



ITA
2023



ELETROMAGNETISMO

AULA 04
ELETRODINÂMICA I

Prof. João Maldonado





Sumário

Introdução	3
1.0. Corrente elétrica	4
1.2. Fontes de DDP	6
1.2.1. Célula Galvânica	6
1.2.2. Gerador Elétrico	8
1.2.3. Gerador Termoelétrico	9
1.2.4. Gerador Piezoelétrico	10
1.2.5. Gerador Fotoelétrico	10
1.3. O sentido e a intensidade da corrente elétrica	11
1.4. Gráfico $i \times t$	15
1.4.1. Corrente contínua constante	16
1.4.2. Corrente contínua pulsante	16
1.4.3. Corrente alternada	17
1.5. A velocidade de deriva ou de arraste do elétron	18
1.6. Densidade de corrente (J)	21
1.7. O princípio da continuidade da corrente elétrica	24
1.7.1. Bipolo elétrico	25
1.8. Potência elétrica	26
1.8.1. Valores nominais	27
1.9. Resistência elétrica	30
1.10. A primeira lei de ohm	31
1.10.1. Curva característica de um condutor ôhmico	33
1.11. Efeito joule	34
2.0. Considerações finais	36
3.0. Referência bibliográficas	37



Introdução

Nessa aula vamos começar o estudo da Eletrodinâmica, tema muito importante para os nossos vestibulares.

Iremos estudar corrente elétrica e primeira Lei de Ohm.

Se atente para o fato de que em Eletrodinâmica, diferentemente de Eletrostática, alguns termos são trocados. Em especial, a energia potencial elétrica, antes abreviada como U , agora será abreviada como E_p , e o potencial elétrico, antes abreviado como V , agora será abreviado como U .

Fique atento para relacionar o Efeito Joule com Termodinâmica, através da dissipação de potência e aquecimento de líquidos.

Além disso, nós abordaremos dois tópicos não tão comuns no ensino médio brasileiro: velocidade de deriva dos elétrons livres e densidade de corrente. Estude com calma e será um assunto tranquilo.

Caso tenha alguma dúvida entre em contato conosco através do fórum de dúvidas do Estratégia ou se preferir:

ESCLARECENDO!



@prof.maldonado

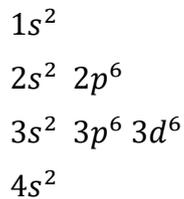


1.0. Corrente elétrica

Inicialmente iremos definir o que é corrente elétrica e sua origem, para depois estudar suas especificidades.

Definição: Corrente elétrica é o **movimento ordenado**, ou seja, o movimento com **direção e sentido preferenciais**, de **portadores** de carga elétrica.

Considere, por exemplo, um pedaço de metal **não conectado a nenhuma bateria**. Uma colher que você usa quando toma sopa por exemplo. Os elétrons da eletrosfera dos átomos que formam a rede metálica não estão em repouso, mas em constante movimento. Até mesmo os prótons e nêutrons se movem, mas com uma amplitude bem menor (chamamos esse movimento de vibração). Para os metais em especial, todos os elétrons que não estão na camada de valência estão fixos em um certo átomo, e não podem sair dele. Vamos dizer, por exemplo, que existam dois átomos de Ferro em sua colher, chamados Charles e John. O Ferro tem 26 elétrons, sendo que 2 deles ocupam a camada de valência. Veja a distribuição:



Como dissemos, em uma rede metálica, os elétrons que não estão na camada de valência não conseguem mudar de átomo. Dessa forma, Charles têm 24 elétrons que são exclusivamente seus e John têm 24 elétrons que também são exclusivamente seus. Entretanto, quando ambos os átomos se juntam para formar uma ligação metálica (rede metálica), eles acabam abdicando dos elétrons de sua camada de valência. Isso quer dizer que os últimos 2 elétrons de Charles uma hora acabam pulando para John, e vice versa. Em um momento qualquer, ninguém sabe de onde vieram os elétrons da sua camada de valência.

Agora, imagine que existam milhões de átomos formando uma rede metálica. Todos os elétrons da camada de valência desses átomos não terão “dono”. São esses elétrons que consideramos portadores de carga (ou também elétrons livres) pois, diferentemente dos outros 24 elétrons, esses são os únicos 2 elétrons (por átomo) que conseguem se movimentar e pular de um átomo para o outro, conduzindo corrente.

Além disso é muito importante entender que em um metal que não está sujeito a um campo elétrico ou diferença de potencial, os elétrons livres continuam pulando de um átomo para o outro, porém de maneira **totalmente aleatória**. Abaixo está mostrado uma possível configuração para as velocidades em um dado momento dos elétrons livres desse metal.

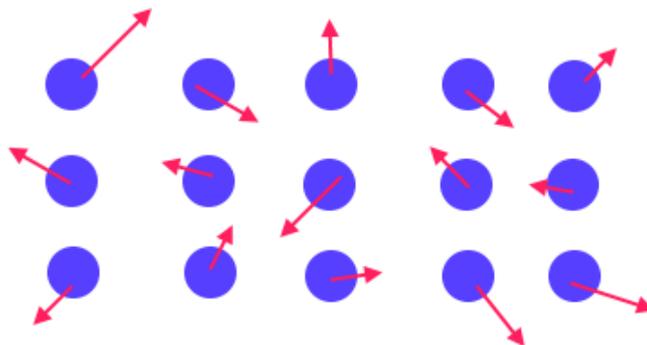


Figura 1: Elétrons livres em movimento totalmente aleatório (caótico).



Veja que as velocidades são totalmente aleatórias. Se somarmos todos os vetores acima necessariamente iremos encontrar o vetor nulo, ou seja, o centro de massa não sai nunca do lugar. Além disso, a ordem de grandeza dessas velocidades é da ordem de 10^6 m/s, ou seja, centésimos/milésimos da velocidade da luz. Extremamente rápido!

Vamos colocar agora nesse experimento uma bateria entre os dois terminais desse metal. Sabemos que uma bateria gera uma diferença de potencial entre os terminais, e qualquer diferença de potencial necessariamente irá criar um campo elétrico. Como os elétrons têm carga, se estiverem em uma região de campo elétrico naturalmente irão sofrer uma força elétrica ($\vec{F} = q\vec{E}$), e como a carga desses portadores é negativa, a força será oposta ao campo.

Digamos que o campo seja para a esquerda. Então todos os elétrons sofrerão uma força para a direita. Os elétrons que não são livres, por mais que sofram essa força, não conseguem se movimentar de um átomo para o outro, simplesmente mudando sua posição de equilíbrio. Entretanto os elétrons livres irão ser acelerados para a direita, de átomo a átomo, fazendo com que aquela velocidade que antes era totalmente aleatória, agora comece a ter uma direção privilegiada.

Não se engane! A velocidade dos elétrons continua sendo **muito** aleatória, mas agora ela tem uma pequena parcela que é ordenada, a parcela na direção do campo elétrico. Veja abaixo como seria um esquema (exagerado para fins educacionais) da nova configuração de velocidades dos elétrons da rede metálica sujeita a um campo elétrico.

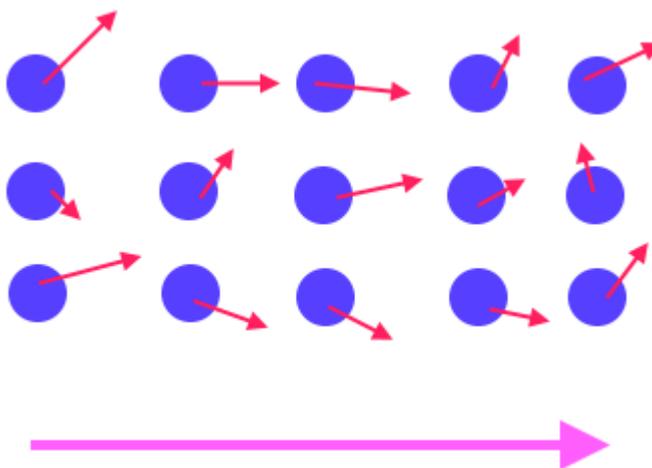


Figura 2: Elétrons livres em movimento parcialmente ordenado.

Veja que a distribuição continua aleatória, mas dá para ver que está “puxada” para a direita. Se somarmos todos os vetores acima não devemos encontrar o vetor nulo, mas um vetor apontando para a direita.

Como eu disse, a figura acima está exagerada. Conforme ainda iremos ver na aula, a **velocidade ordenada** de elétrons (ou seja, a velocidade na direção do campo, chamada de velocidade de deriva) tem ordem de milímetros por segundo, ou até menos. Compare isso com a velocidade desordenada, de milhões de metros por segundo. É uma diferença gigante! Se pegarmos uma velocidade de 0,1 mm/s e uma velocidade total de 10^6 m/s, então 99,99999999% da velocidade dos elétrons será aleatória, e somente 0,00000001% será ordenada.

Finalmente, é muito importante entender que o campo elétrons gera uma força, e uma força gera uma aceleração. Professor, então por que a corrente elétrica não vai aumentando com o tempo? Ótima pergunta. Os elétrons estão constantemente se chocando e sendo absorvidos por outros átomos. Entre um choque e outro a velocidade dos elétrons realmente aumenta devido à aceleração do campo. Mas quando os elétrons se chocam eles passam grande parte de seu momento e energia para o átomo, de



forma que, no equilíbrio, existirá uma velocidade de deriva média, que será a que utilizaremos para calcular a corrente elétrica.

Voltando ao tópico inicial, o que são portadores de carga elétrica? Ora, são simplesmente partículas carregadas **que podem se movimentar**. Em um metal, por exemplo, os portadores de carga elétrica são elétrons livres (elétrons da camada de valência da rede metálica). Veja que os átomos são compostos de outras partículas carregadas (no caso os prótons), mas como elas não podem se mover, não são considerados portadores de carga elétrica. Outros portadores de carga elétrica são os íons, que dependendo de onde se encontram podem também se movimentar.

Observe que para gerar uma corrente elétrica mensurável num material, é necessário que ele seja um **condutor elétrico**. Vimos em Eletrostática que existem três tipos de condutores:

1. **Condutores tipo 1:** os portadores de carga elétrica são elétrons livres. Ex: Metais, alótropos do carbono (ex: grafite) e alguns polímeros.
2. **Condutores tipo 2:** os portadores de carga são íons (cátions e ânions). Ex: Sais dissolvidos ou fundidos.
3. **Condutores tipo 3:** os portadores de carga são íons e elétrons livres. Ex: plasma.

Observação: é possível ocorrer corrente elétrica no vácuo, que não são produzidas por portadores do meio, mas por portadores lançados no meio. Geralmente, há um lançamento de elétrons (raios catódicos), semelhante ao que acontece nos tubos de imagem de televisão antiga (cinescópios) e nos osciloscópios catódicos utilizados em laboratórios. Estudaremos esse tópico em efeito fotoelétrico (Física Moderna).

1.2. Fontes de DDP

Conforme vimos, a corrente elétrica flui enquanto houver diferença de potencial (quando a diferença de potencial se extingue, entramos em equilíbrio eletrostático). Entretanto, para muitas aplicações cotidianas, é necessário que a corrente dure pelo tempo que for necessário. Para isso, é necessário manter uma diferença de potencial fixa.

Existem 5 tipos de dispositivos que geram ddp, e iremos estudar rapidamente cada um deles a seguir.

1. **Célula Galvânica**
2. **Gerador Elétrico**
3. **Gerador Termoelétrico**
4. **Gerador Piezoelétrico**
5. **Gerador Fotoelétrico**

1.2.1. Célula Galvânica

A célula galvânica nada mais é do que a pilha comum que estudamos em Química. Nesse caso, a diferença de potencial elétrico provém da diferença de potencial de redução entre o cátodo e o ânodo.

