_B > 0,7v$ e $I_C = \text{Máximo}$. Para um transistor PNP, o potencial do Emissor deve ser positivo em relação à Base.

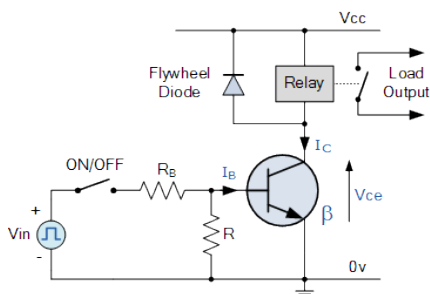
Em seguida, o transistor opera como uma chave de estado sólido “single-pole single-throw” (SPST). Com um sinal zero aplicado na Base do transistor ele desliga agindo como uma chave aberta e a corrente do coletor zero flui. Com um sinal positivo aplicado na Base do transistor ele liga “ON” agindo como uma chave fechada e a corrente máxima do circuito flui através do dispositivo.

A maneira mais simples de alternar quantidades moderadas para altas de potência é usar o transistor com uma saída de coletor aberto e o terminal Emissor do transistor conectado diretamente ao terra. Quando usado dessa maneira, a saída do coletor aberto dos transistores pode, assim, “afundar” uma tensão fornecida externamente ao terra, controlando assim qualquer carga conectada.

Um exemplo de um transistor NPN como um interruptor sendo usado para operar um relé é dado abaixo. Com cargas indutivas, como relés ou solenóides, um diodo volante é colocado na carga para dissipar a EMF traseira gerada pela carga indutiva quando o transistor é desligado e, assim, protege o transistor contra danos. Se a carga for de natureza de corrente ou tensão muito alta, como motores,

aquecedores, etc., a corrente de carga pode ser controlada por meio de um relé adequado, conforme mostrado.

Circuito de comutação de transistor NPN básico



O circuito se assemelha ao circuito do *emissor comum* que vimos nos tutoriais anteriores. A diferença desta vez é que, para operar o transistor como uma chave, o transistor precisa estar totalmente “OFF” (corte) ou totalmente “ON” (saturado).

Um interruptor de transistor ideal teria resistência de circuito infinita entre o Coletor e o Emissor quando “totalmente desligado”, resultando em corrente zero fluindo através dele e resistência zero entre o Coletor e o Emissor quando ligado “totalmente”, resultando em fluxo máximo de corrente.

Na prática, quando o transistor está “OFF”, pequenas correntes de fuga fluem através do transistor e quando totalmente “ON” o dispositivo tem um baixo valor de resistência causando uma pequena tensão de saturação (V_{CE}) através dele. Mesmo que o transistor não seja uma chave perfeita, tanto na região de corte quanto na de saturação a potência dissipada pelo transistor é mínima.

Para que a corrente da Base flua, o terminal de entrada da Base deve ser mais positivo que o Emissor, aumentando-o acima dos 0,7 volts necessários para um dispositivo de silício. Variando esta tensão de base-emissor V_{BE} , a corrente de base também é alterada e que por sua vez controla a quantidade de corrente do coletor que flui através do transistor como discutido anteriormente.

Quando a corrente máxima do coletor flui, o transistor é dito saturado. O valor do resistor de base determina quanta tensão de entrada é necessária e a corrente de base correspondente para ligar o transistor completamente.

Transistor como um interruptor - Exemplo 1

Usando os valores do transistor dos tutoriais anteriores de: $\beta = 200$, $I_C = 4\text{mA}$ e $I_B = 20\mu\text{A}$, encontre o valor do resistor de base (R_B) necessário para ligar a carga completamente quando a tensão do terminal de entrada exceder 2,5V.

$$R_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{I_B} = \frac{2.5\text{V} - 0.7\text{V}}{20 \times 10^{-6}} = 90\text{k}\Omega$$

O próximo valor preferencial mais baixo é: 82k Ω , isso garante que a chave do transistor esteja sempre saturada.

