

# Circuitos Eletrônicos

## Aula 01 - Introdução à Eletrônica

# Apresentação

---

Nesta aula, teremos nosso primeiro contato com a incrível área chamada eletrônica. Então, nada mais interessante do que começarmos conversando um pouco sobre a origem dessa fascinante área, que possibilitou a criação do atual mundo tecnológico no qual vivemos. À medida que conhecermos os principais acontecimentos que alavancaram a evolução da eletrônica, seremos capazes de defini-la e conseguiremos refletir sobre sua importância em inúmeras aplicações.

Em seguida, iremos revisar alguns conceitos de circuitos elétricos que serão fundamentais para facilitar o entendimento da eletrônica. Em geral, iremos focar em conceitos básicos e leis que nos ajudarão a analisar circuitos visando determinar uma corrente específica, tensão e potência em qualquer parte do circuito.

## Objetivos

Ao final desta aula, você será capaz de:

- Conhecer a origem da eletrônica através das diversas descobertas e criações realizadas nesta área.
- Conhecer noções básicas sobre eletrônica e conseguir defini-la.
- Refletir sobre a importância da eletrônica.
- Fortalecer os conhecimentos de circuitos elétricos, através de uma revisão.
- Revisar conceitos de elementos de circuitos elétricos, como capacitores, indutores e resistores, além de relembrar as leis dos nós e a lei das malhas.

# Introdução

---

Provavelmente, vários de vocês nunca chegaram a utilizar ou, ao menos, ver pessoalmente alguns dos celulares e computadores pessoais ilustrados na figura 1. De fato, é inquestionável que a evolução destes dispositivos é extraordinária, uma vez que algumas de suas características avançaram significativamente nos últimos anos, tais como poder de processamento, peso, tamanho, autonomia de bateria, resolução etc.

Porém, gostaria de chamar a sua atenção para duas características muito impactantes: o poder de processamento e o tamanho. Você já parou para se perguntar como alguns modelos de smartphone possuem tantas funcionalidades e conseguem ser tão pequenos e atualmente tão finos? Ou melhor, como os computadores pessoais ficaram tão acessíveis e portáteis? (E olha que na figura 1 não chegamos a colocar os notebooks ultrafinos e os smartphones top de linha, para a comparação não ficar injusta =D).

Então, imaginou que essas características se devem aos inúmeros avanços que ocorreram no campo da eletrônica? Se sim, você está certo! Mas, sabe onde e como começou essa evolução e qual foi o ponto de partida para a eletrônica que conhecemos hoje?

Não? Então, preste atenção nesta curiosa comparação!

**Figura 01** - Evolução dos computadores pessoais e aparelhos celulares.

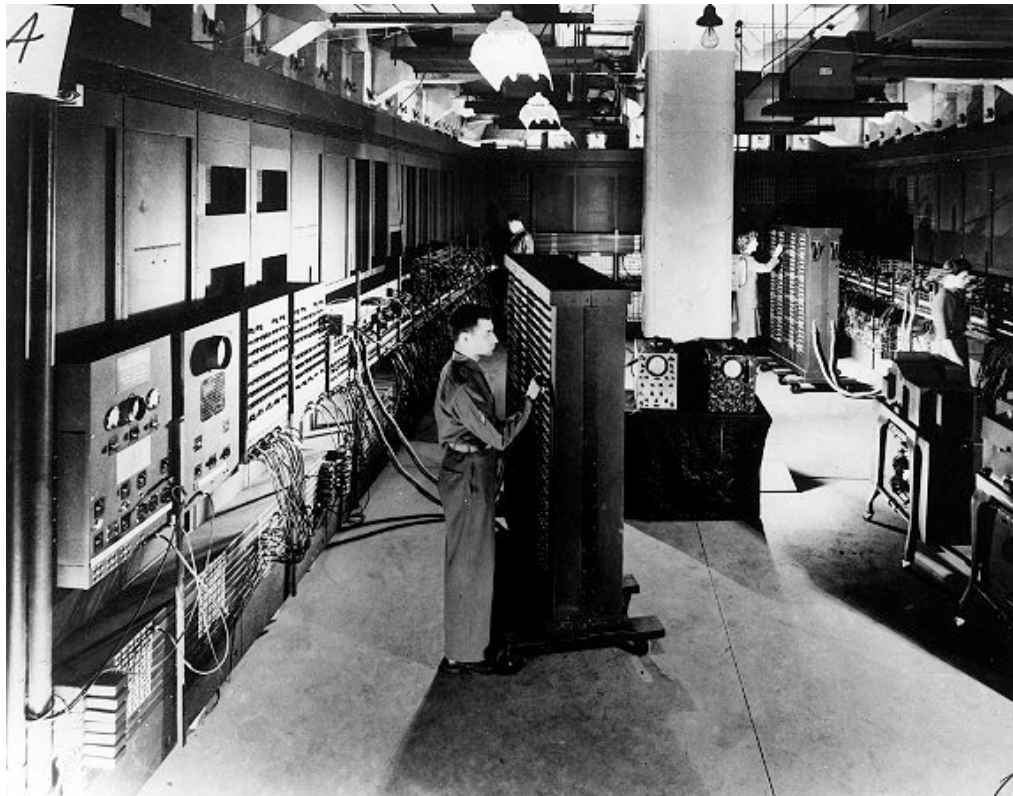


Fonte: <http://classes.dma.ucla.edu/Fall13/161/projects/kristen-sadakane/5-style/html/images/evolution.jpg>. Acesso em: 15 jan. 2016.

## ENIAC

Com certeza, você já deve ter visto a figura 2 em algum momento da sua vida. Se nunca viu, esta figura ilustra O PRIMEIRO computador digital eletrônico, o ENIAC (*Electronic Numeral Integrator and Calculator*). O início do seu desenvolvimento se deu em 1943, durante a segunda guerra mundial, pelos seus criadores John P. Ecker e John W. Mauchly, dois cientistas norte-americanos da *Electronic Control Company*. A ideia principal era criar uma máquina para fins militares, capaz de realizar cálculos balísticos e quebrar códigos de comunicação. Porém, o ENIAC só entrou em operação em 1946, após o final da guerra, e foi utilizado durante a guerra fria na criação da bomba de hidrogênio.

**Figura 02** - O primeiro computador eletrônico - ENIAC.



**Fonte:** <http://s7.computerhistory.org/is/image/CHM/102652279-03-01?re=medium>. Acesso em: 15 jan. 2016.

Não se engane, o ENIAC não se resume ao equipamento no qual o operador está manuseando. Esse computador media 30 m de comprimento, 2,4 m de altura, ocupava uma área de 170 m<sup>2</sup> e pesava cerca de 30 toneladas. Você deve ter notado pela figura que o ENIAC não era um computador com dimensões consideradas normais para a atualidade, ele era tão grande que teve de ser disposto em formato de “U” para que os operadores conseguissem programá-lo. Ainda existia um agravante, seu consumo de potência chegava a incríveis 174 kW e, para se ter uma dimensão, atualmente um computador típico consome cerca de 120 W.

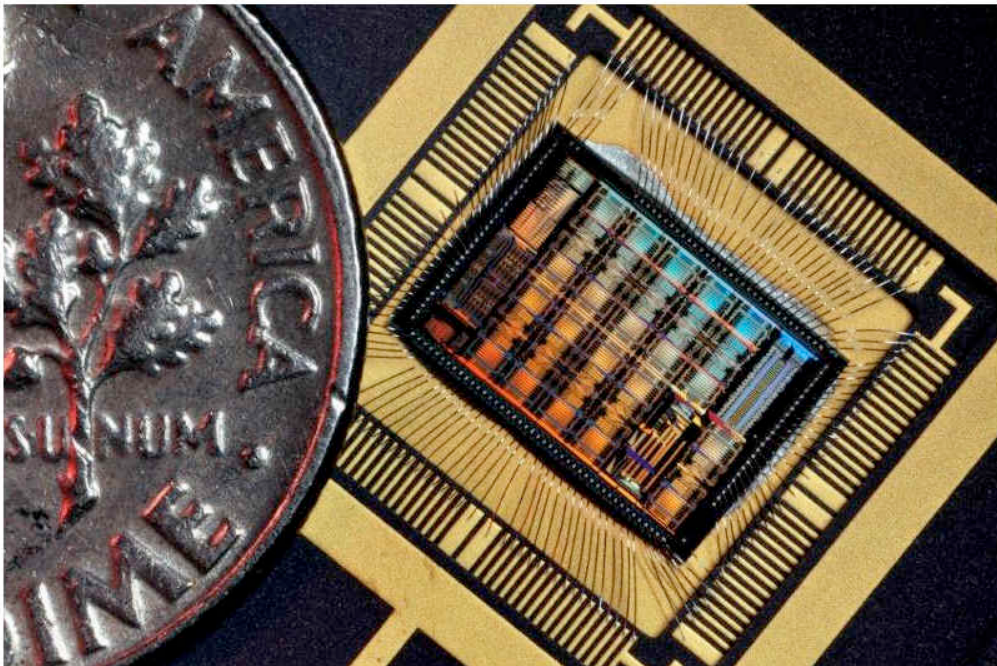
## Curiosidade

Quer saber como medir o consumo de potência do seu computador? Pesquise sobre o programa gratuito Joulemeter (link para download <http://www.baixaki.com.br/download/joulemeter.htm>).

## ENIAC em chip

Agora que você conhece o primeiro computador eletrônico, você consegue responder qual a semelhança entre as figuras 2 e 3?

**Figura 03** - ENIAC em chip.



Packaged Eniac-on-a-Chip (photo by Felice Macera).

Trustees University of Pennsylvania. All rights reserved, 1998

**Fonte:** <http://www.seas.upenn.edu/~jan/pictures/eniacpictures/EniacChipPackaged.jpg>. Acesso em: 15 jan. 2016.

Acertou se você falou que é o mesmo computador. Pois é, para comemorar os 50 anos da criação do ENIAC, um grupo de estudantes de engenharia elétrica da universidade da Pennsylvania projetaram o ENIAC em chip. Eles implementaram todas as funcionalidades desse computador em um único circuito integrado de 7.44 mm por 5.29 mm, utilizando uma tecnologia CMOS de 0.5  $\mu\text{m}$ .