Tanto o cátodo quanto o ânodo são feitos de metais. Entretanto, o cátodo é feito de um metal com maior potencial de redução do que o ânodo. E o que seria um potencial de redução? Nada mais é do que a “vontade” que o átomo tem de reduzir (ou seja, diminuir o seu NOX). Quanto mais eletronegativo



o metal, maior o seu potencial de redução, e quanto mais eletropositivo, menor o seu potencial de redução.

O oxigênio, por exemplo, é uma molécula extremamente eletronegativa, e conseqüentemente tem um potencial de redução muito alto (1,23 V em meio ácido). Isso quer dizer que ele quer muito ganhar elétrons para ficar com seu NOX mais estável (-2).

Já os metais, em geral, são eletronegativos. Abaixo segue uma lista dos potenciais de redução padrão para a maioria dos metais.

Potencial de redução (E_{red}^0)	Estado reduzido	Estado oxidado	Potencial de oxidação (E_{oxid}^0)
-3,04	Li	$Li^+ + e^-$	+3,04
-2,92	K	$K^+ + e^-$	+2,92
-2,90	Ba	$Ba^{2+} + 2e^-$	+2,90
-2,89	Sr	$Sr^{2+} + 2e^-$	+2,89
-2,87	Ca	$Ca^{2+} + 2e^-$	+2,87
-2,71	Na	$Na^+ + e^-$	+2,71
-2,37	Mg	$Mg^{2+} + 2e^-$	+2,37
-1,66	Al	$Al^{3+} + 3e^-$	+1,66
-1,18	Mn	$Mn^{2+} + 2e^-$	+1,18
-0,83	$H_2 + 2(OH)^-$	$2 H_2O + 2e^-$	+0,83
-0,76	Zn	$Zn^{2+} + 2e^-$	+0,76
-0,74	Cr	$Cr^{3+} + 3e^-$	+0,74
-0,48	S^{2-}	$S + 2e^-$	+0,48
-0,44	Fe	$Fe^{2+} + 2e^-$	+0,44
-0,28	Co	$Co^{2+} + 2e^-$	+0,28
-0,23	Ni	$Ni^{2+} + 2e^-$	+0,23
-0,13	Pb	$Pb^{2+} + 2e^-$	+0,13
0,00	H_2	$2H^+ + 2e^-$	0,00
+0,15	Cu^+	$Cu^{2+} + e^-$	-0,15
+0,34	Cu	$Cu^{2+} + 2e^-$	-0,34
+0,40	$2(OH)^-$	$H_2O + 1/2 O_2 + 2e^-$	-0,40
+0,52	Cu	$Cu^+ + e^-$	-0,52
+0,54	$2I^-$	$I_2 + 2e^-$	-0,54
+0,77	Fe^{2+}	$Fe^{3+} + e^-$	-0,77
+0,80	Ag	$Ag^+ + e^-$	-0,80
+0,85	Hg	$Hg^{2+} + 2e^-$	-0,85
+1,09	$2 Br^-$	$Br_2 + 2e^-$	-1,09
+1,23	H_2O	$2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^-$	-1,23
+1,36	$2 Cl^-$	$Cl_2 + 2e^-$	-1,36
+2,87	$2 F^-$	$F_2 + 2e^-$	-2,87

Figura 3. Tabela de Potencial de Redução dos Metais

Lembra que dissemos que se colocarmos um condutor junto com outro o sistema passa a se comportar como um único condutor? O mesmo acontece quando juntamos dois metais com um fio (como em uma pilha elétrica). Eles passam a se comportar como um único pedaço de metal com vários elétrons livres que irão fluir de um eletrodo para o outro.

Como o cátodo quer reduzir mais que o ânodo, quando os elétrons chegam no cátodo, acabam ficando mais tempo “aderidos” aos átomos da região antes de continuar seu movimento aleatório. O que acontece no final é que o cátodo acaba se tornando um terminal positivo (de entrada de elétrons) e o ânodo um terminal negativo (de saída de elétrons), gerando uma diferença de potencial que pode ser utilizada para ligar equipamentos eletrônicos simples.

Dessa forma, podemos dizer que as pilhas convertem energia química (proveniente do potencial de redução dos eletrodos) em energia elétrica.

Importante notar que a grande vantagem da célula galvânica é a praticidade. Podemos levar pilhas para qualquer lugar, e estocá-las por tempo indeterminado, além de serem dispositivos muito compactos. A grande desvantagem é que são extremamente caras!



Uma pilha gera de 1 a 10 Wh e custa cerca de 10 reais. Já a energia elétrica que pagamos custa cerca de R\$ 0,30 por 1000 Wh, proveniente de geradores elétricos em usinas hidrelétricas.

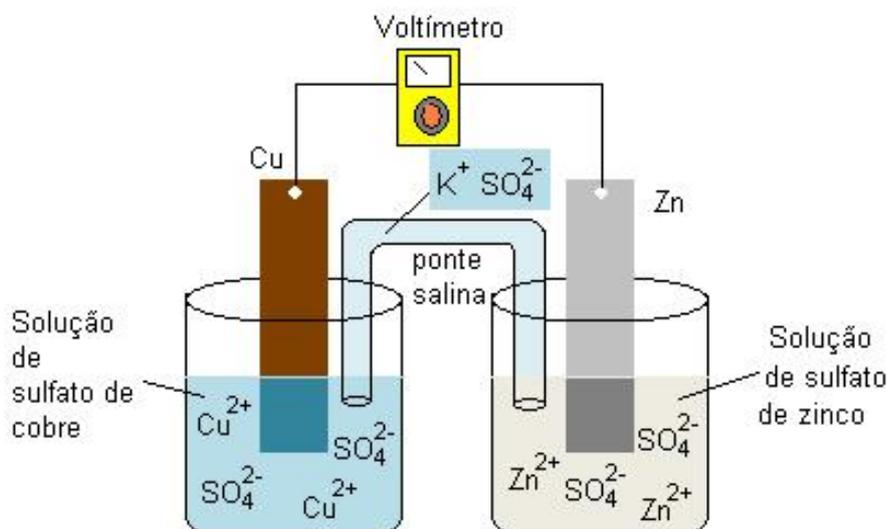


Figura 4. Célula Galvânica de Cobre e Zinco

1.2.2. Gerador Elétrico

Um Gerador Elétrico é um dispositivo que converte energia mecânica em energia elétrica a partir do fenômeno da indução magnética. Iremos estudar mais sobre geradores e motores em Magnetismo, mas aqui iremos explicar o básico.

Os principais exemplos de geradores são: turbinas a vapor, turbinas a gás, turbinas hidráulicas, turbinas eólicas e motores de combustão interna.

Vamos explicar como funciona um desses tipos, a turbina hidráulica, utilizada em hidrelétricas para converter a energia potencial gravitacional da água em energia elétrica.

Para criar uma hidrelétrica inicialmente devemos criar uma barragem que faça com que a água tenha um desnível, e conseqüentemente uma diferença de energia potencial gravitacional.

Essa água quer “cair”, e se colocarmos pás de uma turbina abaixo dessa queda, a colisão da água irá movimentar as pás. Quando colocamos grandes ímãs nessas pás acabamos criando um campo magnético variante. Pela lei de Faraday, campos magnéticos que variam criam campos elétricos e diferenças de potencial, e isso irá induzir uma corrente induzida em um circuito conectado à turbina.

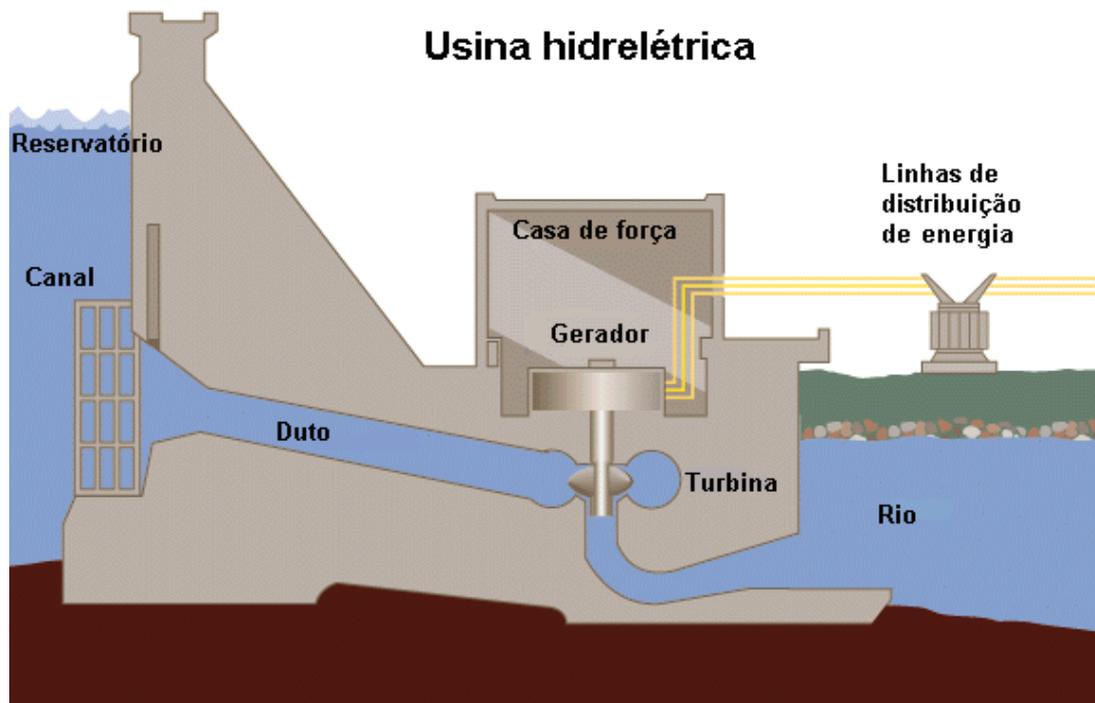


Figura 5. Funcionamento de uma Usina Hidrelétrica

1.2.3. Gerador Termoelétrico

O gerador termoelétrico é um dispositivo que converte energia térmica em energia elétrica a partir do princípio da difusão eletrônica.

Imagine uma barra metálica no qual começamos a aquecer uma das extremidades. Nessa extremidade os átomos estarão mais rápidos e os elétrons terão maior velocidade, fazendo com que mais elétrons saiam da extremidade quente do que da extremidade fria. No final acabamos por criar uma densidade eletrônica maior na extremidade fria do que na extremidade quente, gerando uma diferença de potencial.

Para entender a imagem abaixo note que existe outra classificação para condutores (ou semicondutores), os do tipo-N (onde as cargas livres são negativas) e os do tipo-P (onde as cargas livres são elétrons).

