

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC)

BRENDY BUBELA VIDAL

Estudo para automatização computacional de calibrações em metrologia elétrica.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

2022

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	3
1.1 O que é calibração?	3
1.1 Tipos de Calibração.....	3
1.2.1 Calibração de pressão.....	3
1.2.2 Calibração de temperatura.....	4
1.2.3 Calibração de fluxo.....	4
1.2.4 Calibração de pipeta	4
1.2.5 Calibração elétrica.....	4
1.2.6 Calibração mecânica.....	5
2 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	5
2.1 Definição do Sistema	5
2.2 A Interoperabilidade da Calibração.....	5
2.3 A pirâmide de rastreabilidade da calibração	6
2.4 Rastreabilidade	7
3 CERTIFICADOS E ACREDITAÇÕES	7
3.1 Acreditações	7
3.2 Certificados	7
4 INCERTEZAS	8
5 IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO	11
6 INTRODUÇÃO TEÓRICA DOS FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS.....	12
6.1 Carga Elétrica.....	12
6.2 Tensão.....	13
6.3 Potência.....	14
6.4 Elementos do Circuito Elétrico.....	15
7 LEIS BÁSICAS	17
7.1 Lei de Ohm	17
7.2 Nós, ramos e laços	21
7.3 Leis de Kirchhoff	22
7.4 Resistores em série e divisão de tensão	22
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1 INTRODUÇÃO

1.1 O que é calibração?

Calibração é tipicamente o ato de comparar um determinado dispositivo ou instrumento (que pode ser chamado de Unidade sob Teste), de valor desconhecido, com um dispositivo de referência de valor conhecido. Este ato tem o objetivo de determinar o erro no equipamento que está sendo testado ou determinar a precisão do mesmo, em resumo, determinar se o equipamento está adequado ao uso.

Muitas vezes uma etapa lógica depois de realizada uma calibração e sendo determinada a falha ou o desregulamento do aparelho testado, seria a realização de um processo corretivo na falha detectada ou um ajuste no aparelho para reduzir os seus erros na precisão, mas em geral essa etapa é tecnicamente separada do processo de calibração em si [1].

Um exemplo do processo de calibração de equipamentos é a calibração de uma balança, onde é feita a comparação entre os valores dos pesos de referência que são dispostos na balança para determinar o erro.

Uma definição formalizada da calibração é o BIPM (*International Bureau of Weights and Measures*), localizado na França, e é o sistema de medidas principal em todo o mundo e é ele que garante a unificação das medidas ao redor do planeta [1], [2].

1.1 Tipos de Calibração

A calibração pode ser realizada em todos os setores de uma empresa e em diferentes instrumentos, alguns dos tipos de calibrações mais utilizados são [3], [4]:

- Calibração de pressão [5];
- Calibração de temperatura [6], [7];
- Calibração de fluxo [3];
- Calibração de pipeta [8]–[10];
- Calibração elétrica [11], [12];
- Calibração mecânica [13], [14].

1.2.1 Calibração de pressão

Este tipo de calibração de baseia em comparar a saída de um dispositivo de medição de pressão com a de outro dispositivo do mesmo tipo ou com um padrão de medição dessa pressão. Isto é realizado conectando o dispositivo de teste com o padrão e gerando uma pressão padrão no circuito de medição [5].

Esse tipo de calibração é utilizada, por exemplo, em Institutos Nacionais de Metrologia, Laboratórios de calibração primária, oficinas de calibração de instrumentos, fabricação e serviços para sensores de pressão, calibração de dados aéreos [5].

1.2.2 Calibração de temperatura

Este tipo de calibração consiste em calibrar qualquer dispositivo usado em um sistema que meça temperaturas, e em geral, o sistema é o sensor de temperatura, sendo mais comum um termistor, termopar ou um termômetro de resistência de platina. Os termômetros geralmente são calibrados em uma fonte de calor com temperatura estável e comparando as medidas dos dois tipos de dispositivos já mencionados anteriormente, de teste e de referência [6], [7].

Sua utilização é de grande importância cotidiana para a medição do consumo de água e gás nas residências e para os medidores de combustível nas bombas de estação serviço [6], [7].

1.2.3 Calibração de fluxo

Esta calibração se constrói em volta de fluxo de gás, onde é realizada a calibração de um dispositivo de detecção de fluxo, como um fluxômetro ou controlador de fluxo, comparando as medições com uma referência dessa medição de fluxo. Normalmente ambos os dispositivos são conectados em série de modo que meçam o mesmo fluxo de gás [3].

É utilizada na fabricação e manutenção de fluxômetros ou controladores de fluxo, em sistemas médicos ou de apoio à respiração, em testes de vazamentos, em Institutos Nacionais de Medição, e em diversos controles de processos como biofarmacêutica, petroquímica e mistura de gases [3].

1.2.4 Calibração de pipeta

A calibração de pipetas é muito importante para manter uma maior precisão nos processos de medição de substâncias líquidas que são realizadas em experimentos laboratoriais [8]–[10].

No processo de calibração são utilizados um frasco de *Erlenmeyer*, uma proveta e uma pipeta. A temperatura da água é medida ao início do processo onde água destilada é colocada no frasco, após isso, uma proveta é pesada em uma balança analítica, e após a transferência da água do frasco para a proveta com o auxílio de uma pipeta, a medição é feita novamente. Esse processo é realizado pelo menos duas vezes e a densidade da água em cada uma das medições é calculado pela fórmula: $\text{volume} = \text{massa} / \text{densidade}$ [8]–[10].

1.2.5 Calibração elétrica

A calibração elétrica é o processo que verifica o desempenho de instrumentos que medem ou testem parâmetros elétricos, normalmente essa área é chamada de metrologia elétrica e de baixa frequência. Os principais parâmetros são a tensão, corrente, resistência, indutância, capacitância, tempo e frequência [11], [12].

Esta área trabalha com dispositivos precisos para avaliar o desempenho de outros dispositivos de testes, normalmente, o desempenho dos dispositivos de precisão deve ser no mínimo quatro vezes superior ao dispositivo de teste.

1.2.6 Calibração mecânica

A calibração mecânica é responsável pela calibração de equipamentos como Torquímetros, Medidores de Torque, Dinamômetros, Balanças, Paquímetros, Micrômetros, Acelerômetros Lineares e Indicadores de Impactos Mecânicos. Esta área da calibração é muito importante para a manutenção de equipamentos industriais, como por exemplo, a calibração de torquímetros, que é usada pra gerar uma exatidão que é utilizada por engenheiros para calcular o torque necessário para a fixação de componentes de motores de automóveis e outras partes, já na área elétrica, este tipo de padrão é usado na fixação de barramentos de cobre [13].

2 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

2.1 Definição do Sistema

O Sistema Internacional de Unidades, abreviado de "SI", é o nível mais alto dos padrões de medição, os valores padrões conhecidos são dados através deste sistema, que contém sete unidades bases que são as seguintes: segundo, metro, quilograma, ampère, kelvin, mol e candela. Essas sete unidades são como a velocidade da luz, uma unidade da natureza que é imutável [1].



