

ELETRÔNICA V



GOVERNO DO ESTADO DO
AMAZONAS

CETAM

CENTRO DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA DO AMAZONAS

ELETRÔNICA V

Robson Passos Barbosa

2016

Presidência da República Federativa do Brasil

Ministério da Educação

Governo do Estado do Amazonas

Centro de Educação Tecnológica do Amazonas

Diretora-Presidente/CETAM

Joésia Moreira Julião Pacheco

Diretora Acadêmica

Maria Stela Brito Cyrino

Organização

Coordenação de Cursos de Formação Inicial e Continuada

Revisão

Fabíola Chaves da Silva

Projeto Gráfico - Capa

Suely de Brito Corrêa

APRESENTAÇÃO

O Programa Nacional de Acesso ao Ensino Técnico e Emprego (Pronatec) tem como objetivo expandir, interiorizar e democratizar a oferta de cursos técnicos e profissionais de nível médio, e de cursos de formação inicial e continuada para trabalhadores e pessoas expostas a exclusão social.

Além disso, o Pronatec visa à ampliação de vagas e expansão das redes estaduais de educação profissional. Ou seja, a oferta, pelos estados, de ensino médio concomitante com a educação profissional e a formação inicial e continuada para diversos públicos.

No CETAM o PRONATEC é entendido como uma ação educativa de muita importância, fomentando o acesso das pessoas a educação profissional e ampliando as ofertas da instituição, consolidando uma política de governo de qualificar pessoas, como instrumento de cidadania para gerar ocupação e renda.

SUMÁRIO

1.1 UNIDADE I - INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA.....	9
1.1.1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MEDIÇÃO	9
<u>1.1.2.1</u> Metrologia.....	9
<u>1.1.2.2</u> Medição.....	10
<u>1.1.2.3</u> Grandeza.....	10
<u>1.1.2.4</u> Instrumentos de Medição.....	11
<u>1.1.2.5</u> Calibração.....	12
1.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO 12	
<u>1.2.1</u> CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	13
<u>1.2.1.1</u> Faixa.....	14
<u>1.2.1.2</u> Sensibilidade.....	14
<u>1.2.1.3</u> Resolução.....	15
<u>1.2.1.4</u> Erro de medição.....	15
<u>1.2.1.5</u> Histerese.....	15
<u>1.2.1.6</u> Repetitividade.....	16
<u>1.2.1.7</u> Exatidão.....	16
<u>1.2.1.8</u> Tolerância.....	16
<u>1.2.1.9</u> Confiabilidade.....	17
<u>1.2.1.10</u> Limiar de mobilidade.....	17
<u>1.2.1.11</u> Estabilidade.....	17
<u>1.2.1.12</u> Padrões.....	18
<u>1.2.1.13</u> Comparabilidade.....	18
<u>1.2.2</u> ESTÁGIOS DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	19
<u>1.2.2.1</u> Sensores e transdutores.....	19
<u>1.2.3</u> PERTURBAÇÕES NO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	23
1.3 MEDIDORES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS 25	
<u>1.3.1</u> TIPOS DE INSTRUMENTOS.....	25
<u>1.3.1.1</u> Instrumentos analógicos.....	25
<u>1.3.1.2</u> Instrumentos digitais.....	28
<u>1.3.2</u> INSTRUMENTOS BÁSICOS DE MEDIÇÃO.....	30
<u>1.3.2.1</u> Amperímetro.....	30
<u>1.3.2.2</u> Voltímetro.....	31

1.3.2.3	Ohmímetro	33
1.3.2.4	Wattímetro	34
1.3.2.5	Osciloscópio	35
2.1	UNIDADE 2 – CIRCUITOS ELÉTRICOS	41
2.1.1	INTRODUÇÃO	41
2.2	DEFINIÇÕES E UNIDADES	41
2.2.1	ENERGIA.....	41
2.2.2	CONDUTOR.....	42
2.2.3	CARGA ELÉTRICA.....	43
2.2.4	FORÇA ELETROMOTRIZ	43
2.2.5	TENSÃO ELÉTRICA OU DIFERENÇA DE POTENCIAL – DDP	44
2.2.6	CORRENTE ELÉTRICA.....	44
2.2.7	FONTES DE ALIMENTAÇÃO OU FONTES DE TENSÃO.....	45
2.2.8	RESISTÊNCIA ELÉTRICA OU 2ª LEI DE OHM.....	47
2.2.9	TERRA (GND).....	48
2.2.10	ELEMENTOS ATIVOS E PASSIVOS	48
2.3	CIRCUITOS RESISTIVOS	49
2.3.1	RESISTORES	49
2.3.2	RESISTÊNCIAS VARIÁVEIS	50
2.3.3	ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES.....	52
2.3.3.1	Associação em série	52
2.3.3.2	Associação em paralelo	53
2.3.3.3	Associação mista de resistores.....	56
2.4	CIRCUITO ELÉTRICO	57
2.4.1	1ª LEI DE OHM	58
2.4.2	CONDUTÂNCIA	59
2.4.3	TIPOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS	59
2.4.3.1	Circuitos elétricos em série	59
2.4.3.2	Circuitos elétricos em paralelo.....	61
2.4.3.3	Circuitos elétricos mistos.....	63
2.5	LEIS DE KIRCHHOFF	63
2.5.1	1ª Lei de Kirchhoff ou lei dos nós	63
2.5.2	2ª Lei de Kirchhoff ou lei das tensões.....	64
2.6	PONTE DE WHEATSTONE	66

2.7	DIVISOR DE TENSÃO	66
2.8	DIVISOR DE CORRENTE	68
2.9	POTÊNCIA E TRABALHO ELÉTRICO	70
2.10	POTÊNCIA ELÉTRICA	70
2.10.1	RENDIMENTO	71
2.11	TRABALHO ELÉTRICO	71
2.12	MÉTODOS DE ANÁLISES DE CIRCUITOS	72
2.12.1	MÉTODO DE CORRENTE DE MALHA	72
2.12.2	MÉTODO DAS TENSÕES NODAIS	73
2.13	TEOREMA DE THÉVENIN	74
2.14	TEOREMA DE NORTON	75
2.14.1	EQUIVALÊNCIA ENTRE OS TEOREMAS DE NORTON E THÉVENIN	76
2.14.2	TEOREMA DA SUPERPOSIÇÃO	76
2.15	CAPACITORES E INDUTORES	77
2.15.1	CAPACITORES	77
2.15.1.1	Associação de capacitores	78
2.15.2	INDUTORES	80
2.15.2.1	Associação de indutores	82
2.16	CIRCUITOS EM CORRENTE ALTERNADA	83
2.16.1	CICLO, FREQUÊNCIA E PERÍODO	84
2.16.2	CONCEITOS DIVERSOS EM CORRENTE ALTERNADA	85
2.16.2.1	Tensão de pico e corrente de pico	85
2.16.2.2	Valor de pico a pico	85
2.16.2.3	Valor instantâneo	85
2.16.2.4	Valor médio	87
2.16.2.5	Tensão eficaz	88
2.16.3	FASORES	88
2.16.3.1	Defasamento	89
2.17	CIRCUITOS PURAMENTE RESISTIVOS	89
2.18	CIRCUITOS PURAMENTE CAPACITIVOS	90
2.19	CIRCUITOS PURAMENTE INDUTIVOS	91
2.20	CIRCUITOS RL E RC	93
2.20.1	CIRCUITOS RL E RC EM SÉRIE	93
2.20.2	CIRCUITOS RL E RC EM PARALELO	95

2.20.3 CIRCUITOS RLC.....	98
2.20.3.1 Circuitos RLC em série.....	98
2.20.3.2 Circuito RLC em paralelo	99
2.21 POTÊNCIA EM CIRCUITOS ALTERNADOS	101
REFERÊNCIAS	105

1.1 UNIDADE 1 – INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

1.1.1 INTRODUÇÃO

O termo instrumentação pode ser utilizado para fazer menção à área de trabalho dos técnicos e engenheiros que lidam com processos industriais (técnicos de operação, instrumentação, engenheiros de processamento, de instrumentação e de automação), mas também pode referir-se aos vários métodos e técnicas possíveis aplicadas aos instrumentos.

Para controlar um processo industrial, independente de qual o produto fabricado ou sua área de atuação, é necessária a medição e o controle de uma série de variáveis físicas e químicas, e para isso se utiliza da instrumentação.

A instrumentação eletrônica básica utilizada nas nos laboratórios da engenharia requer vários cuidados em sua operação. O correto manuseio destes instrumentos é de suma importância para a própria segurança dos que o estão utilizando e para a correta obtenção da grandeza analisada, facilitando, desta forma, a compreensão e conclusão do objetivo a que se propôs.

Inicialmente será apresentado alguns conceitos referentes a instrumentação eletrônica, características de cada processo, o que é cada instrumento, para que serve, como deve ser utilizado e onde utilizar

Espera-se que este material possa ser uma ferramenta útil para mostrar o máximo de informações que os instrumentos utilizados em eletrônica podem oferecem, tornando o usuário mais completo no que se refere à sua formação profissional.

1.1.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MEDIÇÃO

1.1.2.1 Metrologia

É um conjunto de conhecimentos que abrange todos os aspectos teóricos e práticos no que diz respeito às medições.

A Metrologia é a ciência das medições, compreendendo:

- todos os aspectos teóricos e práticos que asseguram a exatidão exigida em uma medição;
- garantindo a qualidade de produtos e serviços através da calibração de instrumentos e da realização de ensaios;
- sendo a base fundamental para a competitividade das empresas.

Basicamente, a metrologia está dividida em três grandes áreas, sendo elas:

- A Metrologia Científica: que se utiliza de instrumentos laboratoriais e das pesquisas e metodologias científicas que têm por base padrões de medição nacionais e internacionais para o alcance de altos níveis de qualidade metrológica.
- A Metrologia Industrial: cujos sistemas de medição controlam processos produtivos industriais e são responsáveis pela garantia da qualidade dos produtos acabados.
- A Metrologia Legal: que está relacionada a sistemas de medição usados nas áreas de saúde, segurança e meio ambiente.

1.1.2.2 Medição

Medir é comparar uma grandeza com a outra, tomada como padrão. Então podemos definir medição como um conjunto de operações que tem por objetivo determinar o valor de uma grandeza qualquer.

O objetivo de uma medição é determinar o valor de uma grandeza a ser medida. Esta medição começa com uma apropriada especificação da grandeza, do método e procedimento de medição.

1.1.2.3 Grandeza

Podemos entender como grandeza, tudo aquilo que pode ser medido e possibilita que tenhamos características baseadas em informações numéricas e/ou geométricas.

As chamadas grandezas fundamentais são aquelas definidas exclusivamente por meio de um padrão físico estabelecido pelo Sistema Internacional de Unidades (SI). Podemos entender por unidade física o padrão escolhido para a medida de uma grandeza.

Podemos citar como exemplos de grandeza: o volume, a massa, a superfície, o comprimento, a capacidade, a velocidade, o tempo, a corrente, a tensão, etc.

NOME	GRANDEZA	SÍMBOLO
Metro	Comprimento	M
Segundo	Tempo	S
Quilograma	Massa	Kg
Ampère	Corrente elétrica	A
Kelvin	Temperatura termodinâmica	K
Mol	Quantidade de matéria	Mol
Candela	Intensidade de luz	Cd

Tabela 1 – Unidades fundamentais do SI
Fonte: Adaptado de Balbinot.

Sendo assim, a grandeza pode ser definida, resumidamente, como sendo o atributo físico de um corpo que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado.

1.1.2.4 Instrumentos de Medição

Antes de fazer qualquer medição, precisamos saber qual a grandeza que pretendemos medir e o grau de exatidão que pretendemos obter como resultado dessa medição, para então podermos escolher o instrumento de medir adequado. Além disso, é necessário que o instrumento ou medida materializada em questão tenha sido calibrado. Dentro da área de eletrônica, são utilizados vários instrumentos específicos, entre eles, o multímetro.

1.1.2.5 Calibração

Calibração é um conjunto de operações que estabelecem, sob condições especificadas, a relação entre valores indicados por um instrumento de medição e os valores correspondentes aos padrões utilizados.

A calibração dos instrumentos é importante para a garantia da qualidade da fabricação de um determinado produto. Ela assegura que os instrumentos usados para controlar o seu produto estão dentro de um critério aceitável e que não irão prejudicar a qualidade final do produto.

Qualquer instrumento que tenha influência direta no resultado de um produto final, não importando em qual etapa esse instrumento seja utilizado.

No uso geral, a calibração é considerada como o processo de ajuste da saída ou da indicação de um instrumento de medição a fim de estabelecer os resultados de acordo com o valor da norma aplicada, dentro de uma precisão especificada.

1.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Um conjunto de instrumentos ou dispositivos de medição, padrões, operações, métodos, dispositivos, software, pessoal, ambiente e premissas utilizados para quantificar a unidade de medição ou corrigir a avaliação de uma característica sendo medida, o processo completo para obter medições pode ser descrito como um sistema de medição.

Os sistemas de medição podem ser empregados separadamente ou integrados a um processo de controle de algum sistema. A figura a seguir mostra essas duas aplicações básicas e é importante salientar que um sistema de medição sem funções de controle apenas realiza a monitoração do processo.

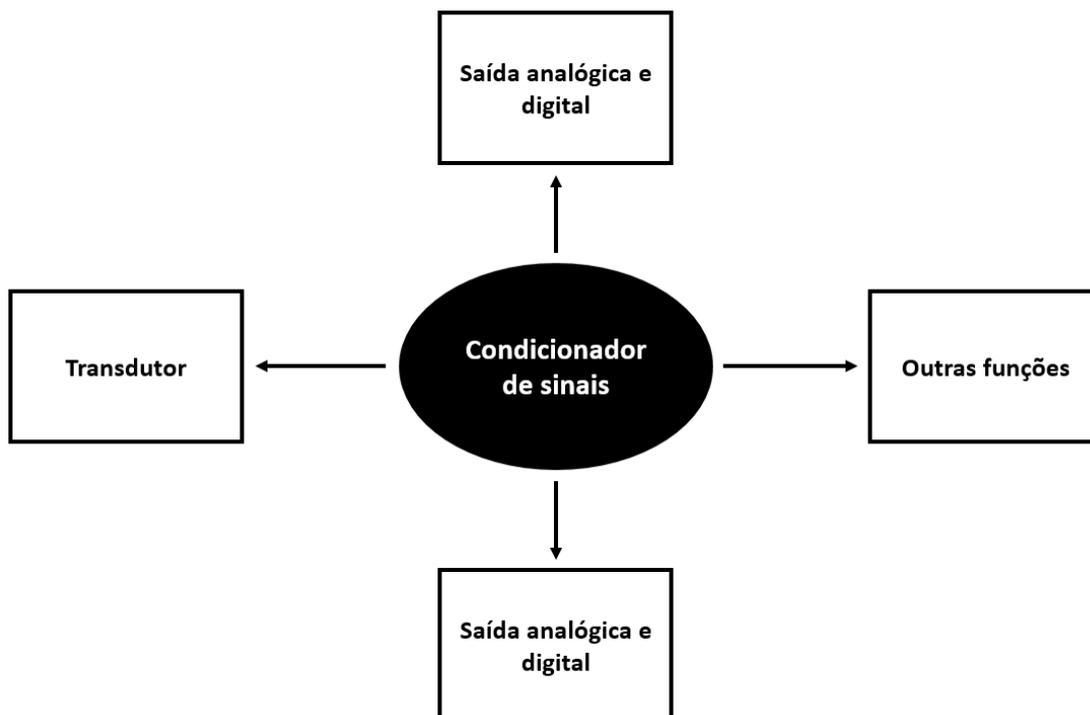


Figura 1 – Exemplo de uma estrutura de um instrumento de medição típico.
Fonte: Adaptado de Balbinot.

O processo de medição de fenômenos físicos é uma transferência da informação entre um sistema fonte e um operador que a utilizará essas informações, através de sistema de medições. A interação entre o sistema fonte e o sistema de medição provoca a modificação das propriedades de ambos, o que será usado como vetor de transferência da informação desejada.

Um sistema de medição tenderá sempre a entrar em equilíbrio com o sistema fonte e a medição que se deseja realizar inicialmente pode não ter levado em conta todos os fenômenos relevantes possíveis e seu comportamento funcional é descrito pelas suas características, operacionais e metrológicas. Uma série destes parâmetros é definida para o uso correto da terminologia e uma melhor caracterização dos sistemas de medição.

1.2.1 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO

Alguns termos utilizados para descrever as características de um instrumento de medição são igualmente aplicáveis a dispositivos de medição,

ou a um sistema de medição e por analogia podem ser aplicados a uma medida materializada ou a um material de referência.

Ao se executar a medição de uma variável, utiliza-se um instrumento. Como esse instrumento foi construído por componentes reais e, além disso, o procedimento é realizado em um ambiente sujeito a alterações de variáveis não controladas como umidade, temperatura, influência de campos magnético, entre outros, é de se esperar que as medidas apresentadas sejam perfeitas. O verdadeiro valor de uma medição é indeterminado, visto que, uma medição perfeita é quase impossível de se realizar.

1.2.1.1 Faixa

Faixa ou range, é a região entre os limites nos quais a grandeza é medida, recebida ou transmitida. Podendo ser subdividida em faixa nominal e faixa de operação.

Faixa nominal é o conjunto de valores compreendidos entre duas indicações extremas arredondadas ou aproximadas, obtido com um posicionamento particular dos comandos de um instrumento de medição ou sistema de medição, utilizado para designar este posicionamento. Um intervalo nominal de indicações é geralmente expresso em termos de seu menor e maior valor.

Faixa de operação é o conjunto de valores, entre duas indicações, para o qual se admite que o erro de um instrumento de medição mantém-se dentro dos limites especificados.

1.2.1.2 Sensibilidade

É a variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo.

Nos instrumentos com indicador de ponteiro comumente se estabelece a sensibilidade como sendo a relação entre o deslocamento da extremidade do ponteiro em (mm) e o valor unitário da grandeza a medir.

A sensibilidade pode depender do valor do estímulo.

1.2.1.3 Resolução

É definida como a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida. Por exemplo, em um dispositivo de mostrador digital, dizemos que é a variação da indicação quando o dígito menos significativo muda de unidade ou também podemos citar a resolução de um termômetro que é dado em $0,1^\circ$ de diferença.

1.2.1.4 Erro de medição

Este erro é determinado pela diferença da indicação de um instrumento de medição e um valor verdadeiro da grandeza de entrada correspondente. Este conceito de erro é aplicado principalmente quando o instrumento é comparado a um padrão de referência.

Para uma medida materializada, o erro é caracterizado entre a indicação e o valor atribuído a ela. Na prática, uma vez que um valor verdadeiro não pode ser determinado, é utilizado um valor verdadeiro convencional.

Até mesmo no que diz respeito a erro, existem limites aceitáveis dentre eles, existe o erro máximos admissível, também conhecido como erro máximo permissível, definido como um valor extremo do erro de medição, com respeito a um valor de referência conhecido, admitido por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição.

1.2.1.5 Histerese

Quantifica a máxima diferença entre leituras para um mesmo instrumento de medição, quando este é aplicado a partir de um incremento ou decremento do estímulo. Este valor poderá ser diferente se o ciclo de carregamento e descarregamento for completo ou parcial.

A histerese é um fenômeno bastante típico nos instrumentos mecânicos, tendo como fonte de erro, principalmente, folgas e deformações associadas ao atrito.

1.2.1.6 Repetitividade

É definida com a aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo, sob as mesmas condições de medição. Estas condições incluem:

- redução ao mínimo das variações devidas ao observador;
- mesmo procedimento de medição;
- mesmo observador;
- mesmo equipamento de medição, utilizado nas mesmas condições;
- mesmo local;
- repetições em um curto período de tempo.

A repetitividade pode ser expressa quantitativamente em termos das características da dispersão das indicações.

1.2.1.7 Exatidão

A exatidão, pode ser definida como a aptidão de um instrumento de medição em dar respostas próximas a um valor verdadeiro ou ainda pode ser definido como grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando.

A exatidão é um conceito qualitativo, não devendo ser confundido com precisão.

1.2.1.8 Tolerância

Quantifica as diferenças que existem em uma determinada característica de um dispositivo do sistema de medição de um dispositivo para outro (do mesmo tipo ou dentro de uma linha de dispositivos) em função do processo de fabricação.

Pode ser considerada como resultante de variáveis espúrias de fabricação e deve entrar na composição do erro esperado para a medida, se for considerada a substituição do dispositivo no instrumento sem efetuar procedimentos de calibração e ajuste.

Determinada pelo fabricante por amostragem na linha de produção dos dispositivos, representada na forma de incerteza.