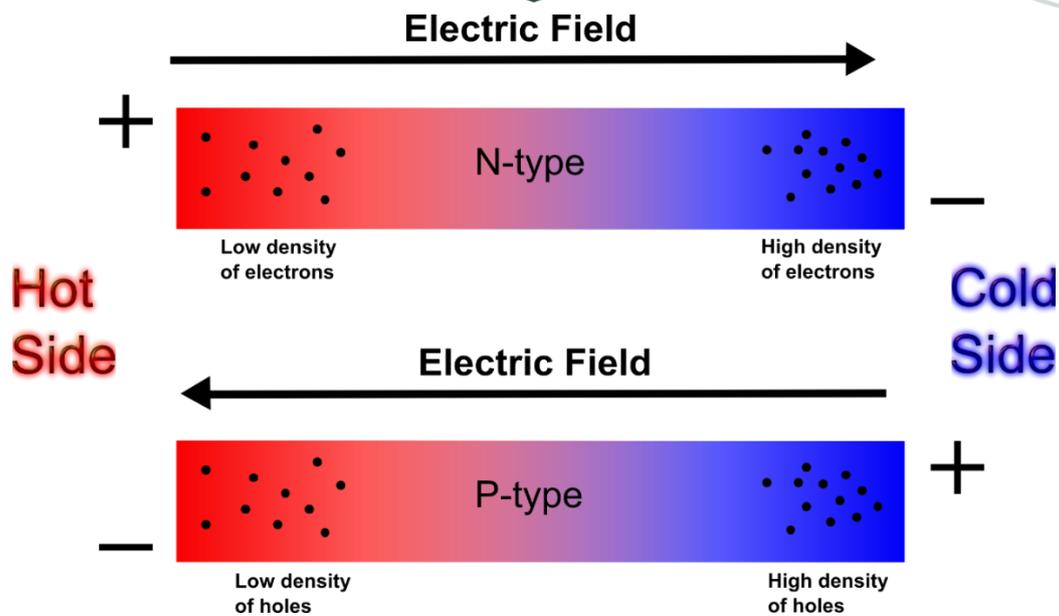


Figura 6. Efeito Termoelétrico

1.2.4. Gerador Piezoelétrico

Um gerador piezoelétrico é um gerador que converte diretamente ou por intermédio de energia química, a energia mecânica em energia elétrica.

Alguns cristais possuem essa propriedade. Imagine que um cristal seja composto por átomos distintos que possuem uma compactação e distribuição eletrônica diferente. Quando exercemos tensão sobre esse cristal acabamos deformando a estrutura de compactação dos átomos. Mas como os átomos possuíam estrutura de compactação distinta acabamos formando um dipolo de cargas (o centro da estrutura de um não mais coincidirá com o centro do outro). Um dipolo elétrico naturalmente cria uma diferença de potencial elétrico.

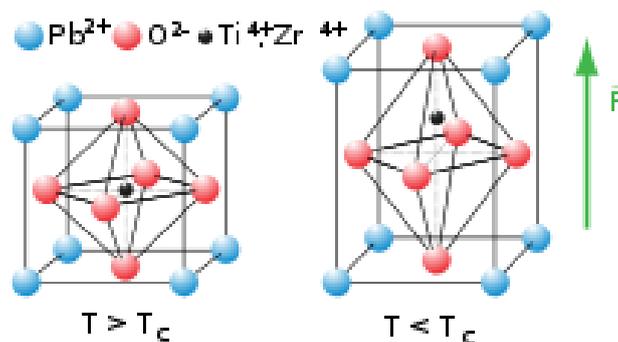


Figura 7. Exemplo de cristal sujeito ao efeito piezoelétrico

1.2.5. Gerador Fotoelétrico

Finalmente um gerador fotoelétrico é um gerador que converte energia luminosa (ou radiante) em energia elétrica.

Vamos inicialmente diferenciar energia radiante de energia luminosa. A energia radiante é a energia proveniente de uma onda eletromagnética qualquer (incluindo raios-X, raios-gama, UV,



Infravermelho, por exemplo). Já uma energia luminosa é uma energia proveniente exclusivamente de luz visível. Entretanto, esses termos são frequentemente misturados.

Um gerador fotoelétrico por ser criado a partir do efeito fotoelétrico (que estudaremos em Física Moderna) ou do efeito fotovoltaico. No segundo, temos uma célula fotovoltaica que absorve fótons de radiação eletromagnética. Os átomos, ao absorverem tal radiação, irão se excitar, e ocorrerá uma difusão eletrônica similar à do efeito termoelétrico.

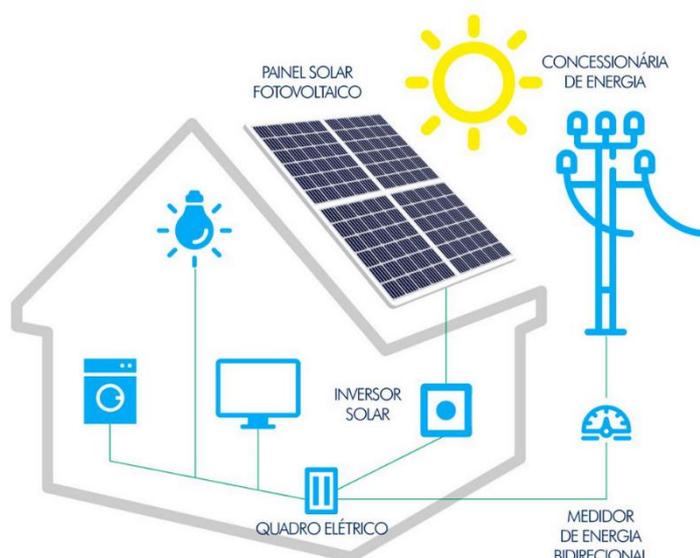


Figura 8. Célula fotovoltaica

1.3. O sentido e a intensidade da corrente elétrica

Aos estudarmos corrente elétrica (condução de carga elétrica) podemos fazer uma analogia com alguns outros fenômenos, como a condução de calor, uma grandeza que flui de corpos de maior temperatura para corpos de menor temperatura e o fluxo de água dos rios que é estabelecido das regiões mais alta para as regiões mais baixas.

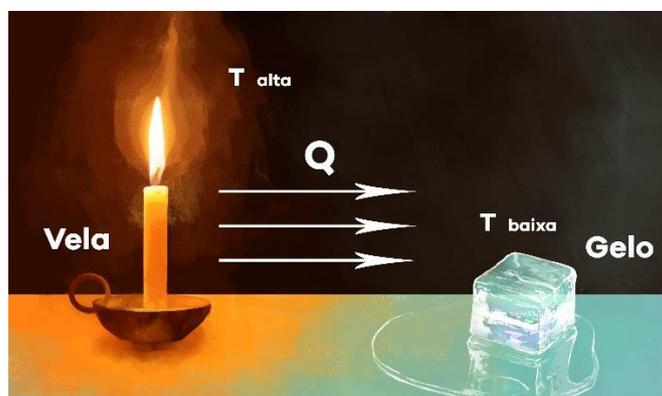


Figura 9: O calor flui da vela (em maior temperatura) para o gelo (em menor temperatura).



Figura 10: A água flui de grandes alturas para baixas alturas, como ocorre em cachoeiras, por exemplo.

Tanto o calor quanto a água vão de regiões de maior potencial e energia potencial para regiões de menor potencial e energia potencial. Ainda não aprendemos energia térmica ou potencial gravitacional pois esses assuntos irão ser vistos em aula futura, por ora aceite o que será dito.

Para o calor, o potencial nada mais é do que a temperatura (T) e a energia potencial nada mais é do que a energia térmica ($\frac{3kT}{2}$). Além disso, pela Lei Zero da Termodinâmica, o calor sempre flui espontaneamente de um corpo mais quente para um corpo mais frio. Como o potencial e a energia térmica são proporcionais à temperatura, o corpo mais quente tem maior potencial térmico e energia térmica, de forma que o calor sempre flui do maior potencial e da maior energia potencial para o menor.

Para a água o potencial gravitacional é definido como gh e a energia potencial gravitacional vale mgh . Como a água sempre se move espontaneamente de regiões de maior altura para menor (você não vai ver um rio subindo uma montanha), o fluxo de [água também flui espontaneamente de regiões de maior potencial e energia para menor).

Na verdade, existe uma Lei muito Geral que dita sobre esse fenômeno em um conceito mais aberto, que é a segunda Lei da Termodinâmica. Uma de suas interpretações diz que **um sistema físico sempre tende espontaneamente ao seu estado de mínima energia**. Podemos pensar nesse fato de maneira mais didática. Imagine que temos um sistema e sua vizinhança. Nosso sistema é uma bola largada do ponto A da rampa abaixo. Veja que a bola irá ficar oscilando entre A e B. A nossa vizinhança é a rampa e o resto do universo.



Figura 11. A bola irá oscilar entre A e B

Inicialmente a bola irá ficar oscilando entre A e B. Entretanto, com o tempo, irá perder energia devido a efeitos dissipativos e variações que não poderá ser absorvida de volta. O resultado é que a bola irá começar a oscilar entre regiões de menor altura (energia potencial) até que no final irá parar. Isso acontece com todos os sistemas do universo.

Mas veja que a **Segunda Lei da Termodinâmica** fala especificamente sobre a **energia** dos sistemas e não sobre o seu potencial. Não iremos entrar na definição matemática de potencial aqui, mas entenda que o potencial sempre pode ser definido a partir da energia potencial da seguinte forma:

$$U = kV$$



Onde U é a energia potencial, V é o potencial, e k uma constante.

No caso da energia térmica essa constante vale $\frac{3k}{2}$, onde k é a constante de Boltzmann. Logo, a constante usada na energia térmica é positiva e tanto a energia térmica quanto o potencial térmico tem o mesmo sinal (positivos).

No caso da energia potencial gravitacional essa constante é a massa (que é sempre positiva), de forma que tanto o potencial gravitacional quanto a energia potencial gravitacional tem o mesmo sinal (positivos).

Dessa forma, como para os casos acima a energia potencial e o potencial tem o mesmo sinal, se um aumenta o outro também aumenta, de forma que, **para os casos acima**, o sistema também tende para regiões de mínimo potencial.

Dessa forma, quando os cientistas descobriram a corrente elétrica eles pensaram que a mesma surgia da diferença de potencial e deveria ser um fluxo de cargas que se dirige do maior para o menor potencial.

Entretanto, no caso da energia potencial elétrica a constante acima é a carga elétrica, que pode ser positiva ou negativa! No caso da carga positiva tudo encontra-se como o esperado (regiões de mínima energia equivalem a regiões de mínimo potencial) mas no caso de cargas negativas isso se inverte (regiões de mínima energia equivalem a regiões de máximo potencial).

Consequentemente, as únicas cargas que obedecem a essa lógica são cargas positivas e, por isso, eles concluíram na época que a corrente elétrica era um fluxo de cargas positivas que se moviam do maior para o menor potencial.

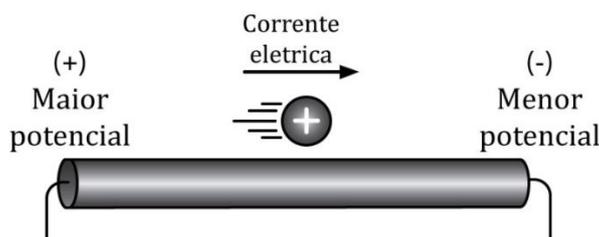


Figura 12: A corrente elétrica se estabelece do maior para o menor potencial, então, trata-se de um fluxo de cargas positivas.

Porém, no início do século XX, com o avanço dos modelos atômicos, logo se descobriu que a corrente elétrica na realidade era um fluxo de elétrons livres. Como já havia passado cerca de 100 anos e já se haviam estabelecidos diversos modelos e aspectos técnicos, que se baseavam na corrente como fluxo de cargas positivas, então, foi convenicionado não trocar este sentido. Entretanto, foi criado uma equivalência entre os portadores de carga.

A carga negativa ($-q$) que se move em um sentido deve ser substituída por uma carga positiva ($+q$) em sentido oposto com igual velocidade.



Figura 13: Convenção para movimentação dos portadores de carga na corrente elétrica.

Portanto, devemos considerar que a corrente elétrica em um condutor é o movimento das cargas positivas que se dirigem de maior para o menor potencial, mesmo sabendo que quem se move mesmo, na maioria dos casos, são elétrons.

Considere um fio de metal conectado entre 6 e 12V, conforme o esquema abaixo.

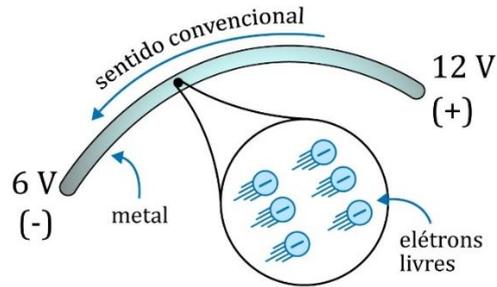


Figura 14: Movimento dos elétrons livres e o sentido convencional da corrente elétrica.