Defining constant	Symbol	Numerical value	SI Unit
hyperfine transition frequency of Cs	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
speed of light in vacuum	c	299 792 458	m s ⁻¹
Planck constant	h	6.626 070 15 x 10 ⁻³⁴	J s
elementary charge	e	1.602 176 634 x 10 ⁻¹⁹	C
Boltzmann constant	k	1.380 649 x 10 ⁻²³	J K ⁻¹
Avogadro constant	N _A	6.022 140 76 x 10 ²³	mol ⁻¹
luminous efficacy	K _{cd}	683	lm W ⁻¹

Figura 1 - As unidades do SI e as constantes. Figura extraída de [1].

2.2 A Interoperabilidade da Calibração

A grande vantagem do *Bureau International des Poids et Mesures* – BIPM (i.e. Escritório Internacional de Pesos e Medidas) gerenciar o SI mundialmente é a interoperabilidade da calibração, ou seja, isso significa que ao redor do mundo, todas as organizações signatárias da Organização Metrológica Mundial (OMM) usam o mesmo sistema e definições de medidas, permitindo por exemplo que nas compras de equipamentos como um resistor de 1 Ohm de qualquer outro país seja a

mesma medida de 1 ohm no Brasil ou nos Estados Unidos, permitindo também que os relatórios de medidas sejam compreendidos com valores sistematizados mundialmente. Para haver esta interoperabilidade, é necessário rastrear essas medidas através da indústria [1].

2.3 A pirâmide de rastreabilidade da calibração

Agora que existem as referências padrão do SI, é necessário compartilhar isto com o resto do mundo para garantir um padrão mundial de medidas.

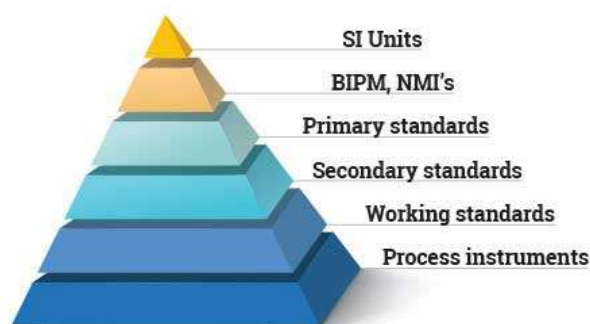


Figure 2 - A pirâmide de rastreabilidade da calibração. Figura extraída de [1].

O SI é como se fosse o topo da pirâmide e o BIPM ajuda a passar o sistema para todos os níveis de uso dentro dos países para promover a inovação e descoberta científica, e também promovendo a fabricação industrial e comércio internacional.

Abaixo do nível do SI, o BIPM trabalha diretamente com os Institutos Nacionais de Metrologia (*National Metrology Institutes* - NMI's) dos estados membros ou países para facilitar a disseminação do sistema. Por conta de não ser possível para todos dentro de um país trabalharem diretamente com seus Institutos de Metrologia, os padrões de calibrações dos NMI's são utilizados para calibrar padrões e instrumentos por meio de rastreabilidade, através de uma rede de laboratórios acreditados.

Os padrões primários são usados para calibrar os padrões secundários, os padrões secundários são usados para calibrar padrões de trabalho, e os padrões de trabalho são usados para calibrar os instrumentos de processo [1].

Em raras situações, uma unidade SI pode ser comparada a uma constante universal dentro de um laboratório usando um instrumento especial para atingir a medida, o efeito Hall quântico (para grandeza de resistência elétrica - ohm) é um exemplo deste tipo de dispositivo [15], ainda assim, os NMIs estão envolvidos para garantir uma medição correta por este instrumento.

2.4 Rastreabilidade

A rastreabilidade na calibração pode ser definida como uma cadeia de medições desde a base da pirâmide até os padrões do SI. No topo dela, a calibração rastreável significa que a calibração foi performada com padrões calibráveis de referência e que são rastreáveis através de uma corrente que retorna a uma unidade de SI, através de um Instituto de Metrologia. A rastreabilidade da calibração pode ser vista como um “pedigree” da calibração.

Esse conceito é importante nos testes e nas medições, pois muitos padrões de empresas requerem que os dispositivos de medição sejam rastreáveis, como por exemplo, dispositivos médicos, farmacêuticos, aeroespaciais e militares, assim como muitas outras indústrias. Sua presença auxilia na melhora do controle dos processos e das pesquisas garantindo que as medidas e os resultados estão corretos.

Como muitos outros tópicos relacionados à calibração, diversos requisitos foram desenvolvidos para garantir tal rastreabilidade da calibração, alguns deles são: a incerteza da calibração, o intervalo de tempo em que a calibração expira e os métodos utilizados para garantir que a rastreabilidade se mantenha intacta no programa de calibração [1].

3 CERTIFICADOS E ACREDITAÇÕES

3.1 Acreditações

As creditações fornecem ao dono do instrumento de teste a confiabilidade das medições realizadas pelo seu instrumento. Uma acreditação de calibração significa que o processo de calibração foi revisto e que está em conformidade com requisitos técnicos e de qualidade aceitos internacionalmente. A acreditação ISO/IEC 17025 é o padrão de gestão de qualidade de metrologia em que os laboratórios de calibração possuem e é reconhecido internacionalmente.

Existem vários serviços de acreditação que são providenciados por organizações independentes, que são por sua vez autorizadas/reconhecidas. Tipicamente países desenvolvidos têm pelo menos um provedor de acreditação. Nos Estados Unidos, por exemplo, existe a *National Voluntary Laboratory Accreditation Program* (NVLAP), que é um dos provedores de creditações no país [1].

Uma vez que o processo de calibração é acreditado em um país, qualquer calibração que venha daquele processo pode ser aceita mundialmente sem requisitos adicionais, salvo casos específicos.

3.2 Certificados

Os laboratórios de calibração frequentemente entregam um certificado com a calibração de um instrumento, este certificado fornece ao dono a confiança/confiabilidade que o dispositivo foi calibrado corretamente e comprova esta calibração. Em geral estes documentos podem incluir informações como a rastreabilidade, uma lista com os padrões usados para a calibração, ou qualquer dado resultante da calibração relevante.

Os certificados podem variar entre laboratórios, pois nem todos os laboratórios seguem os mesmos padrões de negócios e eles também podem variar dependendo de onde a calibração se encaixa na hierarquia (i.e. padrões primários, secundários, etc.). Por exemplo, o certificado de calibração requerido para uma balança de supermercado pode ser simples, mas para uma balança de precisão em um laboratório de calibração pode conter muitos detalhes técnicos a mais.

4 INCERTEZAS

Segundo o VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia), a incerteza de medição é o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando (objeto da calibração), com base nas informações utilizadas. Sendo assim, o resultado da medição é um valor aproximado do objeto, em um intervalo de confiança, sendo essa margem de confiança o valor da incerteza de cada medida [16], [17].