O objetivo era recriar o ENIAC respeitando suas características originais o máximo possível, por exemplo, tentando manter sua arquitetura original e as funcionalidades dos circuitos envolvidos. Para isso, com a utilização de uma tecnologia mais moderna (CMOS 0.5  $\mu\text{m}$ ), algumas adaptações tiveram que ocorrer:



foram utilizados 250 mil transistores para modelar as 18 mil válvulas a vácuo e os 70 mil resistores do projeto original do ENIAC, assim como as chaves mecânicas substituídas por chaves eletrônicas.

A tabela abaixo mostra uma pequena comparação entre as principais características do ENIAC original e o ENIAC em chip. A diferença de potência e tamanho dos dois projetos é impressionante, o ENIAC em chip dissipa meros 0.5 W, o que chega a ser considerado nada quando comparado com 174 kW do ENIAC original. Se levarmos em consideração a dimensão, ele saiu de uma área de aproximadamente 170 m<sup>2</sup> para uma área menor que uma moeda, 39.36 mm<sup>2</sup>.

Componente	ENIAC	ENIAC em chip
Válvulas a Vácuo	18.000	Não tem
Transistores	Não tem	250.000
Resistores	70.000	Não tem
Capacitores	10.000	Não tem
Frequência do Clock	100 kHz	20 MHz
Potência	174 kW	0.5 W
Tamanho	2.4m x 0.9m x 30m ocupando ~170m <sup>2</sup>	7.44 x 5.29 mm (39.36 mm <sup>2</sup> )

**Tabela 1** - Comparação entre ENIAC e ENIAC em chip

# Atividade 01

---

1. Qual o componente eletrônico básico utilizado na construção do ENIAC original?
2. De acordo com a comparação feita anteriormente, qual o componente eletrônico que permitiu tal evolução?
3. Pesquise os tipos desse componente eletrônico e descubra com qual material ele é fabricado.

## Um pouco da Evolução

---

Você deve imaginar que os computadores que utilizavam a tecnologia do ENIAC original não deviam apresentar valores acessíveis e, de fato, para manter essas máquinas gigantes, muito dinheiro era gasto devido aos constantes custos com manutenção. Com isso, criou-se a necessidade de substituir as **válvulas a vácuo**, principal componente eletrônico da época, por uma tecnologia que reduzisse a área de ocupação e principalmente que dissipasse menos potência, evitando assim o superaquecimento.

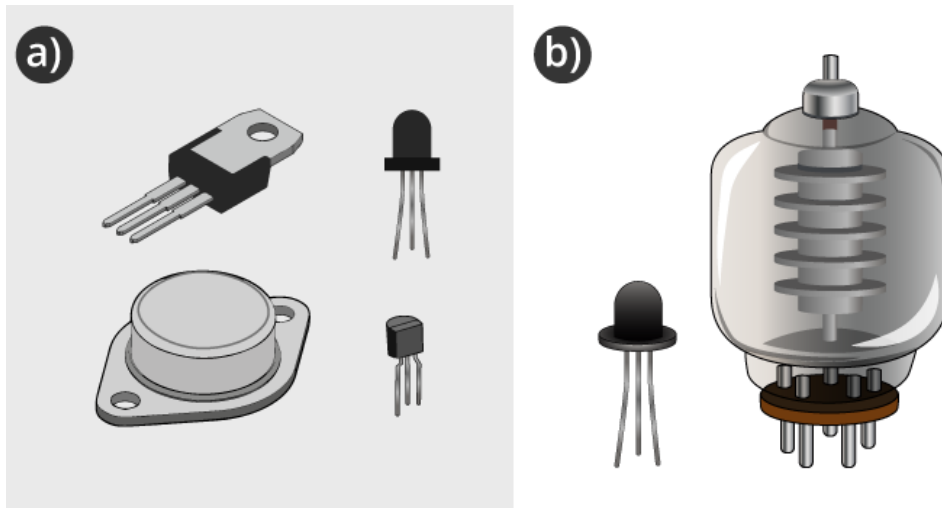
Foi então que, em 1947, John Bardeen e Walter Brattain inventaram, nos laboratórios da empresa Bell Telephone, o principal dispositivo eletrônico responsável pela evolução da eletrônica na década de 1960, **O transistor**, ilustrado na figura 4a. O transistor é o principal componente eletrônico em praticamente todos os aparelhos eletrônicos modernos, sendo considerado por muitos pesquisadores uma das maiores descobertas do século 20, tornando possível a evolução dos computadores e dos equipamentos eletrônicos. Esses componentes foram criados a partir de materiais semicondutores, chamados de germânio e silício, sendo este último o mais utilizado e extraído tanto da areia quanto do quartzo, por exemplo.



## Você Sabia?

O termo “transistor” provém do inglês **transfer resistor** (resistor de transferência). Esse era o termo em inglês utilizado pelos seus inventores.

**Figura 04** - Transistores e Válvulas. **a)** Comparação entre alguns tipos de transistores. **b)** Comparação entre um transistor e uma válvula.



**Fonte:** Figuras Adaptadas de: **a)** <http://www.at-mix.de/images/glossar/transistor.jpg>. **b)** <http://thumbs.dreamstime.com/z/transistor-next-to-vacuum-tube-17665976.jpg>. Acesso em: 15 jan. 2016.

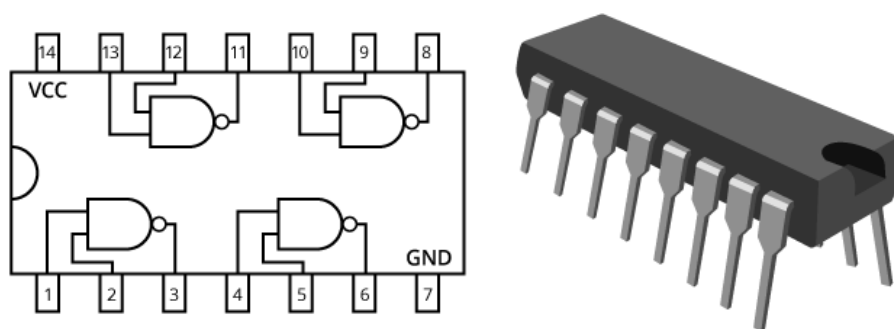
Como falado anteriormente, a inovação no campo da eletrônica possibilitou a evolução de várias outras áreas, principalmente na área de desenvolvimento dos computadores eletrônicos. Para compreendermos melhor a importância de cada nova tecnologia, vamos então associar o avanço da eletrônica à evolução dos computadores através de suas gerações.

**Primeira geração:** essa geração é caracterizada pela utilização da **válvula a vácuo**, como sendo o principal componente eletrônico na construção dos computadores eletrônicos. Devido às características desse dispositivo, os computadores dissipavam muita potência, além de serem muito pesados e ocuparem um grande espaço físico. Um exemplo é o ENIAC (1946), que você já conhece, mas existem outros como Mark I (1943), UNIVAC I (1951), IBM 650 (1954).

**Segunda geração:** com o surgimento do **transistor**, as válvulas a vácuo foram sendo substituídas e o transistor passou a ser o grande responsável pela redução significativa de tamanho e peso dos computadores, sem mencionar no aumento do poder de processamento devido à possibilidade de utilizar muito mais recursos.

**Terceira geração:** essa geração é marcada pela criação dos **circuitos integrados** (CI) em 1958, por Jack Kilby. Esse componente é caracterizado por incorporar inúmeros circuitos, que até então eram implementados separadamente, em uma única pastilha de semicondutor, ou seja, em um único encapsulamento, como ilustrado na figura 5, onde temos quatro portas NANDs em um único CI. Com esse advento os computadores passaram a ser amplamente utilizados em outras áreas e não apenas por grandes corporações, como ocorria nas gerações anteriores.

**Figura 05** - Integração de quatro portas nands. Circuito Integrado 7400N. Datasheet.



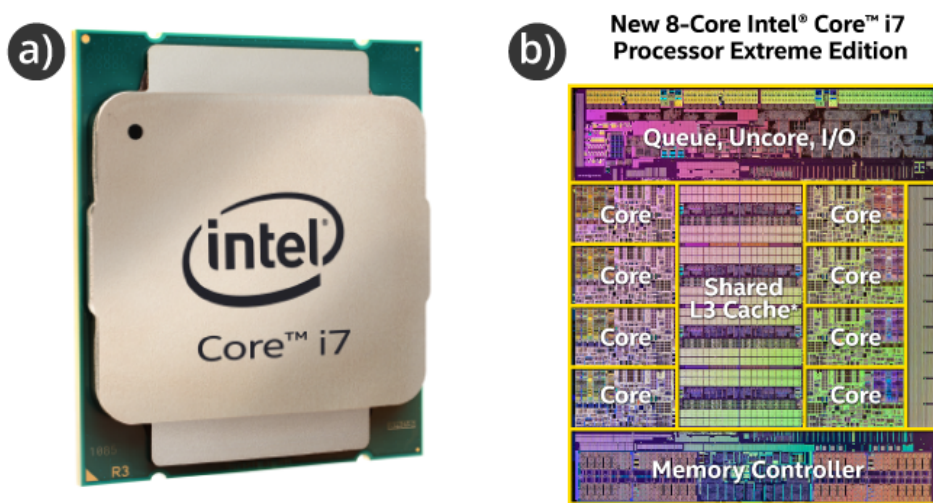
**Fonte:** <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50886/FAIRCHILD/DM7400N.html>.

Acesso em: 15 jan. 2016.

**Quarta geração:** nessa geração surgem os microprocessadores, dando início ao desenvolvimento dos computadores pessoais. Tal feito só foi possível devido ao surgimento da técnica de fabricação de circuitos integrados em **LSI** (Large Scale Integration) e em **VLSI** (Very Large Scale Integration). Nessa técnica estamos falando de chips com mais de 100 mil portas lógicas, possibilitando a criação de computadores para utilização pessoal e também para lazer. O primeiro microprocessador, o Intel 4004, criado no ano de 1971 pela Intel, e os computadores pessoais (Apple) são da década de 1980.