Sabemos que, na realidade, os elétrons irão se movimentar do menor para o maior potencial (da esquerda para a direita). Entretanto, para efeitos de cálculo de corrente elétrica, iremos considerar que prótons fictícios estão se movimentando da direita para a esquerda. Essa corrente imaginária que criamos é denominada **corrente convencional** e é a corrente que devemos utilizar em exercícios.

Chamamos de **corrente real** a corrente oposta (elétrons), e essa não é utilizada a não ser que o examinador explicitamente discorra sobre.

A corrente elétrica então é definida como o módulo da carga que passou em uma secção transversal do fio em um segundo, ou seja:

$$i = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t}$$

Em que $|\Delta Q|$ é o valor da quantidade de carga e Δt é o intervalo de tempo. A unidade de corrente no SI é o ampère (A). Então:

$$1 A = \frac{1 C}{1 s}$$

O que significa $i = 3 A$? Se a corrente é contínua (constante), então significa que passam 3 C de carga pela secção transversal de um fio a cada 1 s.

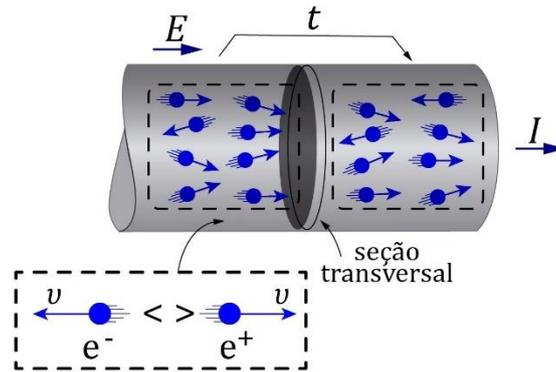


1)

Por uma secção transversal de um condutor passam $5 \cdot 10^{17}$ elétrons livres em 20 s. Determine a intensidade da corrente elétrica no condutor. Suponha que a corrente é contínua.

Comentários:

Por esta secção transversal do condutor passam as cargas negativas e^- , mas podemos substituir essas cargas pelo seu equivalente e^+ , alterando o sentido de deslocamento.



De acordo com o enunciado, a corrente é contínua, isto é, sua magnitude permanece constante. Então:

$$i = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t}$$

A quantidade de carga que atravessa o condutor é dada por:

$$|\Delta Q| = n \cdot |q_{e^-}| = 5 \cdot 10^{17} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ C}$$

Portanto:

$$i = \frac{8 \cdot 10^{-2}}{20} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ A ou } i = 4 \text{ mA}$$



1.4. Gráfico $i \times t$

Em muitos casos, devemos analisar como a corrente elétrica está variando com o tempo. Podemos ter diversas curvas que representam a intensidade i de uma corrente elétrica qualquer em função do tempo t , como no gráfico abaixo:

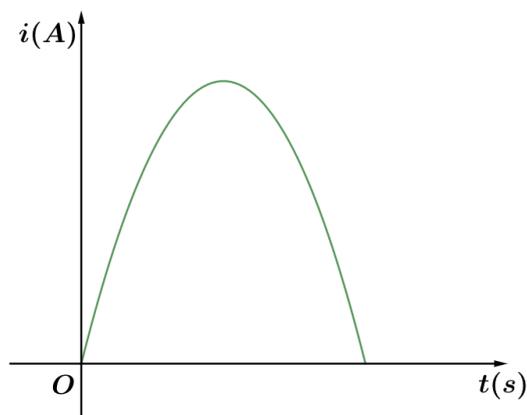


Figura 15: Gráfico de uma corrente elétrica qualquer que atravessa uma secção transversal de um condutor.

Quando representamos a corrente dessa forma, surge uma propriedade muito interessante:



A área compreendida entre a curva e o eixo do tempo, calculada para um intervalo de tempo de interesse, é numericamente igual ao módulo da carga elétrica que atravessou uma secção transversal do condutor.

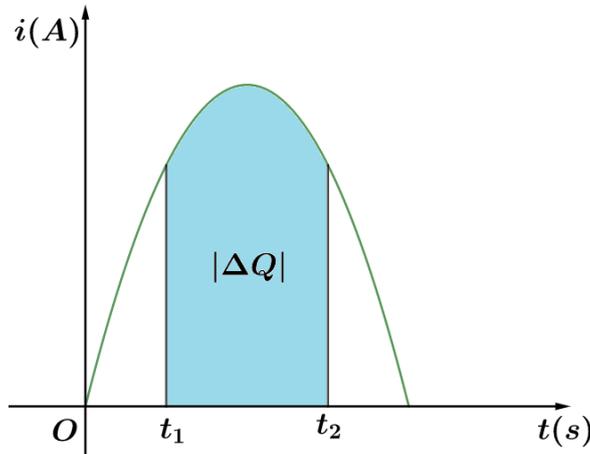


Figura 16: No gráfico $i \times t$, tem-se que $|\Delta Q| = \text{"área"}$.

Isso pode ser justificado pelas regras de derivação/integração:

$$i = \frac{dQ}{dt} \rightarrow \Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt$$

Podemos ainda classificar as correntes elétricas de acordo com a forma do gráfico $i \times t$.

1.4.1. Corrente contínua constante

Chamamos de corrente contínua constante aquela que mantém sua intensidade e sentido constantes no decorrer do tempo. Graficamente, tem-se que:

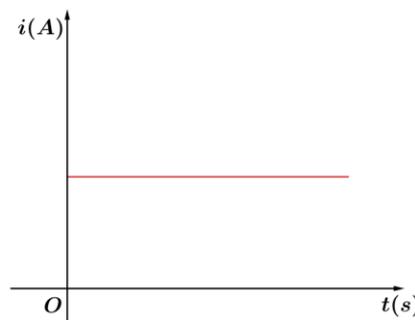


Figura 17: Corrente contínua constante.

1.4.2. Corrente contínua pulsante

É aquela cuja intensidade possui máximos e mínimos, periodicamente, embora o sentido permaneça inalterado.

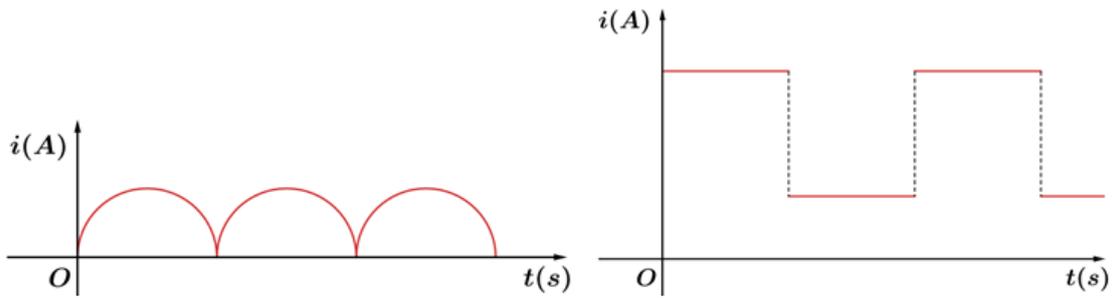


Figura 18: Exemplos de correntes contínuas pulsantes.

1.4.3. Corrente alternada

É aquela cujo sentido é invertido periodicamente. Geralmente, correntes alternadas são funções periódicas com média zero (ex: a função seno).

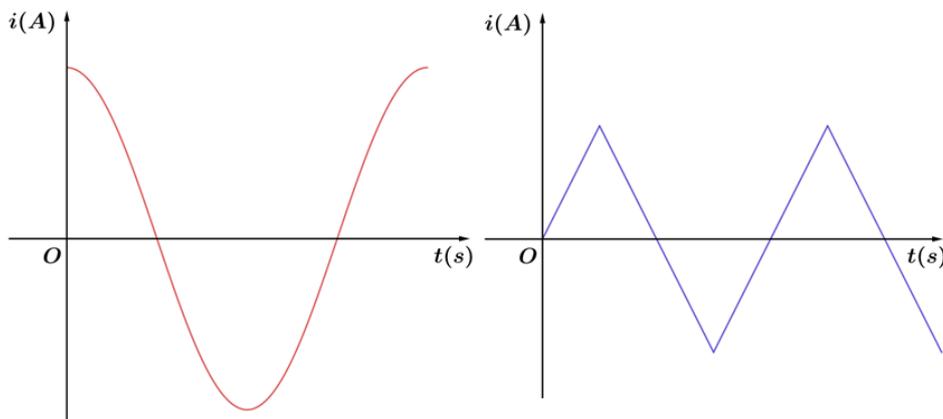
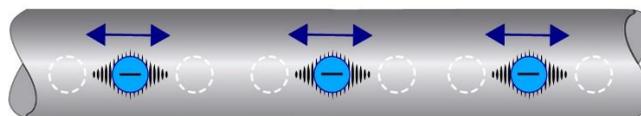


Figura 19: Exemplos de correntes alternadas.

Veja os gráficos acima. Se você tentar achar a área da função (e conseqüentemente a sua média) chegará no valor nulo. Isso porque a área acima do eixo x é numericamente igual à área abaixo do eixo x em um ciclo.

Note que, em um condutor metálico percorrido por corrente contínua, os elétrons livres sempre caminham no mesmo sentido (por exemplo, para a direita). No caso do condutor ser percorrido por uma corrente alternada, os elétrons livres oscilam em torno de determinadas posições (indo para a direita e depois voltando para a esquerda, nunca saindo de sua posição central):



Corrente alternante.

Figura 20: Movimento dos elétrons na corrente alternada.

Essa situação ocorre em uma rede elétrica residencial quando algum aparelho é ligado a ela. Provavelmente você deve ter ouvido falar que a rede elétrica no Brasil tem uma frequência de 60 Hz (lê-se sessenta hertz).

Isso quer dizer que, por exemplo, quando você liga uma lâmpada na sua casa, o valor algébrico da corrente estabelecida varia conforme o gráfico da figura abaixo:

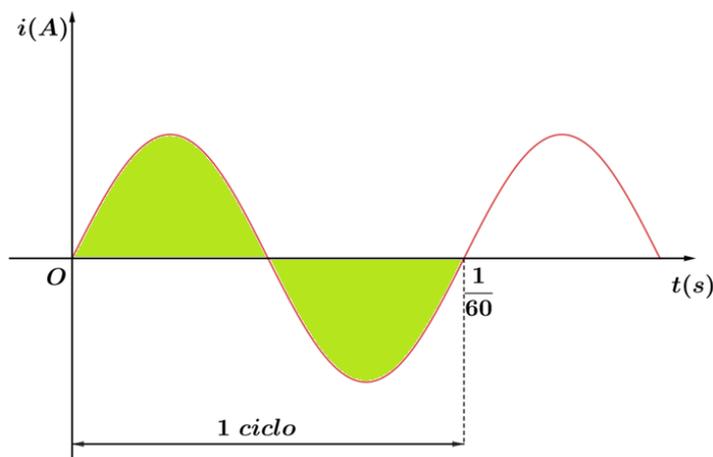


Figura 21. Corrente de 60 Hz

Perceba que uma variação completa de i demora $1/60$ s. Por isso, dizemos que ocorreram 60 ciclos a cada segundo. Então, a frequência da rede elétrica é igual a 60 ciclos por segundo, em outras palavras, 60 Hz.



1.5. A velocidade de deriva ou de arraste do elétron

Quando apertamos um interruptor de uma lâmpada, o circuito elétrico é fechado e parece que repentinamente a luz começa a brilhar e, por isso, somos levados a pensar que a corrente elétrica é muito rápida.