Quanto menor a incerteza, mais precisa a medição é, e se uma medida tiver uma incerteza indefinida, a qualidade do resultado também será desconhecida, como é citado no GUM (*Guide to the expression of Uncertainty Measurement*) no trecho abaixo [18].

“When reporting the result of a measurement of a physical quantity, it is obligatory that some quantitative indication of the quality of the result be given so that those who use it can assess its reliability.” [18].

Existem dois tipos de padrões de incertezas, os tipos A e B. O padrão de incerteza de tipo A é baseada em análise estatística em uma série de medições, por exemplo, utilização do método dos mínimos quadrados para ajustar uma curva aos dados a fim de estimar parâmetros da curva e seus desvios-padrão, cálculo do desvio-padrão da média de uma série de observações independentes, dentre outros. Já a do tipo B é aquela que é determinada por meios diferentes do tipo A, esse tipo é baseado em informação e experiência. Como exemplo do tipo B temos: erros geométricos, limites deduzidos de experiência pessoal, tipo do indicador (digital ou analógico), especificações do fabricante, dados de medições anteriores, dados provenientes de calibrações e de outros certificados, incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais ou publicações, dentre outros.[19]

Abaixo é apresentado uma tabela de medições de uma calibração de um paquímetro para exemplificar os valores de incerteza.

Valor do Padrão (mm)	Valor do Instrumento (mm)	Erro (mm)	Incerteza (mm)	k	Veff
0,0	0,00	0,00	0,01	2,00	∞
10,0	10,01	0,01	0,01	4,53	2
20,0	20,00	0,00	0,01	2,00	∞

50,0	50,02	0,02	0,01	2,00	∞
100,0	100,03	0,03	0,01	2,00	∞
150,0	150,0	0,00	0,03	2,00	∞

Tabela 1 – Exemplos de valores de calibração de um paquímetro. Tabela extraída de [19].

Como representação visual e didática das incertezas, temos o seguinte gráfico de medidas [20]:

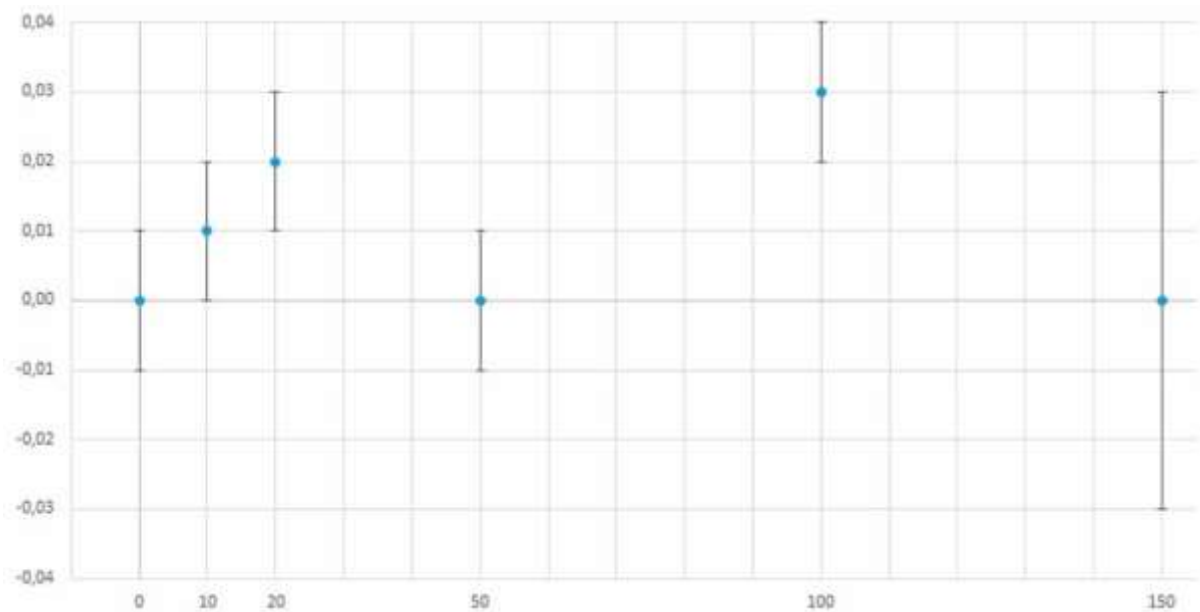


Figura 3 – Exemplo de incerteza de medição. Figura extraída de [20].

É possível observar o ponto de medida de 150 mm, por exemplo, onde sua incerteza é de 0,03 mm, ou seja, os valores podem variar de 149,97 mm até 150,03 mm com 95 % de probabilidade que o valor correto está dentro dessa medida, conforme o cálculo de incerteza expandida de medição.

O cálculo da incerteza expandida de medição é feito a partir da seguinte fórmula:

$$U = U_c * k$$

Onde é feita a multiplicação da incerteza combinada (pelo fator de abrangência k). E com essa incerteza expandida, temos o valor de incerteza que vai constar no certificado de calibração final.

Outro exemplo gráfico da representação da incerteza é colocando uma curva normal sobre o intervalo de confiança dos valores [20]:

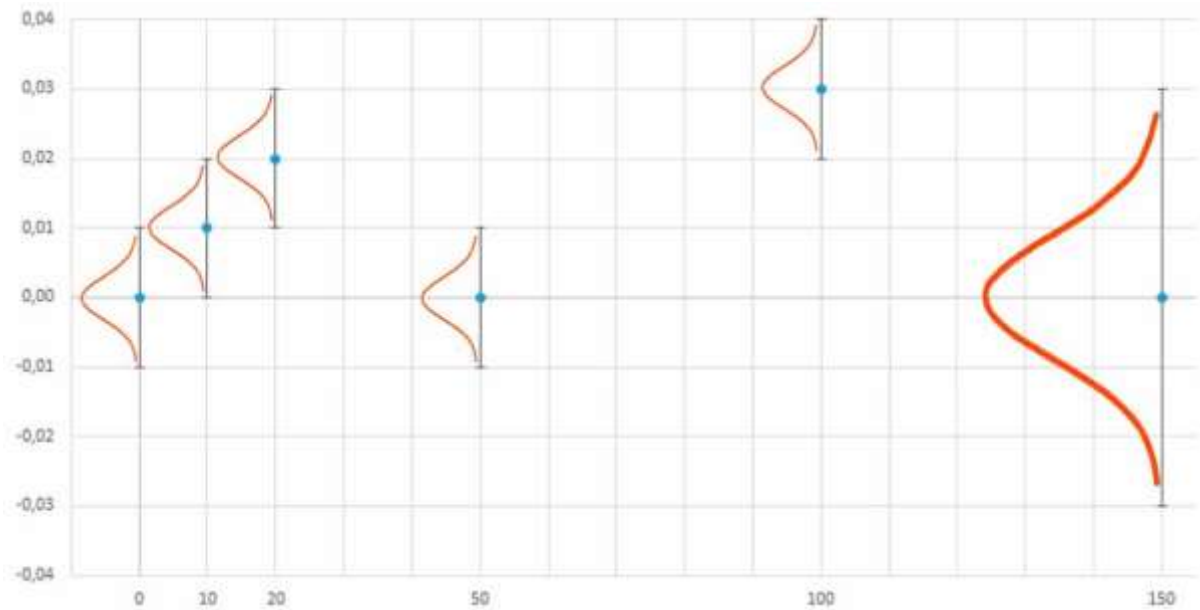


Figura 4 – Exemplo de incerteza de medição. Curvas de probabilidade normal, representando a incerteza de medição. Figura extraída de [20].