Através dessas gerações podemos perceber que a eletrônica está sempre buscando otimizar a área ocupada pelos circuitos eletrônicos, especificamente, diminuindo as dimensões dos transistores em um circuito integrado. Essa característica traz como consequência o aumento no poder de processamento desses circuitos, bem como uma redução significativa da energia dissipada. Nos últimos anos vemos processadores sendo lançados no mercado com tecnologia que fazem uso de dispositivos eletrônicos com dimensões extremamente pequenas, por exemplo, 22 nm (nanômetros) em 2012, ilustrado na figura 6, e 14 nm (nm é equivalente a  $10^{-9}$  m), ambos na Intel.

**Figura 06** - Processador i7 da Intel fabricado com tecnologia de 22 nm. **a)** Processador encapsulado. **b)** Layout do processador.



Fonte: a) [http://images.anandtech.com/doci/8426/Caro\\_678x452.png](http://images.anandtech.com/doci/8426/Caro_678x452.png).  
b) <http://images.anandtech.com/doci/8426/HSW-E%20Die%20Mapping%20Hi-Res.jpg>. Acesso em: 15 jan. 2016.

Interessante!

Você entende o que é uma tecnologia de 14 nm, por exemplo?

Já parou para pensar se há um limite para o avanço dessas tecnologias, ou seja, até que ponto as empresas podem diminuir a tecnologia de fabricação de circuito integrado?

Se sua resposta foi não para as duas perguntas, temos um post bastante interessante para você ler: "What do IBM's 7 nm transistor mean?".

<http://nanoscale.blogspot.com.br/2015/07/what-do-ibms-7-nm-transistors-mean.html>.

# Curiosidades

## “História do transistor”

Já falamos que o transistor é o principal componente para os circuitos eletrônicos. Então, conheça um pouco mais sobre a incrível história desse componente.

<https://www.youtube.com/watch?v=Xsv03w9YJqI>.

## “Processo de fabricação de um processador”

Microprocessador! Sabemos que ele é o cérebro dos nossos computadores, mas alguma vez você já se perguntou como ele é feito? Se sim, este vídeo irá ajudá-lo a entender melhor como esse dispositivo mágico é fabricado. Com certeza ficará mais curioso para saber como funciona cada etapa nesse processo de fabricação. Então, não se limite a este vídeo, busque conhecimento!

Observação: na descrição do vídeo é apresentada, de forma geral, cada etapa da fabricação.

<https://www.youtube.com/watch?v=Kp8PUDsPm1o>.

## Atividade 02

---

1. Neste material foram apresentadas as quatro gerações que descrevem a evolução dos computadores. Pesquise se há mais gerações. Se sim, comente sobre quais características da eletrônica marcaram essas gerações.
2. Pesquise qual a tecnologia de fabricação de processadores mais avançada da atualidade e descubra qual empresa detém essa tecnologia.

# Fundamentos e Definição da Eletrônica

---

Até agora vimos a evolução da eletrônica com o passar dos anos através das gerações dos computadores. Comentamos também sobre o uso das válvulas e transistores. Desse modo, por que os transistores são tão importantes para a eletrônica? Para entendermos melhor vamos relembrar alguns conceitos que estudamos em disciplinas básicas de eletricidade. **Condutividade Elétrica**, você lembra o que é? Não?

Como foi estudado em disciplinas anteriores de eletricidade, o fluxo ordenado dos elétrons é chamado corrente elétrica. Ele é resultado de uma diferença de potencial aplicada a uma resistência. Sendo assim, um determinado material sólido, pelas suas características próprias, pode favorecer o surgimento de elétrons livres, basta que ele tenha, em suas últimas camadas, elétrons que estejam menos fortemente ligados ao núcleo.

Esses materiais que contêm elétrons livres favorecem as correntes elétricas, ou seja, nesses materiais as cargas elétricas se deslocam de maneira relativamente livre. Os metais como o alumínio, a prata e o ouro são alguns exemplos desses chamados **condutores** elétricos.

Existem também os materiais que, ao contrário dos condutores, dificultam a passagem de corrente elétrica. A explicação para isso é a mesma: a natureza do material, ou seja, sua estrutura atômica e como ele faz as ligações entre as suas moléculas. Esse tipo de material é chamado **isolante**.

Há também um tipo de material intermediário, cuja condutividade está entre os isolantes e os condutores. São os chamados Semicondutores. Os semicondutores são, quando puros e cristalinos, a temperaturas muito baixas, excelentes isolantes. Entretanto, se aumentarmos a temperatura de isolantes, os semicondutores passam a facilitar a passagem da corrente elétrica.

Em resumo, os transistores são dispositivos eletrônicos compostos por materiais semicondutores, isolantes e condutores elétricos que controlam o fluxo de elétrons (corrente elétrica) através dos seus terminais. Com isso, podemos dizer que a

eletrônica é um campo da ciência que estuda os dispositivos eletrônicos e suas aplicações, assim como utiliza as variações de grandezas elétricas para captar, transmitir e processar informações.

## Importância da Eletrônica e suas Aplicações

A importância da eletrônica é inquestionável, a praticidade que temos em nosso cotidiano, com as mais variadas tecnologias, se deve à eletrônica e à sua evolução ao longo do tempo. Além de possibilitar a evolução de outras áreas, que fazem parte das nossas vidas como um todo. Você conseguiria imaginar o mundo sem a eletrônica? Sem a tecnologia?

“É inegável a importância e a influência da Eletrônica no modo de vida da nossa sociedade contemporânea. A grande revolução que se vive no mundo, motivada pelo avanço das tecnologias de informação e telecomunicações, bem como da automação dos mais variados tipos de processos, se deve, fundamentalmente, ao advento da invenção do transistor e da ciência aplicada gerada a partir de então - a eletrônica.” (COELHO, 2013, p. 33)

“Por estar presente nas mais diversas áreas de atuação humana, servindo como suporte tecnológico para o desenvolvimento de outras áreas de conhecimento, a eletrônica se qualifica como uma das conquistas mais importantes do século XX, dando origem ao estilo de vida que hoje se chama de 'Sociedade do Conhecimento.’” (COELHO, 2013, p.33).

A figura 7 ilustra algumas áreas nas quais a eletrônica está presente. No entanto, seríamos redundantes caso listássemos todos os avanços obtidos nas áreas das comunicações, tecnologia da informação, de transportes (aéreos, navais, fluviais e rodoferroviários), ciências biomédicas, instrumentação eletrônica, prospecção e minérios, indústria de transformação, entre outros seguimentos da atividade humana, devido ao desenvolvimento da Eletrônica.



**Figura 07** - Algumas aplicações da eletrônica.



## O Futuro

Você já deve ter ouvido falar de Gordon Moore, ele foi um dos três fundadores da Intel e um dos inventores do primeiro microprocessador. Gordon Moore foi o responsável por formular a tão conhecida “Lei de Moore”, em 1964:

*O poder e a complexidade de um chip poderiam dobrar a cada dezoito meses, com diminuição proporcional de seus custos.*

Podemos observar que essa lei vem sendo confirmada com o passar dos anos, tanto o tempo associado quanto os custos dos processadores tendem a se reduzirem. Porém, no ano de 2015, a Intel anunciou que adiaria em um ano o lançamento dos chips com arquitetura de 10 nm. Essa arquitetura deveria ser lançada em 2016, mas será substituída por outra que utiliza tecnologia de 14 nm. Com isso, apenas em 2017 a tecnologia de 10 nm será adotada, fazendo com que as transições de tecnologia ocorram a cada dois anos e meio. Isso seria uma quebra da Lei de Moore? Você acredita que a Lei de Moore não é mais válida?

O fato é que a eletrônica não para de evoluir. E o que você está fazendo para acompanhar essa evolução? O FUTURO ESTÁ ACONTECENDO AGORA, HOJE, ENQUANTO VOCE ESTÁ LENDO ESTE MATERIAL.

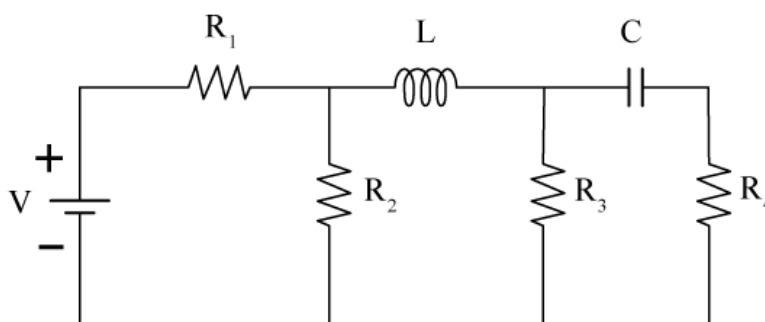
# Conceitos de Circuitos Elétricos

---

Agora que já conhece um pouco mais sobre a eletrônica, incluindo sua evolução e sua situação nos dias atuais, vamos fazer a nossa parte, que é estudar e aprender sobre seus fundamentos e aplicações. Portanto, mãos à obra.

Se você olhar para a figura 8, apesar de não conseguir analisar esse circuito ainda, você deve, além de reconhecer os elementos presentes nesse circuito, saber o princípio de funcionamento de cada um deles. Você não lembra? Então vamos revisar esses conceitos juntos.

**Figura 08** - Circuito elétrico com capacitor, indutor e resistores.



## A lei de Ohm

Essa lei trata da relação entre corrente e tensão em resistores e foi estabelecida pelo físico alemão Georg Simon Ohm. Por isso, em sua homenagem, a unidade de resistência elétrica tem o seu nome. A lei de Ohm é definida da seguinte forma:

*Estabelece que a tensão em um resistor é diretamente proporcional à corrente que flui através dele.*

Mas, o que isso significa? Vamos considerar o circuito da figura 9a. Sabemos, pelo circuito, que há uma tensão,  $V$ , aplicada aos terminais do resistor,  $R$ , fazendo com que flua uma corrente,  $I$ , através dele. Com isso, vamos analisar a seguinte pergunta:

Qual a relação entre V e I nesse circuito, ou melhor, o que ocorre com a corrente se variarmos o valor da tensão?