Entretanto, não é bem assim que acontece. Na verdade, os elétrons livres se encontram em todo filamento do condutor e o campo elétrico criado pela fonte elétrica se estabelece rapidamente no fio (na velocidade da luz), começando então a movimentar os elétrons livres.

Dessa forma, o campo acelera os elétrons livres em direção paralela às linhas de campo, mas antes de ter uma velocidade ordenada considerável, conforme comentamos, os elétrons se chocam com os átomos transferindo momento linear e energia, e conseqüentemente não conseguem chegar em uma velocidade ordenada (velocidade de deriva) muito rápida. É por isso que os fios se esquentam quanto atravessados por uma corrente elétrica (as colisões dissipam calor por efeito joule).

Por causa dessa dificuldade de locomoção, a velocidade de deriva dos elétrons é muito pequena. Por exemplo, em um sistema elétrico de um automóvel a velocidade de deriva é próxima de 10^{-4} m/s. Neste ritmo, um elétron levaria cerca de três horas para percorrer um cabo de 1 metro de comprimento.

Quando não há um campo elétrico no interior de um condutor, os elétrons se movimentam livremente de modo aleatório, semelhante as moléculas de um gás em um recipiente. Na temperatura ambiente, os elétrons têm uma rapidez da ordem de 10^6 m/s.

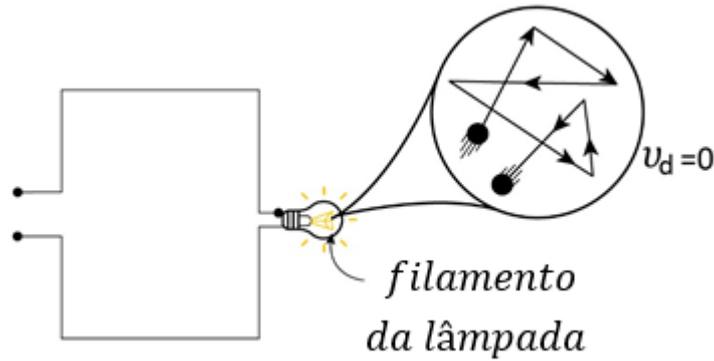


Figura 22: Elétons em movimento aleatório, pois não há um campo no interior do condutor.

Neste caso, não há corrente elétrica no filamento de luz, já que o movimento dos elétrons é aleatório e não existe um fluxo líquido de cargas em uma direção específica ($v_d = 0$).

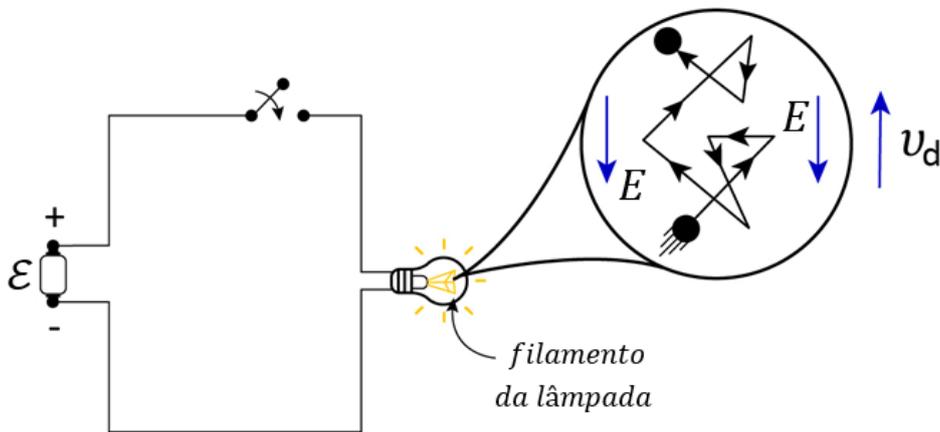


Figura 23: Estabelecimento do campo elétrico no interior do condutor e a velocidade de deriva dos elétrons livres.

Quando se estabelece o campo elétrico no interior do condutor, os elétrons livres são arrastados por esse campo. Entretanto, devido aos choques dos elétrons com os átomos do metal, o movimento resultante é um pouco complicado, gerando um zigue-zague (a figura acima está bem exagerada, visto que a velocidade ordenada é muito menor que a velocidade aleatória).

Vamos relacionar a intensidade da corrente elétrica com o movimento dos portadores de carga. Para ilustrar essa relação, considere um pedaço de um condutor de comprimento L , de área de seção transversal A e de concentração eletrônica (número de elétrons livres por volume) n .

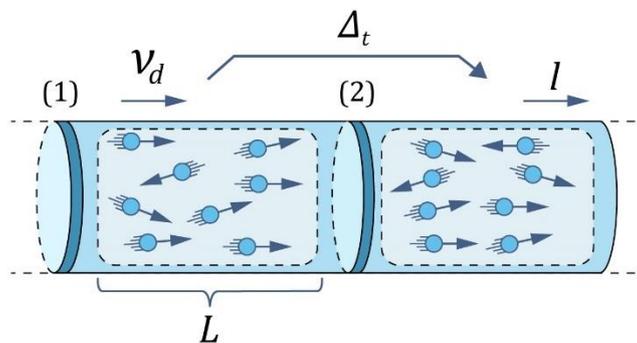


Figura 24: Volume definido em uma região de um condutor onde há movimento ordenado de portadores de carga.

No volume do condutor limitado por 1 e 2, o número de elétrons é dado por:

$$\#elétrons = n \cdot volume = n \cdot (A \cdot L)$$

Então, a quantidade de carga neste volume é de:



$$|Q| = \#elétrons \cdot e$$

$$|Q| = n \cdot A \cdot L \cdot e$$

Em que e é o valor da carga elementar (absoluta do elétron). Se as partículas se movem da esquerda para a direita com velocidade média v_d , então após um intervalo de tempo Δt , todas as partículas que existem no volume considerado deverão passar através da secção 2. Então:

$$v_d = \frac{L}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{L}{v_d}$$

A intensidade da corrente elétrica é dada por:

$$i = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} \Rightarrow i = \frac{n \cdot A \cdot L \cdot e}{\frac{L}{v_d}}$$

$$i = n \cdot A \cdot v_d \cdot e$$

Portanto, a velocidade de deriva dos elétrons é de:

$$v_d = \frac{i}{nAe}$$

Em que:

- i : intensidade de corrente (A);
- e : carga elementar igual a $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;
- n : concentração eletrônica (m^{-3}); e
- A : área da secção transversal (m^2).

Se a área da secção transversal é constante, então a corrente elétrica é diretamente proporcional a velocidade de deriva.

ATENÇÃO
DECORE!



2)

Em um fio de cobre, a intensidade da corrente é de 1 A e a área da secção transversal do condutor é de 10^{-6} m^2 . Além disso, o número de elétrons em um 1 m^3 de cobre é de $8,5 \cdot 10^{28}$. Calcule a velocidade de deriva dos elétrons livres.

Comentários:

A velocidade de deriva é dada por:

$$v_d = \frac{i}{|q_e| \cdot N \cdot A}$$

A concentração eletrônica pode ser calculada por:

$$N = \frac{\#elétrons}{\text{volume}} = \frac{8,5 \cdot 10^{28}}{1 \text{ m}^3} = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

Portanto:



$$v_d = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \Rightarrow v_d = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

3) Calcule a velocidade de deriva de um fio de ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ com diâmetro de 1 mm se a densidade do Fe vale $7,9 \text{ g/cm}^3$ e o fio está sujeito a 2A.

Comentários:

Inicialmente devemos calcular a quantidade de elétrons por volume no Ferro. Veja que o Ferro tem distribuição eletrônica $[\text{Ar}]3d^64s^2$ e conseqüentemente tem 2 elétrons na última camada. Nos metais, os elétrons da camada de valência são considerados livres e portanto o Ferro tem 2 elétrons livres por átomo. Vamos calcular quantidade de elétrons em um metro cúbico.

Um m^3 de Ferro tem 7,9 quilogramas, que equivale a $\frac{7900}{26} = 304 \text{ mols}$ de átomos e 608 mols de e^- . Logo a concentração eletrônica do Ferro será:

$$n = \frac{608 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{1} = 3,65 \cdot 10^{26} \text{ e}^-/\text{m}^3$$

A área da secção transversal é:

$$A = \pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2 = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

E a velocidade de deriva:

$$v_d = \frac{2}{3,65 \cdot 10^{26} \cdot 7,85 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4 \text{ cm/s}$$

INDO MAIS
FUNDO!



1.6. Densidade de corrente (\vec{J})

Quando analisamos com mais detalhe o fluxo de cargas, pode haver casos em que o movimento é não uniforme em toda a secção transversal do condutor. Por isso, é necessário caracterizar a magnitude de cargas que atravessa uma determinada área em o fluxo é uniforme. Chamamos essa magnitude de densidade de corrente.

Se o fluxo de cargas é uniforme em toda secção do condutor (corrente contínua), a densidade de corrente (em módulo) é dada por:

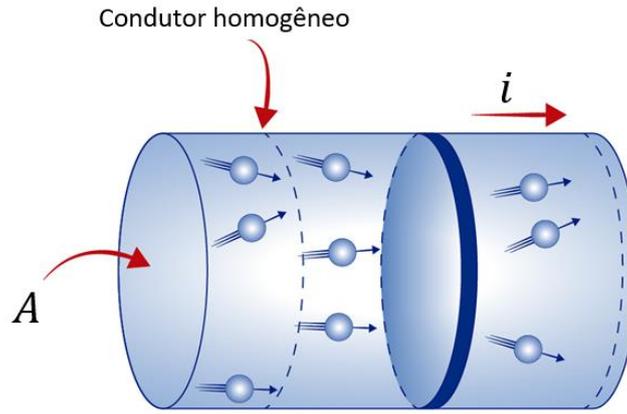


Figura 25: Condutor homogêneo em que a corrente de intensidade i atravessa a secção transversal de área A .

$$J = \frac{i}{A}$$

A unidade de densidade de corrente no SI é A/m^2 .

A densidade de corrente é uma grandeza vetorial e tem direção normal à área transversal e sentido igual ao da corrente.

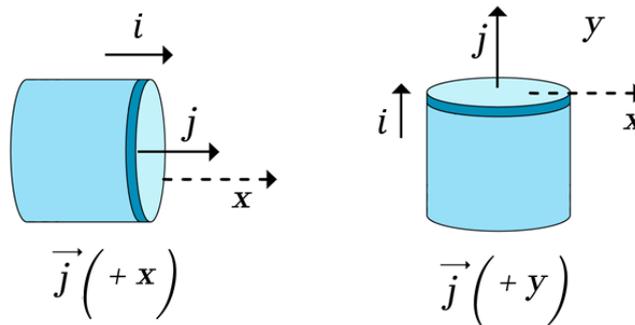


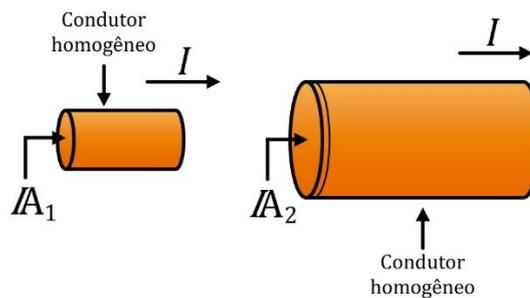
Figura 26: Densidade de corrente é uma grandeza vetorial.

ATENÇÃO
DECORE!



3)

Na figura, temos dois condutores de secções transversais diferentes que transportam a mesma intensidade de corrente. Determine j_1/j_2 sabendo que $A_2 = 4A_1$.