Agora analisando os resultados apenas do ponto 150 mm, é possível ver a relação da probabilidade de medição mencionada anteriormente [20]:

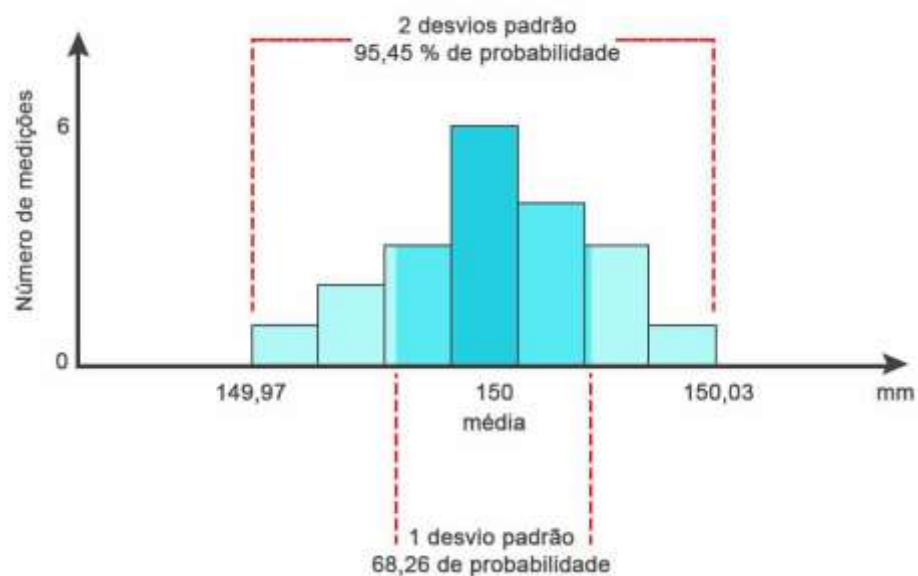


Figura 5 - Histograma. Figura extraída de [20].

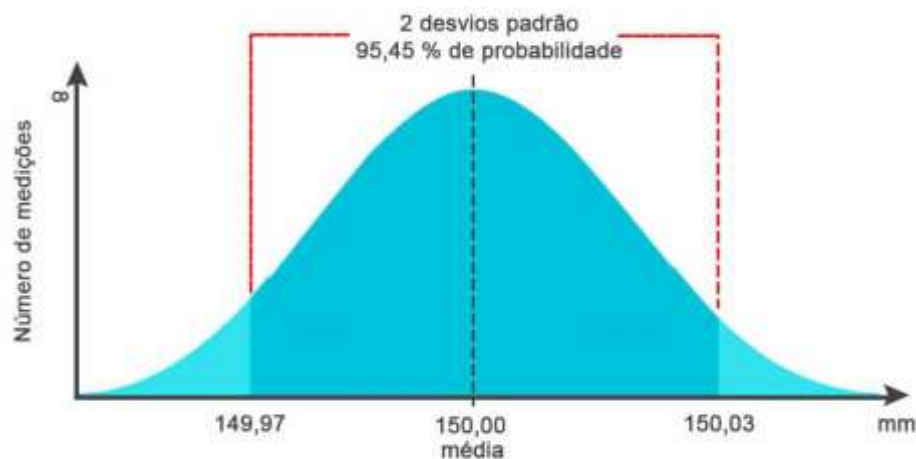


Figura 6 - Curva normal. Figura extraída de [20].

5 IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO

É natural que ao longo do uso de um equipamento ele tende a se desgastar e aumentar sua chance de erros, e quando não é dada a devida atenção a esse desgaste ao longo do tempo pode haver perdas no controle de qualidade. Caso o equipamento de medição apresente um erro que não é notado durante o seu uso, seu desempenho de funcionamento no processo da medição na empresa que o utiliza poderá ser prejudicado tendendo a afetar o processo por inteiro, por consequência, poderá afetar os produtos, decisões ou qualquer outra etapa do processo em que o equipamento venha a ser usado [21], [22].

A calibração está presente no mundo todo diariamente sem a maioria das pessoas perceberem e existem diversos exemplos de onde a calibração está presente e impacta a todos.

Como exemplo de situações diárias temos: os sistemas de qualidade envolvidos na cadeia de produção de sistemas aviônicos, medicamentos, dentre outros. No cotidiano, essas medidas e sua incerteza, podem afetar a qualidade dos valores de massa (ex. medidas em Kg) ao se pesar um produto em uma balança, por exemplo, um prato pesado em um restaurante a quilo, bem como a quantidade de combustível medida (ex. em Litros) em um posto de gasolina (o valor pago pode ser interferido diretamente). Sendo assim, é esperado que todos os sistemas que estão presentes em todos esses equipamento e instrumentos estejam devidamente calibrados para uma maior precisão na medida, prevenindo problemas futuros e durante o seu uso diário.

Além de prevenir problemas diários citados acima, a calibração de equipamento também auxilia, por exemplo, na área da saúde através da calibração de equipamentos hospitalares, inibindo riscos operacionais e aumentando a precisão do monitoramento da saúde dos pacientes [23]. Outro exemplo de uso comum na área da saúde é o uso de termômetros e de medidores de pressão, caso esses dispositivos estejam inadequados, pode haver um equívoco na tomada de decisão

da equipe médica e da análise dos pacientes. Em suma, a calibração aumenta a eficiência na utilização de equipamentos, a confiabilidade no funcionamento do sistema devidamente calibrado e também na tomada de decisões dentro dos processos em que o equipamento está presente nas empresas e fábricas.

6 INTRODUÇÃO TEÓRICA DOS FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

6.1 Carga Elétrica

O conceito de carga elétrica é definido como: “...uma propriedade elétrica das partículas atômicas que compõem a matéria, medida em coulombs (C).” [24]. Essa propriedade é essencial para a explicação dos fenômenos relacionados à eletricidade. Todos nós experimentamos o efeito da carga elétrica, um dos fenômenos relacionados que é a eletricidade estática é manifestada no nosso cotidiano, por exemplo, quando aproximamos o braço de um monitor de computador carregado, os pelos ficam esticados por conta da atração eletrostática [25].

