

RODRIGO ALVES DIAS

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

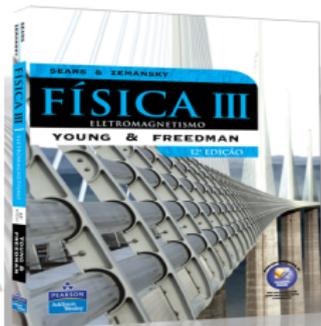
Livro texto: Física 3 - Eletromagnetismo

Autores: Sears e Zemansky

Edição: 12ª

Editora: Pearson - Addison and Wesley

28 de abril de 2011



Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ O significado de corrente elétrica e como as cargas se movem em um condutor.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ O significado de corrente elétrica e como as cargas se movem em um condutor.
- ▶ O que significam a resistividade e a condutividade de uma substância.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ O significado de corrente elétrica e como as cargas se movem em um condutor.
- ▶ O que significam a resistividade e a condutividade de uma substância.
- ▶ Como calcular a resistência de um condutor a partir das suas dimensões e da sua resistividade.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ O significado de corrente elétrica e como as cargas se movem em um condutor.
- ▶ O que significam a resistividade e a condutividade de uma substância.
- ▶ Como calcular a resistência de um condutor a partir das suas dimensões e da sua resistividade.
- ▶ Como uma força eletromotriz(fem) possibilita o fluxo de uma corrente em um circuito.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ O significado de corrente elétrica e como as cargas se movem em um condutor.
- ▶ O que significam a resistividade e a condutividade de uma substância.
- ▶ Como calcular a resistência de um condutor a partir das suas dimensões e da sua resistividade.
- ▶ Como uma força eletromotriz(fem) possibilita o fluxo de uma corrente em um circuito.
- ▶ Como fazer cálculos que envolvam energia e potência em circuitos.

- ▶ O Até agora vimos cargas elétricas que estavam em repouso. (Eletrostática)

- ▶ O Até agora vimos cargas elétricas que estavam em repouso. (Eletrostática)
- ▶ Começaremos a estudar as cargas elétricas em movimento. (Eletrodinâmica)

- ▶ O Até agora vimos cargas elétricas que estavam em repouso. (Eletrostática)
- ▶ Começaremos a estudar as cargas elétricas em movimento. (Eletrodinâmica)
- ▶ Uma corrente elétrica é o movimento de cargas de uma região para outra.

- ▶ O Até agora vimos cargas elétricas que estavam em repouso. (Eletrostática)
- ▶ Começaremos a estudar as cargas elétricas em movimento. (Eletrodinâmica)
- ▶ Uma corrente elétrica é o movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ Quando o movimento de cargas ocorre em caminho fechado a trajetória denomina-se **circuito elétrico**.

- ▶ O Até agora vimos cargas elétricas que estavam em repouso. (Eletrostática)
- ▶ Começaremos a estudar as cargas elétricas em movimento. (Eletrodinâmica)
- ▶ Uma corrente elétrica é o movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ Quando o movimento de cargas ocorre em caminho fechado a trajetória denomina-se **circuito elétrico**.
- ▶ Um circuito elétrico fornece basicamente um caminho para transferir *energia* de um local para outro.

Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.

Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ No equilíbrio eletrostático, $\vec{E} = 0$ em todos os pontos no interior de um condutor (Não existe corrente).

Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ No equilíbrio eletrostático, $\vec{E} = 0$ em todos os pontos no interior de um condutor (Não existe corrente).
- ▶ No entanto, **isso não significa que as cargas estejam em repouso.**

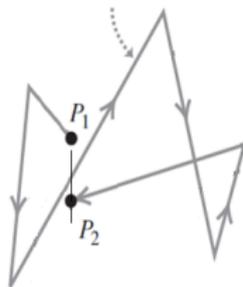
Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ No equilíbrio eletrostático, $\vec{E} = 0$ em todos os pontos no interior de um condutor (Não existe corrente).
- ▶ No entanto, **isso não significa que as cargas estejam em repouso**.
- ▶ O movimento dos elétrons é caótico; logo, não existe nenhum fluxo efetivo de cargas em nenhuma direção, portanto não existe corrente.