Comentários:

Por definição, sabemos que:



$$j_1 = \frac{i}{A_1} \text{ e } j_2 = \frac{i}{A_2}$$

Ou seja:

$$j_1 \cdot A_1 = i = j_2 \cdot A_2$$

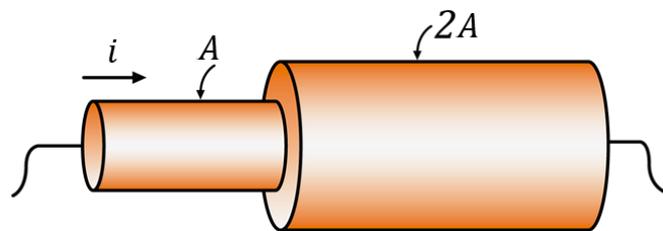
Portanto:

$$j_1 \cdot A_1 = j_2 \cdot 4 \cdot A_1$$

$$\boxed{\frac{j_1}{j_2} = 4}$$

4)

A figura em questão mostra um condutor que altera sua área de secção transversal. Determine a razão j_1/j_2 .



Comentários:

Na primeira parte do condutor, temos:

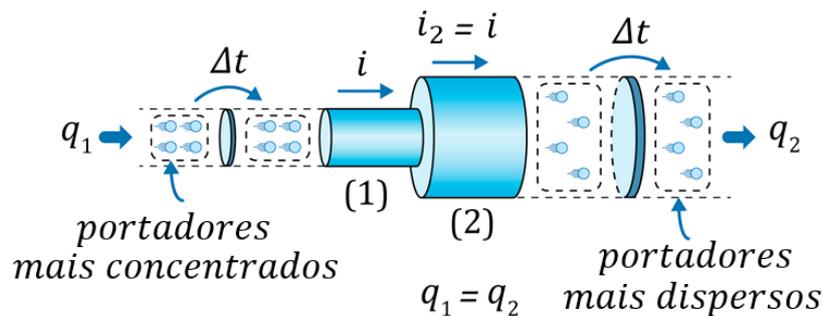
$$j_1 = \frac{i}{A}$$

Na segunda parte, tem-se:

$$j_2 = \frac{i_2}{2A}$$

Não sabemos quanto é i_2 . Assim, devemos ter em mente que a carga que flui pelo condutor não se acumula em nenhuma parte do condutor. Logo, não há acúmulo nem perda de cargas quando elas atravessam o condutor.

Portanto, a quantidade de carga que entra na primeira parte do condutor é igual a quantidade de carga que entra na outra região do condutor ($q_1 = q_2$) em um mesmo intervalo de tempo. Tal fato também é conhecido como conservação da carga elétrica. Então, podemos afirmar que $i = i_2$. Esquemáticamente, temos:



Portanto:

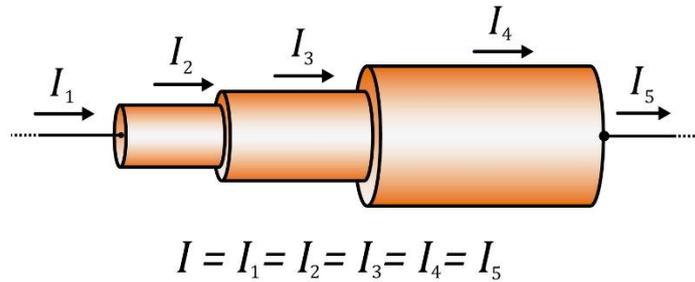
$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{\frac{i}{A}}{\frac{i}{2A}} \Rightarrow \boxed{\frac{j_1}{j_2} = 2}$$



Ou seja, $j_1 > j_2$.

Este resultado nos mostra que a quantidade de carga que flui se encontra mais concentrada (maior densidade de corrente) na região onde secção transversal é menor (primeira parte do condutor). Na segunda parte, as partículas se encontram mais dispersas (menor a densidade de corrente), mas a quantidade de carga que atravessa a secção transversal em cada parte do conduto, para um mesmo intervalo de tempo, é a mesma.

Observação: de um modo geral, se um condutor apresenta secções transversais de diferentes áreas, em cada trecho do condutor, as intensidades de correntes são iguais, alterando apenas a densidade de corrente:



1.7. O princípio da continuidade da corrente elétrica

Como vimos anteriormente no tópico sobre densidade de corrente, ainda que o condutor tenha secção transversal variável, a corrente que atravessa ele é a mesma.

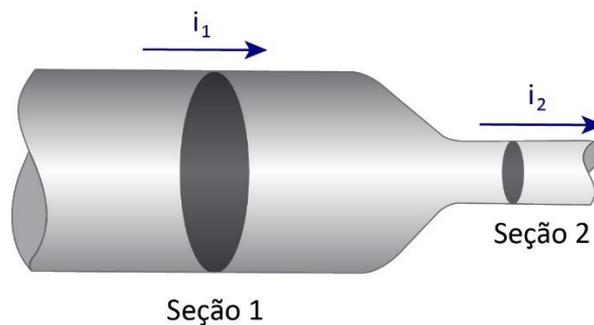


Figura 27: Secção de área transversal variável.

Consequentemente, caso o caminho da corrente elétrica sofra uma fragmentação, a soma das correntes em cada ramo será igual à corrente total antes da ramificação.

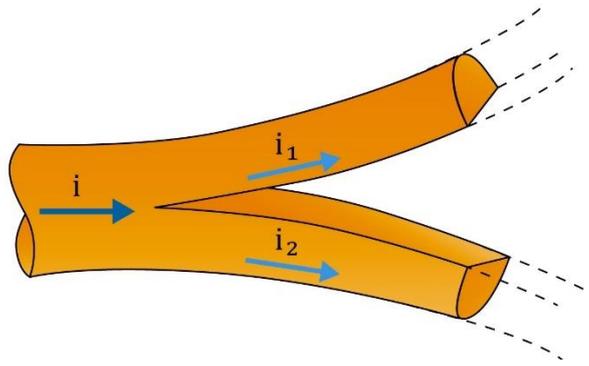


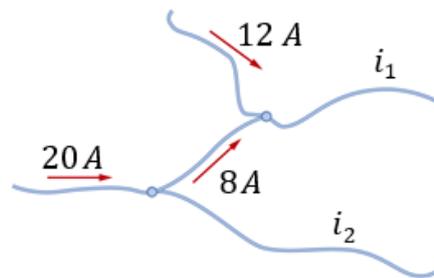
Figura 28: Ramificação da corrente de acordo com a divisão sofrida pelo condutor.

ATENÇÃO
DECORE!



5)

A figura ilustra fios de cobre interligados:



Determine os valores de i_1 e i_2 :

Comentários:

Pelo princípio da continuidade da corrente elétrica, temos:

$$\begin{cases} 12 + 8 = i_1 \\ 20 = 8 + i_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = 20 \text{ A} \\ i_2 = 12 \text{ A} \end{cases}$$

1.7.1. Bipolo elétrico

Um bipolo elétrico é qualquer dispositivo que contenha dois terminais elétricos que são capazes de serem ligados a um circuito elétrico. Se o bipolo está inserido em um circuito, a corrente elétrica entra por um dos seus terminais e sai pelo outro.

De um modo geral, um bipolo pode consumir ou fornecer energia a um circuito elétrico. Alguns exemplos de bipolos são: resistores, lâmpadas, geradores, capacitores, indutores, receptores, amperímetros, voltímetros, galvanômetros, ...

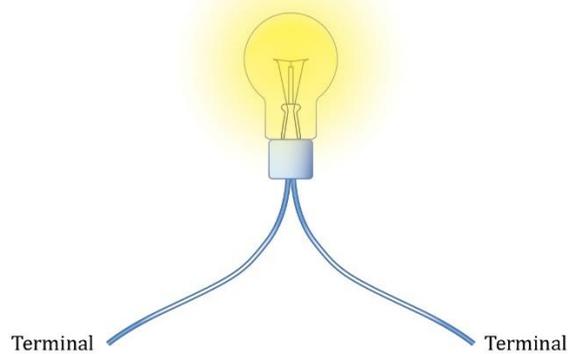


Figura 29: Lâmpada ligada acesa, exemplo de bipolo elétrico.

Em nosso curso de eletrodinâmica praticamente todos os dispositivos tratados serão bipolos. Existem dispositivos com mais de dois polos elétricos, porém eles são assuntos de nível superior (embora já tenha caído algumas perguntas sobre dispositivos desse tipo na história dos vestibulares, mas nada que não se dê para resolver com o conhecimento normal sobre eletrodinâmica). Um tripolo muito importante é o transistor, dispositivo utilizado para amplificar ou trocar sinais elétricos.



Figura 30. Transistor

ESCLARECENDO!



1.8. Potência elétrica

Para melhor entendimento do conceito de potência elétrica, vamos tomar uma lâmpada incandescente, um bipolo elétrico submetido a uma diferença de potencial constante U fornecida por uma pilha, sendo percorrido por uma corrente elétrica de intensidade i , como na figura abaixo:

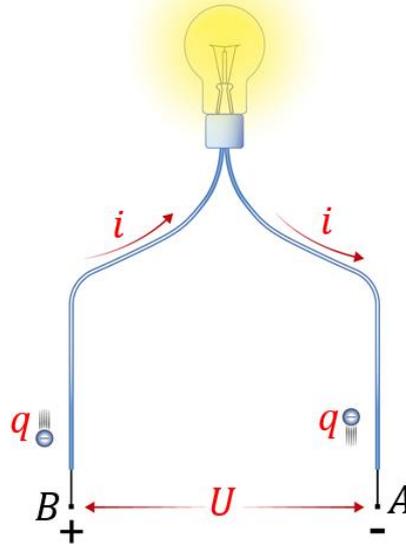


Figura 31: Corrente elétrica, movimento dos elétrons e diferença de potencial no bipolo elétrico.

Durante um intervalo de tempo dt , a lâmpada ganha uma quantidade de energia térmica dE , que é igual à energia potencial elétrica perdida por uma carga q que passou pelo bipolo. Então, a potência recebida pelo dispositivo é de:

$$P = \frac{dE_p}{dt}$$

Como vimos em Eletrostática, a energia potencial elétrica é expressa por:

$$E_p = q \cdot V$$

Portanto:

$$P = \frac{d(q \cdot V)}{dt} = V \cdot \frac{dq}{dt} = V \cdot i$$

Chamando de U a diferença de potencial, podemos calcular a potência de qualquer bipolo como:

$$P = Ui$$

CURIOSIDADE



1.8.1. Valores nominais

É muito comum os bipolos elétricos especificarem seus **valores nominais** de potência e de tensão. A **potência nominal** é a potência elétrica consumida pelo dispositivo quando submetido à **tensão nominal**, que é a tensão da rede elétrica para a qual o aparelho foi fabricado.

Por exemplo, considere que um engenheiro criou uma lâmpada com especificações nominais 60 W – 110 V. Esses são os valores nominais, ou seja, os valores que essa lâmpada foi fabricada para operar, mostrando que a lâmpada trabalha com a potência 60 W, quando submetida a uma ddp igual a 110 V.



Considere uma lâmpada incandescente. O princípio de funcionamento da lâmpada é que a resistência elétrica de tungstênio em seu interior se aquece por efeito Joule até que esse filamento de tungstênio, se comportando como um corpo negro, irradia radiação suficiente no espectro visível para que possamos observar. A lâmpada entra em equilíbrio quando a potência irradiada pelo filamento de tungstênio se iguala à potência da rede elétrica, ou seja, quando $\sigma T^4 = Ui$ (conforme veremos na aula de irradiação térmica).