1.2.1.9 Confiabilidade

Procura quantificar o período de tempo em que o instrumento fica livre de falhas. Engloba o valor que o instrumento de medição pode ultrapassar sem afetar permanentemente as características do instrumento e o tempo de vida do dispositivo, que neste caso, entra a armazenagem, o tipo de operação e o número mínimo em toda faixa de operação que pode ser efetuada sem que nenhuma das características do instrumento possa ser afetada.

1.2.1.10 Limiar de mobilidade

Consiste na maior variação no estímulo (grandeza medida) que não produz variação detectável na resposta (indicação no visor) de um instrumento de medição, sendo a variação no sinal de entrada lenta e uniforme. O limiar pode depender, por exemplo, de ruído ou de atrito.

O limiar de mobilidade define a resolução de entrada, e a resolução de mostrador, a resolução de saída.

1.2.1.11 Estabilidade

É definida como a aptidão de um instrumento em manter constantes suas características metrológicas ao longo do tempo. A estabilidade poder ser quantificada de várias maneiras, entre elas:

- Tempo em que a característica metrológica varia de um determinado valor;
- Termos da variação de uma característica em um determinado período de tempo.

1.2.1.12 Padrões

Consistem em grandezas utilizadas como referências para que os analisadores possam comparar os resultados das suas medições com valores consistentes. É a realização da definição de uma dada grandeza, com um valor determinado e uma incerteza na medição associada, utilizada como referência.

Todo instrumento utilizado em um sistema de medição, deve ter suas medidas comparadas com um padrão para que tenham a sua incerteza relacionada conhecida. Abaixo segue alguns padrões existentes:

- Padrão internacional: padrão reconhecido como um padrão internacional tendo como propósito um padrão mundial.
- Padrão nacional: padrão reconhecido por uma decisão nacional para servir, em um país, como base para atribuir valores a outros padrões de grandeza do mesmo tipo.
- Padrão primário: padrão estabelecido com um procedimento de medição primário ou criado como artefato, escolhido por convenção. Esse padrão é reconhecido como tendo a mais alta qualidade metrológica e cujo valor é aceito sem referência a outros padrões de mesma grandeza.
- Padrão secundário: padrão cujo valor é estabelecido por comparação a um padrão primário de uma grandeza do mesmo tipo.
- Padrão de referência: padrão de alta qualidade metrológica disponível em um dado local ou em uma dada organização, designado para a calibração de outros padrões de grandezas de mesmo tipo.
- Padrão de trabalho: padrão utilizado rotineiramente para calibrar ou controlar medidas materializadas, instrumentos de medição ou sistemas de medição.
- Padrão itinerante: padrão de construção especial para ser transportado entre locais diferentes.

1.2.1.13 Comparabilidade

Propriedade de um conjunto de resultados de medições correspondentes a um instrumento de medição especificado tal que o valor

absoluto da diferença dos valores medidos de todos os pares de resultados de medição seja menor que um certo múltiplo escolhido da incerteza padrão dessa diferença.

Substitui o conceito tradicional de manter-se dentro do erro, já que representa o critério de decisão se dois resultados de medição referem-se a um mesmo instrumento ou não. Se em um conjunto de medições de um instrumento, considerado padrão, apresentar um resultado não compatível, diz-se que a medição não foi feita corretamente.

1.2.2 ESTÁGIOS DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO.

Segundo Holman (1994), o sistema geral de medições pode ser dividido em três partes que devem ser especificadas para satisfazer as seguintes funções:

- Transdutor: interface entre o sistema fonte e o de medições.
- Estágio intermediário: modifica o sinal direto, amplificando, filtrando ou tratando o sinal para que uma saída conveniente seja obtida.
- Estágio final: com função de indicar, registrar ou controlar a variável. Torna disponível ao operador o valor da grandeza física que está sendo medida

1.2.2.1 Sensores e transdutores

Chama-se de transdutor a parte da cadeia de medição responsável pela transformação da grandeza física a ser medida em uma grandeza mais facilmente mensurável. São extremamente importantes para que os instrumentos de medição possam detectar as grandezas físicas a serem medidas.



Figura 2 – Esquema de funcionamento de um transdutor.

Fonte: Adaptado de Balbinot.

Os transdutores são hoje em dia indispensáveis nos sistemas de automatização e controle. A partir do momento em que se utilizam magnitudes físicas para o controle dum processo, é necessário utilizar um transdutor. A razão deve-se ao fato de hoje em dia ser necessário registrar um elevado número de magnitudes. Para ter flexibilidade, a indústria determinou sinais normalizados que possam ser lidos por muitos medidores.

Muitas vezes os transdutores e os sensores são tratados como se exercessem a mesma função, mas na verdade eles possuem papéis diferentes. O sensor é um elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida. Em alguns campos de aplicação é usado o termo detector para esse conceito.

Apesar de não ser o mesmo dispositivo, muitas vezes os transdutores e os sensores podem vir integrados, por isso acabam sendo chamados apenas como transdutores.

Os transdutores podem ser classificados, quanto a sua operação em:

- Ativo: Dispensam energia auxiliar para gerar seu sinal de saída, sendo que para uma única entrada, produz uma única saída.
- Passivo: Necessitam de uma entrada adicional para que o sinal de saída produza a informação necessária.

Quanto a sua função:

- Analógico: Fornece um sinal analógico de saída. Ex.: tensão, ângulo de rotação (potenciômetro).
- Discreto: fornece um sinal de natureza binária, onde os valores estão associados aos estados lógicos. Ex.: chaves, encoders.

Quanto à grandeza física resultante:

- Mecânicos: Mensurando e transformado em deslocamento e movimento.
- Elétricos: Mensurando e transformado em tensão devido à variação de resistência elétrica, capacitância, indutância e carga elétrica.
- Magnéticos: Mensurando e transformado em campo magnético.
- Ópticos: Mensurando e transformado em sinal óptico.

- Acústicos: Mensurando e transformado em frequência (ressonância) e amplitude (emissão acústica).
- Químicos: Mensurando e transformado em alteração da condutividade elétrica.
- Biológicos: Mensurando e transformado em nível de atividade metabólica.

Abaixo segue uma tabela de exemplos de transdutores e sua aplicação.

ENTRADA	SAÍDA	TRANSDUTOR
Temperatura	Deslocamento (coluna líquidos)	Termômetros
Temperatura	Tensão	Termopar
Temperatura	Variação de resistência	Termistor
Força	Deslocamento	Balanças de mola
Pressão	Movimento (coluna de líquidos)	Manômetro
Deslocamento	Variação da resistência	Potenciômetros
Luz	Tensão	Células fotoelétricas
Som	Variação de capacidade	Microfone

Tabela 1- Exemplo de transdutores e suas aplicações
Fonte: Adaptado de Balbinot.

Na maior parte dos casos, a saída dos transdutores é um sinal elétrico.

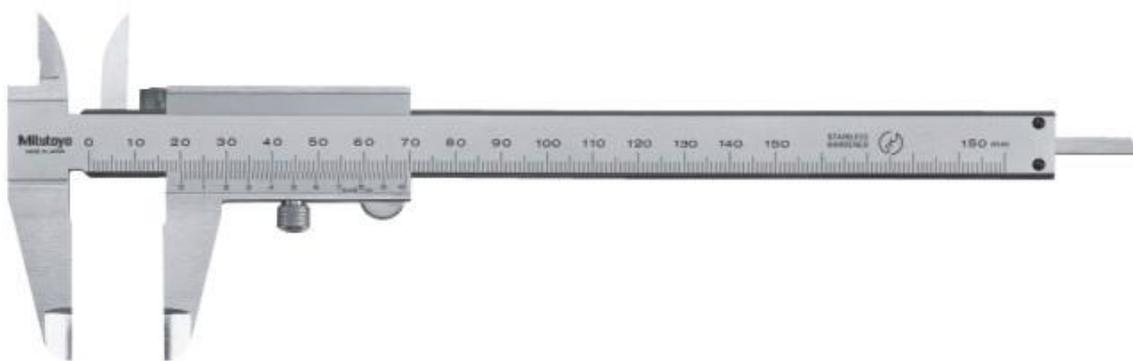


Figura 3 – Paquímetro
Fonte: Adaptado de Balbinot

A figura acima mostra um paquímetro, instrumento mecânico utilizado para se fazer medições de tamanhos diversos.



Figura 4 – Termômetro de mercúrio
Fonte: Adaptado de Balbinot

O termômetro mostrado acima é um aparelho usado para medir a temperatura ou as variações de temperatura. Composto por uma substância que possui uma propriedade termométrica, isto é, uma propriedade que varia com a temperatura.



Figura 5 – Termistor
Fonte: Adaptado de Balbinot

O termistor da figura acima é um transdutor elétrico resistivo onde transforma a temperatura em resistência elétrica. Podem ser positivos, onde o valor da resistência aumenta juntamente com o aumento da temperatura, ou podem ser negativos, onde o valor da resistência diminui com o aumento da temperatura, e vice-versa.

1.2.3 PERTURBAÇÕES NO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Toda medida está afetada por um erro. Este erro é provocado pelo sistema de medição e operador

Sendo inúmeras as possíveis causas. O comportamento metrológico do sistema de medição é influenciado por perturbações externas e internas, bem como efeitos de retroação do sistema sobre a grandeza a medir e retroação do receptor da medida sobre o sistema.

As perturbações externas podem provocar erros alterando diretamente o comportamento do sistema a ser medido ou agindo diretamente sobre a grandeza a medir. O elemento perturbador mais crítico, de modo geral, é a variação de temperatura ambiente. A variação de temperatura provoca, por exemplo, dilatação das escalas dos sistemas de medição para medição de comprimentos, da mesma forma que age sobre a grandeza a medir, por exemplo, o comprimento a medir de uma peça.

A variação de temperatura pode também ser uma perturbação interna. Exemplo típico é a não estabilidade dos sistemas elétricos de medição, por determinado espaço de tempo, após terem sido ligados. Em função da liberação de calor nos circuitos elétrico-eletrônicos pode haver uma variação das características elétricas de alguns componentes e assim do sistema. Há necessidade de aguardar uma estabilização térmica, a que minimizará os efeitos da temperatura.

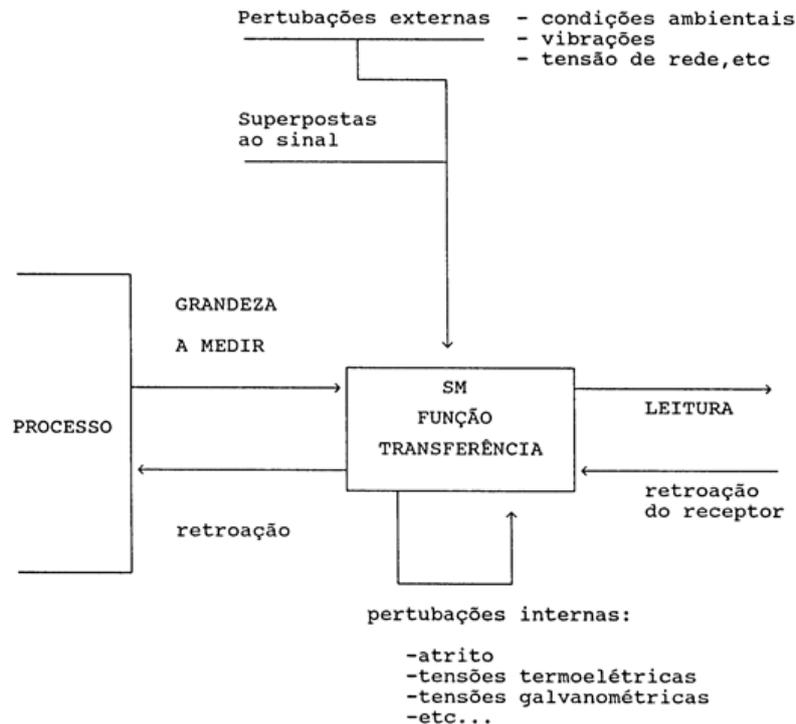


Figura 6 – Fontes de erros de medições
 Fonte: Adaptado de Balbinot

Para a operação, a fabricante fixa condições limitantes aos fatores que influem sobre o comportamento do sistema de medição. Somente dentro destas faixas é que são garantidas as especificações metrológicas dos sistemas.

Finalmente existe uma série de outros fatores que influem nos erros, que não se pode quantificar através de formulações. Estes fatores não são objeto de estudos de técnicas em metrologia. São fatores relacionados com os erros grosseiros, mas que sem dúvida são necessários de se conhecer para que através do treinamento no trabalho seja possível evitá-los. Entre estes fatores pode-se citar:

- Falhas causadas por cansaço;
- falhas causadas por leitura distorcida (paralaxe);
- falhas causadas por manipulação errada;
- falhas causadas por falta de atenção.

1.3 MEDIDORES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

Instrumentos utilizados para medir grandezas elétricas, são ferramentas essenciais em qualquer laboratório que desenvolva ou faça manutenção elétrica. Medidores de tensão, corrente e resistência elétrica, podem ser encontrados com facilidade, são simples e baratos, podendo apresentar outras funções como: medição de capacitância, ganhos de transistores, temperatura ou testar diodos. O equipamento mais conhecido e que realiza esse tipo de medições, são conhecidos como multímetros.

1.3.1 TIPOS DE INSTRUMENTOS

Como existem varias grandezas elétricas a serem medidas, os instrumentos dividem-se de acordo com a finalidade e quanto aos sistemas de medição com qual funcionam e podem ser:

1.3.1.1 Instrumentos analógicos

A principal característica dos instrumentos analógicos é o fato de seus resultados serem mostrados através de ponteiros. Os primeiros instrumentos tinham como base de funcionamento o efeito eletromecânico com o intuito de movimentar o ponteiro sobre uma escala graduada e calibrada.

Apesar de terem surgido há muito tempo, muitos são utilizados até os dias de hoje, porém, perderam a popularidade para os instrumentos digitais, devido à grande quantidade de recursos que podem ser inseridos nestes modelos mais recentes.



Figura 7 – Instrumento de medição analógico.
Fonte: Apostila de Medidas Elétricas

O erro mais comum nos instrumentos analógicos é conhecido como erro de paralaxe, quando a vista do observador, a ponta do ponteiro e o valor indicado na escala não se situam no mesmo plano. Deve ser garantido um ângulo de 90° entre o observador e o instrumento.

O instrumento fundamental com que os instrumentos de medida analógicos são construídos é o galvanômetro, possui alta sensibilidade ao fluxo de baixa corrente. Adicionando-se componentes, é possível transformar o mesmo medidor em medidor de tensão e um medidor de resistência.

O galvanômetro pode ser construído de várias maneiras, as mais comuns são a de ferro móvel e os de bobina móvel.

O galvanômetro de ferro móvel tem como principal característica a simplicidade de construção. Consiste em duas barras metálicas paralelas adjacentes, imersas em um campo eletromagnético gerado por uma bobina na qual passa uma corrente. As barras metálicas estão sob a ação de um campo magnético, e a sua magnetização dependerá do sentido da corrente na bobina. Na prática, uma das barras é fixa e a outra, móvel. A barra móvel também é anexada a uma mola que é calibrada juntamente a uma escala, sobre a qual desloca-se um ponteiro fixado ao ferro e placa móvel.

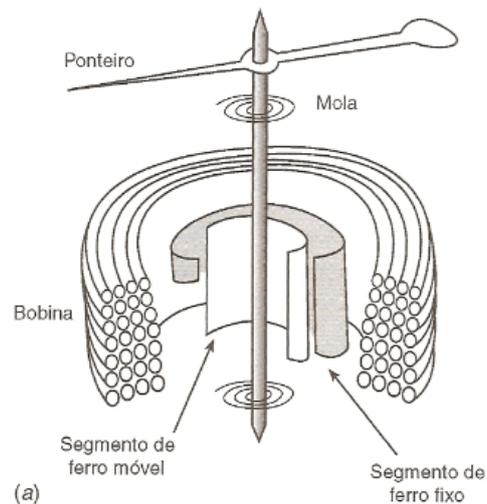


Figura 8 – Galvanômetro de ferro móvel
 Fonte: Balbinot, 2011 pg. 235

Já o galvanômetro de bobina móvel utiliza um ímã permanente. Os polos desse ímã são montados em conjunto com uma bobina presa em apenas dois extremos, de modo que a mesma possa se movimentar livremente sobre o eixo. Quando uma corrente passa pela bobina, o campo magnético gerado pela bobina interage com o do ímã, fazendo com que o ponteiro fixado junto com uma mola se mova.

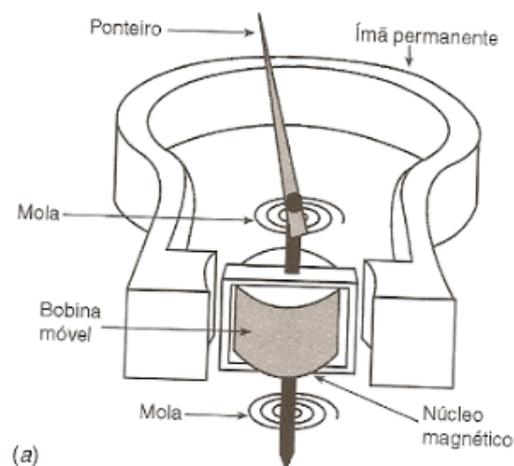


Figura 9 – Galvanômetro de bobina móvel.
 Fonte: Balbinot, 2011, pg 235.

A maioria dos instrumentos lógicos de bancada é constituída a partir de um galvanômetro de bobina móvel. Isso acontece porque esses instrumentos fornecem respostas mais precisas que os feitos de ferro móvel.

Apesar do galvanômetro de bobina móvel ler apenas sinais de baixa frequência ou sinais DC, também pode utilizá-lo com sinais AC, basta acrescentar semicondutores retificadores.

1.3.1.2 Instrumentos digitais

Se nos instrumentos analógicos o modelo básico é o amperímetro, a operação dos aparelhos digitais tem como fundamento a medida de tensão (voltímetro). A alteração da configuração inicial permite que sejam medidas outras grandezas, como corrente, resistência, frequência, temperatura e capacitância.

Os instrumentos digitais fornecem a leitura em forma de dígitos em vez de mostrar através da posição de um ponteiro e a conversão dos sinais analógicos de entrada em dados digitais. Esta conversão analógico-digital (ou A-D) é realizada por circuitos eletrônicos.

A parte mais evidente em um instrumento digital é seu display (visor), que pode ser de 2 tipos:

- Display de LEDs (Light Emitting Diodes), dispositivos semicondutores capazes de emitir luz quando percorridos por corrente elétrica. Esses displays têm fundo escuro, para proporcionar maior destaque ao brilho dos LEDs.
- Display de cristal líquido LCD (Liquid Crystal Display), constituídos por duas lâminas transparentes de material polarizador de luz, com eixos polarizadores alinhados perpendicularmente entre si; entre as lâminas existe uma solução de cristal líquido, cujas moléculas podem se alinhar sob a ação da corrente elétrica, impedindo a passagem da luz.

Em relação à capacidade de contagem máxima do display digital, um instrumento com $3\frac{1}{2}$ dígitos tem três dígitos “completos” (isto é, capazes de mostrar os algarismos de 0 até 9) e 1 “meio dígito”, que só pode apresentar 2 valores: 0 (nesse caso o algarismo está “apagado”) ou 1; portanto, este instrumento pode contar até 1999. Outro instrumento de $4\frac{1}{2}$ dígitos tem maior contagem, pois pode apresentar 19999 contagens. Instrumentos com

contagem de 3999 (31/4 dígitos), 4999 (31/5 dígitos) ou 6999 (31/7 dígitos) também são fabricados, até com contagens máximas maiores.

De forma semelhante aos instrumentos analógicos, a exatidão dos medidores digitais informa o maior erro possível em determinada condição de medição. É expresso através de percentual da leitura do instrumento. Por exemplo, se um instrumento digital com 1% de exatidão está apresentando uma medida de 100 unidades em seu display, o valor verdadeiro estará na faixa de 99 a 101 unidades. A especificação da exatidão de alguns instrumentos inclui o número de contagens que o dígito mais à direita pode variar. Assim, se um voltímetro tem exatidão de $\pm(1\% +2)$ e seu display mede 220 V, o valor real pode estar entre 217,78 e 222,22 V.