Transistor como um interruptor - Exemplo 2

Novamente usando os mesmos valores, encontre a corrente de Base mínima necessária para ligar o transistor “totalmente” (saturado) para uma carga que requer 200mA de corrente quando a tensão de entrada é aumentada para 5,0 V. Calcule também o novo valor de R_B .

Corrente da base do transistor:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{200\text{mA}}{200} = 1\text{mA}$$

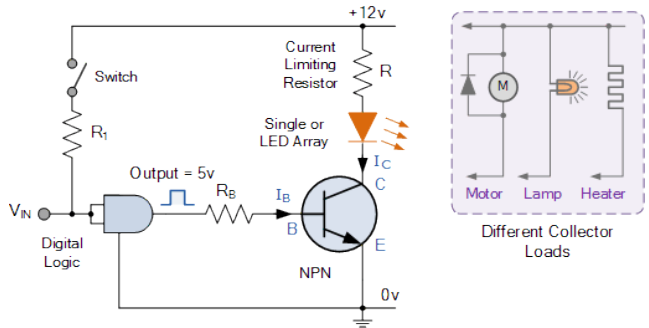
Resistência da base do transistor:

$$R_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{I_B} = \frac{5.0\text{V} - 0.7\text{V}}{1 \times 10^{-3}} = 4.3\text{k}\Omega$$

As chaves de transistor são usadas para uma ampla variedade de aplicações, como interface de dispositivos de alta corrente ou alta tensão, como motores, relés ou lâmpadas, para ICs digitais de baixa tensão ou portas lógicas como portas AND ou portas OR.

Aqui, a saída de uma porta lógica digital é de apenas +5V, mas o dispositivo a ser controlado pode exigir uma alimentação de 12 ou até 24 volts. Ou a carga como um Motor DC pode precisar ter sua velocidade controlada usando uma série de pulsos (Pulse Width Modulation). comutadores de transistor nos permitirão fazer isso mais rápido e facilmente do que com comutadores mecânicos convencionais.

Interrupor de transistor lógico digital

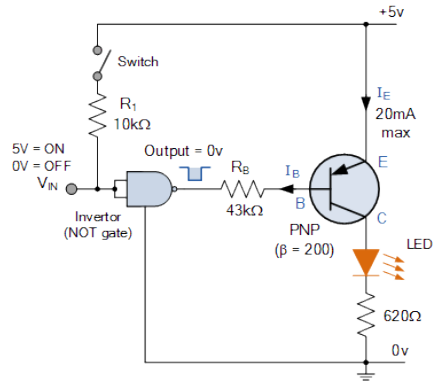


O resistor de base R_B , é necessário para limitar a corrente de saída da porta lógica.

Interrupor de transistor PNP

Também podemos usar os transistores PNP como chave, a diferença desta vez é que a carga é ligada ao terra (0v) e o transistor PNP comuta a alimentação para ele. Para ligar o transistor PNP operando como chave “ON”, o terminal Base é conectado ao terra ou zero volts (LOW) conforme mostrado.

Circuito de comutação do transistor PNP



As equações para calcular a resistência da base, a corrente e as tensões do coletor são exatamente as mesmas do interruptor de transistor NPN anterior. A diferença desta vez é que estamos trocando a energia com um transistor PNP

(corrente de fonte) em vez de chavear o terra com um transistor NPN (corrente de afundamento).

Interruptor de transistor Darlington

Às vezes, o ganho de corrente CC do transistor bipolar é muito baixo para alternar diretamente a corrente ou tensão de carga, portanto, vários transistores de comutação são usados. Aqui, um pequeno transistor de entrada é usado para ligar ou desligar um transistor de saída de manuseio de corrente muito maior.

Para maximizar o ganho do sinal, os dois transistores são conectados em uma “Configuração de Composição de Ganho Complementar” ou o que é mais comumente chamado de “Configuração Darlington” onde o fator de amplificação é o produto dos dois transistores individuais.

Os transistores Darlington simplesmente contêm dois transistores bipolares individuais do tipo NPN ou PNP conectados entre si, de modo que o ganho de corrente do primeiro transistor é multiplicado pelo ganho de corrente do segundo transistor para produzir um dispositivo que atua como um único transistor com uma corrente muito alta ganho para uma corrente de base muito menor.