Essa pergunta é facilmente respondida pela definição da lei de Ohm. Podemos interpretar por essa lei que qualquer variação na tensão irá causar uma variação na corrente proporcional à resistência. Para um melhor entendimento, vamos analisar o gráfico da figura 9b. Este gráfico ilustra a relação entre tensão e corrente do circuito da figura 9a. Considerando, inicialmente, que a tensão aplicada ao resistor é de 10 Volts, a corrente resultante dada pelo gráfico é de 10 mA (mili Ampere =  $10^{-3}$  A). Logo:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{10V}{10mA} = \frac{10V}{10 \times 10^{-3} A} = 1 \times 10^3 \Omega = 1k\Omega$$

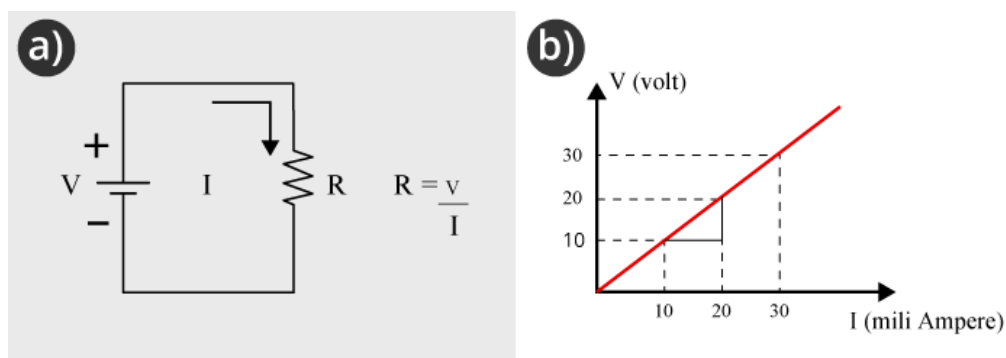
Se mudarmos a tensão aplicada ao resistor de 10 V para 20 V, temos uma alteração na corrente de 10 mA para 20 mA. Logo, temos novamente uma resistência de

$$R = \frac{V}{I} = \frac{20V}{20mA} = \frac{20V}{20 \times 10^{-3} A} = 1 \times 10^3 \Omega = 1k\Omega,$$

com isso, podemos concluir que para qualquer valor de tensão aplicada ao resistor a corrente terá um valor que manterá a resistência constante. Você deve ter em mente que o mesmo ocorre se variarmos a corrente, ou seja, a tensão também irá se alterar de forma a manter a resistência constante, obedecendo a lei de Ohm.

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

**Figura 09** - Lei de Ohm. **a)** circuito com um resistor. **b)** relação entre tensão e corrente do circuito.

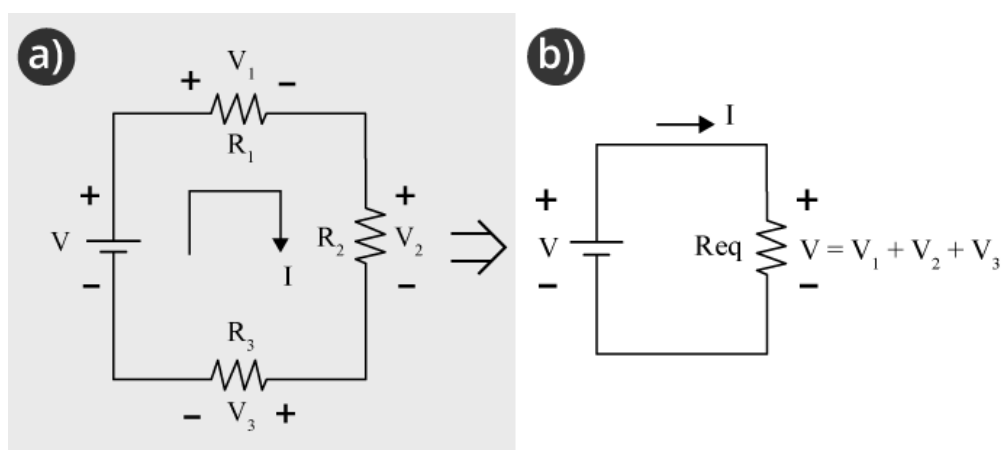


Agora que aprendemos o princípio de funcionamento da lei de Ohm, vamos aplicá-la a circuitos mais elaborados, por exemplo, com resistores em série e em paralelo. Então vamos aproveitar e revisar o cálculo de resistência equivalente.

## Aplicação da Lei de Ohm - Resistores em série

É muito importante entendermos como aplicar a lei de Ohm, ou seja, qual o valor da tensão e corrente que devemos utilizar. Esses valores dependem bastante de como o circuito está arranjado. Vamos considerar o caso onde temos várias resistências em série, ilustrado na figura 10a.

**Figura 10 - a) Associação em série b) Circuito equivalente.**



Você deve lembrar que para calcular a resistência equivalente quando há resistores em série, basta somar as resistências obtendo, assim, o valor de  $R_{eq}$ , ilustrado na figura 10b pelo circuito equivalente, ou seja,

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

Vamos entender melhor algumas características dessa associação. Se analisarmos esse circuito, podemos afirmar que a corrente que passa pelos resistores  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  é a mesma e possui o valor  $I$ . Jamais esqueça dessa

característica! Quando existem resistores em série, a mesma corrente deve fluir por todos os resistores, **obrigatoriamente**. Ao aplicarmos a lei de Ohm no circuito equivalente, temos:

$$V = R_{eq} * I$$

Concluimos anteriormente que  $R_{eq}$  é o somatório de todas as resistências, logo,

$$V = (R_1 + R_2 + R_3) * I$$

$$V = (R_1 * I) + (R_2 * I) + (R_3 * I)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Pela equação acima, podemos concluir que o somatório das tensões em cada resistor deve ser igual à tensão aplicada aos terminais do resistor equivalente. As tensões em cada resistor podem ser iguais ou diferentes, isso dependerá do valor de cada resistência, por exemplo, se  $R_1 = R_2 = R_3$ , podemos afirmar que  $V_1 = V_2 = V_3$ .

Devemos fixar três características:

1. Para essa associação, a corrente que flui pelos resistores deve ser a mesma, **obrigatoriamente**.
2. As tensões em cada resistor são "diferentes" (são iguais para um caso específico já comentado), pois dependem do valor de cada resistência.
3. O somatório das tensões em cada resistor é igual ao valor da tensão aplicada à resistência equivalente.

## Aplicação da Lei de Ohm - Resistores em paralelo

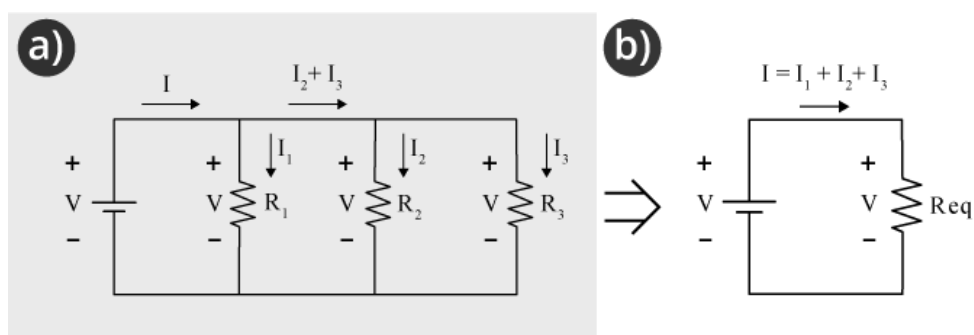
Mas, e se as resistências estiverem associadas em paralelo, quais conclusões podemos tirar sobre as tensões e correntes em cada resistor? Para isto, vamos analisar o circuito da figura 11a. O primeiro passo a se fazer é calcular a resistência equivalente desse circuito, ilustrada na figura 11b. Você deve lembrar que  $R_{eq}$  para resistores em paralelo é dado por:

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

Para um caso especial, onde temos apenas dois resistores em paralelo, essa fórmula pode ser simplificada para:

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

**Figura 11 - a) Associação em paralelo b) Circuito equivalente.**



Para entendermos o que ocorre com as tensões e correntes em cada resistor, vamos analisar o circuito assim como fizemos para a associação em série. Partimos da seguinte equação:

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

Se analisarmos atentamente o circuito da figura 11a, podemos perceber que a tensão  $V$  é aplicada aos terminais do resistor  $R_1$ , que por sua vez é aplicada ao resistor  $R_2$  e  $R_3$ . Logo, tiramos nossa primeira **importante** conclusão, que em uma associação paralela as tensões em cada resistor são iguais e têm o valor da tensão aplicada aos terminais do resistor equivalente, ou seja,  $V$ . Se multiplicarmos ambos os lados da equação acima por  $V$ , teremos a seguinte equação:

$$V * \left( \frac{1}{R_{eq}} \right) = V * \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \rightarrow \frac{V}{R_{eq}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Porém, sabemos que

$$\frac{V}{R_{eq}} = I, \quad \frac{V}{R_1} = I_1, \quad \frac{V}{R_2} = I_2 \quad \text{e} \quad \frac{V}{R_3} = I_3$$

Logo, temos que:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Finalmente, devemos ter em mente três conceitos:

1. Na associação paralela, as tensões em cada resistor são iguais.

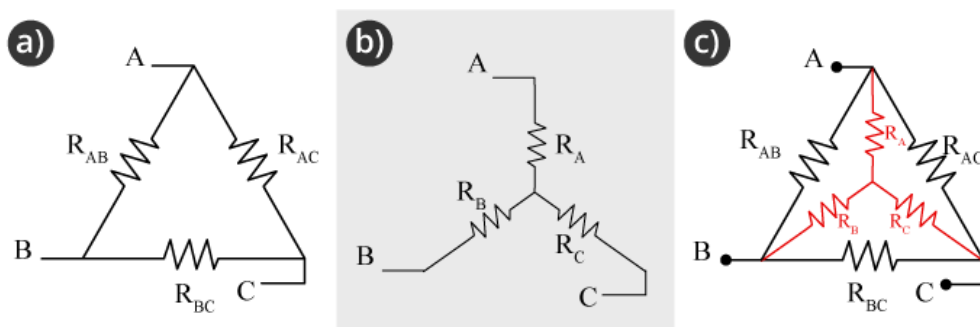


2. As correntes em cada resistor são “diferentes” (são iguais para  $R_1 = R_2 = R_3$ ), pois dependem do valor de cada resistência.
3. O somatório das correntes em cada resistor é igual ao valor da corrente que flui pela resistência equivalente.