Os instrumentos digitais são hierarquizados em categorias numeradas de I a IV, cada uma delas abrangendo situações às quais o medidor se aplica. Essas categorias dizem respeito à segurança, tanto do instrumento em si como de seu operador. Não basta que a proteção se dê pela escolha de instrumento com escalas com ordem de grandeza suficiente para medir o que se quer, é necessário levar-se em consideração, ainda, a possibilidade da existência de valores de tensão, que podem atingir picos de milhares de volts em determinadas situações. As categorias podem ser classificadas da seguinte forma:

- CAT I: Equipamentos eletrônicos, equipamentos de baixa energia com proteção que limita efeitos dos valores medidos, qualquer fonte de alta tensão e baixa energia derivada de um transformador de resistência de alto enrolamento.
- CAT II: Aparelhos e ferramentas portáteis, saídas e circuitos ramificados longos.
- CAT III: Equipamentos em instalações fixas: aparelhagem de comutação e motores trifásicos, barramento e alimentador em plantas industriais, alimentadores e circuitos ramificados curtos, dispositivos de painel de distribuição, saídas de aparelhos pesados com conexões curtas à entrada de serviço, sistemas grandes de iluminação.
- CAT IV: Origem da instalação: ponto onde se faz a conexão de baixa tensão com a energia da empresa fornecedora, medidores de eletricidade, equipamentos primários de proteção contra sobrecorrente,

exterior e entrada de serviço, ramal de ligação de poste ao prédio, conexão entre o medidor e o painel, linha aérea que vai a um edifício isolado, linhas subterrâneas.

A maioria dos medidores de tensão e corrente fornece indicações bastante exatas quando operam grandezas constantes (CC) ou formas sinusoidais puras (CA); no entanto deixam a desejar quando a grandeza sob análise tem outra forma de onda. Nesse caso, somente os instrumentos classificados com True RMS darão a indicação exata.

1.3.2 INSTRUMENTOS BÁSICOS DE MEDIÇÃO

1.3.2.1 Amperímetro

Instrumento utilizado para medir correntes, sempre é ligado em série com o elemento do circuito cuja corrente se quer medir, isto significa que um condutor deverá ser “aberto” no ponto de inserção do instrumento. Abaixo é mostrado como deve ser feita a medição da corrente elétrica utilizando o amperímetro e em seguida o símbolo do amperímetro.

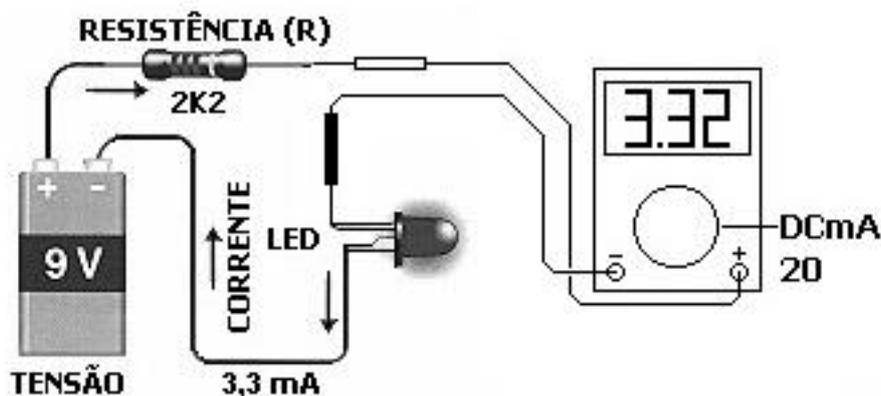


Figura 10 – Exemplo de medição de corrente DC
Fonte: Balbinot, 2011

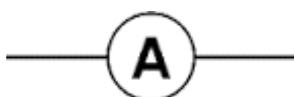


Figura 11 – Símbolo do amperímetro.
Fonte: Balbinot, 2011

Se a interrupção do circuito não é possível, pode-se usar um alicate amperímetro, capaz de medir a corrente pelo campo magnético que esta produz ao passar no condutor. Geralmente esse tipo de amperímetro é utilizado em circuitos alterados CA.



Figura 12 – Alicate amperímetro
Fonte: Balbinot, 2011

A resistência interna de um amperímetro deve ser a menor possível, a fim de que o instrumento interfira minimamente no circuito sob inspeção. Um amperímetro ideal é aquele que tem resistência interna igual a zero, ou seja, equivale a um curto-circuito.

1.3.2.2 Voltímetro

Instrumento destinado à medida das tensões elétricas, o voltímetro deve ser ligado em paralelo com o elemento cuja tensão quer-se determinar. Abaixo segue um exemplo de como se deve medir a tensão elétrica de um circuito e em seguida o símbolo do voltímetro.

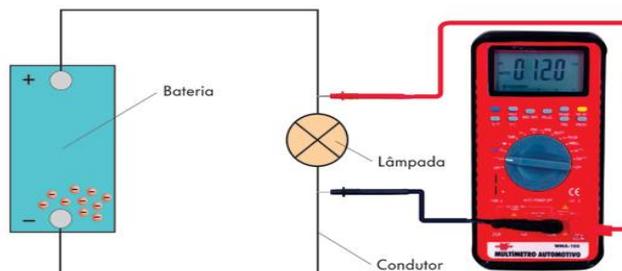


Figura 13 – Exemplo de medição de tensão
Fonte: Balbinot, 2011

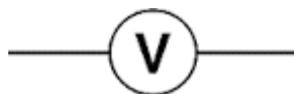


Figura 14 – Símbolo do voltímetro
Fonte: Balbinot, 2011

Uma observação importante com relação à ligação de voltímetros e amperímetros para medição de tensões e correntes, respectivamente, é o fato de que nunca se deve ligar um amperímetro em paralelo com a carga que se deseja medir a corrente. Isto porque, um amperímetro, que idealmente possui uma resistência interna nula, quando ligado em paralelo causará um curto-circuito nos terminais da carga, possibilidade de passagem de correntes na ordem de kA no amperímetro ocasionando queima do equipamento e risco de choque elétrico no operador. Por outro lado, um voltímetro, que idealmente deve ter impedância infinita, não deve ser colocado em série na carga que se deseja medir a tensão, pois haverá interrupção da corrente demandada pela carga. Abaixo segue um exemplo de medição simultânea de corrente e tensão.

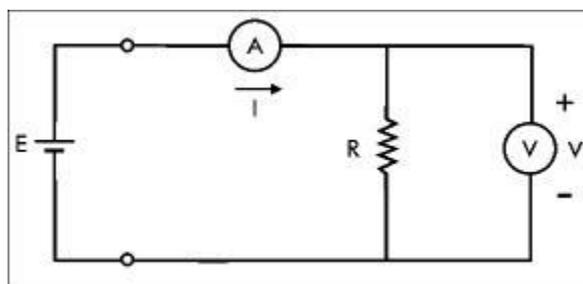


Figura 15 – Medição de corrente e tensão em um circuito elétrico.
Fonte: Balbinot, 2011

1.3.2.3 Ohmímetro

O ohmímetro é um instrumento que permite medir a resistência elétrica de um elemento. Os ohmímetros são regra geral parte integrante de um multímetro, constituindo assim uma das múltiplas funções que disponibilizam, é comum os multímetros integrarem as funções de ohmímetro, amperímetro e voltímetro, além de outras funções, relacionadas com o teste de dispositivos eletrônicos e a realização de operações sobre as medidas efetuadas.

A medição da resistência de um elemento é efetuada colocando em paralelo o instrumento e o componente. A medição efetuada por um ohmímetro baseia-se na aplicação da Lei de Ohm, o ohmímetro injeta no elemento uma corrente pré-estabelecida, mede a tensão aos terminais e efetua o cálculo da resistência.

No entanto, para que a medição seja correta é necessário que o elemento a medir se encontre devidamente isolado de outros componentes do circuito e, em particular, da massa através do corpo humano. Deste modo evita-se que o circuito envolvente retire ou injete no elemento corrente distinta daquela aplicada pelo ohmímetro. O isolamento elétrico pode ser obtido de duas maneiras distintas, desligando o componente em questão do resto do circuito, ou colocando pelo menos um dos seus terminais no ar. Abaixo, segue um exemplo de aplicação.

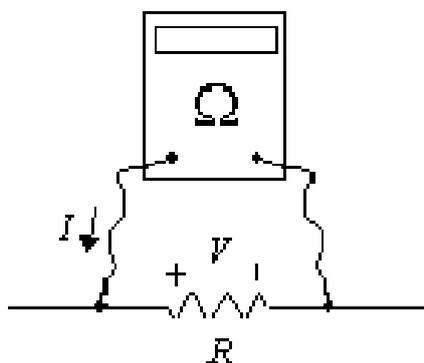


Figura 16 – Exemplo de medição da resistência elétrica.
Fonte: Balbinot, 2011

1.3.2.4 Wattímetro

O wattímetro é um instrumento que permite medir a potência elétrica fornecida ou dissipada por um elemento. O wattímetro implementa o produto das grandezas tensão e corrente elétrica no elemento, razão pela qual a sua ligação ao circuito é feita simultaneamente em série e em paralelo. Assim, dois terminais são ligados em paralelo com o elemento, efetuando a medição da tensão, e os dois restantes são interpostos no caminho da corrente.

Uma técnica de multiplicação utilizada é o TDM (Time division multiplier), ou multiplicação por divisão de tempo. Segundo essa técnica, é gerada uma onda quadrada com período constante T e com duty cycle (ciclo de trabalho) e amplitude determinados pela corrente e tensão $i(t)$ e $v(t)$.

Tal como o voltímetro e o amperímetro, o wattímetro ideal mede a tensão sem desvio de qualquer fluxo de corrente e mede a corrente sem introduzir qualquer queda de tensão aos seus terminais.

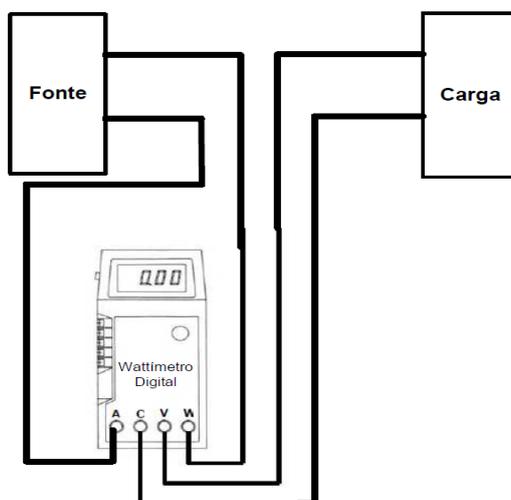


Figura 17 – Exemplo de medição da potência ativa.
Fonte: Balbinot, 2011

Hoje em dia, são utilizados são utilizados os wattímetros digitais que utilizam multiplicadores digitais. Esses dispositivos podem ser facilmente implementados com microprocessadores integrados a uma série de dispositivos periféricos.



Figura 18 – Imagem de um wattímetro digital.
Fonte: Balbinot, 2011

1.3.2.5 Osciloscópio

O osciloscópio é um instrumento de medição que permite visualizar graficamente sinais eléctricos. Na maioria das aplicações, o osciloscópio mostra como é que um sinal eléctrico varia no tempo. Neste caso, o eixo vertical (Y) representa a amplitude do sinal (tensão) e o eixo horizontal (X) representa o tempo. A intensidade (ou brilho) do écran é por vezes chamada de eixo dos Z.

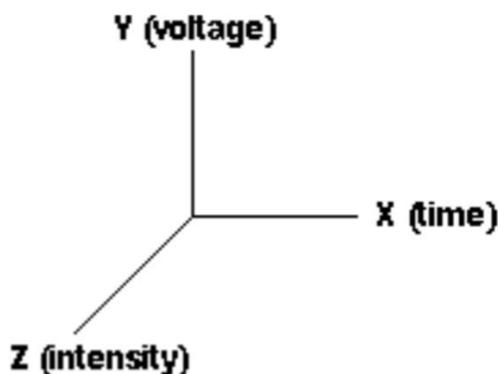


Figura 19 – Eixos X, Y e Z de um osciloscópio.
Fonte: Balbinot, 2011

Os osciloscópios podem ser analógicos ou digitais. Os osciloscópios analógicos são assim chamados por apresentarem um tubo de raio catódico (TRC). Além disso, esses osciloscópios analógicos possuem apenas funções analógicas, ou seja, não podem armazenar dados, fazer ajustes que necessitem de algum recurso mais avançado.

Um gráfico deste tipo poderá dizer-nos diversas coisas acerca de um sinal, nomeadamente:

- Permite determinar valores de tensão e temporais de um sinal.
- Permite determinar a frequência de um sinal periódico.
- Permite determinar a componente contínua (CC) e alternada (CA) de um sinal.
- Permite detectar a interferência de ruído num sinal e, por vezes, eliminá-lo.
- Permite comparar dois sinais num dado circuito, nomeadamente a entrada e a saída, permitindo tirar as mais variadas conclusões, tais como se um dado componente está avariado.

Outras potencialidades surgem na utilização do modo 'xy', bem como nos osciloscópios digitais, que incorporam muitas funcionalidades adicionais.

O osciloscópio tem um aspecto que se assemelha a um televisor, excetuando a grelha inscrita no écran e a grande quantidade de comandos. O painel frontal do osciloscópio tem os comandos divididos em grupos, organizados segundo a sua funcionalidade. Existe um grupo de comandos para o controlo do eixo vertical (amplitude do sinal), outro para o controlo do eixo horizontal (tempo) e outro ainda para controlar os parâmetros do écran (intensidade, focagem, etc.).



Figura 20 – Osciloscópio analógico.
Fonte: Balbinot, 2010

O osciloscópio é utilizado por diversos profissionais, num sem número de aplicações, tão variadas como a reparação de televisores, a análise do funcionamento das unidades eletrônicas de controlo dos automóveis, a análise de vibrações (de um motor, por exemplo), o projeto de circuitos de

condicionamento de sinal (para sistemas de instrumentação, por exemplo) ou sistemas biomédicos.

A utilidade do osciloscópio não se limita ao mundo da eletricidade/eletrônica. Com o transdutor apropriado, o osciloscópio poderá utilizar-se para visualizar e medir qualquer tipo de grandeza física. Um transdutor é um dispositivo que cria um sinal elétrico a partir de um estímulo de outro tipo de grandeza, tal como som, luz ou calor.

Embora os osciloscópios digitais permitam analisar sinais transitórios, que só acontecem uma vez, o osciloscópio é, por princípio, um instrumento de medição adequado a medir e analisar sinais periódicos.

Os sinais periódicos, também denominados de ondas, representam a variação de grandezas que se repetem (periodicamente) no tempo. São exemplos típicos as ondas senoidais (sine wave) e senoidais amortecidas (damped sine wave), as ondas quadradas (square wave), retangulares (rectangular wave), as ondas triangulares (triangle wave) e de dente de serra (sawtooth wave). Abaixo segue exemplo de cada uma delas.

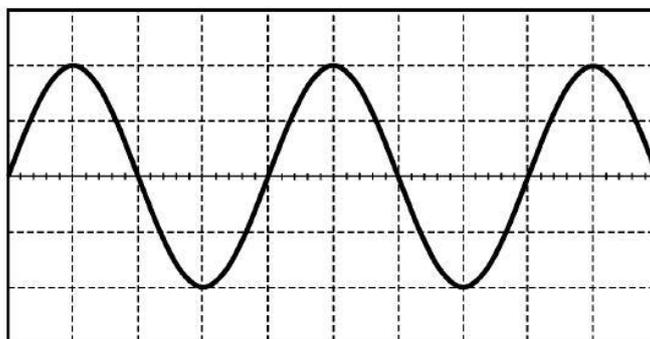


Figura 21 – Onda senoidal.
Fonte: Balbinot, 2010

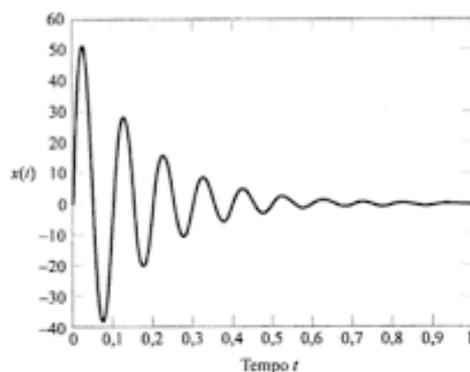


Figura 22 – Onda senoidal amortecida.
Fonte: Balbinot, 2010

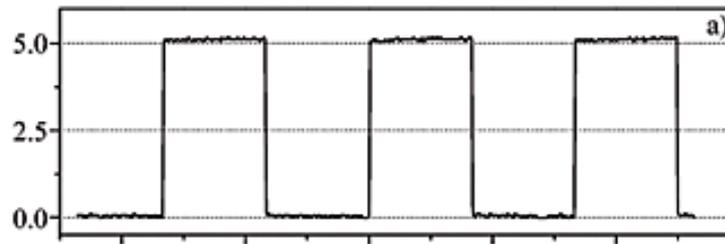


Figura 23 – Onda quadrada.
Fonte: Balbinot, 2010

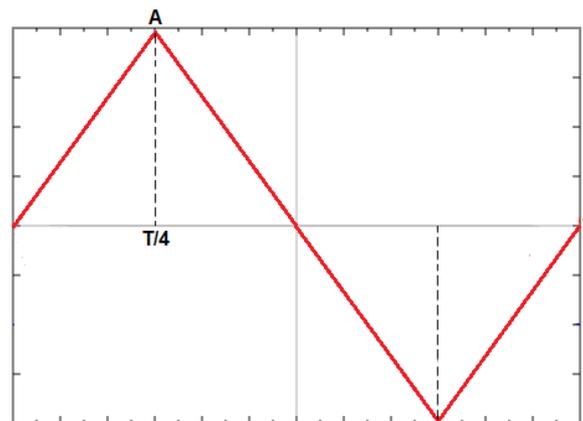


Figura 24 – Onda triangular.
Fonte: Balbinot, 2010

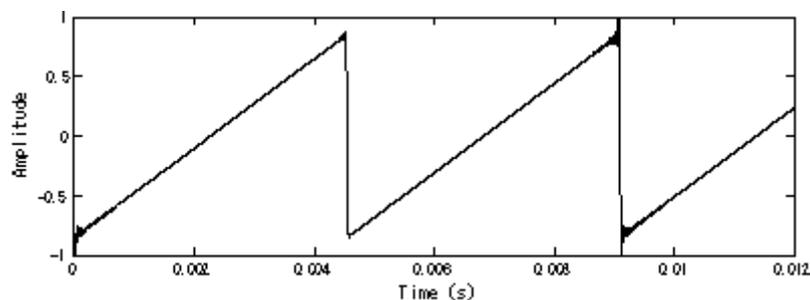


Figura 25 – Onda dente de serra.
Fonte: Balbinot, 2010

Quanto à proveniência desses sinais, sua origem vem de vários lugares distintos seja de uma tomada de energia alternada, sinal senoidal, ou por impulsos digitais dentro de computadores, onda quadrada.

Dentro das grandezas elétricas mensuráveis em um osciloscópio, podemos destacar algumas:

- Período e frequência: se um sinal se repete no tempo, ele tem uma frequência de repetição. Esta frequência (f) é medida em Hertz (Hz) e é

igual ao número de vezes que o sinal se repete por segundo (número de ciclos por segundo). Analogamente, um sinal periódico tem um período (T), que é o tempo que o sinal leva a completar um ciclo. O período e a frequência são inversos um do outro, isto é, $f = 1/T$.

- Amplitude: Com um osciloscópio podem medir-se amplitudes de sinais, nomeadamente amplitudes de pico e pico-a-pico.
- Defasamento: O defasamento (ou diferença de fase) representa o atraso, no tempo ou em fase, entre dois sinais da mesma frequência.

De modo geral, os osciloscópios (analógicos ou digitais) tem um painel frontal que apresentam controles básicos, que serão descritos a seguir. Estas características gerais podem variar em diferentes equipamentos. São eles:

- Interruptor: liga e desliga o osciloscópio.
- Brilho: ajusta a luminosidade do ponto e do traço.
- Foco: é o controle que ajusta a nitidez do ponto ou traço luminoso.
- Iluminação de retícula: possibilita o controle da luminosidade do quadriculado ou divisões na tela.
- Entrada de sinal vertical: nessa entrada, é conectada a ponta de prova do osciloscópio.
- Chave de seleção do modo de entrada CA, CC e GND: essa chave seleciona de acordo com a forma de onda a ser observada.
- Chave seletora de ganho: essa chave permite a amplificação ou atenuação da amplitude de projeção na tela do osciloscópio, altura da imagem.
- Posição vertical: possibilita movimentar a referência de cada canal para cima ou para baixo na tela.
- Chave seletora de base no tempo: é o controle que permite variar o tempo de varredura horizontal do ponto da tela.
- Ajuste horizontal: é o ajuste que permite controlar horizontalmente o controle a forma de onda na tela.
- Trigger: é o controle manual que possibilita o ajuste de sincronismo quando não se consegue um sincronismo automático.
- Pontas de prova: As pontas de prova são utilizadas para interligar o osciloscópio aos pontos de medida.