Trazendo alguns conceitos da física, é dado que toda matéria é formada por átomos, que contém elétrons, prótons e nêutrons, também sabe-se que a carga em um elétron é negativa e equivale a $1,602 \times 10^{-19}C$, já o próton, transporta uma carga positiva de mesmo valor que o elétron.

Quanto a carga elétrica, a sua unidade de medida é *Coulomb* e em 1C de carga existem $\frac{1}{1,602 \times 10^{-19}} = 6,24 \times 10^{18}$ elétrons. Outra observação é a seguinte: “De acordo com observações experimentais, as únicas cargas que ocorrem na natureza são múltiplos inteiros da carga eletrônica e $= -1,602 \times 10^{-19}C$ ” [24]. Por último, de acordo com a lei de conservação de cargas, como as cargas só podem ser transferidas e não destruídas, a soma algébrica das cargas elétricas em um sistema é sempre a mesma.

Uma característica importante da carga elétrica é sua mobilidade, ela pode se mover de um ponto a outro e ser convertida em outra forma de energia. Por exemplo, quando um fio condutor é conectado a uma bateria, as cargas são forçadas a se moverem, as cargas positivas e negativas se movimentam em direções opostas, e essa movimentação das cargas é conhecida como corrente elétrica. Por convenção, introduzida por Benjamin Franklin (cientista norte-americano), o fluxo da corrente é o das cargas positivas, e essa convenção é adotada universalmente.

Uma definição mais formal de corrente elétrica é o fluxo de carga por unidade de tempo, medido em ampères (A). A relação entre as unidades de corrente, carga e tempo é dada pela seguinte fórmula .

$$i \triangleq \frac{dq}{dt},$$

onde i é a corrente medida em ampères (A), q é a carga e t é o tempo. A representação das medidas nesta fórmula é: 1 ampère = 1 coulomb/segundo.

Existem duas classificações de correntes, a contínua e a alternada, a contínua é aquela que se mantém constante, ou seja, não se altera com a passagem do tempo, já a alternada, varia com o tempo e comumente tem o formato de onda senoidal e esta corrente é comumente usada nas residências nos eletrodomésticos como refrigeradores. Os gráficos de representação das duas correntes estão retratados na Figura 7.

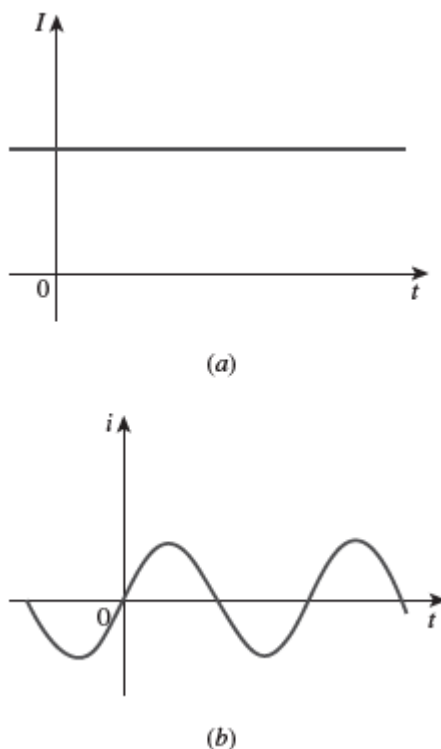


Figura 7 – Representação dos dois tipos mais comuns de correntes, Corrente Contínua (a), Corrente Alternada (b). Figura extraída de [24].

6.2 Tensão

Por definição, a tensão ou diferença de potencial é a energia necessária realizar o trabalho para transportar uma carga elétrica de um ponto a outro, ela é medida em volts em homenagem ao criador da primeira bateria elétrica, Alessandro Antonio Volta (1745 – 1827).

A fórmula para conseguir a tensão é a relação entre energia expressa em joules (J) e a carga em coulombs (C),

$$v_{ab} \triangleq \frac{dw}{dq},$$

onde w é a energia em Joules e q é a carga, ou seja, 1 volt = 1 joule/Coulomb.

A polaridade da tensão que passa por um elemento é representada pelos sinais de positivo (+) e negativo(-),

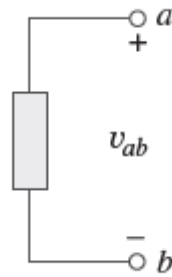


Figura 8 – Polaridade de tensão de um ponto a para um ponto b. Figura extraída de [24].

Na figura 8, é possível interpretar que o ponto a tem um potencial de volts mais alto que o ponto b, portanto, em geral pode-se inferir que,

$$v_{ab} = -v_{ba}$$

Dada esta relação entre as tensões, a figura 9 representa a mesma tensão de duas perspectivas diferentes.

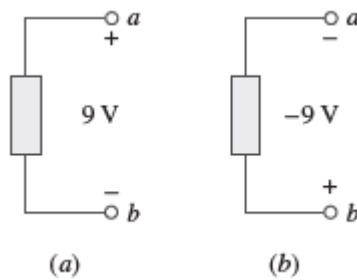


Figura 9 – Representação de uma tensão equivalente, evidenciando uma queda de tensão do ponto a para o ponto b, tanto como a elevação de tensão do ponto b para o ponto a. Figura extraída de [24].

Assim como na corrente, existe a tensão constante e a alternada, sendo a tensão constante presente nas baterias, por exemplo, e a alternada nos geradores elétricos. Também é importante notar como a tensão age sobre terminais dos elementos e entre dois pontos distintos, diferentemente da corrente, que passa através dos elementos.

6.3 Potência

Potência por definição é “a velocidade com que se consome ou se absorve energia medida em watts (W)”[24]. portanto, é possível observar que há uma passagem de tempo para conseguir o valor da potência em um sistema, sendo assim a relação entre energia e tempo é:

$$p \triangleq \frac{dw}{dt},$$

onde p é a potência medida em *Watts*, w é a energia medida em *joules* (J), e t é o tempo medido em segundos (s). A potência também é representada pelo produto da tensão pela corrente através de um elemento, sendo que matematicamente,

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = vi.$$

Quanto ao sinal negativo ou positivo da potência, é utilizado a chamada *convenção de sinal passivo*, que define uma potência positiva quando a corrente entra pelo terminal positivo do elemento e negativo quando a corrente entra pelo terminal negativo.[24].

Dada à lei de conservação de energia, a soma algébrica da potência em um circuito em um determinado instante de tempo deve ser igual à zero, ou seja, a potência total fornecida ao circuito elétrico é igual à potência total que foi absorvida,

$$\sum p = 0$$

A energia que é absorvida ou fornecida no circuito, é calculada da seguinte forma, dada a fórmula anterior de potência,

$$w = \int_{t_0}^t p \, dt = \int_{t_0}^t v i \, dt$$

E a energia por definição é *“a capacidade de realizar trabalho e é medida em joules(J)”*[24].

A energia elétrica é comumente medida nas concessionárias em *watts* por hora (Wh), onde 1 Wh equivale a 3600 J.