## Transformação triângulo estrela ( $\Delta Y$ )

Existem associações de resistores que não conseguiremos obter sua resistência equivalente, a não ser que realizemos uma transformação triângulo estrela, também conhecida como delta estrela. Primeiramente, vamos entender como realizar essa transformação e em seguida faremos um exemplo demonstrando essa aplicação. As figuras 12a e 12b ilustram as configurações delta e estrela, respectivamente. Já a figura 12c ilustra como podemos fazer a substituição através dos nós A, B e C, comuns para ambas as configurações.

**Figura 12 - a)** Configuração triângulo **b)** Configuração estrela **c)** Arranjo para substituição



Para realizar a transformação da configuração triângulo para estrela ou estrela para triângulo devemos fazer uso das equações listadas abaixo.

## Transformação triângulo para estrela    Transformação estrela para triângulo

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_{AB} = \frac{R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A}{R_C}$$

$$R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

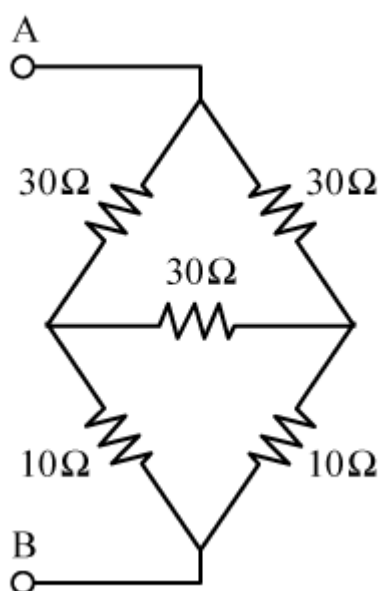
$$R_{BC} = \frac{R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A}{R_A}$$

$$R_C = \frac{R_{BC} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_{AC} = \frac{R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A}{R_B}$$

**Tabela 2** - Equações para transformações.

**Exercício Resolvido** - Encontre a resistência equivalente entre os pontos A e B.



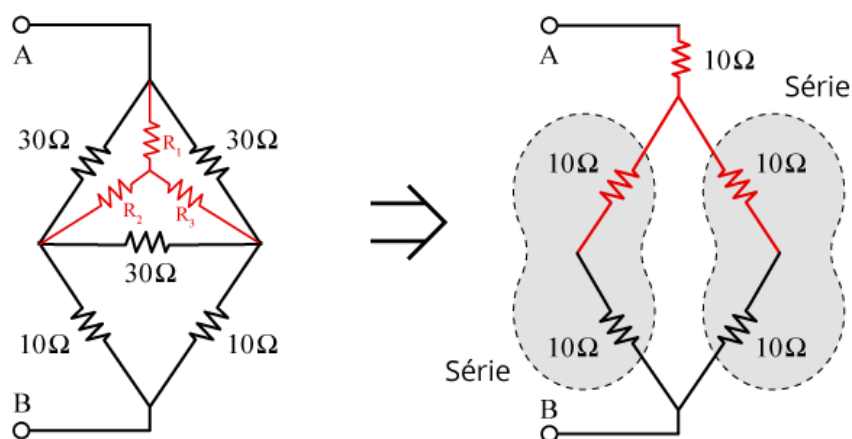
Você deve ter notado que não sabemos se os resistores estão em série ou em paralelo, uma vez que não temos nenhuma das características vistas anteriormente de tensão e corrente para essas associações. Porém, se analisar atentamente,

verá que os resistores de  $30\ \Omega$  estão formando uma configuração triângulo. Logo, podemos realizar uma transformação triângulo para estrela utilizando as equações da tabela 2, ilustrada na figura abaixo.

$$R_1 = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30 + 30} = \frac{900}{90} = 10\ \Omega$$

$$R_2 = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30 + 30} = \frac{900}{90} = 10\ \Omega$$

$$R_3 = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30 + 30} = \frac{900}{90} = 10\ \Omega$$



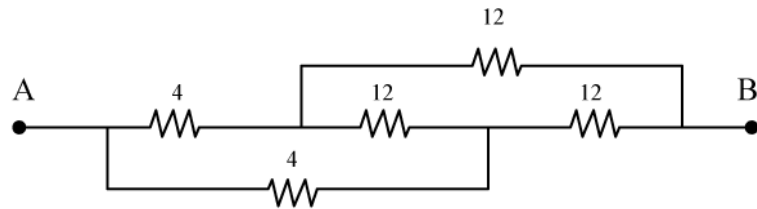
Com essa transformação podemos ver que temos dois pares de resistores em série, como destacado na figura. Consequentemente, o resultado desses resistores em série ( $20\ \Omega$ ) está em paralelo, ou seja,  $20\ \Omega$  em paralelo com  $20\ \Omega$ . A partir desse momento deve ter ficado fácil calcular a resistência equivalente. Então, calculando a resistência equivalente, temos:

$$R_{eq} = 10 + (20 // 20) = 10 + \left( \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} \right) = 20\ \Omega$$

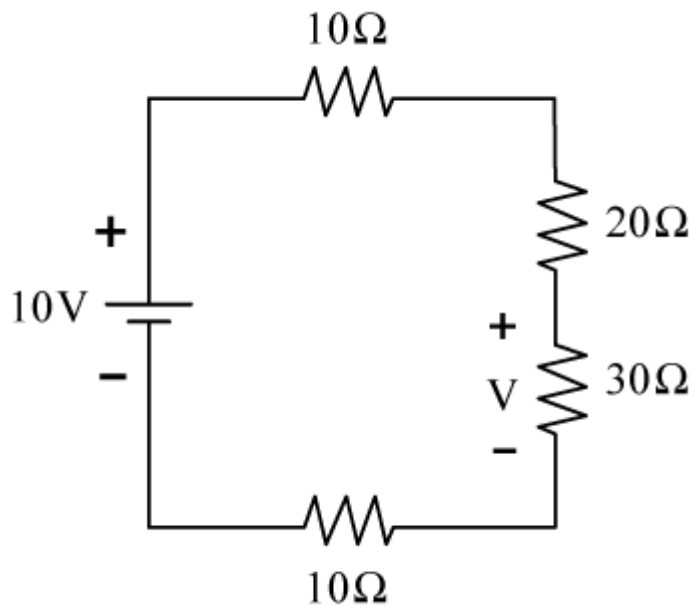
## Atividade 03

---

1. Encontre a resistência equivalente entre os pontos A e B.



2. Obtenha a queda de tensão no resistor de  $30\ \Omega$ .



3. Quais as principais características entre associações de resistores em série e em paralelo? Diferencie essas associações em termos de tensão e corrente.

# Capacitores

---

Como vocês devem ter estudado em disciplinas sobre conceitos de eletricidade, os capacitores são elementos passivos que possuem como principal característica a capacidade de armazenamento de carga. Essa capacidade de armazenamento é caracterizada pela capacitância, que é uma medida da quantidade de cargas que um capacitor é capaz de armazenar em suas placas. Porém, antes de comentarmos sobre essa característica iremos revisar as possíveis associações (série e paralelo) entre capacitores. Para isso, devemos lembrar que a capacitância de um capacitor é dada pela seguinte equação:

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

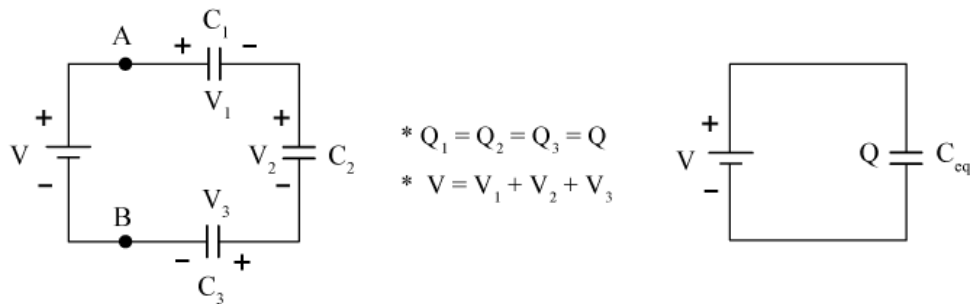
Onde, Q é a carga armazenada no capacitor, dada em Coulombs (C); V é a tensão aplicada aos terminais do capacitor, dada em Volts (V); e C é a capacitância, dada em Farads (F).

## Capacitores - Associação em série

Assim como os resistores, os capacitores podem ser associados de forma a gerar uma nova capacitância, chamada capacitância equivalente. Considerando o caso da figura 13, onde temos capacitores em série, podemos obter a capacitância equivalente entre os pontos A e B, fazendo uso da seguinte equação:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

**Figura 13** - Associação de capacitores em série.



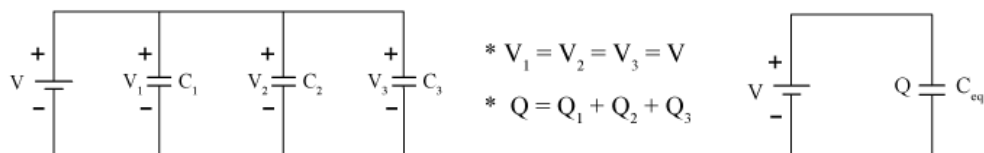
É importante ressaltar que nessa associação a carga é igual para todos os capacitores, ou seja,  $Q$  é mantida constante, como destacada na figura.