Figura 26 – Pontas de prova osciloscópio.
Fonte: Balbinot, 2010

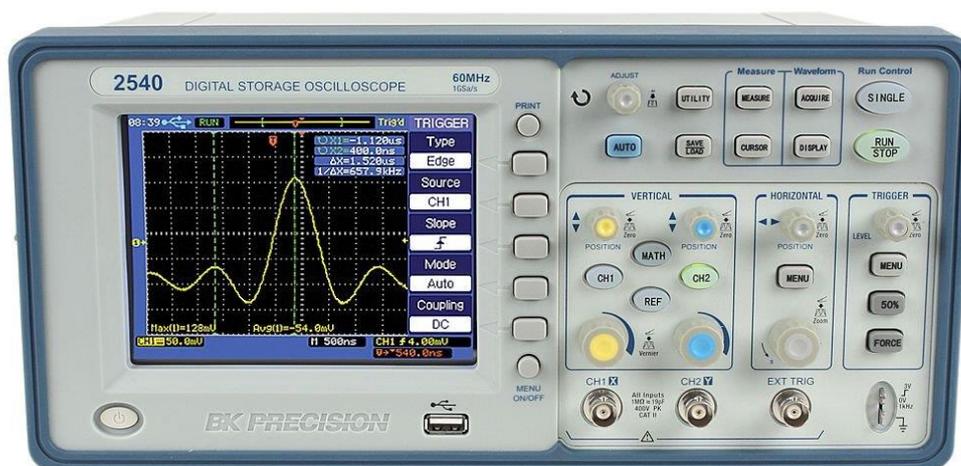


Figura 27 – Osciloscópio digital.
Fonte: Balbinot, 2010

Acima, foram mostradas as pontas de prova de um osciloscópio e um tipo de osciloscópio digital utilizado em laboratórios de eletrônica. A tendência dos osciloscópios digitais é se tornar um equipamento autoajustável.

2.1 UNIDADE 2 – CIRCUITOS ELÉTRICOS

2.1.1 INTRODUÇÃO

Circuitos elétricos é a disciplina base em qualquer currículo do ramo da eletricidade, sendo elas na área de eletrônica, sistemas de potência, sistemas de comunicação, máquinas elétricas e teoria de controle.

A eletricidade está a cada dia mais presente na vida da população, ela é uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento da humanidade, por conta disso, se faz necessário um conhecimento mais aprofundado nessa área de tão importância para as comunidades do mundo todo.

Nessa disciplina, serão conhecidos o significado de circuitos elétricos, os principais elementos que o compõe, grandezas e medidas, comportamento e etc. Será abordada, ainda, a parte de análise de circuitos, componente chave para se entender o comportamento dos circuitos sendo eles contínuos ou alternados.

2.2 DEFINIÇÕES E UNIDADES

2.2.1 ENERGIA

Segundo (MARKUS, 2004) energia é uma grandeza que caracteriza um sistema físico, mantendo o seu valor independente das transformações que ocorrem nesse sistema, expressando também, a capacidade de modificar o estado de outros sistemas com os quais interage.

É representada pelo τ (tau) e a sua unidade é o joule (J).

Abaixo segue algumas formas de energia e suas possíveis transformações.

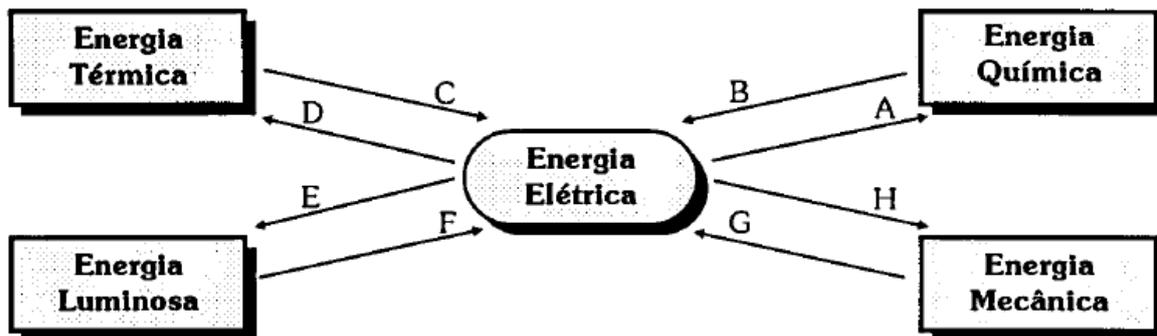


Figura 28 – Formas de energia e suas transformações
Fonte: Markus (2004, p.1)

A seguir, segue uma tabela exemplificando alguns dispositivos que podem realizar esses processos de transformação:

LETRA	EXEMPLOS DE DISPOSITIVOS
A	Eletrólise
B	Pilha elétrica
C	Sensor termoelétrico
D	Resistência elétrica
E	Lâmpada elétrica
F	Sensor fotoelétrico
G	Dínamo
H	Motor elétrico

Tabela 1 – Exemplos de dispositivos que realizam transformações de energia.
Fonte: Adaptado de Markus (2004)

É importante citar que, em qualquer processo que envolva transformação de energia ocorre o aparecimento de energias indesejáveis denominadas perdas.

2.2.2 CONDUTOR

É todo o material que apresenta cargas elétricas livres em grande quantidade permitindo a circulação das mesmas.

2.2.3 CARGA ELÉTRICA

Propriedade de uma partícula de atrair ou repelir outra partícula semelhante, podendo ser positiva (excesso de prótons) ou negativa (excesso de elétrons).

Pode ser representada pela letra q e a sua unidade de medida é o coulomb (C).

Sendo que, para se achar a quantidade de carga elétrica, usa-se a seguinte equação:

$$\Delta q = n \cdot e$$

Onde:

$\Delta q \rightarrow$ Quantidade de cargas em coulomb (C)

$n \rightarrow$ número de cargas em excesso

$e \rightarrow$ carga elementar em módulo ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

Exemplo: Quantos elétrons em excesso possui um corpo que apresenta uma carga elétrica de $3C$?

R:

$$\Delta q = n \cdot e$$

$$n = \frac{\Delta q}{e}$$

$$n = \frac{3}{1,6 \cdot 10^{-19}}$$

$$n = 1,87 \cdot 10^{19} \text{ elétrons.}$$

2.2.4 FORÇA ELETROMOTRIZ

Cargas em um condutor, representadas por elétrons livres, podem-se mover aleatoriamente. Porém, se desejarmos um movimento ordenado, se faz necessário a aplicação de uma força, ou seja, um trabalho é realizado sobre as cargas.

Podemos então definir força eletromotriz como a energia que promove o deslocamento de cargas ordenadamente no interior da fonte repondo as

cargas em seus terminais e mantendo a diferença de potencial constante por um longo período, fazendo, assim, com que o fluxo de cargas se mantenha constante através de um condutor.

A unidade da força eletromotriz é o volt (V).

2.2.5 TENSÃO ELÉTRICA OU DIFERENÇA DE POTENCIAL – DDP

Tensão elétrica é a diferença de potencial aplicada entre dois pontos fazendo-se com que as cargas se movam ordenadamente.

Podemos representar a tensão elétrica utilizando duas letras, a letra V ou a letra E, e a sua unidade também é o volt (V).

Matematicamente, podemos escrever:

$$E = V_B - V_A$$

ou

$$V = V_B - V_A$$

Exemplo: Calcule a diferença de potencial entre dois pontos A e B que apresentam 4V e 6V respectivamente?

R:

$$E = V_B - V_A$$

$$E = 6 - 4$$

$$E = 2V$$

2.2.6 CORRENTE ELÉTRICA

Corrente elétrica é a movimentação ordenada das cargas elétricas dentro de um condutor.

É representada pela letra I e a sua unidade é o ampère (A).

Podemos adotar dois tipos de sentidos da corrente elétrica, o sentido convencional e o sentido real, como demonstrado na figura abaixo:

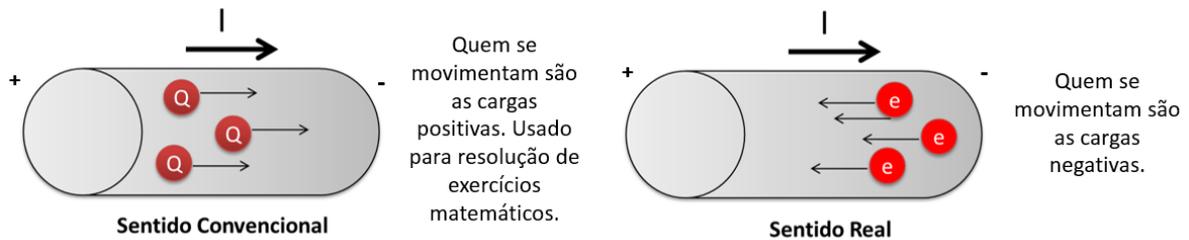


Figura 29 – Apresentação dos sentidos da corrente elétrica.
Fonte: Markus (2004, p.1)

A intensidade da corrente elétrica indica a quantidade de carga elétrica que passa através de um condutor a cada segundo. Matematicamente, podemos representar:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Onde:

$I \rightarrow$ Intensidade da corrente elétrica (A)

$\Delta q \rightarrow$ Quantidade de cargas em coulomb (C)

$\Delta t \rightarrow$ Intervalo de tempo em segundos (s)

Exemplo: Determine a intensidade da corrente elétrica em um condutor em que se passa 0,05C de carga pelo tempo de 2s?

R:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

$$I = \frac{0,05}{2}$$

$$I = 0,025A$$

2.2.7 FONTES DE ALIMENTAÇÃO OU FONTES DE TENSÃO

Como já foi visto, para que a corrente elétrica possa ser conduzida é necessária a presença de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre as extremidades de um condutor.

Fonte de alimentação ou fonte de tensão é um dispositivo que fornece tensão a um circuito. O ponto de maior potencial é chamado de polo positivo e o de menor potencial de polo negativo.

Existem fontes de tensão contínuas, onde a principal característica é de manter um valor constante de tensão no decorrer do tempo. Podemos citar como exemplos as pilhas e as baterias.

Já as fontes de tensão alternadas, apresentam a característica de variar o valor da tensão no decorrer do tempo. Como exemplo, podemos citar os alternadores.

Uma importante característica presente nos dois tipos de fontes é a presença da força eletromotriz, abordada anteriormente, onde o valor e o comportamento, depende exclusivamente do material utilizado na sua construção.

Nas figuras a seguir, serão apresentados os símbolos utilizados em circuitos e os gráficos de tensão em função do tempo de cada uma das fontes.

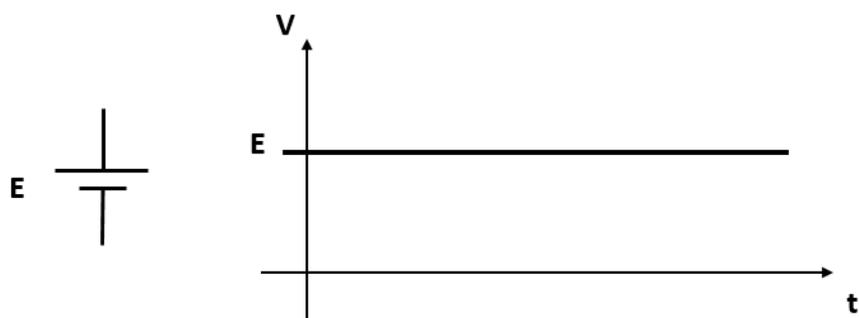


Figura 30 – Símbolo e gráfico da fonte de tensão contínua.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

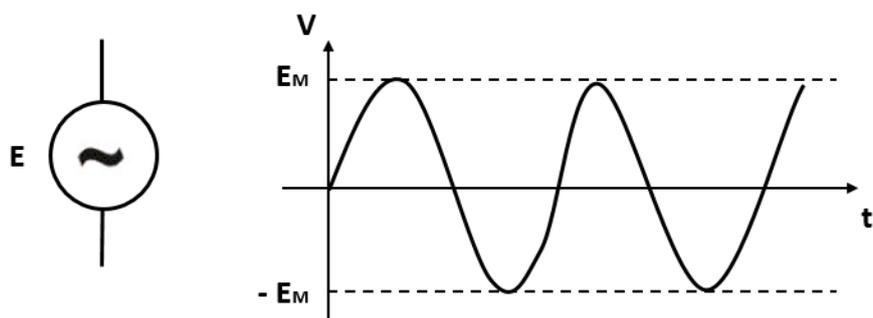


Figura 31 – Símbolo e gráfico da fonte de tensão alternada.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.2.8 RESISTÊNCIA ELÉTRICA OU 2ª LEI DE OHM

Apesar de um condutor apresentar características de facilitar a movimentação das cargas elétricas, ou seja, a passagem da corrente elétrica, existe uma certa restrição a essa movimentação, pois os átomos da corrente elétrica estão sempre se chocando com a estrutura atômica do condutor. A essa restrição de movimentação dá-se o nome de resistência elétrica.

Pode-se concluir então que, resistência elétrica é a oposição oferecida por um condutor a passagem da corrente elétrica.

Matematicamente, podemos escrever:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Onde:

R → resistência de um condutor em ohm (Ω)

ρ → resistividade do material (Ωm)

l → comprimento do condutor (m)

S → área da seção transversal do condutor (m^2)

Abaixo, mostra-se o símbolo da resistência elétrica.



Figura 32 – Símbolo da resistência elétrica.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

A tabela a seguir, mostra alguns valores de resistividade de materiais diversos.

Material	Cobre	Alumínio	Ferro	Chumbo	Prata
ρ (Ωm)	$17,7 \cdot 10^{-9}$	$28,3 \cdot 10^{-9}$	$98 \cdot 10^{-9}$	$208 \cdot 10^{-9}$	$16,4 \cdot 10^{-9}$

Tabela 2 – Valores de resistividade de materiais.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Exemplo: Determine a resistência de um condutor feito de prata que possui 15m de comprimento e apresenta 0,005m² de área de seção transversal.

R:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$R = 16,4 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{15}{0,005}$$

$$R = 16,4 \cdot 10^{-9} \cdot 3000$$

$$R = 49,2 \cdot 10^{-6} \Omega$$

2.2.9 TERRA (GND)

Em um circuito, deve-se estabelecer um ponto cujo potencial servirá de referência para as medidas das tensões. Em geral, é considerado o polo negativo da fonte de alimentação, considerado como ponto de potencial zero.

A essa referência dá-se o nome de terra ou GND (abreviação de ground, em inglês). Os símbolos usuais serão mostrados na figura a seguir.

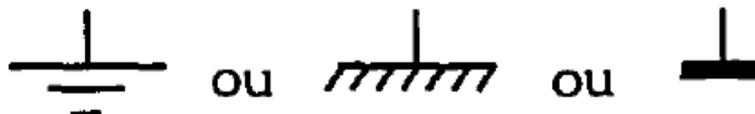


Figura 33 – Simbologia utilizada para representar o terra.
Fonte: Markus (2004, p. 18)

2.2.10 ELEMENTOS ATIVOS E PASSIVOS

Podem ser classificados os elementos de um circuito em dois tipos: os elementos ativos e os elementos passivos.

Os elementos ativos são aqueles que fornecem energia ao circuito. Podemos citar como exemplo as fontes de tensão.

Os elementos passivos são aqueles que recebem e utilizam essa energia de alguma forma, seja dissipando calor (resistores) ou armazenando

energia (indutores e capacitores), esses últimos, serão estudados mais à frente.

2.3 CIRCUITOS RESISTIVOS

2.3.1 RESISTORES

Como vimos no tópico anterior, alguns condutores apresentam valores de resistência elétrica, o ideal seria que os condutores apresentassem resistência nula.

Entretanto, às vezes, se faz necessário a presença da resistência elétrica em um circuito, tanto que alguns dispositivos são construídos especialmente para essa finalidade, como é o caso dos resistores.

Os resistores são dispositivos eletrônicos fabricados para oferecerem um valor de resistência predeterminado. Comercialmente possuem valores padronizados, sendo identificados através de um código de cores.

O resistor é feito de carbono e seu corpo é pintado com faixas de cores diversas, onde, cada cor posicionada em uma determinada sequência, identifica o valor do resistor, e também a margem de erro admitida por ele.



Figura 34 – Resistor real.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

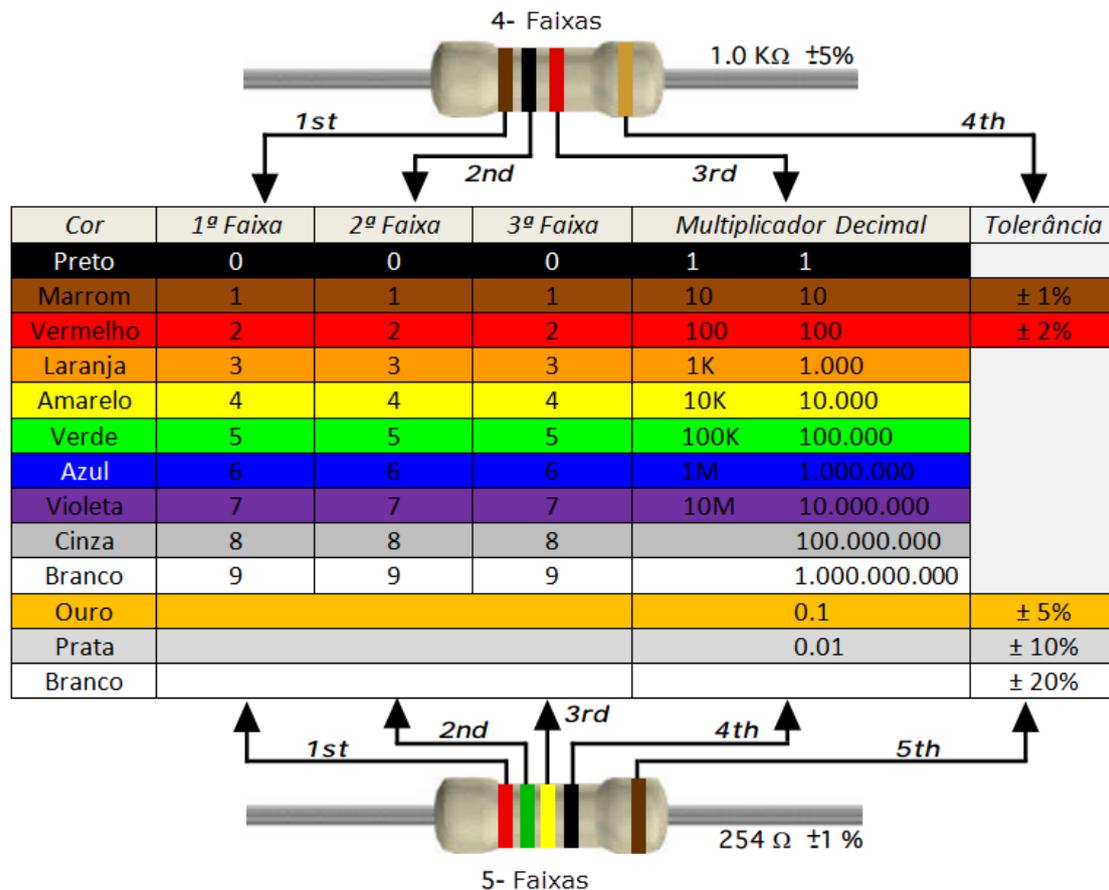


Figura 35 – Código de cores dos resistores.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.3.2 RESISTÊNCIAS VARIÁVEIS

Os reostatos, os potenciômetros e o trimpot são resistências variáveis através de um cursor.

Os reostatos são equipamentos robustos, destinados a circuitos de alta potência.

Já os potenciômetros e os trimpot são dispositivos destinados a circuitos de baixa potência. A diferença entre os dois é que o potenciômetro possui um cabo chamado “knob”, com um botão de ajuste, e no trimpot o ajuste deve ser feito utilizando uma chave de fenda.



Figura 36 – Símbolo da resistência variável
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)



Figura 37 – Imagem real de um potenciômetro.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)



Figura 38 – Imagem real de um trimpot.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.3.3 ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES

Pode-se obter diferentes valores de resistência elétrica interligando resistores entre si, com a finalidade de se obter algum valor de resistência que não esteja disponível no mercado. A associação de resistores pode ser feita de três maneiras diferentes: série, paralelo e mista.

Em qualquer uma das maneiras acima citadas, podemos determinar o valor da resistência equivalente das associações.

Resistência equivalente é o valor obtido no circuito, produzido pelo efeito de todas as resistências do circuito original juntas.

2.3.3.1 Associação em série

Uma associação em série de resistores consiste em ligar os resistores sucessivamente do terminal de um ao terminal de outro. A figura abaixo exemplifica essa ligação.