Material condutor sem o campo \vec{E} interno

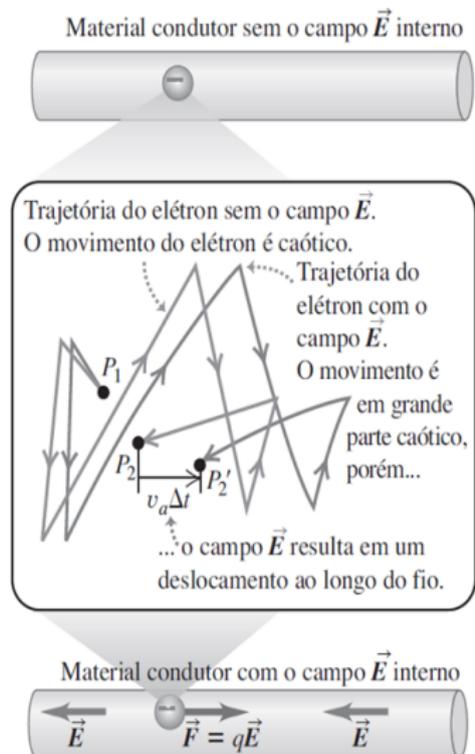


Trajetória do elétron sem o campo \vec{E} .
O movimento do elétron é caótico.



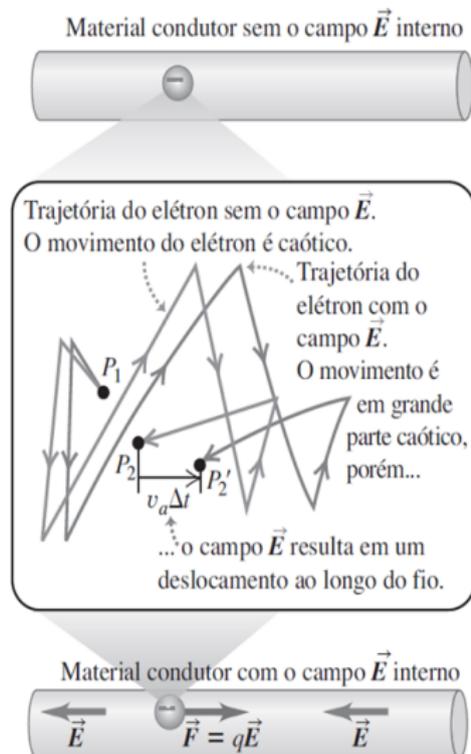
Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ No equilíbrio eletrostático, $\vec{E} = 0$ em todos os pontos no interior de um condutor (Não existe corrente).
- ▶ No entanto, **isso não significa que as cargas estejam em repouso**.
- ▶ O movimento dos elétrons é caótico; logo, não existe nenhum fluxo efetivo de cargas em nenhuma direção, portanto não existe corrente.
- ▶ O que ocorre quando $\vec{E} \neq 0$, estacionário e constante é estabelecido dentro de um condutor?



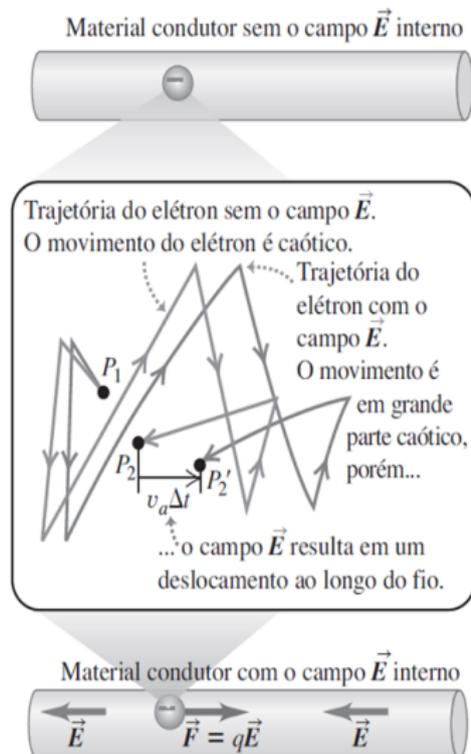
Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ No equilíbrio eletrostático, $\vec{E} = 0$ em todos os pontos no interior de um condutor (Não existe corrente).
- ▶ No entanto, **isso não significa que as cargas estejam em repouso**.
- ▶ O movimento dos elétrons é caótico; logo, não existe nenhum fluxo efetivo de cargas em nenhuma direção, portanto não existe corrente.
- ▶ O que ocorre quando $\vec{E} \neq 0$, estacionário e constante é estabelecido dentro de um condutor?
- ▶ O feito resultante de $\vec{E} \neq 0$ é tal que, além do movimento caótico, existe um movimento muito lento, de um grupo de partículas carregadas na direção da força elétrica, $\vec{F} = q\vec{E}$.