## Capacitores - Associação em paralelo

Para o caso da associação de capacitores em paralelo, ilustrada na figura 14, podemos perceber facilmente que as tensões aplicadas aos terminais de cada capacitor são idênticas e possuem valor igual ao da fonte de tensão, ou seja,  $V$ . Com isso, para calcular a capacitância equivalente, usaremos a seguinte equação:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$$

**Figura 14** - Associação de capacitores em paralelo.



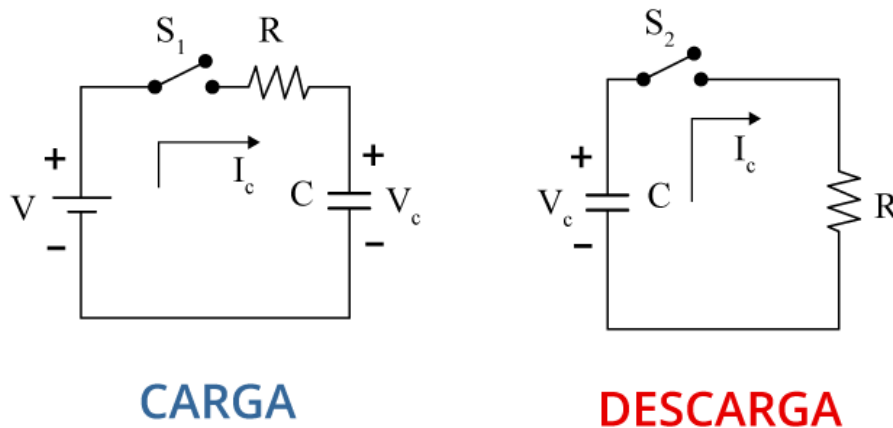
Salientamos, também, que nessa configuração a carga total do capacitor equivalente é o somatório das cargas de cada capacitor. Isto está ilustrado na figura 14.

## Capacitores - Carga e Descarga

Como falado anteriormente, a capacidade de armazenamento de cargas é a principal característica dos capacitores. Sabendo disso, vamos analisar cuidadosamente o que ocorre no carregamento de um capacitor e na descarga do mesmo. Você **não** pode encerrar esta aula sem conhecer o princípio básico de funcionamento do capacitor, pois irá utilizá-lo bastante ao longo do curso.

**Situação de carga** - Inicialmente, vamos considerar que queremos carregar o capacitor. Esta situação está ilustrada na figura 15 (Carga). Neste caso, temos duas situações:

**Figura 15** - Circuitos de carga e descarga do capacitor.



**Primeira:** Chave  $S_1$  aberta.

Nesta situação o capacitor deve estar completamente descarregado, ou seja, a tensão em seus terminais é zero ( $V_C = 0$ ) e a corrente que flui pelo circuito também é zero ( $I_C = 0$ ), uma vez que  $S_1$  está aberta.

**Segunda:** Chave  $S_1$  fechada.



No exato momento em que a chave S1 é fechada, a tensão em cima do capacitor permanecerá em zero, fazendo com que toda a tensão da fonte seja aplicada ao resistor R. Logo, neste momento, teremos a situação de corrente máxima durante a carga, e seu valor será dado por:

$$I_{C,MAX} = \frac{V}{R}$$

Mas, o que ocorre com a tensão do capacitor (V<sub>C</sub>)? Continuará em zero?

Não. A tensão nos terminais do capacitor irá aumentando exponencialmente com o tempo, obedecendo à seguinte equação:

$$V_C = V - V \cdot e^{-t/(RC)}$$

onde, “e” é uma constante aproximadamente igual a 2,7182.

OBS.: Você lembra que o capacitor é um dispositivo contra variações bruscas de tensão? Por esse motivo, sua tensão permanece em zero assim que a chave é fechada e seu valor só aumenta aos poucos, seguindo a equação descrita acima.

Vamos entender melhor essa equação. Para isso, é importante que você acompanhe pelo gráfico ilustrado na figura 16, carga.

No início, quando a chave S1 estava aberta, afirmamos que o capacitor estava completamente descarregado, ou seja,  $V_C = 0$ . Esse valor se mantém ( $V_C = 0$ ) para o momento imediatamente depois que a chave é fechada, como explicado na observação. Podemos confirmar isso pela equação. Esse momento é caracterizado pelo instante de tempo  $t = 0$ . Substituindo esse valor na equação, temos:

$$V_C = V - V.e^{-t/(RC)} = V - V.e^{0/(RC)} = V - V.e^0 = V - V.1 = 0$$

Esse resultado confirma nossa suposição inicial.

Agora, vamos nos atentar para um caso especial, que ocorre quando o instante de tempo é  $t = RC$ . Neste caso, temos a seguinte situação:

$$V_C = V - V.e^{-RC/(RC)} = V - V.e^{-1} = V - \frac{V}{e}$$

$$V_C = V - \frac{V}{e} = V - 0,37V = 0,63V = 63\%V$$

Concluimos que, para  $t = RC$ , o valor da tensão no capacitor é 63% da tensão da fonte. Esse valor é conhecido como constante de tempo, comumente associada à letra grega tau ( $\tau = RC$ ).

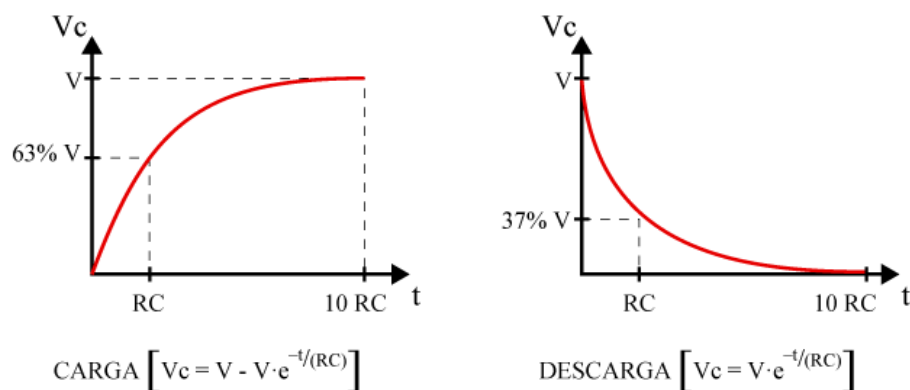
Outro caso específico ocorre quando o tempo tende a infinito, ou seja, quando o circuito permanece ligado por muito tempo. Neste caso, o valor da tensão no capacitor tende a se igualar com a tensão da fonte de alimentação. É comum considerarmos que o capacitor está completamente carregado, quando o tempo que o circuito está ligado é maior ou igual a 10 vezes a constante de tempo. Vamos comprovar essa afirmação:

$$V_C = V - V \cdot e^{-10RC/(RC)} = V - V \cdot e^{-10} = V - \frac{V}{e^{10}}$$

$$V_C = V - \frac{V}{22020}; V - 0; V$$

Quando o circuito chega nessa situação, dizemos que o capacitor está carregado ( $V_{C,MAX} = V$ ) e que a corrente que flui pelo circuito é zero ( $I_C = 0$ ). Uma vez que não há tensão sobre o resistor, pois toda a tensão de alimentação está aplicada ao capacitor.

**Figura 16** - Gráfico de carga e descarga do capacitor.



## Atividade 04

1. Considere o caso de descarga, ilustrado nas figuras 15 e 16. Assim como para o caso de carga, temos aqui duas situações:

**Primeira:** Chave S2 aberta.

O capacitor está completamente carregado, ou seja,  $V_C = V$ . Nesta situação não há corrente no circuito,  $I_C = 0$ , pois o circuito está aberto.

**Segunda:** Chave S2 fechada.

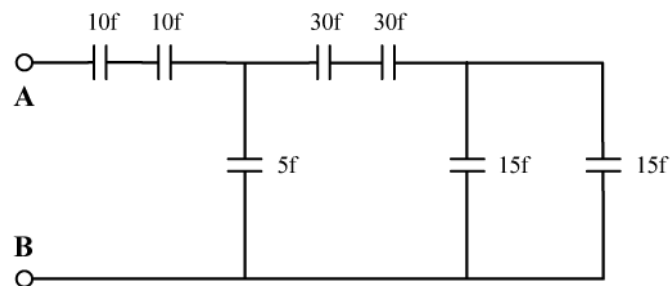
Realize os mesmos passos descritos na situação de carga, ou seja, obtenha:

- a. O valor de VC para  $t = 0$ ,  $t = RC$  e  $t = 10RC$ . Utilize a seguinte equação:

$$V_C = V \cdot e^{-t/(RC)}$$

- b. O valor de IC quando o capacitor está totalmente descarregado.

2. Encontre a capacitância equivalente entre os pontos A e B.



## Indutores

Nesta seção, vamos falar um pouco sobre outro componente passivo que também é capaz de armazenar energia, o indutor. Porém, esse componente, diferentemente do capacitor, armazena energia em forma de campo magnético. Você deve lembrar que o indutor basicamente consiste de um fio em forma de uma bobina, onde a tensão em seus terminais ( $V_L$ ) é proporcional à variação da corrente em um intervalo de tempo, ou seja,

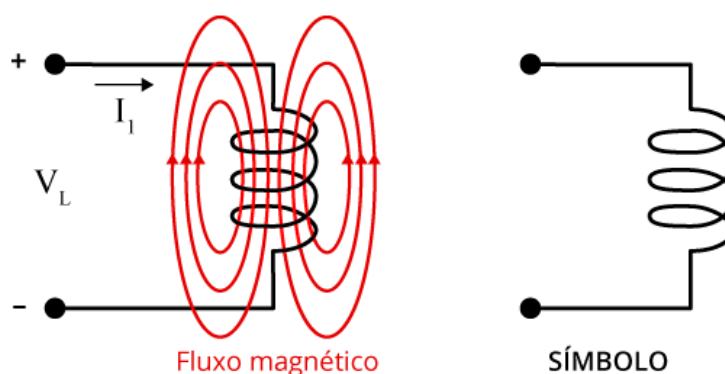
$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Onde,  $\Delta I$  é uma variação na corrente, dada em Ampere (A);  $\Delta t$  é uma variação no tempo, dada em segundos (s); e,  $L$  é a indutância do indutor (fator de proporcionalidade), dada em Henry (H).

Mas, você pode se perguntar, de onde vem essa variação da corrente no tempo?

Existe uma lei na física, chamada Lei da indução eletromagnética de Faraday (você já deve ter estudado), conforme é ilustrado na figura 17. Essa lei estabelece que todo condutor, quando submetido a uma variação de fluxo magnético, induz uma força eletromotriz (tensão) em seus terminais. Por esse motivo, a variação da corrente (fluxo magnético) no tempo gera uma tensão  $V_L$  nos terminais do indutor.

**Figura 17** - Representação da lei de indução eletromagnética de Faraday.



## Indutores - Associação em série e em paralelo

Assim como os demais elementos estudados até o momento, os indutores também podem ser associados de forma a gerar um novo valor de indutância. Podemos fazer analogia da associação utilizando indutores à associação utilizando resistores, pois suas equações para encontrar a indutância e a resistência equivalente são idênticas, tanto para série como para paralelo, respeitando os devidos conceitos.