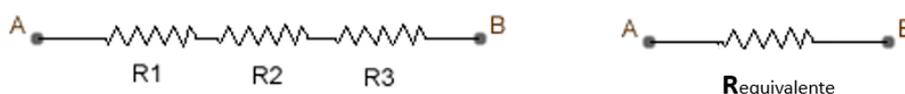


Figura 10 – Exemplo de ligação em série de resistores.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

A resistência equivalente dessa associação é dada pela soma de todas as resistências do circuito. Matematicamente se escreve:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Onde:

R_e → resistência equivalente da associação.

R_1, R_2, R_3, R_n → resistências originais do circuito.

Caso haja n resistores iguais em série, podemos escrever:

$$R_e = n \cdot R$$

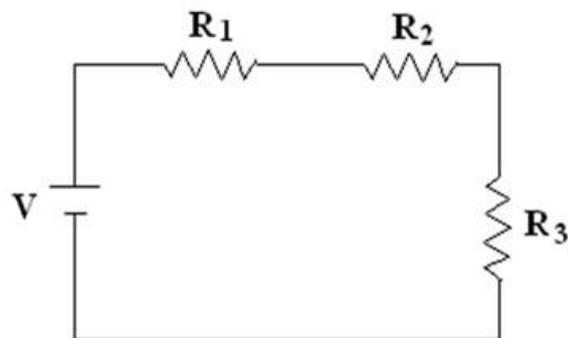
Onde:

$R_e \rightarrow$ resistência equivalente da associação.

$n \rightarrow$ quantidade de resistores iguais

$R \rightarrow$ valor do resistor.

Exemplo: Tomando como base o circuito abaixo e sabendo que $R_1 = 3\Omega$ e $R_2 = 7\Omega$ e $R_3 = 2\Omega$, encontre o valor da resistência equivalente do circuito.



R:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_e = 3 + 7 + 2$$

$$R_e = 12\Omega$$

2.3.3.2 Associação em paralelo

Na associação em paralelo de resistores, os terminais de um resistor são ligados diretamente aos terminais do outro resistor assim sucessivamente. A figura a seguir exemplifica essa ligação.

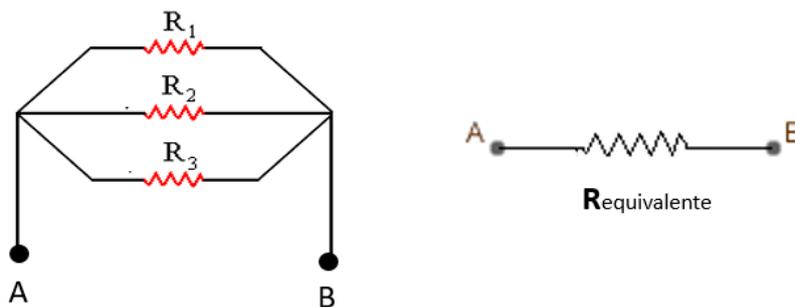


Figura 39 – Exemplo de ligação em paralelo de resistores

Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Matematicamente, a resistência equivalente dessa associação pode ser calculada:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Onde:

R_e → resistência equivalente da associação.

R_1, R_2, R_3, R_n → resistências originais do circuito.

Para circuitos com dois resistores em paralelo somente a fórmula pode ser simplificada para:

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

Onde:

R_e → resistência equivalente da associação.

R_1 e R_2 → resistências originais do circuito.

Quando a associação for composta de n resistores iguais, pode-se aplicar a seguinte fórmula matemática:

$$R_e = \frac{R}{n}$$

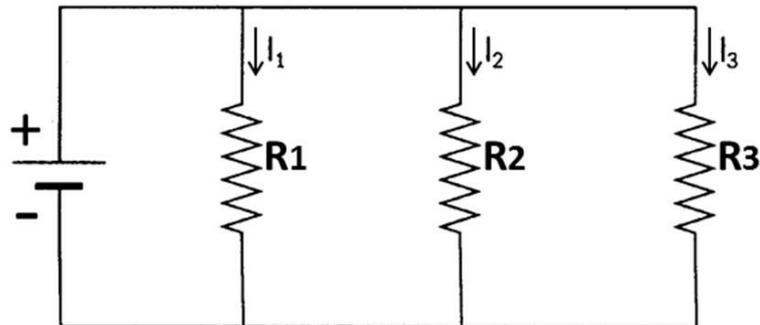
Onde:

$R_e \rightarrow$ resistência equivalente da associação.

$n \rightarrow$ quantidade de resistores iguais

$R \rightarrow$ valor do resistor.

Exemplo: Tomando como base o circuito abaixo, e adotando $R_1 = 5\Omega$ e $R_2 = 3\Omega$ e $R_3 = 4\Omega$. Ache o valor da resistência equivalente do circuito.



R:

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

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{5} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}$$

$$\frac{1}{R_e} = 0,2 + 0,33 + 0,25$$

$$\frac{1}{R_e} = 0,78$$

$$R_e = \frac{1}{0,78}$$

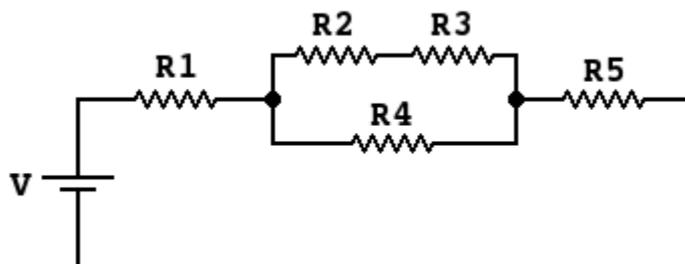
$$R_e = 1,28 \Omega$$

2.3.3.3 Associação mista de resistores

Na associação mista de resistores, os resistores são interligados de forma que em algumas partes do circuito a associação é série e em outras partes ela é paralela, fazendo então a junção das duas configurações, daí vem o nome associação mista. Logo, as fórmulas aplicadas na resolução do circuito misto, são as mesmas utilizadas nas associações série e paralela.

A resolução deverá ser feita, resolvendo as partes que estão em série e em paralelo, e em seguida redesenhando o circuito, identificando qual está em série e qual em paralelo. Saber identificar se dois ou mais resistores estão em série ou em paralelo no interior do circuito misto é de fundamental importância.

Exemplo: Considerando o circuito abaixo, e adotando $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $R_3 = 4\Omega$, $R_4 = 8\Omega$ e $R_5 = 3\Omega$. Ache o valor da resistência equivalente do circuito.



R:

Fazendo primeiro R_2 e R_3 em série, temos:

$$R_{s1} = 3 + 4 = 7\Omega$$

Por seguinte, resolvemos a associação em paralelo resultante de R_{s1} com R_4 :

$$R_p = \frac{R_{s1} \times R_4}{R_{s1} + R_4}$$

$$R_p = \frac{7 \times 8}{7 + 8}$$

$$R_p = \frac{56}{15}$$

$$R_e = 3,73\Omega$$

Por último, resolvemos a associação em série resultante:

$$R_e = R_1 + R_p + R_5$$

$$R_e = 5 + 3,73 + 3$$

$$R_e = 11,73\Omega \text{ (Resultado final)}$$

2.4 CIRCUITO ELÉTRICO

Podemos definir um circuito elétrico como um caminho fechado por onde a corrente elétrica percorre. Para ser caracterizado como um circuito elétrico é necessário que contenha alguns requisitos mínimos, sendo eles:

- Uma fonte de alimentação (elemento ativo);
- Uma carga (elemento passivo), que pode ser uma resistência, uma lâmpada, um indutor ou qualquer outro dispositivo que absorva energia;
- Condutores que possam interligar os componentes (ativos e passivos) do circuito e que permitam a passagem da corrente elétrica;
- Dispositivo de controle para interromper o circuito, podendo ser, por exemplo, um interruptor. Através do dispositivo de controle, o circuito poderá ser fechado ou aberto.

Abaixo segue uma figura exemplificando um circuito elétrico.

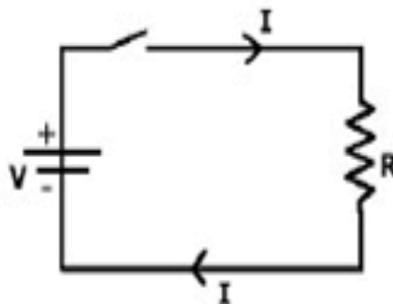


Figura 40 – Exemplo de um circuito elétrico.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.4.1 1ª LEI DE OHM

A 1ª lei de ohm foi elaborada por um cientista alemão chamado George Simon Ohm, que descobriu a relação que envolve a corrente, a tensão e a resistência elétrica em um circuito elétrico.

A lei diz que, a intensidade da corrente elétrica (I), depende diretamente da tensão aplicada no circuito (E ou V) e inversamente ao valor da resistência aplicada (R).

Matematicamente podemos escrever:

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

Onde:

I → Intensidade da corrente elétrica (A).

E → Fonte de alimentação aplicada ao circuito, ou simplesmente tensão elétrica (V).

R → Resistência elétrica (Ω).

Exemplo: Determine a intensidade de corrente em um circuito onde a tensão aplicada é 200V e possui uma resistência de valor 800 Ω .

R:

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

$$I = \frac{200}{800}$$

$$I = 0,25A$$

Exemplo: Determine a resistência de um circuito sabendo que a tensão aplicada é de 150V e que a corrente que percorre o circuito vale 2A.

R:

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

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

$$R = \frac{150}{2}$$

$$R = 75\Omega$$

2.4.2 CONDUTÂNCIA

Condutância é uma característica dada aos materiais, onde apresentam um comportamento inverso da resistência elétrica, ou seja, expressa a facilidade que um condutor tem de permitir a passagem da corrente elétrica.

Matematicamente podemos escrever:

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

Onde:

G → Condutância elétrica (Ω^{-1}) ou (Siemens – S)

R → Resistência elétrica (Ω)

Exemplo: Ache o valor da condutância de um circuito sabendo que sua resistência é igual a 50Ω .

R:

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

$$G = \frac{1}{50}$$

$$G = 0,02S$$

2.4.3 TIPOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

2.4.3.1 Circuitos elétricos em série

O circuito elétrico em série é identificado por apresentar uma fonte de tensão alimentando uma associação em série de resistores.

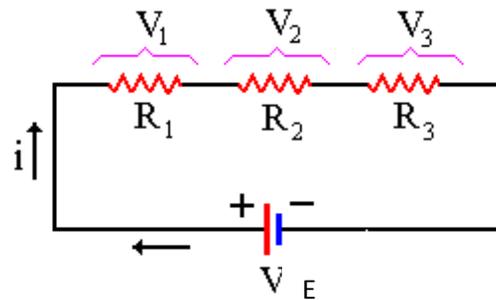


Figura 41 – Configuração de um circuito elétrico em série.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Sua principal característica é de apresentar um único caminho para a passagem da corrente elétrica. Podemos dizer então, que o valor da corrente elétrica é o mesmo em todos os resistores, podendo ser obtida pela lei de ohm, considerando a resistência equivalente.

Matematicamente podemos escrever:

$$I = \frac{E}{R_e}$$

Onde:

$I \rightarrow$ Intensidade da corrente elétrica (A).

$E \rightarrow$ Tensão elétrica (V).

$R_e \rightarrow$ Resistência equivalente do circuito (Ω).

A tensão elétrica aplicada no circuito se divide em todos os resistores, sendo proporcional ao valor da resistência. Matematicamente, podemos encontrá-la utilizando a lei de ohm:

$$V_1 = I \cdot R_1 \qquad V_2 = I \cdot R_2 \qquad V_3 = I \cdot R_3$$

Onde:

$V_1, V_2, V_3 \rightarrow$ Tensão em cima de cada resistor (V).

$I \rightarrow$ Intensidade da corrente elétrica (A).

$R_1, R_2, R_3 \rightarrow$ Resistências dos circuitos (Ω).

Exemplo: Ache o valor da corrente que percorre um circuito em série sabendo que os valores das resistências valem $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 4\Omega$ e $R_3 = 6\Omega$ e que a tensão aplicada a esse circuito é de 200V.

R:

$$R_e = 2 + 4 + 6 = 12\Omega$$

$$I = \frac{E}{R_e}$$

$$I = \frac{200}{12}$$

$$I = 16,66^a$$

2.4.3.2 Circuitos elétricos em paralelo

O circuito elétrico em paralelo é identificado por apresentar uma fonte de tensão alimentando um circuito em paralelo de resistores.

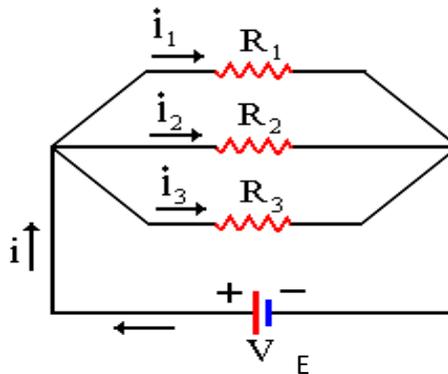


Figura 42 – Configuração de um circuito elétrico em paralelo
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Sua principal característica é de apresentar o valor da tensão em cima dos resistores (queda de tensão) igual ao valor da fonte de alimentação, visto que, se observarmos, cada resistor está diretamente ligado à fonte.

Matematicamente podemos escrever:

$$E = V_1 = V_2 = V_3$$

Onde:

$E \rightarrow$ Fonte de tensão (V).

$V_1, V_2, V_3 \rightarrow$ Queda de tensão em cima de cada resistor (V).

A corrente que passa por cada resistor é obtida utilizando a 1ª lei de ohm.

$$I_1 = \frac{E}{R_1} \quad I_2 = \frac{E}{R_2} \quad I_3 = \frac{E}{R_3} \quad I_T = \frac{E}{R_e}$$

Onde:

$E \rightarrow$ Fonte de tensão (V).

$I_1, I_2, I_3 \rightarrow$ Corrente que passa por cima de cada resistor (A).

$I_T \rightarrow$ Corrente total do circuito (A).

$R_e \rightarrow$ Resistência equivalente do circuito (Ω).

Outra forma de se calcular a corrente total do circuito é mostrada a seguir:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

Onde:

$I_1, I_2, I_3 \rightarrow$ Corrente que passa por cima de cada resistor (A).

$I_T \rightarrow$ Corrente total do circuito (A).

Exemplo: Determine as intensidades de corrente em cada resistor, e a total, de um circuito em paralelo, sabendo que o valor da tensão aplicada é de 200V e que as resistências valem $R_1 = 5\Omega$ e $R_2 = 10\Omega$.

R:

Em circuitos paralelos, a tensão de alimentação é a mesma que chega em cada resistor, então podemos escrever:

$$E = V_1 = V_2 = 200V$$

$$I_1 = \frac{E}{R_1}$$

$$I_1 = \frac{200}{5}$$

$$I_1 = 40A$$

$$I_2 = \frac{E}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{200}{10}$$

$$I_2 = 20A$$

$$I_T = I_1 + I_2$$

$$I_T = 40 + 20$$

$$I_T = 60^a$$

2.4.3.3 Circuitos elétricos mistos

Nos circuitos elétricos mistos são encontradas as duas características dos circuitos abordados nos itens anteriores, então cabe ao analisador identificar as partes dos circuitos correspondentes e aplicar as mesmas fórmulas mostradas, para, assim, encontrar os valores do circuito.

2.5 LEIS DE KIRCHHOFF

As Leis de Kirchhoff são empregadas em circuitos elétricos mais complexos, como, por exemplo, circuitos com mais de uma fonte de alimentação e contendo associação mista de resistores.

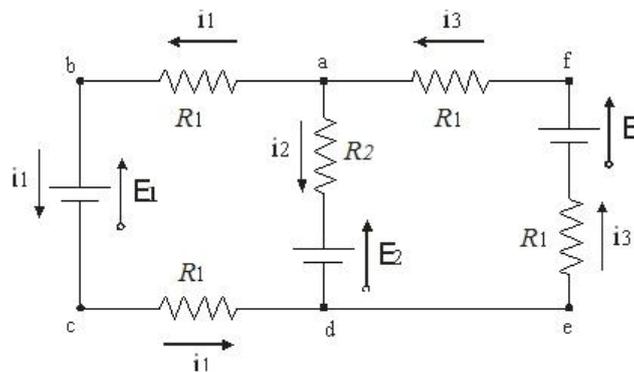


Figura 43 – Exemplo de um circuito elétrico misto com mais de uma fonte.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Antes de conhecermos as Leis de Kirchhoff, é necessário que façamos algumas definições.

- Nó: É a junção de três ou mais ramos.
- Ramo: É um trecho compreendido entre dois nós consecutivos.
- Malha: É qualquer caminho fechado do circuito, saindo e retornando ao mesmo ponto.

2.5.1 1ª Lei de Kirchhoff ou lei dos nós

A 1ª Lei de Kirchhoff diz que, em qualquer nó de circuito elétrico, o somatório das correntes que chegam ao nó é igual ao somatório das correntes que saem do nó.

Matematicamente podemos escrever:

$$\sum I_{\text{chegam}} = \sum I_{\text{saem}}$$

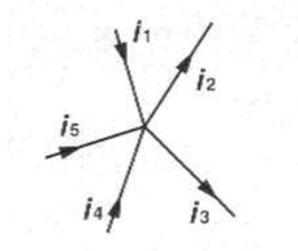


Figura 17 – Aplicação da 1ª lei de Kirchhoff
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Exemplo: Utilizando a figura acima, calcule o valor da corrente I_5 , sabendo que $I_1 = 2A$, $I_2 = 5A$, $I_3 = 1A$ e $I_4 = 3A$.

R:

Utilizando a 1ª lei de Kirchhoff que diz, que a soma das correntes que entram no nó é igual a soma das correntes que saem do nó, observamos que as correntes que entram no nó são, I_1 , I_4 e I_5 , já as correntes que saem do nó são I_2 e I_3 . Podemos escrever então:

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

$$2 + 3 + I_5 = 5 + 1$$

$$5 + I_5 = 6$$

$$I_5 = 6 - 5$$

$$I_5 = 1A$$

2.5.2 2ª Lei de Kirchhoff ou lei das tensões

Em uma malha qualquer presente em um circuito elétrico, o somatório das forças eletromotrizes (Fontes de tensão) é igual ao somatório das quedas de tensão presentes nos resistores pertencentes a malha analisada.

Matematicamente podemos escrever:

$$\sum \text{fem} = \sum V \quad \text{ou} \quad \sum E = \sum R \cdot I$$

Onde:

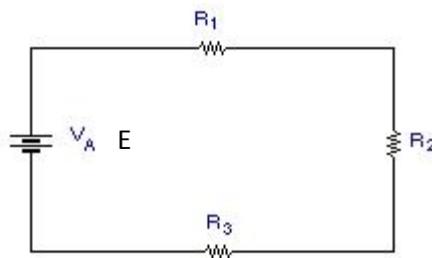
$E \rightarrow$ Força eletromotriz ou fonte de tensão (V).

$V \rightarrow$ Queda de tensão (V).

$R \rightarrow$ Resistência elétrica (Ω).

$I \rightarrow$ Corrente elétrica (A).

Exemplo: Considerando o circuito abaixo, calcule o valor da queda de tensão em cima de R_3 . Dados: $R_1 = 50\Omega$, $R_2 = 100\Omega$ e $R_3 = 150\Omega$ e $E = 250V$.



R:

Pela 2ª lei de Kirchhoff, que diz que a somatória das fontes de uma malha é igual à somatória das quedas de tensão da mesma, podemos escrever:

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

$$250 = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I$$

$$250 = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I$$

$$250 = (50 + 100 + 150) \cdot I$$

$$250 = 300 \cdot I$$

$$I = 250/300$$

$$I = 0,83^a$$

Como a corrente encontrada é a corrente que passa em cima de todos os resistores, podemos utilizar essa corrente para encontrar a queda de tensão em cima do R_3 .

$$V_3 = R_3 \cdot I$$

$$V_3 = 150 \cdot 0,83$$

$$V_3 = 124,5V$$

2.6 PONTE DE WHEATSTONE

A ponte de Wheatstone é um circuito elétrico montado que é capaz de descobrir com precisão o valor de uma resistência elétrica desconhecida de um dos quatro resistores que o compõe.

A ponte consiste em dois ramos de circuito contendo dois resistores cada um e interligados por um galvanômetro. Todo conjunto deve ser ligado a uma fonte de tensão elétrica.

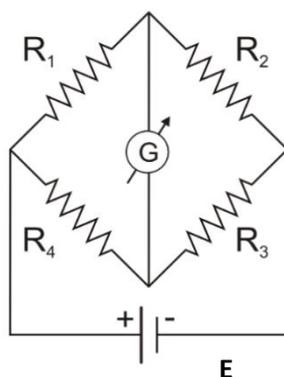


Figura 44 - Ponte de Wheatstone
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Em uma ponte de Wheatstone em equilíbrio, os produtos das resistências opostas são iguais.