Se essa lâmpada for ligada a uma tensão um pouco superior a nominal, a temperatura de equilíbrio do filamento de tungstênio aumentará, ela dissipará uma potência maior e brilhará mais intensamente, mas sua vida útil será reduzida. Se a lâmpada for ligada a uma tensão muito superior à nominal, queimará, pois o filamento de tungstênio irá derreter. Por outro lado, se a lâmpada for ligada a uma tensão inferior à nominal, a potência dissipada será menor e o seu brilho menos intenso. Se for ligada em uma tensão muito pequena, a temperatura do filamento não será suficiente para produzir radiação apreciável no espectro do visível, e ela nem acenderá.

Os valores nominais dos dispositivos elétricos são de extrema importância para projetar uma instalação elétrica. Para garantir a segurança do edifício, utilizamos um dispositivo chamado de **disjuntor**, que é responsável por garantir que os bipolos elétricos não queimem.

Basicamente, o quando a corrente que atravessa o disjuntor é superior àquela especificada nele, ele “desarma”, impedindo a passagem de corrente. A grande vantagem do disjuntor em relação ao fusível é que após cortar a passagem de corrente, ele pode ser religado para que o circuito volte a operar nas condições normais, diferentemente do fusível que deve ser trocado. Iremos estudar disjuntores e fusíveis mais detalhadamente na aula de circuitos elétricos.

Cada bipolo elétrico demandará uma corrente elétrica para o circuito. Assim, é muito importante conhecer a corrente que passa pelo bipolo, bem como saber a corrente total que entra no seu circuito. Por isso nós devemos especificar corretamente os valores nominais dos dispositivos que irão compor o circuito elétrico, evitando danos.

Afinal, o que significa os 220 volts ou os 110 volts em sua casa?

Como já mencionamos, a corrente elétrica que chega em sua residência é alternada e possui frequência igual a 60 Hz. Isso provém do fato de que a diferença de potencial U ($U = V_A - V_B$) entre os terminais de sua tomada também é uma função alternada.

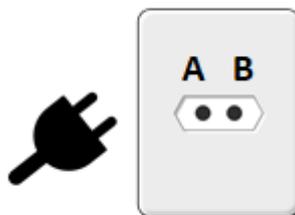


Figura 32: Representação de uma tomada simples.

Graficamente, temos que U em função do tempo, para uma tomada de 220 volts, deve variar, aproximadamente, da seguinte forma:

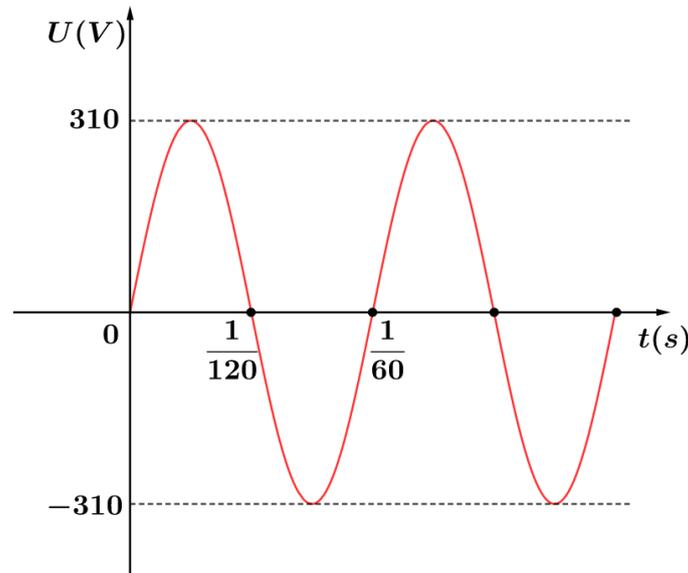


Figura 33. Tensão alternada com máximo em 310 V

Isso quer dizer que nos primeiros $1/120$ s, V_A é maior que V_B e $U > 0$. Nos próximos $1/120$ s, V_A será menor que V_B e $U < 0$. Mas por que os valores de máximos da ddp U são -310 V e $+310$ V (aproximadamente), se nossa tomada é de 220 V?

Na realidade os 220 V não existem. Eles são apenas uma tensão constante e fictícia que chamamos de **tensão eficaz**, na qual o seu aparelho elétrico produziria o mesmo efeito em termos de energia absorvida se estivesse trabalhando nessa tensão (constante) ou na **tensão real** (alternada) que varia entre -310 V e $+310$ V.

O valor máximo da tensão real (310V) é chamado de tensão de pico.

Mas como achamos os 220V a partir dos 310V? Bom, se fôssemos extrair a média da função vista no gráfico acima, iríamos encontrar zero (pois metade do tempo ela é positiva e metade negativa). Entretanto, como o valor nominal busca igualar a energia absorvida, e, conforme iremos ver, a potência dissipada por um bipolo elétrico com resistência R vale $\frac{U^2}{R}$, devemos obter a média da função U^2 e não a média da função U . Em uma função senoidal, o valor médio da função ao quadrado vale $\frac{1}{2}$, ou seja:

$$\frac{\int_0^{2\pi} \sin^2 x \, dx}{2\pi} = \frac{1}{2}$$

Com isso, dizemos que o valor quadrático médio da função seno (ou cosseno) é a raiz quadrada desse valor, ou seja, $\frac{\sqrt{2}}{2}$. No caso acima temos $U(t) = 310 \cdot \sin 120\pi t$, cujo valor quadrático médio (tensão eficaz) vale:

$$U_{eficaz} = 310 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 220 \text{ V}$$

De modo análogo, em uma tomada de 110 V, a ddp real varia entre -155 V e $+155$ V, aproximadamente.

Vale notar que no Brasil as tensões eficazes que chamamos de 220V e 110V são, na verdade, 220V e 127V. Segue um mapa abaixo das tensões usadas no mundo. Veja que o Brasil é um dos poucos países no mundo onde dentro do mesmo país são utilizadas duas tensões distintas (o que não é algo inteligente do ponto de vista da industrialização pública).

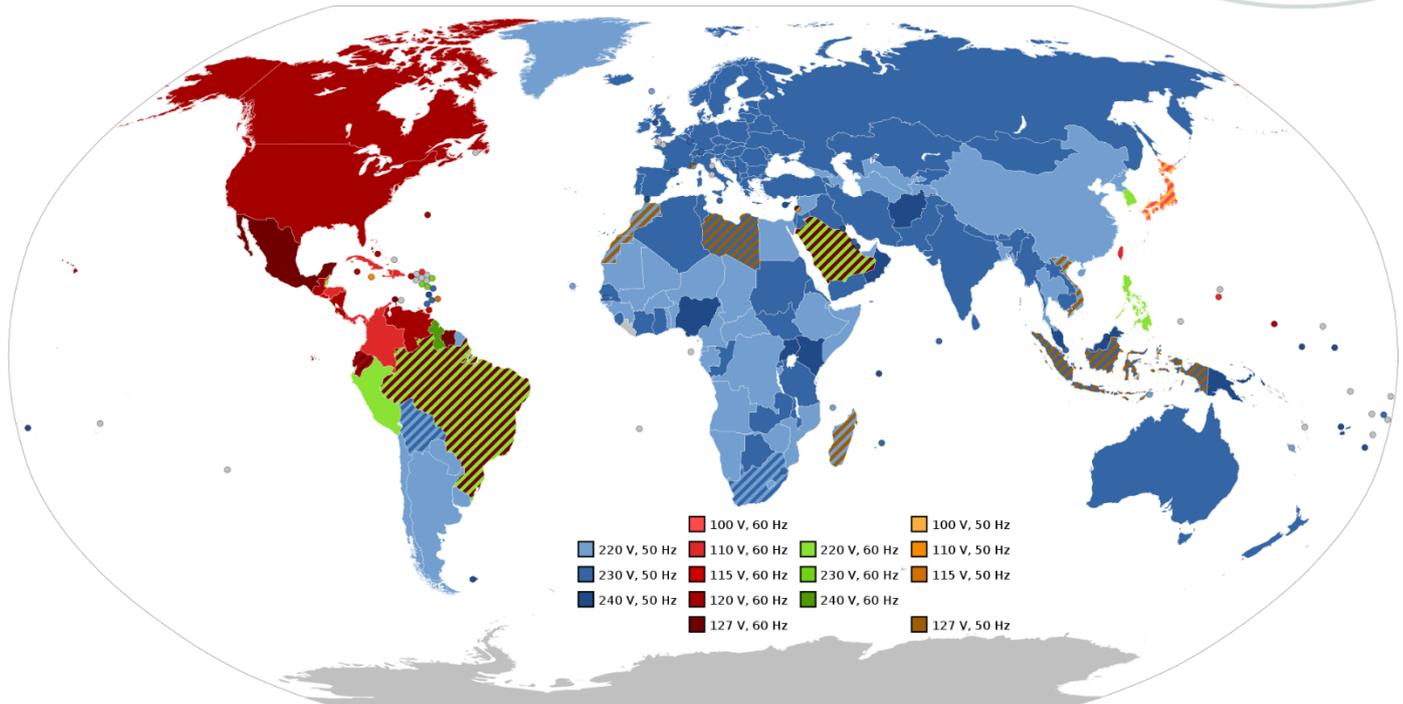


Figura 34. Mapa mundial de voltagens e frequências

1.9. Resistência elétrica

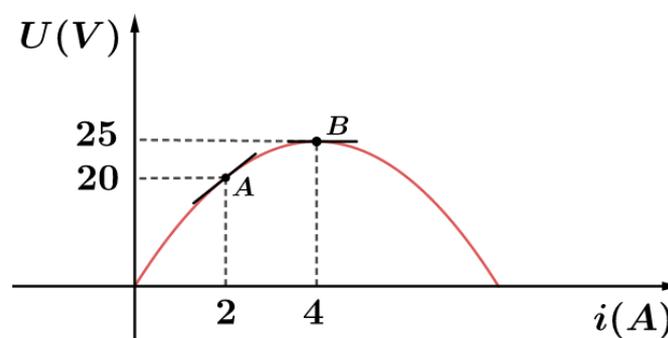
Quando um condutor é submetido a uma tensão elétrica U , ele é percorrido por uma corrente elétrica i . Define-se resistência elétrica como o quociente:

$$R = \frac{U}{i}$$

A unidade de medida dessa grandeza física escalar no SI é o ohm (símbolo: Ω).

$$1 \Omega = \frac{1 V}{1 A}$$

Note que um condutor não precisa apresentar R constante necessariamente, isto é, a sua resistência pode variar com a corrente, temperatura, geometria do condutor etc. Assim, é muito importante conhecer a **curva característica** $U \times i$, que é o gráfico da tensão de um resistor em função de sua corrente:



De acordo com a definição de resistência, vemos que ela é diretamente proporcional à ddp e inversamente proporcional à corrente. Para determinar a resistência elétrica em cada ponto da curva, devemos aplicar a definição de resistência, efetuando a divisão U/i no ponto desejado. Por exemplo, para os pontos A e B da curva característica logo acima, temos:



$$\left\{ \begin{array}{l} R_A = \frac{20}{2} = 10 \, \Omega \\ R_B = \frac{25}{4} = 6,25 \, \Omega \end{array} \right.$$

Além disso, é importante notar que a definição de resistência que levaremos para o vestibular é:

$$R = \frac{U}{i}$$

E não:

$$R' = \frac{dU}{di}$$

As definições são totalmente diferentes. Veja que para o ponto B da curva acima, $\frac{dU}{di}$ vale zero, mas a resistência desse ponto vale 6,25 ohms. Na realidade, a primeira resistência ($\frac{U}{i}$) é denominada de resistência estática (e é a que utilizaremos), e a segunda resistência ($\frac{dU}{di}$) é denominada resistência dinâmica e tem outro significado físico que não interessa para nós.



1.10. A primeira lei de ohm

Vamos tomar um pedaço de um fio condutor e submetê-lo a uma diferença de potencial de valor crescente e muito bem conhecida. A seguir nós medimos a intensidade da corrente elétrica que passa pelo condutor.