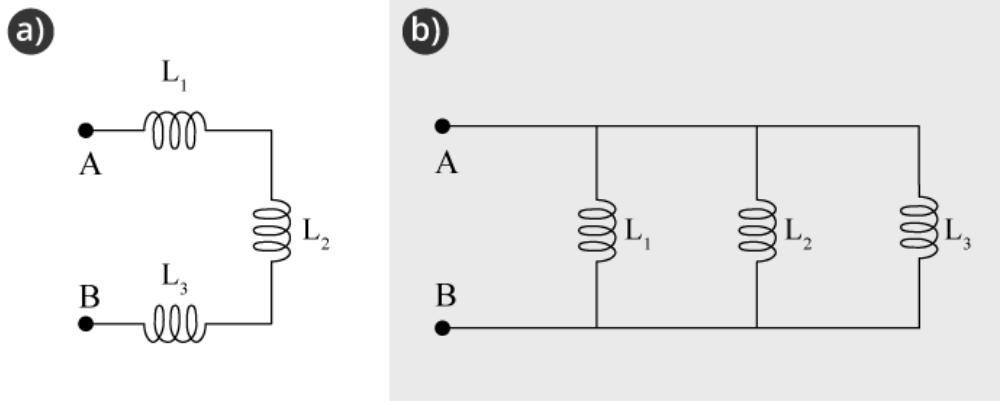
Indutância equivalente em série:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3$$

Indutância equivalente em paralelo:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

**Figura 18 - a)** Circuito com Indutores em série **b)** Circuito com Indutores em paralelo.

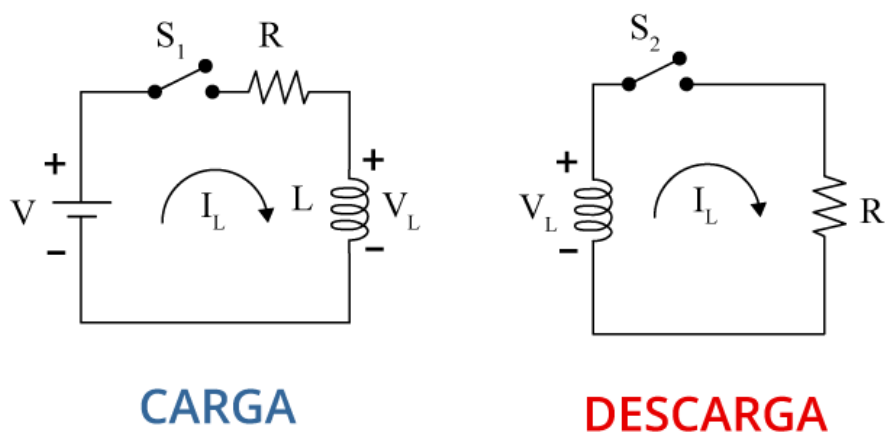


## Indutores - Carga e Descarga

Os mesmos passos que realizamos para analisar a carga no capacitor, vamos realizar para o indutor, fazendo analogias e comparações entre os dois dispositivos.

**Situação de carga** - Inicialmente, vamos considerar que queremos carregar o indutor. Essa situação é ilustrada na figura 19 (Carga). Neste caso, temos duas situações:

**Figura 19 - Circuitos de carga e descarga do indutor.**



**Primeira:** Chave S1 aberta.

Nesta situação, o indutor deve estar completamente descarregado, ou seja, a tensão em seus terminais é zero ( $V_L = 0$ ) e a corrente que flui pelo circuito também é zero ( $I_L = 0$ ), uma vez que S1 está aberta.

**Segunda:** Chave S1 fechada.

No exato momento em que a chave S1 é fechada, a **corrente** que flui pelo circuito é zero, fazendo com que toda a **tensão** da fonte seja aplicada ao indutor. Logo, neste momento, teremos a situação de **tensão máxima** durante a carga, e seu valor será dado por:

$$V_{L,MAX} = V$$

Mas, o que ocorre com a **corrente** no indutor ( $V_C$ )? Continuará em zero?

Não. A corrente que flui nos terminais do indutor irá aumentando exponencialmente com o tempo, obedecendo à seguinte equação:

$$I_L = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot e^{-(R/L)t}$$



**OBS.:** Neste ponto é importante que façamos uma analogia. Quando falamos sobre carga no capacitor vimos que, no momento em que fechamos a chave S1, a tensão no capacitor permanecia igual a zero, uma vez que esse dispositivo é contra variações bruscas de tensão. No caso de carga do indutor, é a corrente ( $I_L$ ) que permanece igual a zero. Com isso, concluímos que o indutor é contra variações bruscas de corrente.

Assim como fizemos para a equação de carga no capacitor, vamos fazer para o indutor. É importante que você acompanhe os passos relacionando os valores obtidos ao gráfico da figura 19, carga.

No início, quando a chave S1 estava aberta, afirmamos que o indutor estava completamente descarregado, ou seja,  $V_L = 0$  e  $I_L = 0$ . Esse valor de **corrente** se mantém ( $I_L = 0$ ) para o momento imediatamente depois que a chave é fechada, como explicado na observação. Podemos confirmar isso pela equação, já que esse momento é caracterizado pelo instante de tempo  $t = 0$  e ao substituir esse valor na equação, temos:

$$I_L = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot e^0 = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot 1 = 0$$

Esse resultado confirma nossa suposição inicial.

Vamos então obter o valor da corrente para o caso  $t = L/R$  e  $t = 10 \cdot L/R$ . Substituindo o  $t = L/R$  na equação, temos:

$$I_L = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot e^{-(R/L)(L/R)} = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot \frac{1}{e} = 63\% \frac{V}{R}$$

Onde,  $L/R$  é a constante de tempo ( $\tau = L / R$ ) desse circuito, ou seja, quando  $t = L/R$  a corrente que flui através do indutor chega a 63% do seu valor final.

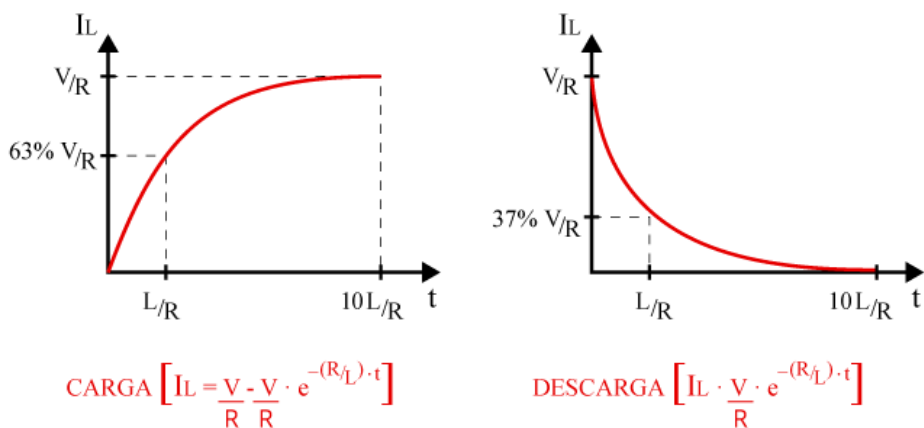
Outro caso específico ocorre quando  $t = 10 \cdot L/R$ , ou seja, já interpretamos essa situação como o tempo tendendo ao infinito. Fazendo a substituição, obtemos:

$$I_L = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot e^{-(R/L) \cdot 10(L/R)} = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} \cdot e^{-10} = \frac{V}{R} - 0 = \frac{V}{R}$$

$$I_{L,MAX} = \frac{V}{R}$$

Quando o circuito chega nessa situação, dizemos que o indutor está completamente carregado ( $I_L = V/R$ ) e que a tensão em seus terminais é zero ( $V_L = 0$ ), uma vez que a tensão da fonte de alimentação está totalmente aplicada sobre o resistor.

**Figura 20** - Gráfico de carga e descarga do capacitor.



## Atividade 05

---

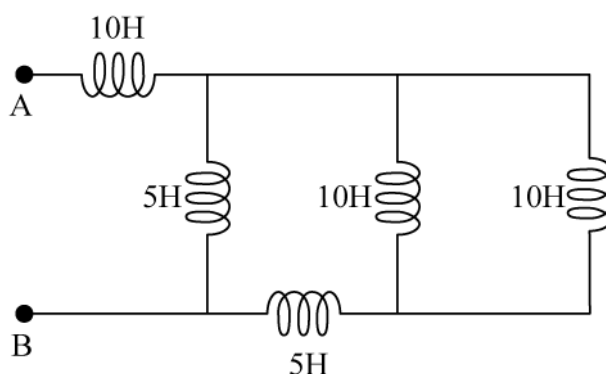
1. Considere o caso de descarga, ilustrado nas figuras 19 e 20. Para isso, observe as seguintes afirmações:
  - a. No momento em que a chave S2 é fechada, a corrente inicialmente armazenada no indutor ( $I_L = V/R$ ) é direcionada ao resistor.
  - b. Notamos que no final da carga a tensão no indutor é zero,  $V_L = 0$ . Porém, segundo a afirmação acima, no momento em que a chave S2 é fechada, passará uma corrente  $V/R$  sobre o resistor, fazendo que a tensão nos terminais do resistor e do indutor seja igual a  $V$ .
  - c. Logo, assim que fechamos a chave S2,  $V_L = V$  e  $I_L = V/R$ .

Realize os mesmos passos descritos na situação de carga, ou seja, obtenha:

O valor de  $I_L$  para  $t = 0$ ,  $t = L/R$  e  $t = 10L/R$ . Utilize a seguinte equação:

$$I_L = \frac{V}{R} e^{-(R/L)t}$$

2. Encontre a indutância equivalente entre os pontos A e B.



# Leis de Kirchhoff

---

Gustav Kirchhoff foi um famoso cientista alemão que deu diversas contribuições à ciência. O que abordaremos nesta seção são as famosas leis de Kirchhoff, muito utilizadas e base de diversos conteúdos de circuitos eletrônicos. Tais leis foram formuladas em 1845, mas são usadas frequentemente até os dias de hoje.