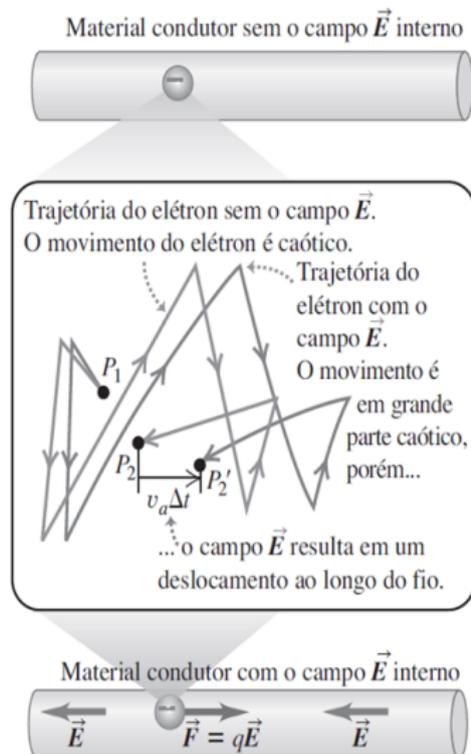
Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ No equilíbrio eletrostático, $\vec{E} = 0$ em todos os pontos no interior de um condutor (Não existe corrente).
- ▶ No entanto, **isso não significa que as cargas estejam em repouso**.
- ▶ O movimento dos elétrons é caótico; logo, não existe nenhum fluxo efetivo de cargas em nenhuma direção, portanto não existe corrente.
- ▶ O que ocorre quando $\vec{E} \neq 0$, estacionário e constante é estabelecido dentro de um condutor?
- ▶ O feito resultante de $\vec{E} \neq 0$ é tal que, além do movimento caótico, existe um movimento muito lento, de um grupo de partículas carregadas na direção da força elétrica, $\vec{F} = q\vec{E}$.
- ▶ Esse movimento lento é descrito pela **velocidade de arraste**, \vec{v}_a , das partículas.



Corrente

- ▶ Uma **corrente** é qualquer movimento de cargas de uma região para outra.
- ▶ No equilíbrio eletrostático, $\vec{E} = 0$ em todos os pontos no interior de um condutor (Não existe corrente).
- ▶ No entanto, **isso não significa que as cargas estejam em repouso**.
- ▶ O movimento dos elétrons é caótico; logo, não existe nenhum fluxo efetivo de cargas em nenhuma direção, portanto não existe corrente.
- ▶ O que ocorre quando $\vec{E} \neq 0$, estacionário e constante é estabelecido dentro de um condutor?
- ▶ O feito resultante de $\vec{E} \neq 0$ é tal que, além do movimento caótico, existe um movimento muito lento, de um grupo de partículas carregadas na direção da força elétrica, $\vec{F} = q\vec{E}$.
- ▶ Esse movimento lento é descrito pela **velocidade de arraste**, \vec{v}_a , das partículas.
- ▶ A velocidade aleatória é da ordem de $v_{alea} \sim 10^6 \text{ m/s}$ e a velocidade de arraste é da ordem de $v_a \sim 10^{-4} \text{ m/s}$.



Corrente

Se os elétrons se movem tão lentos, por que a luz ascende imediatamente depois de ligarmos uma lanterna?

Corrente

Se os elétrons se movem tão lentos, por que a luz ascende imediatamente depois de ligarmos uma lanterna?

- ▶ Porque o campo elétrico no interior surge no interior de um fio com uma velocidade de aproximadamente a velocidade da luz, e os elétrons começam a se mover ao longo do fio praticamente ao mesmo tempo!

A direção e o sentido do fluxo de corrente

- ▶ O campo elétrico \vec{E} realiza um trabalho sobre as cargas que se deslocam.

A direção e o sentido do fluxo de corrente

- ▶ O campo elétrico \vec{E} realiza um trabalho sobre as cargas que se deslocam.
- ▶ Esse trabalho é igual à variação da energia cinética das partículas carregadas.

A direção e o sentido do fluxo de corrente

- ▶ O campo elétrico \vec{E} realiza um trabalho sobre as cargas que se deslocam.
- ▶ Esse trabalho é igual à variação da energia cinética das partículas carregadas.
- ▶ Essa energia produz um aumento da vibração dos ions, e portanto, faz aumentar a temperatura do material.

A direção e o sentido do fluxo de corrente

- ▶ O campo elétrico \vec{E} realiza um trabalho sobre as cargas que se deslocam.
- ▶ Esse trabalho é igual à variação da energia cinética das partículas carregadas.
- ▶ Essa energia produz um aumento da vibração dos ions, e portanto, faz aumentar a temperatura do material.
- ▶ A maior parte do trabalho realizado por \vec{E} é convertido em calor e não para acelerar os elétrons.