6.4 Elementos do Circuito Elétrico

Um circuito elétrico é simplesmente uma interconexão entre elementos e a análise de circuitos determina as tensões presentes nesses elementos ou as correntes que passam através deles. Existem elementos passivos e ativos em um circuito, onde os elementos ativos são aqueles capazes de gerar energia e os passivos não geram energia, um exemplo de elemento passivo são os resistores e os elementos ativos mais importantes são as fontes de tensão ou de corrente.

Essas fontes liberam potência para o circuito e existem dois tipos de fontes, as dependentes e as independentes. Uma fonte independente ideal *“é um elemento ativo que fornece uma tensão especificada ou corrente que é completamente independente de outros elementos do circuito”*[24].

Uma fonte de tensão ideal libera a corrente necessária para manter a tensão nos terminais do circuito e como exemplo temos as baterias que são aproximadamente fontes de tensão ideais. Por outro lado, uma fonte de corrente independente ideal libera a tensão necessária para manter a corrente no circuito. As representações das fontes de tensão e de corrente são apresentadas abaixo.

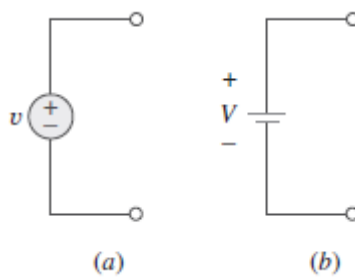


Figura 10 – Símbolo para fontes de tensão independentes. (a) tensão constante ou variável com o tempo; (b) tensão constante. Figura extraída de [24].



Figura 11 – Símbolo para fontes de corrente independente. Figura extraída de [24].

As fontes dependentes são representadas normalmente por símbolos de losango como mostrado abaixo,

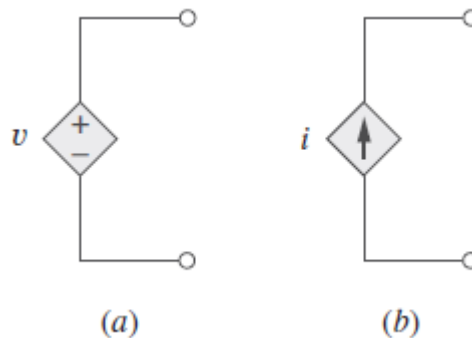


Figura 11 – Símbolo para fontes dependentes (a) fonte de tensão dependente; (b) fonte decorrente dependente. Figura extraída de [24].

e por definição, essas fontes possuem sua energia controlada por uma tensão ou uma corrente, e existem quatro tipos de fontes dependentes: fonte de tensão controlada por tensão, fonte de corrente controlada por tensão, fonte de corrente controlada por corrente, fonte de tensão controlada por corrente [24].

Um exemplo de uma fonte dependente em um circuito é dado na figura abaixo.

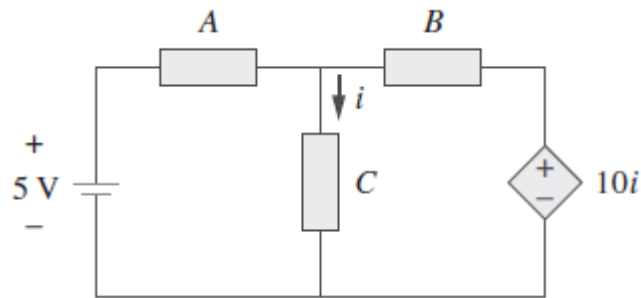


Figura 12 – A fonte de tensão na direita é controlada pela corrente do circuito. Figura extraída de [24].

Por fim, nota-se que as fontes além de fornecer potência para um circuito, podem também absorver a potência do circuito. Em uma fonte de tensão, conhecemos a tensão mas não a corrente, e na fonte de corrente é o contrário, conhecemos a corrente mas não a tensão.[24].

7 LEIS BÁSICAS

7.1 Lei de Ohm

Os materiais possuem a capacidade de resistir ao fluxo de carga elétrica, ou seja, a propriedade de resistência, que por definição é a capacidade de resistir ao fluxo de corrente, e seu cálculo é feito da seguinte forma:

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

onde ρ é a resistividade que o material possui, o A é a área de seção transversal do material e l é seu comprimento. Bons condutores como o cobre, possuem resistividade baixa e bons isolantes, como o papel, têm resistividade alta [24].

A *lei de ohm* dita a relação entre corrente e tensão para um resistor, afirmando que “a tensão v em um resistor é diretamente proporcional à corrente i através dele” [24]. E a fórmula matemática da lei de Ohm é representada por:

$$v = iR$$

Manipulando matematicamente esta lei, é possível inferir que 1 ohm equivale a 1 Volt por Ampère, ou,

$$1\Omega = 1\text{ V/A}$$

Quanto ao sinal negativo ou positivo da equação da lei de ohm, depende do sentido da corrente e da polaridade da tensão do circuito, sendo que quando a corrente flui de um potencial maior para o menor, o sinal da equação é positivo, caso contrário, se torna negativo.

O valor da resistência (R) pode variar de 0 ao infinito, dado um valor de resistência igual a 0, significa que o fluxo de corrente elétrica tende ao infinito, e o circuito elétrico correspondente é chamado de curto-circuito. Ao contrário do caso anterior, quando a resistência tende ao infinito, o circuito é conhecido como circuito aberto, onde a corrente fica igual a 0, ou seja, não há fluxo de corrente elétrica

quando a resistência é máxima. A figura abaixo ilustra os dois exemplos de circuitos estudados nessa seção.

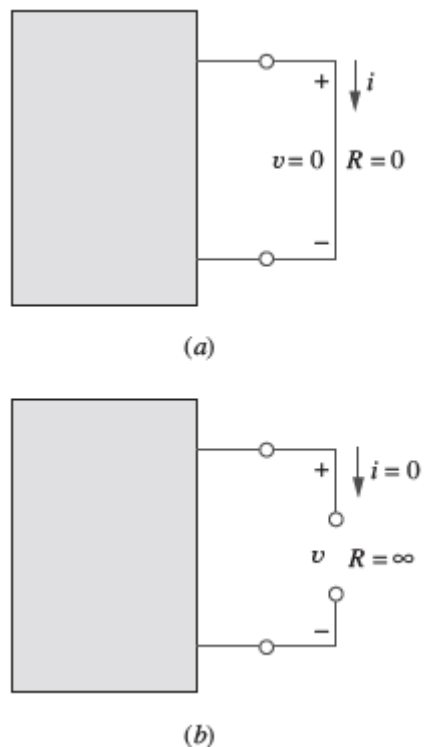


Figura 13 – Curto-circuito (a) e circuito aberto (b). Figura extraída de [24].

Existem dois tipos de resistores, os fixos e os variáveis. Os fixos mantêm a resistência constante, já os variáveis não. A maioria dos resistores é do tipo fixo, e os tipos mais comuns de resistores fixos são o de fio e os compostos, os compostos são usados quando é necessária uma resistência alta [24].