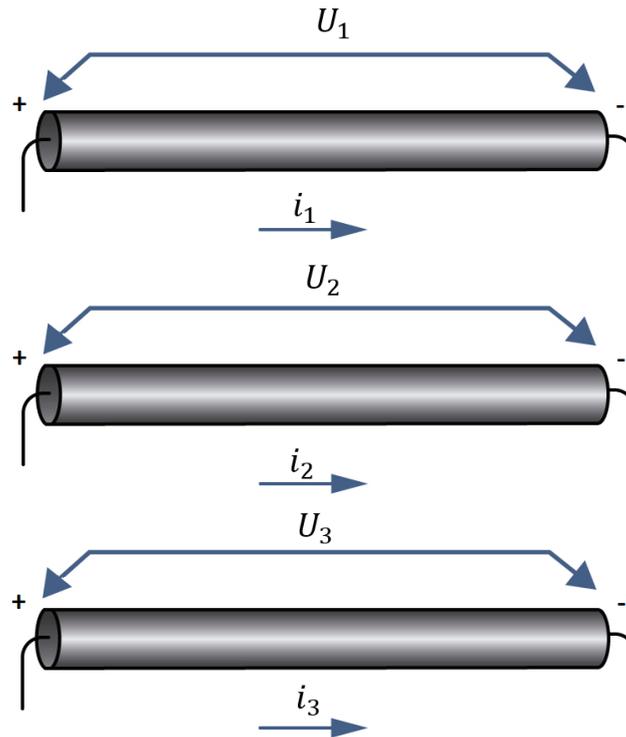


Figura 35: Fio condutor ôhmico submetido a três ddp diferentes.

Note que quando aumentamos a diferença de potencial U , também aumentamos a intensidade do campo elétrico gerado no interior do condutor. Por isso, os elétrons alcançam velocidades maiores.

Dessa forma, experimentalmente, conseguimos provar que:

$$\frac{U_1}{i_1} = \frac{U_2}{i_2} = \frac{U_3}{i_3} = \dots = \text{constante}$$

Como podemos ver, a corrente elétrica que atravessa o dispositivo é diretamente proporcional à tensão aplicada entre os seus terminais.

Quando é válida a proporcionalidade entre U e i , caso dos metais, eles são chamados de **condutores ôhmicos**, e a expressão $\frac{U}{i} = R$, com R constante é denominada **Primeira Lei de Ohm**, graças aos trabalhos do físico alemão Georg Simon Ohm (1787 – 1854). Podemos enunciar essa lei da seguinte maneira:

Em um condutor ôhmico, quando mantido a uma determinada temperatura constante, a intensidade da corrente elétrica (i) é diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada (U) entre seus terminais:

$$\frac{U}{i} = R \Rightarrow U = R \cdot i$$

Em outras palavras, condutores ôhmicos são aqueles que apresentam resistência constante, a uma temperatura constante.



FIQUE
ATENTO!



Não confunda resistores ôhmicos com a definição de resistência elétrica. Condutores que não obedecem à Primeira Lei de Ohm são ditos condutores não ôhmicos, entretanto, conhecendo a curva característica $U \times i$ do dispositivo, podemos determinar a resistência elétrica em cada ponto de interesse.

O símbolo de resistência elétrica em esquemas de circuitos elétricos é:



Figura 36: Simbologia de resistência elétrica em circuitos.

Os fatores que ocasionam e influenciam na resistência elétrica serão abordados na Segunda Lei de Ohm, assunto da próxima aula. Como já demos um pequeno *spoiler*, um dos fatores é a temperatura. É por isso que enunciamos a Primeira Lei de Ohm considerando que a temperatura era constante.

1.10.1. Curva característica de um condutor ôhmico

Como vimos, em um condutor ôhmico mantido à temperatura constante, a resistência elétrica é constante. Dessa forma, se plotarmos um gráfico da tensão pela corrente, temos:

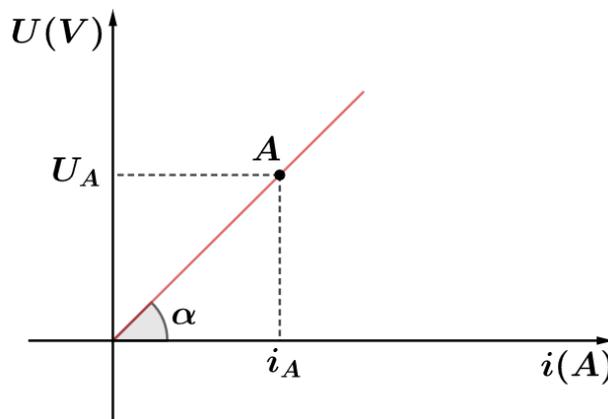


Figura 37: Gráfico da tensão pela corrente elétrica no condutor ôhmico.

Note que a resistência independe da tensão aplicada nos terminais do condutor ou da corrente que o atravessa. Ela só depende da temperatura que no nosso caso foi considerada constante. Algumas propriedades que você deve gravar da curva característica de um condutor ôhmico:

- É sempre uma reta, que necessariamente passa pela origem dos eixos.
- $0 < \alpha < 90^\circ$.
- $R = \text{constante} = \frac{U_A}{i_A} = \text{ao valor da tangente de } \alpha$.

Como mencionamos, a resistência elétrica é definida como $R = \frac{U}{i}$, mesmo para não ôhmicos. Mas o quociente $\frac{U}{i}$ não será mais uma constante, ainda que a temperatura seja mantida constante. Como vimos, para cada ponto teremos uma resistência elétrica diferente. Podemos exemplificar um condutor



não ôhmico através do gráfico de um diodo, um semicondutor que possui grande importância na conversão de corrente alternada em corrente contínua.

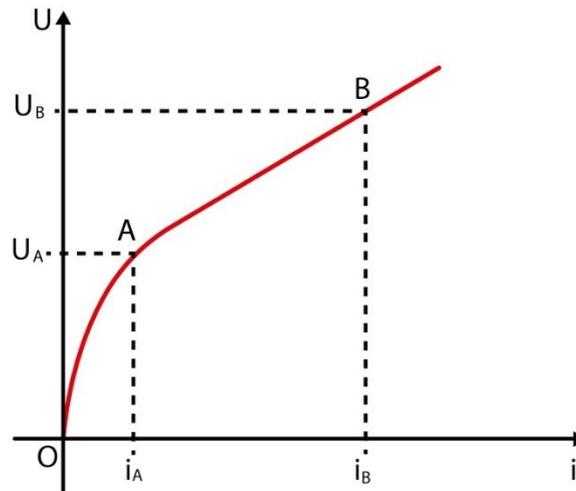


Figura 38: Curva característica $U \times i$ de um diodo.

Nas duas condições A e B, a resistência elétrica é dada por:

$$\begin{cases} R_A = \frac{U_A}{i_A} \\ R_B = \frac{U_B}{i_B} \end{cases}$$

FIQUE ATENTO!



Nunca calcule a tangente no ponto A e no ponto B para determinar a resistência elétricas nesses pontos.

Chamamos de **condutância elétrica** de um condutor, representada pela letra G , o inverso da resistência elétrica:

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

A unidade de condutância elétrica no SI é o **siemens** (símbolo: S):

$$1 S = \frac{1}{\Omega} = 1 \Omega^{-1}$$

1.11. Efeito joule

Como já vimos, quando um fio condutor é submetido a uma diferença de potencial, um campo elétrico se estabelece no interior dele. Com isso, os elétrons são acelerados de tal maneira que eles ganham velocidade no sentido do campo.



Entretanto, logo em seguida, esses elétrons colidem com átomos do metal e perdem velocidade. Como ainda há campo elétrico, os elétrons livres ganham novamente velocidade naquele sentido, permitindo que eles colidam novamente com outros átomos, e assim sucessivamente.

Dessa forma, o condutor permite que os elétrons livres se movam em seu interior, mas impõe uma grande resistência a esse movimento. É como se você estivesse em um show de rock, no meio do pessoal e desejasse ir comprar uma bebida. Naturalmente, você (elétron) esbarraria em diversas pessoas (átomos do metal), teria seu movimento dificultado por elas, mas a cada instante estaria mais próxima de comprar sua bebida.

Quando os elétrons livres se chocam com os átomos do metal, os átomos passam a oscilar com amplitudes maiores, o que acarreta a elevação da temperatura do fio.

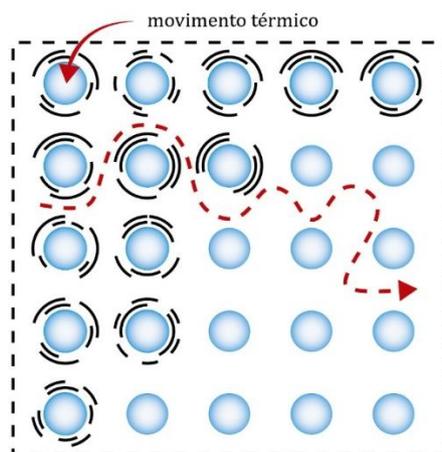


Figura 39: Representação do movimento térmico devido aos choques dos elétrons.

Como já vimos no cálculo da velocidade de deriva, o movimento da nuvem de elétrons é tão dificultado pela presença dos átomos que a ordem de grandeza da velocidade de deriva é de 10^{-4} m/s .

Essa velocidade é atingida quase que instantaneamente após a ligação do fio a um gerador elétrico e se mantém estável. Assim, toda energia potencial elétrica perdida pelos elétrons durante as colisões é convertida em energia térmica. É comum dizer que **a energia potencial elétrica é dissipada no condutor**. Esse fenômeno de transformação da energia potencial elétrica em energia térmica recebe o nome de **Efeito Joule**.

Vale lembrar que o movimento dos elétrons é bem lento, mas se inicia quase instantaneamente em todos os pontos do condutor, porque a velocidade de propagação do campo elétrico é muito alta, próxima a velocidade da luz (veremos mais sobre isso futuramente em magnetismo).

As considerações feitas até aqui são bem superficiais perto do que ocorre na realidade, mas já são o suficiente para atender nossas necessidades no mundo dos nossos vestibulares.



2.0. Considerações finais

Chegamos ao final da nossa aula. Relembre os conceitos estudados nessa aula e revise com calma os tópicos relacionados a velocidade de deriva dos elétrons livres e densidade de corrente, já que não são assuntos comuns em ensino médio.

Na próxima aula trabalharemos a segunda lei de Ohm, associação de resistores e casos especiais de associação de resistores. Aula muito importante para nossos vestibulares. Entretanto, ter todos os conceitos dessa aula bem enraizados são fundamentais para um entendimento completo da aula sobre geradores elétricos e circuitos elétricos.

Conte comigo nessa jornada. Quaisquer dúvidas, críticas ou sugestões entre em contato pelo fórum de dúvidas do Estratégia ou se preferir:

ESCLARECENDO!



@prof.maldonado



3.0. Referência bibliográficas

- [1] Calçada, Caio Sérgio. Física Clássica volume 5. 2. Ed. Saraiva Didáticos, 2012. 576p.
- [2] Bukhovtsev, B.B. Krivtchenkov, V.D. Miakishev, G.Ya. Saraeva, I. M. Problemas Seleccionados de Física Elementar. 1 ed. MIR, 1977.518p.
- [3] Newton, Gualter, Helou. Tópicos de Física volume 3. 11ª ed. Saraiva, 1993. 303p.
- [4] Toledo, Nicolau, Ramalho. Os Fundamentos da Física volume 3. 9ª ed. Moderna. 490p.
- [5] Resnick, Halliday, Jearl Walker. Fundamentos de Física volume 3. 10ª ed. LTC. 365p.
- [6] Asociación Fondo de Investigadores y Editores. Una visión analítica del movimiento volume II. 11ª ed. Lumbreras editores. 989 p.