O ganho global de corrente Beta (β) ou valor hfe de um dispositivo Darlington é o produto dos dois ganhos individuais dos transistores e é dado como:

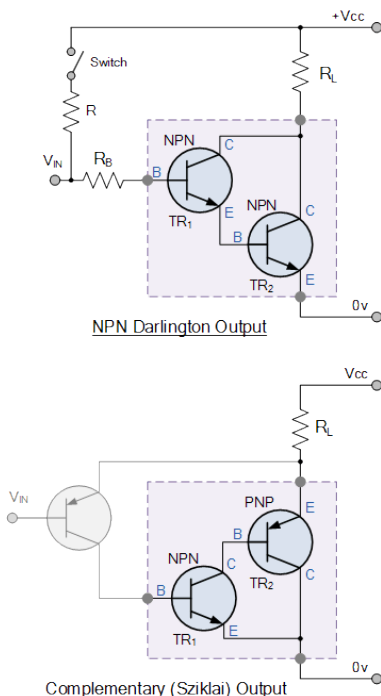
$$\beta_{\text{TOTAL}} = \beta_1 \times \beta_2$$

Portanto, transistores Darlington com valores β muito altos e altas correntes de coletor são possíveis em comparação com uma única chave de transistor. Por exemplo, se o primeiro transistor de entrada tiver um ganho de corrente de 100 e o segundo transistor de comutação tiver um ganho de corrente de 50, o ganho de corrente total será de $100 \times 50 = 5000$.

Então, por exemplo, se nossa corrente de carga de cima for 200mA , então a corrente de base darlington é apenas $200\text{mA}/5000 = 40\mu\text{A}$. Uma enorme redução em relação ao 1mA anterior para um único transistor.

Um exemplo dos dois tipos básicos de configurações do transistor Darlington é dado a seguir.

Configurações do transistor Darlington



A configuração do interruptor do transistor NPN Darlington acima mostra os coletores dos dois transistores conectados em conjunto com o emissor do primeiro transistor conectado ao terminal de base do segundo transistor, portanto, a corrente do emissor do primeiro transistor se torna a corrente de base da comutação do segundo transistor está “LIGADO”.

O primeiro transistor ou “entrada” recebe o sinal de entrada para sua Base. Este transistor o amplifica da maneira usual e o usa para acionar os segundos transistores de “saída” maiores. O segundo transistor amplifica o sinal novamente, resultando em um ganho de corrente muito alto. Uma das principais características dos transistores Darlington são seus altos ganhos de corrente em comparação com os transistores bipolares simples.

Além de sua alta capacidade de comutação de corrente e tensão, outra vantagem de um “Darlington Transistor Switch” está em suas altas velocidades de comutação, tornando-o ideal para uso em circuitos inversores, circuitos de iluminação e aplicações de controle de motor CC ou motor de passo.

Uma diferença a considerar ao usar transistores Darlington sobre os tipos convencionais bipolares simples ao usar o transistor como chave é que a tensão de entrada do emissor-base (V_{BE}) precisa ser maior em aproximadamente 1,4 V para dispositivos de silício, devido à conexão em série das duas junções PN.

Resumo do transistor como um switch

Então, para resumir ao usar um transistor como um switch, as seguintes condições se aplicam:

Os interruptores a transistor podem ser usados para comutar e controlar lâmpadas, relés ou até motores.

Ao usar o transistor bipolar como chave, eles devem estar “totalmente desligados” ou “totalmente ligados”.

Transistores que estão totalmente “ON” são considerados em sua região de saturação.

Transistores que estão totalmente “OFF” são considerados em sua região de corte.

Ao usar o transistor como um interruptor, uma pequena corrente de base controla uma corrente de carga do coletor muito maior.

Ao usar transistores para alternar cargas indutivas, como relés e solenóides, é usado um “Díodo de volante”.

Quando grandes correntes ou tensões precisam ser controladas, transistores Darlington podem ser usado.

Referência bibliográfica: https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_1.htm