Dentre os resistores variáveis, o tipo mais comum é o potenciômetro, que é um elemento com três terminais com contato deslizante, ou seja, deslizando-se o contato, a resistência varia, e assim como os fixos, eles podem ser de fio ou compostos. As figuras abaixo ilustram tais resistores relatados acima.

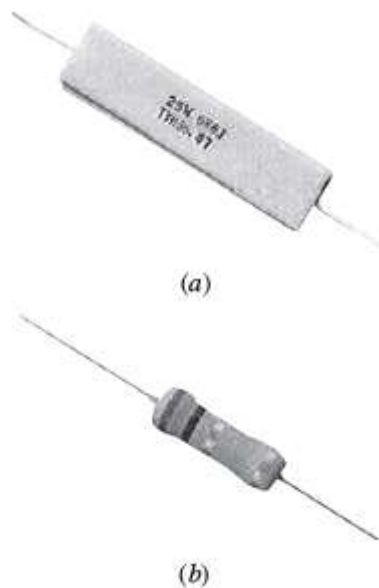


Figura 14 – Resistores fixos: de fio (a); de filme de carbono (b). Figura extraída de [24].



Figura 15 – Resistores variáveis: composto (a); potenciômetro com contato deslizante (b). Figura extraída de [24].

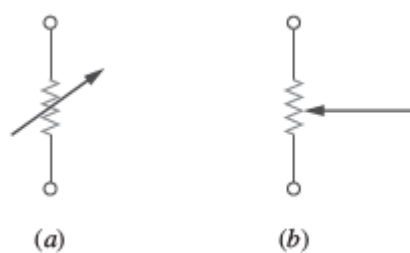


Figura 16 – Símbolo para resistores variáveis: geral (a); potenciômetro (b). Figura extraída de [24].

Quanto a lei de ohm mencionada anteriormente, existem resistores que não obedecem à essa lei, esses são chamados de resistores *não lineares*, e os resistores que obedecem à lei são chamados de lineares. Os resistores lineares têm uma resistência constante e uma curva característica que representa uma linha reta que passa pela origem em um gráfico entre tensão e corrente. Já os não lineares, não possuem resistência constante, ou seja, sua resistência varia de acordo com a corrente [24].

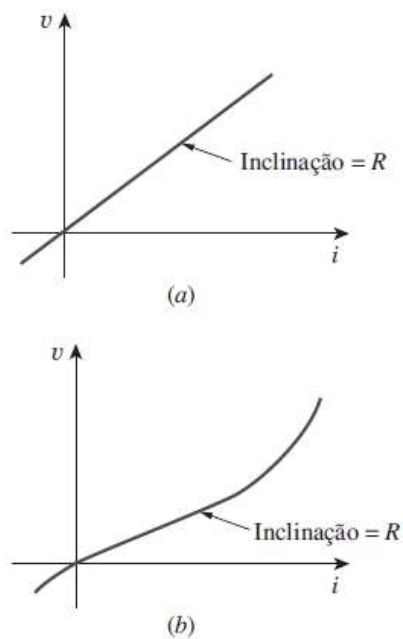


Figura 17 – Curva característica entre corrente e tensão de: resistor linear (a) e resistor não linear (b).
Figura extraída de [24].

Condutância é um conceito que é útil para analisar circuitos, matematicamente e por definição ele é o inverso da resistência, ou seja, ele mede a capacidade de um elemento de conduzir corrente elétrica, ao invés de resistir ao fluxo, que é o caso da resistência [24]. Condutância é medida em mho (ohm ao contrário) ou Siemens (S), nas fórmulas é representado por G , e sua expressão matemática é dada por:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{v}.$$

Quanto às unidades, pode-se dizer que

$$1 \text{ S} = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}}.$$

O valor de resistência pode ser representado das duas maneiras, tanto em ohms quanto Siemens, por exemplo, 10 ohms equivalem a 0,1 S, essa relação é expressa na equação seguinte:

$$i = Gv$$

A potência dissipada por um resistor pode ser expressa em R ou em G :

$$p = vi = i^2 R = \frac{v^2}{R}$$

Ou

$$p = vi = v^2 G = \frac{i^2}{G}$$

7.2 Nós, ramos e laços

Um ramo em um circuito é qualquer elemento que contém dois terminais, como um resistor, e um nó é o ponto de conexão entre esses elementos ou ramos.

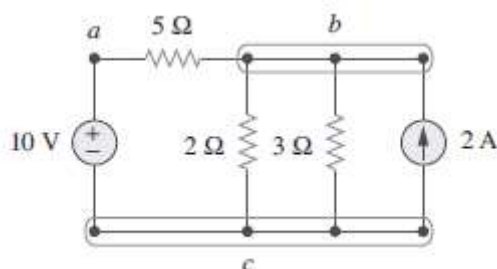


Figura 18 – Demonstração de nós, ramos e laços em um circuito. Figura extraída de [24].

Na figura 18, vemos os nós representados por pontos, os ramos pelos elementos específicos do circuito como a fonte de tensão de 10 V, e as letras *b* e *c* representam nós únicos, pois como não tem nenhum elemento nesses trechos do fio de conexão, isso constitui um único nó. Observando a figura 18 podemos redesenhar o circuito com três nós e o circuito continuará sendo o mesmo, não perdendo suas características essenciais.

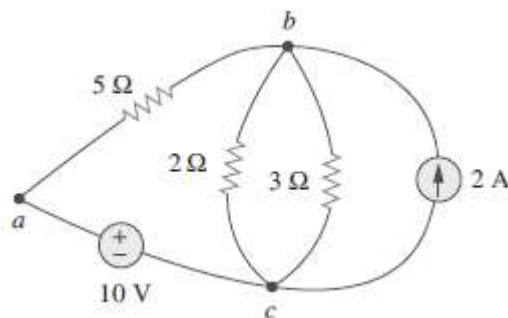


Figura 19 – Circuito da Figura 18 redesenhado com três nós. Figura extraída de [24].

Através do circuito redesenhado da Figura 19, é possível enxergar mais facilmente o conceito de laço aplicado nele. “Laço é um caminho fechado formado iniciando-se em um nó, passando por uma série de nós e retornando ao nó de partida sem passar por qualquer outro mais de uma vez [24]”, um exemplo de laço neste circuito é o *abca* com o resistor de 3 ohms. Um laço é classificado como independente quando ele contém pelo menos um ramo que não faz parte de nenhum outro laço independente, e esses também, resultam em conjuntos de equações diferentes [24].

O teorema fundamental pode ser visto pela fórmula

$$b = l + n - 1,$$

onde *b* são os ramos, *l* o número de laços independentes e *n* o número de nós.

Na análise de circuitos é importante entender sobre nós, ramos e laços para compreender os conceitos de elementos em *série* e em *paralelo* nos circuitos.