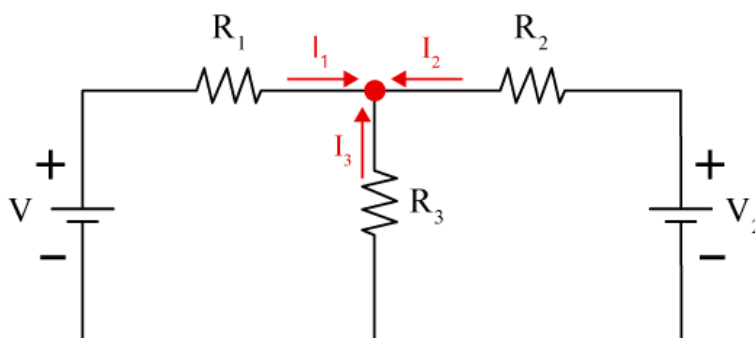
As leis de Kirchhoff são baseadas no princípio da conservação da energia e no princípio da quantidade de carga.

## 1ª Lei de Kirchhoff - lei dos nós

A 1ª Lei de Kirchhoff é popularmente conhecida como lei dos nós. Ela diz que **a soma das correntes que saem de um nó deve ser igual à soma das correntes que entram nesse mesmo nó**. A terminologia nó é atribuída a qualquer ponto de um circuito eletrônico, onde haja possibilidade da corrente elétrica ir para um lugar ou outro.

Para a figura 21, foi arbitrado um nó num ponto de entroncamento entre três fios condutores. Sendo assim, podemos supor que existem, naquele nó, três correntes elétricas,  **$I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$** . Os sentidos das correntes elétricas foram escolhidos aleatoriamente e indicados pelas setas, como ilustra a figura 21.

**Figura 21** - Aplicação da lei dos nós.



Utilizando a primeira lei de Kirchhoff, de acordo com o sentido que foi definido para as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , obrigatoriamente, a soma das correntes que chegam, no caso  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , vai ser igual à soma das correntes que saem desse nó, no caso 0. Sendo assim, teremos:

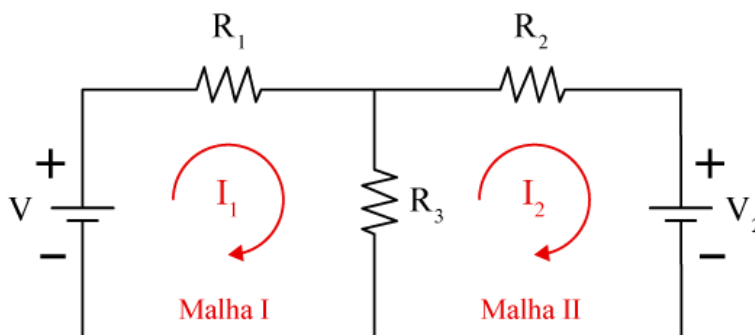
$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

## 2ª Lei de Kirchhoff - lei das malhas

A 2ª Lei de Kirchhoff, a chamada lei das malhas, trata das tensões em um circuito eletrônico. Ela diz que **a soma das tensões em uma malha fechada é igual a zero**. Da mesma forma que a terminologia nó introduzida na 1ª Lei, temos aqui a terminologia malha.

Entende-se por uma malha um circuito fechado, um caminho que pode ser feito pela corrente elétrica. Veja a figura 22, na qual temos duas malhas.

**Figura 22** - Aplicação da lei das malhas.



Vamos montar as equações para cada uma das malhas e começaremos pela malha I. É importante lembrar que o sentido adotado para as correntes é arbitrário. No final desta seção faremos alguns exemplos para fixar melhor esses conceitos.

### Equação para malha I:

$$V_1 - R_1 I_1 - R_3 (I_1 - I_2) = 0$$

Gostaria de chamar sua atenção para o termo  $R_3(I_1 - I_2)$ . Esse termo se refere à queda de tensão em cima do resistor  $R_3$ , e  $(I_1 - I_2)$  é a corrente que flui por esse resistor. Ao analisar a malha I, estamos adotando o sentido da corrente  $I_1$ . Por este fato, a corrente em  $R_3$  é  $(I_1 - I_2)$  (isto só ocorre por estarmos analisando a malha I. Veremos que na malha II será diferente).

### **Equação para malha II:**

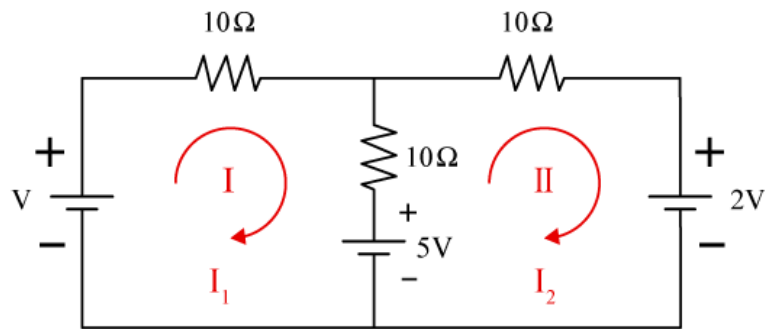
$$-R_3(I_2 - I_1) - R_2I_2 - V_2 = 0$$

Temos que fazer algumas observações importantes nesta equação. O termo  $R_3(I_2 - I_1)$  refere-se à queda de tensão no resistor  $R_3$ , considerando o sentido da corrente  $I_2$ , como explicado no tópico anterior. Outra observação importante é o fato de  $V_2$  aparecer negativo na equação. Para isso, você deve entender dois conceitos:

1. Se você percorre a malha no mesmo sentido que você adotou para corrente, ao passar por um resistor, a tensão em cima dele aparecerá negativa na equação. Caso contrário, ou seja, você percorra a malha no sentido contrário ao da corrente, a tensão em cima do resistor aparecerá positiva na equação.
2. Se você percorre a malha no mesmo sentido que você adotou para corrente, ao passar por uma fonte de tensão, a tensão aparecerá na equação com o mesmo sinal do polo pelo qual a corrente está saindo. Por exemplo, considerando o sentido da corrente  $I_2$ , ao passar pela fonte  $V_2$ , a corrente sai pelo polo negativo da fonte. Por este motivo,  $V_2$  apareceu com o sinal negativo na equação.

### **Exemplo resolvido.**

Encontre a corrente que flui pelas fontes de tensão de 10 V, 5 V e 2 V.



### Utilizando Lei das malhas

Primeiramente, adotamos o sentido das correntes, como indicado na figura acima. Depois, vamos encontrar as equações para cada uma das malhas.

#### Equação para malha I:

$$10 - 10I_1 - 10(I_1 - I_2) - 5 = 0$$

#### Equação para malha II:

$$5 - 10(I_2 - I_1) - 10I_2 - 2 = 0$$

Logo, temos duas equações e duas variáveis, tornando possível a solução do problema. Esse sistema linear, entre outros que vocês encontrarão nos exercícios, podem ser resolvidos de diversas formas (substituição, escalonamento, regra de Cramer etc.).

Vamos resolver esse problema por substituição, isolando a corrente  $I_1$  na primeira equação e a substituindo na segunda equação. Da primeira equação, temos:

$$10 - 10I_1 - 10I_1 + 10I_2 - 5 = 0 \rightarrow I_1 = \frac{10I_2 + 5}{20}$$

Substituindo  $I_1$  na segunda equação, temos:

$$5 - 10\left(I_2 - \frac{10I_2 + 5}{20}\right) - 10I_2 - 2 = 0 \rightarrow 5 - 10I_2 + \left(\frac{10I_2 + 5}{2}\right) - 10I_2 - 2 = 0$$
$$5 - 10I_2 + 5I_2 + \frac{5}{2} - 10I_2 - 2 = 0 \rightarrow -15I_2 + 5 + \frac{5}{2} - 2 = 0 \rightarrow \left(\frac{10 + 5 - 4}{2}\right) = 15I_2$$
$$I_2 = \frac{11}{30} = 0,37A$$

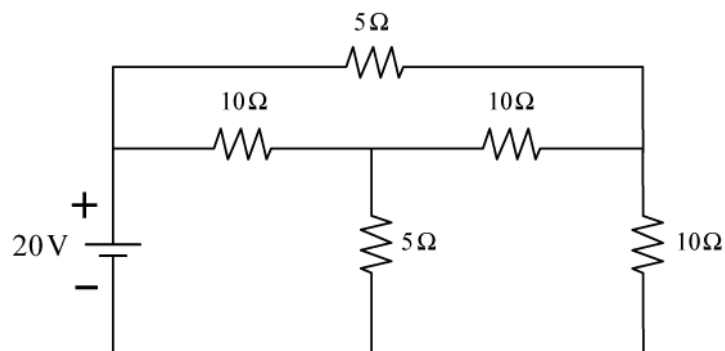
Podemos agora substituir o valor de  $I_2$  e encontrar o valor de  $I_1$ , pela seguinte equação:

$$I_1 = \frac{10I_2 + 5}{20} = \frac{10 \cdot 0,37 + 5}{20} = \frac{3,7 + 5}{20} = 0,435A$$

Com isso, podemos concluir que a corrente nas fontes de tensão de 10 V e 2 V, são  $I_1 = 0,435 A$  e  $I_2 = 0,37 A$ , respectivamente. Fica faltando a corrente na fonte de tensão 5 V. Então, se assumirmos que a corrente nesta fonte está descendo, ou seja, entrando no polo positivo, temos que o valor será  $(I_1 - I_2) = 0,065 A$ .

## Atividade 06

1. Refaça o exercício resolvido utilizando a lei dos nós. As correntes devem ser iguais aos valores encontrados anteriormente.
2. Considerando o circuito abaixo. Encontre as correntes que fluem nos dois resistores de 5  $\Omega$ .





## Referências

---

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. [s.l.]: Pearson, 2012.

FERREIRA, Aitan Póvoas. **Curso básico de Eletrônica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Biblioteca técnica Freitas Bastos, 1987.

COELHO, Francisco. **As Tecnologias digitais na formação do profissional de alunos do curso de Eletrônica do IFPI**: apropriação de competências e/ou caminho para emancipação. 2013. 140 f. Dissertação (Mestrado em Educação). - Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2013. Disponível em: <http://biblioteca.asav.org.br/vinculos/000009/00000910.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.