Matematicamente podemos escrever:

$$R_x \cdot R_3 = R_1 \cdot R_2$$

Onde:

$R_x \rightarrow$ Resistência que se quer achar (Ω).

$R_1, R_2, R_3 \rightarrow$ Outras resistências que compõe a ponte.

2.7 DIVISOR DE TENSÃO

Vimos nos itens anteriores, que na associação em série de circuitos a tensão fornecida pela fonte se divide entre os resistores, formando um divisor de tensão.

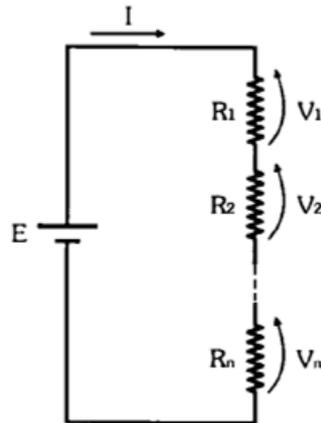


Figura 45 – Exemplo de circuito em série.
Fonte: Markus (2004)

Podemos então, calcular matematicamente a queda de tensão em cima de cada resistor utilizando a fórmula do divisor de tensão deduzida a seguir.

A tensão V_i no resistor R_i é dada por:

$$V_i = R_i \cdot I \quad (I)$$

A corrente I que passa nos resistores em série é obtida por:

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

Substituindo a equação (II) em (I), obtemos a equação do divisor de tensão:

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

Onde:

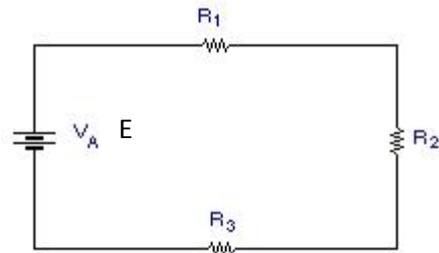
$V_i \rightarrow$ Queda de tensão no resistor escolhido (V).

$R_i \rightarrow$ Valor do resistor escolhido (Ω)

$R_{eq} \rightarrow$ Resistência equivalente série (Ω).

$E \rightarrow$ Fonte de tensão (V).

Exemplo: Utilizando o mesmo circuito e os mesmos dados do exemplo da 2ª Lei de Kirchhoff, vamos encontrar o valor da queda de tensão em cima de R_3 utilizando a fórmula do divisor de tensão. Dados: $R_1 = 50\Omega$, $R_2 = 100\Omega$ e $R_3 = 150\Omega$ e $E = 250V$



$$V_3 = \frac{R_3}{R_{eq}} \cdot E$$

$$V_3 = \frac{150}{(50+100+150)} \cdot 250$$

$$V_3 = \frac{150}{300} \cdot 250$$

$$V_3 = 0,5 \cdot 250$$

$$V_3 = 125V$$

Se compararmos os dois resultados, observamos que obtivemos valores aproximados, com diferença de 0,5V.

2.8 DIVISOR DE CORRENTE

Nos itens anteriores, observamos que nos circuitos elétricos em paralelo a corrente fornecida pela fonte se dividia pelos ramos do circuito, formando um divisor de corrente.

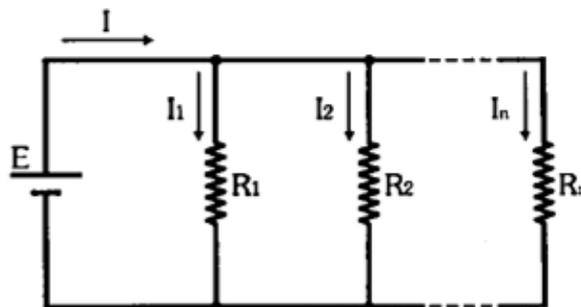


Figura 46 – Exemplo de um circuito em paralelo.
Fonte: Markus (2004)

Podemos então, calcular matematicamente a corrente que passa em cima de cada resistor, utilizando a fórmula do divisor de corrente deduzida a seguir.

A corrente I_i que passa no resistor R_i , é dada por:

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

A tensão aplicada na associação é obtida por:

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

Substituindo a equação (II) em (I), obtemos a equação do divisor de corrente:

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

Onde:

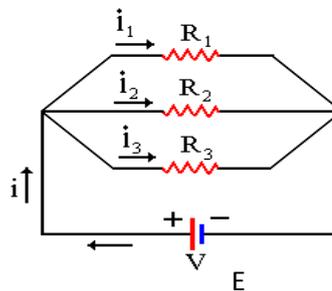
I_i → Corrente que passa em cima do resistor escolhido (A).

R_i → Valor do resistor escolhido (Ω)

R_{eq} → Resistência equivalente série (Ω).

E → Fonte de tensão (V).

Exemplo: Considerando o circuito abaixo, acho o valor de I_2 . Dados: $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 20\Omega$ e $R_3 = 20\Omega$ e $E = 40V$



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

$$R_{eq} = \frac{20}{3}$$

$$R_{eq} = 6,66\Omega$$

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

$$I = \frac{40}{6,66}$$

$$I = 6A$$

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

$$I_i = \frac{6,66}{20} \cdot 6$$

$$I_i = 0,33 \cdot 6$$

$$I_i = 1,98A$$

2.9 POTÊNCIA E TRABALHO ELÉTRICO

2.10 POTÊNCIA ELÉTRICA

A maioria dos equipamentos utilizados necessita de uma potência para funcionar. Nos circuitos elétricos de corrente contínua a potência elétrica é dada por:

$$P = E \cdot I$$

Ou

$$P = V \cdot I$$

Utilizando a lei de Ohm e substituindo na equação acima, temos:

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

Ou

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

Onde:

P → Potência elétrica em watts (W).

E → Força eletromotriz (V).

V → Queda de tensão (V).

I → Corrente elétrica (A).

R → Resistência elétrica (Ω).

Outras unidades de potência são utilizadas na prática, especialmente na especificação de outras máquinas mais robustas. São elas:

- CV (Cavalo-vapor) → 736W
- HP (Horse-power) → 746W

O CV e o HP são utilizados usualmente em circuitos alternados, que serão estudados mais à frente.

Exemplo: Calcule a intensidade de corrente que uma lâmpada incandescente que possui as seguintes características 60W/127V.

R:

$$P = V \cdot I$$

$$60 = 127 \cdot I$$

$$I = \frac{60}{127}$$

$$I = 0,47^a$$

2.10.1 Rendimento

O rendimento, também conhecido como a eficiência de um equipamento, é a razão entre a potência fornecida e a potência absorvida. Matematicamente podemos escrever:

$$\eta = \frac{P_{\text{forn}}}{P_{\text{abs}}}$$

Onde:

η → Rendimento ou eficiência.

P_{forn} → Potência fornecida (W).

P_{abs} → Potência absorvida (W).

2.11 TRABALHO ELÉTRICO

Trabalho elétrico, também conhecido como energia elétrica, é o produto da potência elétrica pelo tempo. Matematicamente podemos escrever:

$$\tau = P \cdot \Delta t$$

Onde:

τ → Trabalho elétrico ou energia elétrica em joules (J).

P → Potência elétrica (W).

Δt → Intervalo de tempo (s)

Exemplo: Calcule o trabalho elétrico realizado por uma estufa que possui um valor de resistência de 50Ω , e permanece ligado a uma fonte de 220V durante 3600s.

R:

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

$$I = \frac{220}{50} = 4,4A$$

$$P = E \cdot I$$

$$P = 220 \cdot 4,4$$

$$P = 968W$$

$$\tau = P \cdot \Delta t$$

$$\tau = 968 \cdot 3600 = 3484800J = 3484KJ$$

2.12 MÉTODOS DE ANÁLISES DE CIRCUITOS

Para se obter a solução de circuitos simples, contendo apenas uma fonte de alimentação ou fontes ligadas em série, podemos aplicar a lei de Ohm, as Leis de Kirchhoff ou os divisores de tensão e corrente, mostrados nos itens anteriores.

Quando um circuito elétrico apresenta mais de uma fonte de alimentação e contém vários outros elementos conectados de diferentes formas, não se pode resolvê-lo simplesmente aplicando a lei de Ohm e as Leis de Kirchhoff, se faz necessário estabelecer uma rotina de cálculos e aplicar uma sistematização dessas leis para que se possa chegar a uma solução.

Por haver essa necessidade, foram criados vários métodos matemáticos para resolução de circuitos, cada um apresentando suas características, vantagens e desvantagens um em relação ao outro, mostrados a seguir.

2.12.1 MÉTODO DE CORRENTE DE MALHA

Esse método é capaz de prever o número de equações necessárias para a solução do circuito e permite que se percorra a malha em qualquer sentido, desde que sejam observados os sinais das correntes em questão.

Podemos, então adotar alguns passos para se aplicar método de corrente de malhas, visto que os circuitos diferem entre si, podendo haver

quantas fontes de alimentação e quantos resistores forem possíveis. Os passos seguem abaixo:

1º) Determinar o número de equações (N) necessárias para resolver o circuito:

$$N = n^{\circ} \text{ de ramos} - n^{\circ} \text{ de nós} + 1$$

2º) Escolher N malhas adotando correntes com sentido arbitrários para cada uma delas e identificando cada corrente de malha com a letra I e um subíndice adequado. Ex: I_a , I_2 , I_x .

3º) Percorrer cada malha, no sentido da corrente daquela malha, aplicando a 2ª Lei de Kirchhoff.

$$\sum E = \sum V$$

4ª) Colocar em evidência as incógnitas (as correntes das malhas), formando um sistema de N equações com N incógnitas.

5º) Resolver o sistema de equações utilizando o método matemático de sua escolha.

6º) Determinar seus valores solicitados.

2.12.2 MÉTODO DAS TENSÕES NODAIS

O método das tensões nodais é outra opção para se resolver circuitos mais complexos.

Apresentam uma vantagem em relação ao anterior de reduzir em uma equação o sistema de equações, não sendo uma regra, pois em algumas situações essa vantagem pode não surgir.

A desvantagem desse método é que ele utiliza a condutância, inverso da resistência, necessitando que se utilizem várias casas decimais nos valores podendo, assim, perder a precisão dos cálculos.

Pode-se então, resumir o método das tensões nodais nos seguintes passos:

1º) Escolher um nó de referência, sendo este, o que possuir maior número de ramos ligados a ele, referenciando à terra.

2º) Identificar todos os nós com letras e números, menos o escolhido como referência, sinalizando as correntes que saem de cada nó.

3º) Aplicar a 1ª lei de Kirchhoff e a lei de Ohm a cada um dos nós, menos o escolhido como referência.

4º) Organizar e resolver o sistema de equações, encontrando as tensões de cada nó (tensões nodais).

5º) Calcular as grandezas solicitadas, com base na tensões nodais.

6º) Encontrar V_a e V_b .

7º) Encontrar as correntes desejadas utilizando a lei de Ohm.

2.13 TEOREMA DE THÉVENIN

O teorema de thévenin estabelece que circuito elétrico ativo pode ser substituído por uma única fonte de tensão em série com uma única resistência elétrica.

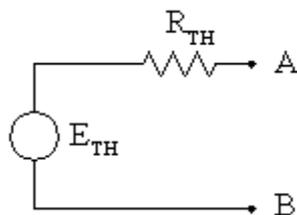


Figura 47 – Circuito equivalente thévenin.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Podemos resumir o desenvolvimento do teorema thévenin nos seguintes passos:

1º) Se quisermos conhecer o valor de alguma grandeza do circuito, este deve ser removido temporariamente e os pontos de onde ele foi desconectado, devem ser identificados por letras ou números.

2º) Caso se deseja apenas conhecer o equivalente thévenin, nenhum ponto será removido.

3º) Calcula-se a resistência thévenin do circuito, curto circuitando todas as fontes de tensão (eliminando do circuito), ou simplesmente substituindo pelos suas respectivas resistências internas.

4º) Determinar a tensão de thévenin, como sendo a tensão existente entre os pontos de interesse, observando sua polaridade correta.

5º) Obter o circuito equivalente de thévenin, associando em série a resistência thévenin e a tensão thévenin encontradas, retornando o elemento retirado e encontrando a grandeza solicitada.

2.14 TEOREMA DE NORTON

Ele se assemelha ao teorema de thévenin e tem a mesma aplicabilidade, a diferença entre eles é que o circuito equivalente consta de uma fonte de corrente em paralelo com uma resistência.

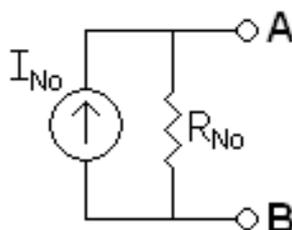


Figura 48 – Circuito equivalente norton.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

O teorema de norton pode ser resumido nos seguintes passos:

1º) Se quisermos conhecer o valor de alguma grandeza do circuito, este deve ser removido temporariamente e os pontos de onde ele foi desconectado devem ser identificados por letras ou números.

2º) Caso deseja apenas conhecer o circuito equivalente norton, nenhum ponto será removido.

3º) Calcula-se a resistência norton do circuito, curto circuitando todas as fontes de tensão (eliminando do circuito), ou simplesmente substituindo pelos suas respectivas resistências internas e abrindo as fontes de corrente.

4º) Determina-se a corrente norton como sendo a corrente que passa pelo curto circuito estabelecido entre os pontos de interesse, observando seu sentido.

5º) Obt m-se o circuito equivalente norton associando a resistência norton em paralelo com a corrente norton, retornando com o elemento retirado e calculando-se a grandeza solicitada.

2.14.1 EQUIVALÊNCIA ENTRE OS TEOREMAS DE NORTON E THÉVENIN

Um circuito equivalente thévenin pode ser convertido e um circuito equivalente norton e vice-versa, mediante a aplicação da lei de ohm.

Para converter de thévenin pra norton, devemos proceder como segue:

$$R_N = R_{th}$$

$$I_N = \frac{E_{th}}{R_{th}}$$

Para converter de norton para thévenin, devemos proceder da seguinte forma:

$$R_{th} = R_N$$

$$E_{th} = R_N \cdot I_N$$

Onde:

$R_N \rightarrow$ Resistência norton (Ω).

$R_{th} \rightarrow$ Resistência thévenin (Ω).

$I_N \rightarrow$ Corrente norton (A).

$E_{th} \rightarrow$ Tensão thévenin (V).

2.14.2 TEOREMA DA SUPERPOSIÇÃO

O teorema da superposição estabelece que em um circuito elétrico ativo contendo várias fontes de alimentação a de tensão ou a corrente em qualquer elemento pode ser dada pela soma algébrica das contribuições de cada fonte atuando sozinha.

Podemos resumir a aplicação do teorema da superposição como segue abaixo:

1º) Calcular a contribuição da primeira fonte para a grandeza desejada no elemento de interesse. Para isso, o circuito deverá ser redesenhado, substituindo todas as fontes por um curto circuito, exceto aquela cuja contribuição estiver sendo calculada.

2º) Repetir o procedimento para as demais fontes, sempre identificando a corrente ou tensão no elemento escolhido, relacionando com o índice da fonte.

3º) Obter a resultado de todas as contribuições no elemento escolhido, atentando para o sentido das correntes ou a polaridade das tensões.

2.15 CAPACITORES E INDUTORES

2.15.1 CAPACITORES

Capacitores são dispositivos capazes de armazenar cargas elétricas. É composto basicamente por duas placas paralelas separadas por um isolante (dielétrico).



Figura 49 – Tipos de capacitores reais.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

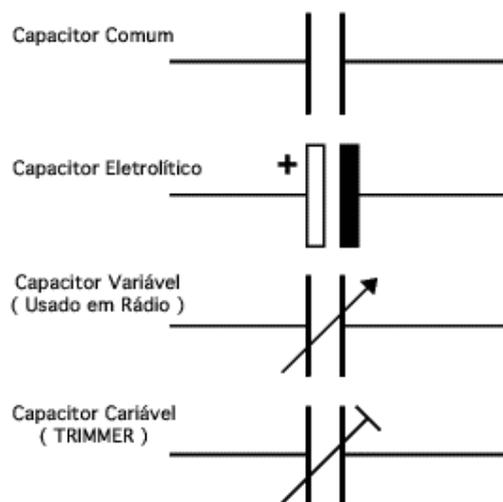


Figura 50 – Símbolos dos capacitores.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993).

O capacitor é representado por uma grandeza chamada capacitância. A capacitância expressa a capacidade do capacitor de armazenar cargas elétricas.

Podemos representá-lo pela letra C e sua unidade de medida é o Farad (F). Matematicamente podemos a capacitância utilizando a fórmula abaixo:

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

Onde:

C → Capacitância (F)

q → carga elétrica (C)

V → Tensão elétrica (V)

2.15.1.1 Associação de capacitores

Em um circuito, os capacitores podem ser ligados em série e/ou paralelo em função da necessidade de dividir a tensão e/ou corrente ou de se obter uma capacitância diferente dos valores comerciais.

Na associação em série, coloca-se os capacitores um em seguida do outro, como representado na figura abaixo.

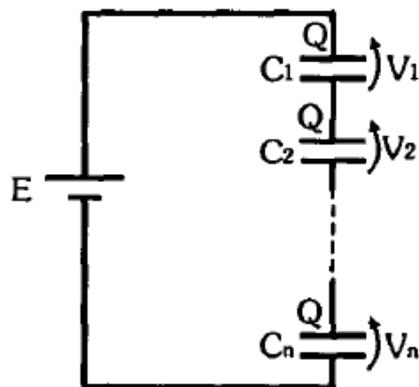


Figura 51 – Circuito capacitivo em série.
Fonte: Markus (2004).

Matematicamente podemos calcular a capacitância equivalente de um circuito capacitivo em série utilizando a fórmula geral.

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

Caso tenha somente dois capacitores, pode-se usar a fórmula expressa abaixo.

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

Em caso de haver n capacitores iguais, utiliza-se a fórmula a seguir.

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

Onde:

C_{eq} → Capacitância equivalente (F).

C_1, C_2, C_n → Capacitâncias do circuito (F).

n → número de capacitores iguais no circuito.

Na associação em paralelo, os capacitores são ligados nos terminais um do outro e assim sucessivamente. A figura abaixo exemplifica esse tipo de ligação.

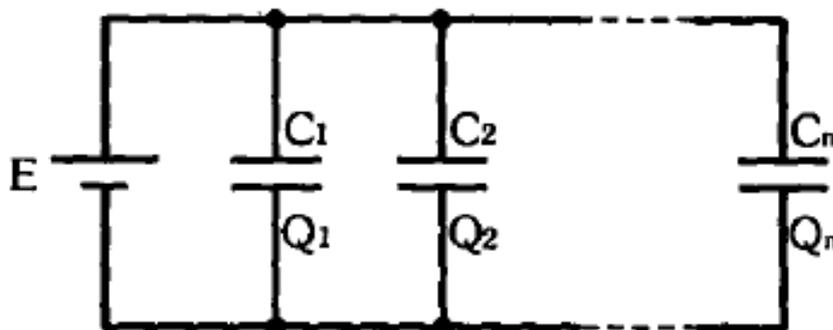


Figura 52 – Circuito capacitivo em paralelo.
Fonte: Markus (2004).

Matematicamente podemos calcular a capacitância equivalente de um circuito capacitivo em paralelo utilizando a fórmula especificada abaixo.

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

Caso o circuito contenha n capacitores iguais, podemos utilizar a fórmula abaixo.

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

Onde:

C_{eq} → Capacitância equivalente (F)

C_1, C_2, C_n → Capacitância dos circuitos (F)

n → Número de capacitores iguais no circuito.

2.15.2 INDUTORES

Os indutores, também conhecidos como bobinas ou solenoides, são compostos por um fio isolado esmaltado, enrolado sobre uma base. O enrolamento é constituído por espiras.