“Dois ou mais elementos estão em série se eles compartilharem exclusivamente um único nó e, conseqüentemente, transportarem a mesma corrente. Dois ou mais elementos estão em paralelo se eles estiverem conectados

aos mesmos dois nós e, conseqüentemente, tiverem a mesma tensão entre eles.”[24]. Um exemplo de elementos em série conforme a Figura 18, são a fonte de tensão e o resistor de 5 ohms, que têm a mesma corrente passando por eles, e um exemplo de elementos em paralelo são os resistores de 2 ohms e 3 ohms, que se conectam nos nós *b* e *c*, portanto, têm a mesma tensão entre os elementos [24].

7.3 Leis de Kirchhoff

A lei de Kirchhoff para corrente (LKC) diz que: “*soma algébrica das correntes que entram em um nó (ou um limite fechado) é zero*”[24]. E sua fórmula implica que:

$$\sum_{n=1}^N i_n = 0,$$

onde *N* é o número de ramos que estão conectados a um nó, *i_n* implica nesta soma das correntes, ou seja, é a última corrente calculada que entra ou sai do nó. Dada esta lei, as correntes que entram em um nó são positivas e as que saem do nó são negativas.

Uma leitura ou expressão alternativa da LKC é que “*A soma das correntes que entram em um nó é igual à soma das correntes que saem desse nó*”[24].

Já a lei de Kirchhoff para tensão (LKT) dita que “*a soma algébrica de todas as tensões em torno de um caminho fechado (ou laço) é zero.*” Podemos interpretar também que a soma das quedas de tensão é igual à soma das elevações de tensão, como a LKC, mas aplicada às tensões. E sua fórmula representativa é similar à LKC e é representada por:

$$\sum_{m=1}^M v_m = 0,$$

onde o *M* é o número de tensões no laço e *v_m* é a última tensão a ser calculada no laço.

7.4 Resistores em série e divisão de tensão

É comum a associação de resistores em série e em paralelo nos circuitos, portanto entender essas associações é de extrema importância para a análise de circuitos, considerar dois resistores por vez facilita o processo de qualquer um dos dois tipos de associações.

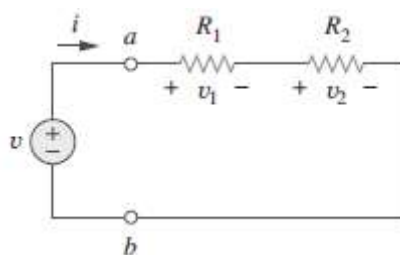


Figura 20 – Exemplo de um circuito com dois resistores associados em série. Figura extraída de [24].

Precisamos aplicar a lei de Ohm nos dois resistores, a LKT no laço único do circuito, e combinar as equações e manipulá-las para obter o valor desejado.

Os dois resistores podem ser substituídos por um só resistor equivalente, de acordo com a lei de Ohm, a fórmula pode ser escrita da seguinte maneira:

$$v = iR_{eq}$$

Ou seja, isto implica que a resistência equivalente é a soma das resistências individuais de cada um dos resistores quando conectados em série [24], neste caso da Figura 20:

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

Combinando as fórmulas de aplicação da lei de Ohm no circuito e a aplicação da Lei de Kirchhoff para tensão, obtemos a seguinte fórmula:

$$v = v_1 + v_2 = i(R_1 + R_2)$$

Que pode ser simplificada para:

$$i = \frac{v}{R_1 + R_2}$$

O chamado *princípio da divisão de tensão* diz que quanto maior for a resistência, maior a queda de tensão e o circuito presente na Figura 20 possui o nome de *divisor de tensão* [24], portanto, matematicamente podemos substituir a fórmula de corrente na lei de Ohm aplicada, para conseguir determinar a tensão de cada resistor.

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v$$

“Em geral, se um divisor de tensão tiver N resistores ($R_1, R_2, \dots, R_n$) em série com a tensão de entrada v , o n -ésimo resistor R_n terá uma queda de tensão de”[24]:

$$v_n = \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} v$$

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fluke, "About-Calibration: Fluke Calibration," 2022.
- [2] BIPM, "BIPM - Home," 2022.
- [3] Tobias Schroeder, "A diferença entre calibração e validação de equipamentos - Softexpert(Blog)," 2022.
- [4] Tecnomeca, "Conheça os tipos de calibração dos equipamentos de medição," 2022.
- [5] Fluke, "Calibração de pressão." <https://br.flukecal.com/products/pressure-calibration> (accessed Nov. 07, 2022).
- [6] Wika, "Calibração de temperatura - Wika Brasil," 2022.
- [7] Fluke, "Calibração de Temperatura - Fluke," 2022.
- [8] Prolab, "Calibração de Pipetas - Prolab," 2022.
- [9] Pharma, "Calibração de Volume," 2022.
- [10] TÉCNICA, "Calibração de vidrarias." <https://www.tecnicabalancas.com.br/calibracao-vidrarias> (accessed Nov. 07, 2022).
- [11] Fluke, "Calibração elétrica," 2022.
- [12] *Calibration: Philosophy in Practice*, 2 Ed. Everett, WA: Fluke Corporation, 1994.
- [13] Qualimetro, "Calibração de torquímetro." <https://www.qualimetrop.com.br/calibracao-torquimetro> (accessed Nov. 07, 2022).
- [14] INPE, "INPE - Metrologia Mecânica," 2022.
- [15] Wikipedia, "Quantum Hall Effect." https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_Hall_effect#Applications (accessed Nov. 07, 2022).
- [16] JCGM, "GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," 2008, Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>
- [17] INMETRO, *Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*, 1 ed., no. 1ª Edição. INMETRO, 2012.
- [18] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of measurement data-An introduction to the 'Guide to the expression of uncertainty in measurement' and related documents Évaluation des données de mesure-Une introduction au 'Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure' et aux documents," 2009.
- [19] Qualyteam, "O que é Incerteza do Tipo A e Incerteza do Tipo B?," 2019.

<https://suporte.qualyteam.com.br/pt-BR/support/solutions/articles/35000072049-o-que-é-incerteza-do-tipo-a-e-incerteza-do-tipo-b-> (accessed Nov. 21, 2022).

- [20] M. J. Martins, “O que é a Incerteza de Medição no Certificado de Calibração?,” 2022.
- [21] Certificado (Cursos Online), “A importância da metrologia industrial,” 2022.
- [22] Bruno Carvalho, “Compreenda a calibração e sua importância,” Feb. 26, 2021. <https://www.mercatoautomacao.com.br/blogs/novidades/compreenda-a-calibracao-e-sua-importancia> (accessed Nov. 10, 2022).
- [23] Previsa, “A importância de realizar a calibração de equipamentos hospitalares com frequência,” Feb. 26, 2020. <https://www.previsa.com.br/a-importancia-de-realizar-a-calibracao-de-equipamentos-hospitalares-com-frequencia/> (accessed Nov. 10, 2022).
- [24] M. N. O. S. Charles K. Alexander, *Fundamentos de Circuitos Elétricos-Bookman (2013)*, 5th ed. 2013.
- [25] G. L. Kítor, “Eletricidade Estática,” 2022. <https://www.infoescola.com/fisica/eletricidade-estatica/>