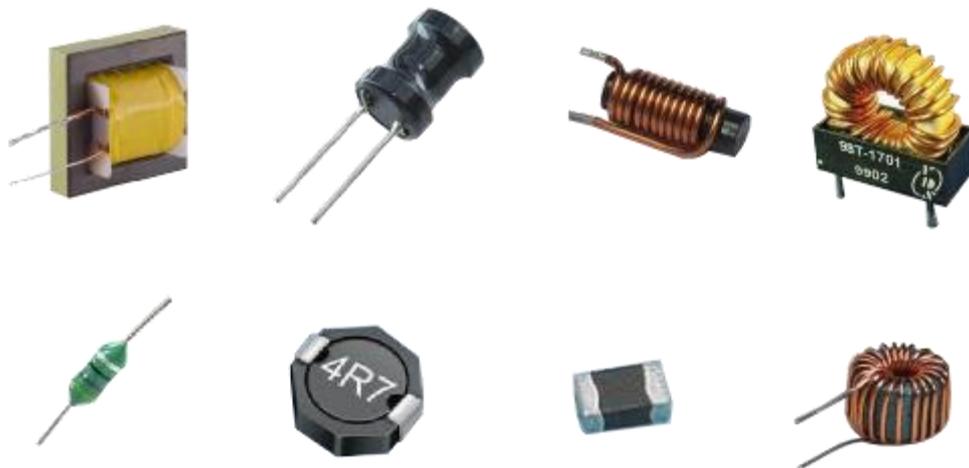


Figura 53 – Modelos de indutores reais.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

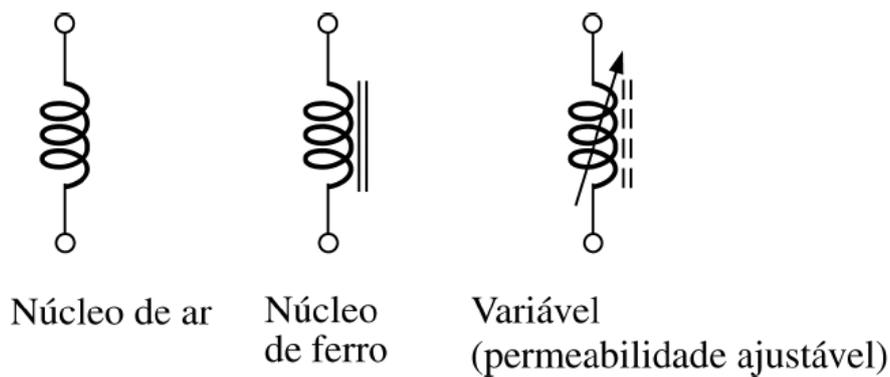


Figura 54 – Símbolos dos indutores.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

O indutor é caracterizado por uma grandeza chamada indutância. Esta é uma propriedade relacionada a capacidade de produzir fluxo magnético.

Representamos a indutância utilizando a letra L e sua unidade de medida é o henry (H). Matematicamente podemos calcular a indutância utilizando a fórmula.

$$L = \frac{\varphi}{I}$$

Onde:

L → Indutância (H)

φ → Fluxo magnético (Wb)

$I \rightarrow$ Corrente que passa pelo indutor (A).

2.15.2.1 Associação de indutores

Na associação em série, os indutores estão ligados de forma que a corrente i seja a mesma em todos eles.

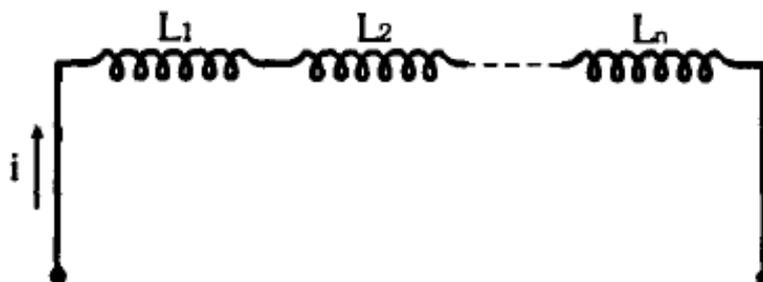


Figura 55 – Circuito indutivo em série.
Fonte: Markus (2004)

A indutância equivalente é dada por:

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

Para n indutores iguais, a indutância é calculada por:

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

Onde:

$L_{eq} \rightarrow$ Indutância equivalente (H)

$L_1, L_2, L_n \rightarrow$ Indutâncias do circuito (H)

$n \rightarrow$ Número de indutâncias iguais no circuito.

Na associação em paralela, os indutores são ligados nos terminais um do outro e assim sucessivamente.

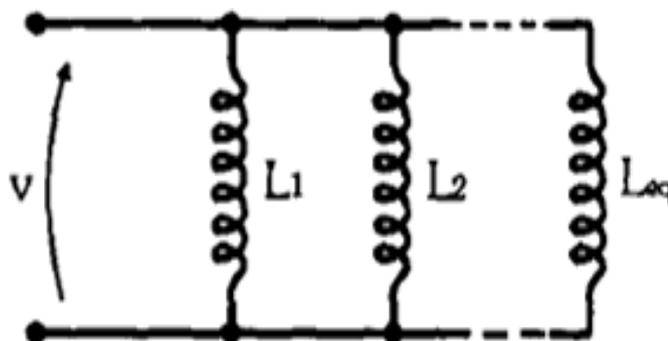


Figura 56 – Circuito indutivo paralelo.
Fonte: Markus (2004)

A indutância equivalente é dada por:

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

Para n indutores iguais:

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

Para dois indutores:

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

Onde:

L_{eq} → Indutância equivalente (H)

L_1, L_2, L_n → Indutâncias do circuito (H)

n → Número de indutâncias iguais no circuito.

2.16 CIRCUITOS EM CORRENTE ALTERNADA

A geração e o consumo de energia elétrica no mundo inteiro são produzidos, em sua maioria, em corrente alternada. Mesmo para circuitos que funcionam em corrente contínua é mais vantagem transformar de alternada para contínua do que produzir energia em corrente contínua. A facilidade da geração em corrente alternada transformou este tipo de geração como a mais utilizada pelos consumidores.

A principal característica dos circuitos em corrente alternada, diferentemente da corrente contínua que mantém sua intensidade constante e no mesmo sentido, é de mudar periodicamente de sentido podendo também mudar de intensidade.

A maioria da energia elétrica consumida é sob a forma de onda senoidal, que resulta da aplicação da função seno, cujo gráfico é uma senoide, como mostrado abaixo.

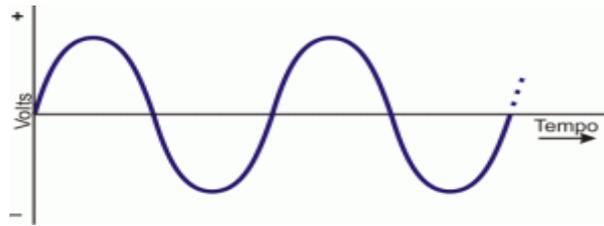


Figura 57 – Forma de onda senoidal.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.16.1 CICLO, FREQUÊNCIA E PERÍODO

Ciclo é o caminho completo da forma de onda saindo do valor zero, passando pelo máximo valor positivo, voltando para o valor zero, passando pelo máximo valor negativo e retornando ao valor zero. A metade desse caminho é chamado de semiciclo.

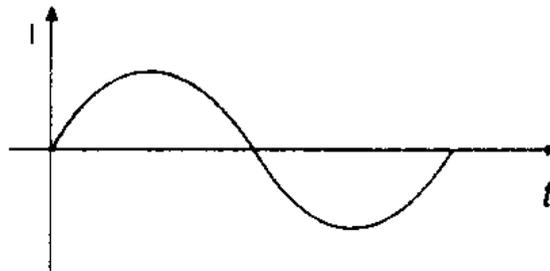


Figura 58 – Representação de um ciclo completo.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Período é o tempo necessário para a realização de um ciclo completo. É representado pela letra T e a sua unidade é em segundos (s).

A frequência é o número da quantidade de vezes que o ciclo ocorreu em uma unidade de tempo, na maioria das vezes, adotado em segundos. É representado pela letra f e a sua unidade é em hertz (Hz).

Matematicamente, é possível obter uma relação entre o período e a frequência. Se f ciclos ocorrem em 1 segundo, 1 ciclo ocorrerá em T segundos. Logo:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ou} \quad f = \frac{1}{T}$$

Onde:

T → É o período (s).

f → É a frequência (Hz).

2.16.2 CONCEITOS DIVERSOS EM CORRENTE ALTERNADA

2.16.2.1 Tensão de pico e corrente de pico

O maior valor atingido em uma senoide, tanto no semiciclo positivo quanto no semiciclo negativo é conhecido como valor de pico. Ou seja, se a senoide for de uma tensão, então será chamado de tensão de pico (E_p), já se a senoide for de uma corrente, então será chamada de corrente de pico (I_p).

2.16.2.2 Valor de pico a pico

O valor compreendido entre o valor máximo positivo e o valor máximo negativo é conhecido como valor de pico a pico. Correspondendo ao dobro do valor máximo.

Matematicamente podemos escrever:

$$E_{pp} = 2 \cdot E_p \qquad I_{pp} = 2 \cdot I_p$$

Onde:

$E_p \rightarrow$ Tensão de pico (V)

$E_{pp} \rightarrow$ Tensão pico a pico (V)

$I_p \rightarrow$ Corrente de pico (A)

$I_{pp} \rightarrow$ Corrente pico a pico (A)

2.16.2.3 Valor instantâneo

O valor assumido pela grandeza, sendo tensão ou corrente, em um determinado instante de tempo, é chamado de valor instantâneo.

Em um determinado instante de tempo t_1 de um gráfico senoidal, o valor instantâneo pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$e = E_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen } \omega t$$

Onde:

$e \rightarrow$ Valor instantâneo da tensão (V)

$E_{m\acute{a}x} \rightarrow$ Máximo valor da tensão (V)

$\omega \rightarrow$ Velocidade angular (rad/s)

$t \rightarrow$ instante de tempo (s)

$$i = I_{\text{máx}} \cdot \text{sen } \omega t$$

Onde:

$i \rightarrow$ Valor instantâneo da corrente (A)

$I_{\text{máx}} \rightarrow$ Máximo valor da corrente (A)

$\omega \rightarrow$ Velocidade angular (rad/s)

$t \rightarrow$ instante de tempo (s)

A velocidade com que os condutores rotacionam dentro do gerador de energia, utilizando os campos magnéticos para gerar as tensões e correntes alternadas, é conhecida como velocidade angular (ω). Esta grandeza é associada à frequência, e podemos expressar matematicamente como:

$$\omega = 2 \pi f$$

Onde:

$\omega \rightarrow$ Velocidade angular (rad/s)

$\pi \rightarrow$ Constante matemática conhecida como pi, de valor fixo 3,14

$t \rightarrow$ Tempo (s)

O valor instantâneo também pode ser representado em função de um ângulo α .

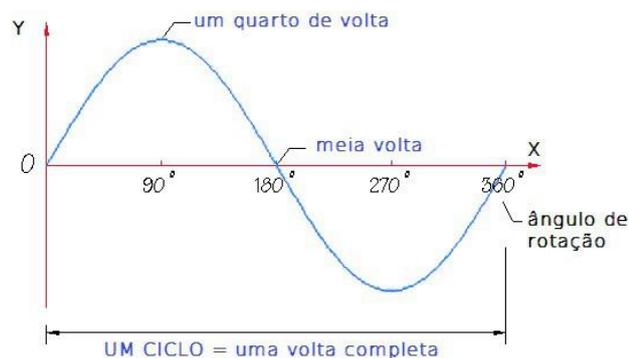


Figura 59 – Representação da senoide em função do ângulo.

Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Matematicamente, podemos expressar qualquer valor instantâneo, tanto de uma tensão como de uma corrente, pelas expressões abaixo:

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

Onde:

$e \rightarrow$ Valor instantâneo da tensão (V)

$E_{\text{máx}} \rightarrow$ Máximo valor da tensão (V)

$\alpha \rightarrow$ Ângulo da senóide ($^{\circ}$)

$$i = I_{\text{máx}} \cdot \text{sen}\alpha$$

Onde:

$i \rightarrow$ Valor instantâneo da corrente (A)

$I_{\text{máx}} \rightarrow$ Máximo valor da corrente (A)

$\alpha \rightarrow$ Ângulo da senóide ($^{\circ}$)

2.16.2.4 Valor médio

O valor médio de uma tensão ou corrente alternada corresponde à média dos valores instantâneos de um semiciclo. Matematicamente, podemos escrever:

$$E_{\text{méd}} = 2 \cdot \frac{E_p}{\pi}$$

Onde:

$E_{\text{méd}} \rightarrow$ Tensão média (V)

$E_p \rightarrow$ Tensão de pico (V)

$\pi \rightarrow$ Constante matemática pi (3,14)

$$I_{\text{méd}} = 2 \cdot \frac{I_p}{\pi}$$

Onde:

$I_{\text{méd}} \rightarrow$ Corrente média (A)

$I_p \rightarrow$ Corrente de pico (A)

$\pi \rightarrow$ Constante matemática pi (3,14)

2.16.2.5 Tensão eficaz

O valor eficaz de uma corrente ou de uma tensão alternada corresponde ao valor que produz o mesmo efeito que uma corrente contínua aplicada a uma resistência, ou seja, é o valor real da tensão e da corrente.

Matematicamente podemos escrever da seguinte maneira:

$$I = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

Onde:

$I \rightarrow$ Corrente eficaz (A)

$I_p \rightarrow$ Corrente de pico (A)

$$E = \frac{E_p}{\sqrt{2}}$$

Onde:

$E \rightarrow$ Tensão eficaz (V)

$E_p \rightarrow$ Tensão de pico (V)

2.16.3 FASORES

Fasor é entendido como um vetor como um vetor que gira no sentido anti-horário, completando 360° a cada ciclo completo da grandeza. O fasor deveria representar os valores máximos de tensão e corrente, porém, utiliza-se o valor eficaz, que é mais útil nesse caso.

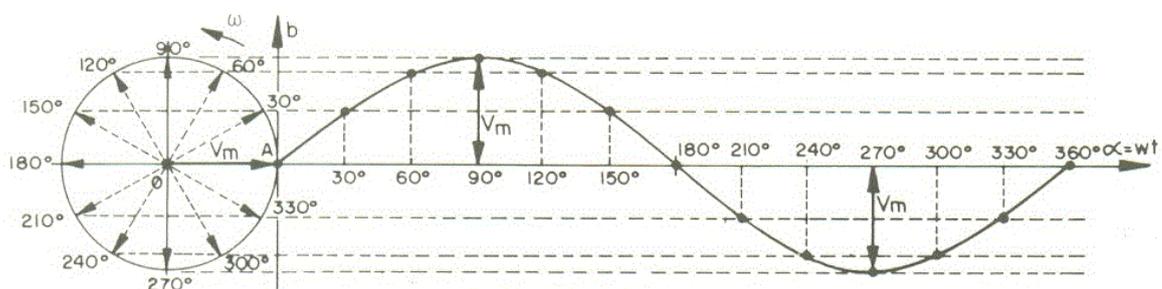


Figura 60 – Representação senoidal de um fasor.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.16.3.1 Defasamento

Defasamento é a posição relativa entre dois fasores quando estes se fizerem presentes no circuito. Uma tensão e uma corrente alternada podem ter seus valores máximos não ocorrendo ao mesmo tempo.

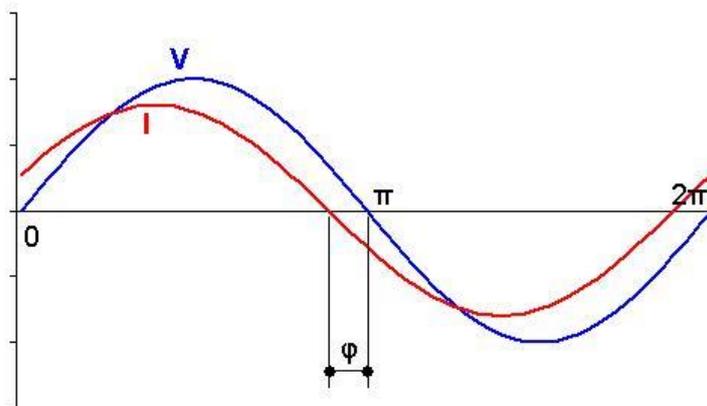


Figura 61 – Exemplo de uma defasagem entre tensão e corrente.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.17 CIRCUITOS PURAMENTE RESISTIVOS

É um circuito composto somente de resistências. A tensão da fonte sendo alternada faz com a corrente também seja. A intensidade da corrente em termo de valores eficazes é dada pela lei de Ohm.

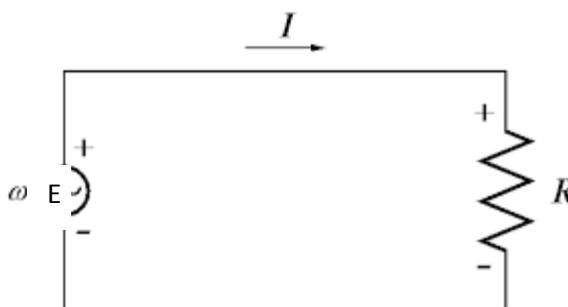


Figura 62 – Circuito puramente resistivo.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

A principal característica do circuito puramente resistivo é que a tensão e a corrente se encontram em fase, ou seja, as duas grandezas começam e terminam no mesmo momento.

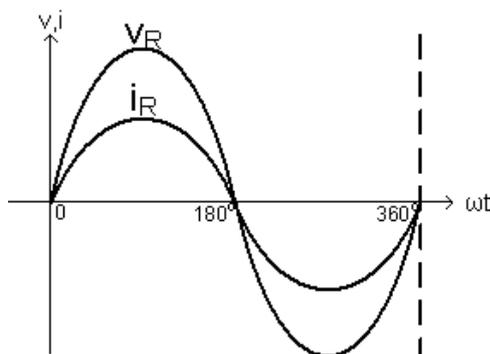


Figura 63 – Forma de onda do circuito puramente resistivo.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.18 CIRCUITOS PURAMENTE CAPACITIVOS

É um circuito composto simplesmente por capacitores. Quando ligamos o capacitor em uma fonte de alternada este fica sujeito as oscilações da fonte alternada, carregando-se e descarregando-se, fazendo com que tenhamos corrente o tempo todo no circuito capacitivo. Essa corrente é determinada através de uma grandeza conhecida como reatância capacitiva (X_c).

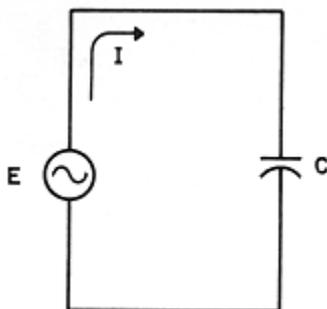


Figura 64 – Circuito puramente capacitivo.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

A reatância capacitiva é a oposição oferecida pelo capacitor a passagem da corrente elétrica. E é calculada por:

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

Onde:

$X_c \rightarrow$ Reatância capacitiva (Ω).

$f \rightarrow$ Frequência (Hz).

$C \rightarrow$ Capacitância (F).

Para se calcular a corrente, utiliza-se a lei de Ohm

$$I = \frac{E}{X_c}$$

Onde:

$I \rightarrow$ Corrente elétrica (A).

$E \rightarrow$ Tensão da fonte (V).

$X_c \rightarrow$ Reatância capacitiva (Ω).

A característica principal dos circuitos puramente capacitivos é que a corrente é defasada da tensão em 90° adiantada da tensão.

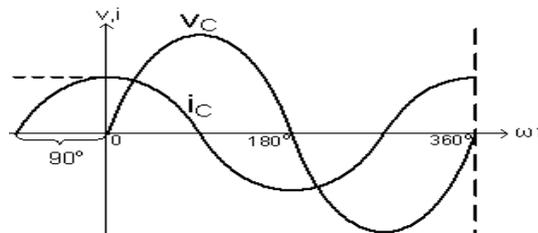


Figura 65 – Forma de onda de um circuito puramente capacitivo.

Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.19 CIRCUITOS PURAMENTE INDUTIVOS

É um circuito composto exclusivamente de indutores. Quando ligado em uma fonte alternada, a corrente é obtida utilizando-se a lei de Ohm, porém é limitada por uma grandeza conhecida como reatância indutiva.

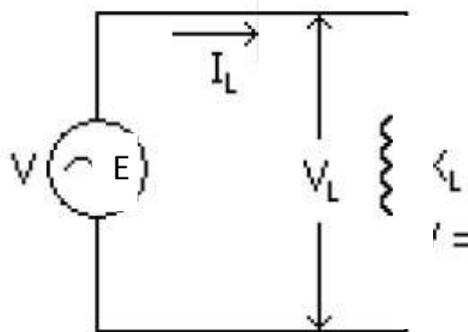


Figura 66 – Circuito puramente Indutivo.

Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

A reatância indutiva é a oposição oferecida pela bobina à passagem da corrente elétrica. E é dada por:

$$X_L = 2\pi fL$$

Onde:

$X_L \rightarrow$ Reatância indutiva (Ω).

$f \rightarrow$ Frequência (Hz).

$L \rightarrow$ Indutância (H).

Para se calcular a corrente, utiliza-se a lei de Ohm:

$$I = \frac{E}{X_L}$$

Onde:

$X_L \rightarrow$ Reatância indutiva (Ω).

$E \rightarrow$ Tensão da fonte (V).

$I \rightarrow$ Corrente elétrica (A).

A característica principal dos circuitos puramente indutivos é que a corrente é defasada 90° em atraso da tensão.

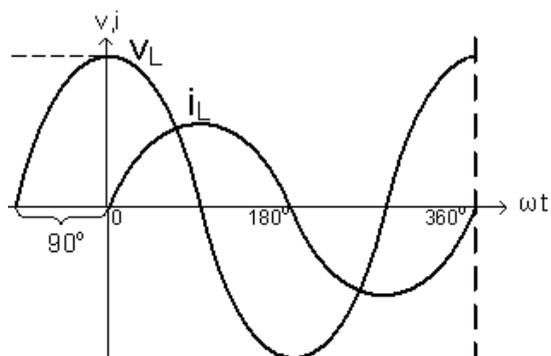


Figura 67 – Forma de onda de um circuito puramente indutivo.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

2.20 CIRCUITOS RL E RC

2.20.1 Circuitos RL e RC em série

Os circuitos RL e RC em série, funcionam como divisores de tensão reativos que defasam a tensão da fonte de tensão em relação à corrente elétrica de um ângulo φ .

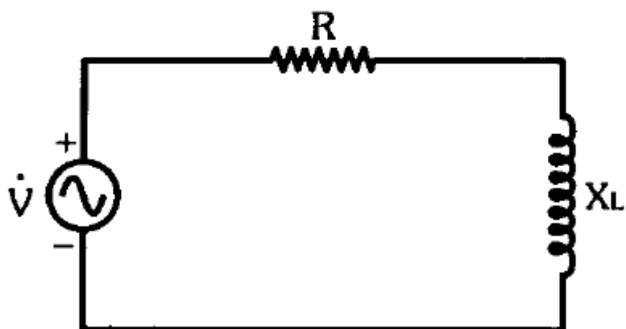


Figura 68 – Circuito RL em série
Fonte: Markus (2004)

No circuito RL série, obtém-se:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\varphi^+ = \arctg \frac{X_L}{R}$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi^+$$

$$X_L = Z \cdot \sen \varphi^+$$

Onde:

$Z \rightarrow$ Impedância do circuito (Ω).

$R \rightarrow$ Resistência (Ω)

$\varphi \rightarrow$ Ângulo de fase em Z ($^\circ$)

$X_L \rightarrow$ Reatância indutiva (Ω)

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_l^2}$$

$$\varphi^+ = \arctg \frac{V_L}{V_r}$$

$$V_r = V \cdot \cos \varphi^+$$

$$V_L = V \cdot \sen \varphi^+$$

Onde:

$V \rightarrow$ Tensão do circuito (V).

$V_r \rightarrow$ Tensão em cima do resistor (V).

$V_L \rightarrow$ Tensão em cima do indutor (V)

$\varphi \rightarrow$ Defasagem entre V e I ($^\circ$)

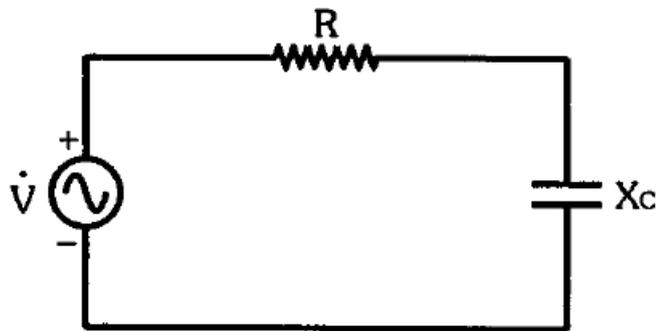


Figura 69 – Circuito RC em série.
Fonte: Markus (2004)

No circuito RC série obtém-se:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\varphi^- = - \arctg \frac{X_C}{R}$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi^-$$

$$X_C = - Z \cdot \sen \varphi^-$$

Onde:

$Z \rightarrow$ Impedância do circuito (Ω).

$R \rightarrow$ Resistência (Ω)

$\varphi \rightarrow$ Ângulo de fase em Z ($^\circ$)

$X_C \rightarrow$ Reatância capacitiva (Ω)

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_c^2}$$

$$\varphi^- = - \operatorname{arctg} \frac{V_c}{V_r}$$

$$V_r = V \cdot \cos \varphi^-$$

$$V_L = - V \cdot \operatorname{sen} \varphi^-$$

Onde:

$V \rightarrow$ Tensão do circuito (V).

$V_r \rightarrow$ Tensão em cima do resistor (V).

$V_c \rightarrow$ Tensão em cima do capacitor (V)

$\varphi \rightarrow$ Defasagem entre V e I ($^\circ$)

A fase φ da impedância indutiva é entre 0° a $+90^\circ$, enquanto na impedância capacitiva é entre 0° a -90° . Essa fase corresponde à defasagem da tensão e da corrente que é fornecida ao circuito.

2.20.2 Circuitos RL e RC em paralelo

Os circuitos RL e RC em paralelo funcionam como divisores de corrente que defasam a tensão da fonte em relação à corrente elétrica em um ângulo φ .

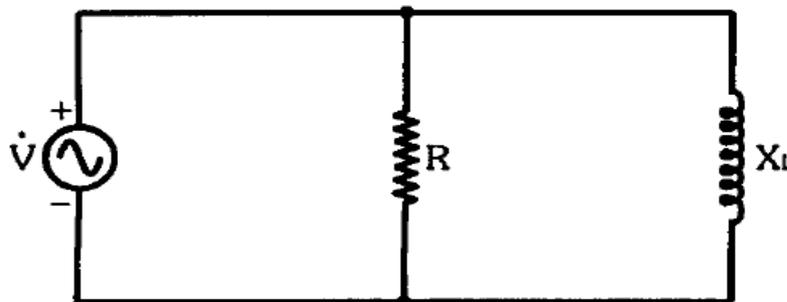


Figura 70 – Circuito RL em paralelo.
Fonte: Markus (2004).

No circuito RL paralelo, obtém-se:

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$$

ou

$$Z = \frac{R \cdot X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

$$\varphi^+ = \text{arctg} \frac{R}{X_L}$$

ou

$$\varphi^+ = 90^\circ - \text{arctg} \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{Z}{\cos \varphi^+}$$

$$X_L = \frac{Z}{\text{sen} \varphi^+}$$

Onde:

Z → Impedância do circuito (Ω).

R → Resistência (Ω)

φ → Ângulo de fase em Z ($^\circ$)

X_L → Reatância indutiva (Ω)

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_l^2}$$

$$\varphi^+ = \text{arctg} \frac{I_l}{I_r}$$

$$I_r = I \cdot \cos \varphi^+$$

$$I_l = I \cdot \text{sen} \varphi^+$$

Onde:

I → Corrente do circuito (A).

I_r → Corrente que passa no resistor (A).

I_l → Corrente que passa no capacitor (A)

φ → Defasagem entre V e I ($^\circ$)

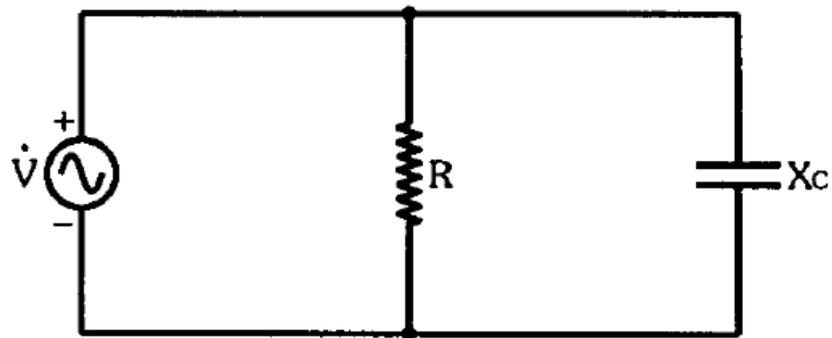


Figura 71 – Circuito RC em paralelo.
Fonte: Markus (2004).

No circuito RC em paralelo, obtém-se:

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{Xc^2}}$$

ou

$$Z = \frac{R \cdot Xc}{\sqrt{R^2 + Xc^2}}$$

$$\varphi^- = - \operatorname{arctg} \frac{R}{Xc}$$

ou

$$\varphi^- = - 90^\circ - \operatorname{arctg} \frac{Xc}{R}$$

$$R = \frac{Z}{\cos \varphi^-}$$

$$X_L = - \frac{Z}{\operatorname{sen} \varphi^-}$$

Onde:

$Z \rightarrow$ Impedância do circuito (Ω).

$R \rightarrow$ Resistência (Ω)

$\varphi \rightarrow$ Ângulo de fase em Z ($^\circ$)

$X_C \rightarrow$ Reatância capacitiva (Ω)

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_c^2}$$

$$\varphi^- = - \operatorname{arctg} \frac{I_c}{I_r}$$

$$I_r = I \cdot \cos \varphi^-$$

$$I_c = - I \cdot \operatorname{sen} \varphi^-$$

Onde:

$I \rightarrow$ Corrente do circuito (A).

$I_r \rightarrow$ Corrente que passa no resistor (A).

$I_c \rightarrow$ Corrente que passa no capacitor (A)

$\varphi \rightarrow$ Defasagem entre V e I ($^\circ$)

A fase φ da impedância indutiva é entre 0° a $+90^\circ$, enquanto na impedância capacitiva é entre 0° a -90° . Essa fase corresponde à defasagem da tensão e da corrente que é fornecida ao circuito.

2.20.3 CIRCUITOS RLC

2.20.3.1 Circuitos RLC em série

O circuito RLC série possui os três elementos resistor, indutor e capacitor ligados em série.

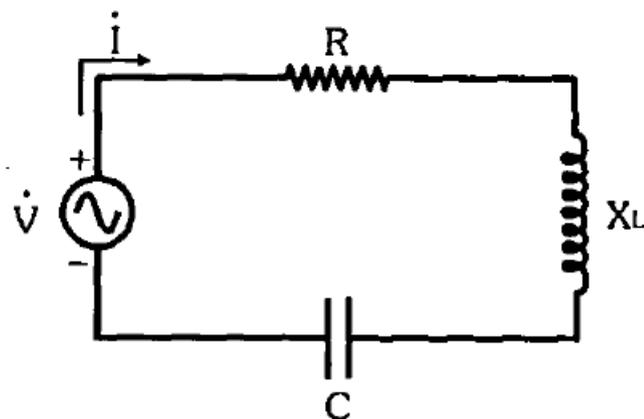


Figura 72 – Circuito RLC em série.
Fonte: Markus (2004).

As reatâncias X_C e X_L estão sempre defasadas 180° entre si, a reatância predominante elimina o efeito da outra. Nesse tipo de circuito, a reatância predominante é a de maior valor.

As fórmulas para os cálculos da fase e da impedância do circuito RLC série são:

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

$$\varphi = \text{arctg} \cdot \frac{X_L - X_C}{R}$$

Onde:

$Z \rightarrow$ Impedância do circuito (Ω).

$R \rightarrow$ Resistência (Ω).

$X_L \rightarrow$ Reatância indutiva (Ω).

$X_C \rightarrow$ Reatância capacitiva (Ω).

$\varphi \rightarrow$ Ângulo de fase ($^\circ$)

$$V = \sqrt{V_r^2 + (V_L - V_C)^2}$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{V_L - V_C}{V_r}$$

Onde:

$V \rightarrow$ Tensão da fonte (V).

$V_r \rightarrow$ Tensão em cima do resistor (V).

$V_L \rightarrow$ Tensão em cima do indutor (V)

$V_C \rightarrow$ Tensão em cima do capacitor (V)

$\varphi \rightarrow$ Ângulo de fase de V ($^\circ$)

2.20.3.2 Circuito RLC em paralelo

O circuito RLC paralelo possui os três elementos resistor, indutor e capacitor ligados em paralelo.

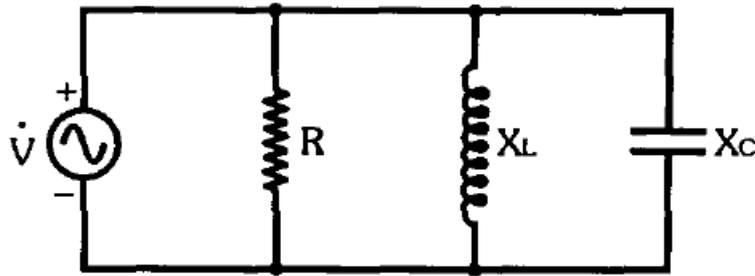


Figura 73 – Circuito RLC em paralelo.
Fonte: Markus (2004).

As reatâncias X_C e X_L estão sempre defasadas 180° entre si, a reatância predominante elimina o efeito da outra. Nesse tipo de circuito, a reatância predominante é a de menor valor.

O circuito RLC paralelo pode apresentar três comportamentos distintos:

- $X_L > X_C \rightarrow$ Circuito indutivo ($\varphi > 0^\circ$);
- $X_C > X_L \rightarrow$ Circuito capacitivo ($\varphi < 0^\circ$);
- $X_L = X_C$ (Ressonância) \rightarrow Circuito resistivo ($\varphi = 0^\circ$)

As fórmulas para o cálculo da impedância ou da fase do circuito paralelo são:

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{R \cdot (X_C - X_L)}{X_L \cdot X_C}$$

Onde:

$Z \rightarrow$ Impedância do circuito (Ω).

$R \rightarrow$ Resistência (Ω).

$X_L \rightarrow$ Reatância indutiva (Ω).

$X_C \rightarrow$ Reatância capacitiva (Ω).

$\varphi \rightarrow$ Ângulo de fase ($^\circ$)

Em relação a corrente, obtemos três comportamentos distintos também:

- $I_L > I_C \rightarrow$ Circuito indutivo ($\varphi < 0^\circ$);
- $I_C > I_L \rightarrow$ Circuito capacitivo ($\varphi > 0^\circ$);

- $I_L = I_C$ (Ressonância) → Circuito resistivo ($\varphi = 0^\circ$)

As fórmulas para o cálculo da corrente e da fase dos circuitos RLC paralelo são:

$$I = \sqrt{I_r^2 + (I_l - I_c)^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{I_l - I_c}{I_r}$$

Onde:

I → Corrente do circuito (A).

I_r → Corrente que passa no resistor (A).

I_c → Corrente que passa no capacitor (A)

φ → Fase de I ($^\circ$)

2.21 POTÊNCIA EM CIRCUITOS ALTERNADOS

A potência estudada em corrente contínua é basicamente o trabalho realizado em uma resistência. A potência que resultar do produto da tensão pela corrente é chamada de potência ativa. Já a potência em cima de uma bobina ou de um capacitor é chamada de potência reativa. E a resultante das duas potências citadas acima é chamada de potência aparente. Então podemos separá-las da seguinte forma:

Potência ativa é aquela que realiza trabalho, é aquela utilizada pelas resistências.

P → Potência ativa (watt – W)

Potência reativa é aquela utilizada pelas bobinas e capacitores, sem ser transformada em trabalho.

Q → Potência reativa (volt-ampère reativo – VAR)

Potência aparente é aquela que resulta da potência ativa e da potência reativa. Considerada a potência real que chega nos circuitos.

S → Potência aparente (volt-ampère – VA)

A potência aparente pode ser simplesmente o produto da tensão e da corrente que chega a um circuito.

Podemos obter as equações das potências simplesmente multiplicando a corrente pela sua respectiva queda de tensão de cada componente. Os produtos obtidos são os seguintes:

$$\begin{aligned}P &= I \cdot V_R \\Q_C &= I \cdot V_C \\Q_L &= I \cdot V_L \\Q &= I \cdot (V_L - V_C) = Q_L - Q_C \\S &= I \cdot E\end{aligned}$$

Onde:

$P \rightarrow$ Potência ativa (W).

$Q_C \rightarrow$ Potência reativa do capacitor (VAR).

$Q_L \rightarrow$ Potência reativa do indutor (VAR).

$Q \rightarrow$ Potência reativa total (VA).

$S \rightarrow$ Potência aparente (VA).

A potência reativa Q corresponde à diferença entre a potência reativa indutiva e a potência reativa capacitiva, dependendo dos valores da capacitância e da indutância do circuito, podemos ter a potência reativa capacitiva maior do que a potência reativa indutiva e vice e versa. Neste caso, o diagrama de potências costuma ser representado em forma de triângulo da seguinte forma.

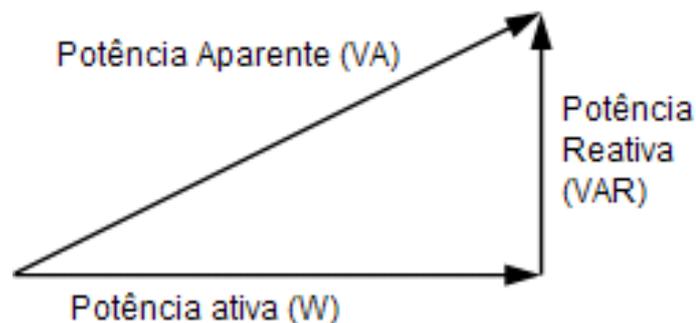


Figura 74 – Triângulo de potências.
Fonte: Adaptado de Albuquerque (1993)

Se a potência reativa indutiva for maior que a potência reativa capacitiva, o triângulo é voltado para cima, caso a potência reativa capacitiva for maior que a potência reativa indutiva, o triângulo é voltado para baixo.

Se a potência reativa indutiva for igual à potência reativa capacitiva, teremos a potência reativa nula. Neste caso, o triângulo de potência se resume a uma reta onde:

$$P = S$$

Pode-se obter várias relações entre os três tipos de potência aplicando o teorema de Pitágoras e as relações trigonométricas.

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Ou reescrevendo matematicamente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{Q}{S}$$

Ou reescrevendo matematicamente:

$$Q = \operatorname{sen}\varphi \cdot S$$

$$\operatorname{cos}\varphi = \frac{P}{S}$$

Ou reescrevendo matematicamente:

$$P = \operatorname{cos}\varphi \cdot S$$

$$\operatorname{tan}\varphi = \frac{Q}{P}$$

Ou reescrevendo matematicamente:

$$Q = \operatorname{tan}\varphi \cdot P$$

Onde:

$P \rightarrow$ Potência ativa (W).

$Q \rightarrow$ Potência reativa total (VAR).

$S \rightarrow$ Potência aparente (VA).

$\operatorname{sen}, \operatorname{cos}, \operatorname{tan} \rightarrow$ Relações trigonométricas.

O cos é a relação que envolve a potência ativa e a potência aparente, ela revela a porcentagem de potência ativa no circuito, visto que a potência aparente é a potência total do circuito.

O $\operatorname{cos}\varphi$ do circuito é chamado de fator de potência (fp).

Para os circuitos RLC, utiliza-se as fórmulas abaixo:

$$Q = I^2 \cdot (X_C - X_L)$$

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

$$S = I^2 \cdot Z$$

$$Q = \frac{(V_L - V_C)^2}{X_L - X_C}$$

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

$$S = \frac{E^2}{Z}$$

Onde:

P → Potência ativa (W).

Q → Potência reativa total (VAR).

S → Potência aparente (VA).

R → Resistência elétrica (Ω).

E → Tensão elétrica (V).

Z → Impedância do circuito (Ω).

X_L → Reatância indutiva (Ω).

X_C → Reatância capacitiva (Ω).

V_L → Tensão em cima do indutor (V).

V_C → Tensão em cima do capacitor (V)

REFERÊNCIAS

ALBURQUEQUE, Rômulo Oliveira. **Análise de circuitos em corrente contínua**. 10 ed. São Paulo: Érika 1993.

ALBURQUEQUE, Rômulo Oliveira. **Análise de circuitos em corrente alternada**. 10 ed. São Paulo: Érika 1993.

BALNINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner. **Instrumentação e Fundamentos de medidas**. Vol 1. 2ª ed. São Paulo: LTC, 2010.

BALNINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner. **Instrumentação e Fundamentos de medidas**. Vol 2. 2ª ed. São Paulo: LTC, 2010.

BHUYAN, Manabendra. **Instrumentação inteligente: Princípios e aplicações**. 1a ed. São Paulo: LTC, 2013.

LIRA, Francisco Adval de. **Metrologia na indústria**. 9ª ed. São Paulo: Erica, 2013.

MARKUS, Otávio. **Circuitos elétricos – corrente contínua e alternada**. 9 ed. São Paulo: Érika 2004.

WOLSKI, Belmiro. **Curso técnico em eletrotécnica – Eletricidade básica**. 1 ed. Base 2010.

WOLSKI, Belmiro. **Curso técnico em eletrotécnica – Circuitos e medidas elétricas**. 1 ed. Base 2010.