A direção e o sentido do fluxo de corrente

Em materiais, as cargas que conduzem corrente podem ser positivas ou negativas:

A direção e o sentido do fluxo de corrente

Em materiais, as cargas que conduzem corrente podem ser positivas ou negativas:

- ▶ Metais - Quem se move são sempre os elétrons(negativas).

A direção e o sentido do fluxo de corrente

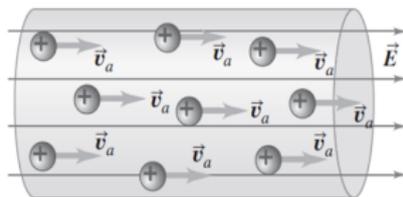
Em materiais, as cargas que conduzem corrente podem ser positivas ou negativas:

- ▶ Metais - Quem se move são sempre os elétrons(negativas).
- ▶ Gás ionizado(plasma) - Quem se move são os elétrons e os ions positivos.

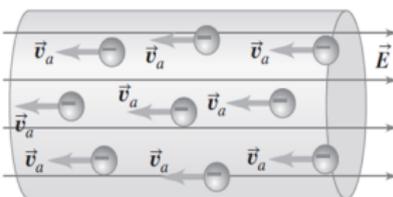
A direção e o sentido do fluxo de corrente

Em materiais, as cargas que conduzem corrente podem ser positivas ou negativas:

- ▶ Metais - Quem se move são sempre os elétrons(negativas).
- ▶ Gás ionizado(plasma) - Quem se move são os elétrons e os ions positivos.
- ▶ Semi-condutor - Quem se move são os elétrons e os buracos(ausência de elétrons)(se comportam como cargas positivas).

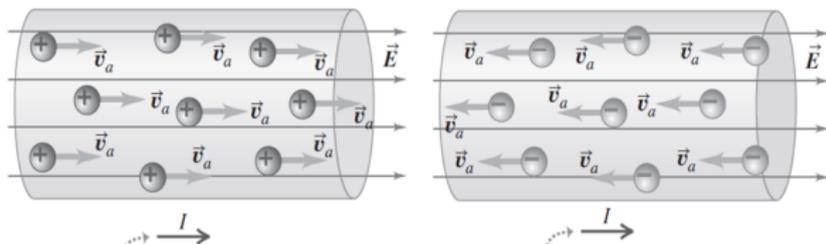


Uma **corrente convencional** é tratada como um fluxo de cargas positivas, não importando se as cargas livres no condutor são positivas, negativas ou ambas



Em um condutor metálico, as cargas em movimento são elétrons — mas a *corrente* ainda aponta no sentido do movimento das cargas positivas

A direção e o sentido do fluxo de corrente



Uma **corrente convencional** é tratada como um fluxo de cargas positivas, não importando se as cargas livres no condutor são positivas, negativas ou ambas

Em um condutor metálico, as cargas em movimento são elétrons — mas a **corrente** ainda aponta no sentido do movimento das cargas positivas

- Definimos a corrente, I , como o movimento de cargas **positivas (corrente convencional)**.

A direção e o sentido do fluxo de corrente

- ▶ Definimos a corrente, I , como o movimento de cargas **positivas (corrente convencional)**.
- ▶ Definimos a corrente através da área com seção reta A como o *fluxo total de cargas através da área por unidade de tempo*.

A direção e o sentido do fluxo de corrente

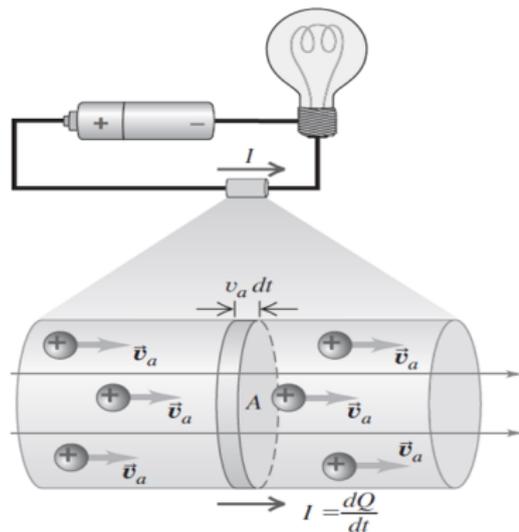
- ▶ Definimos a corrente, I , como o movimento de cargas **positivas (corrente convencional)**.
- ▶ Definimos a corrente através da área com seção reta A como o *fluxo total de cargas através da área por unidade de tempo*.
- ▶ Se uma carga total dQ flui através de uma área em um intervalo de tempo dt , a corrente será dada por:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

- ▶ No S.I. a unidade de corrente é o **ampère**, definido como *um coulomb por segundo*. $1A = 1C/s$.
- ▶ **A corrente não é um vetor!**

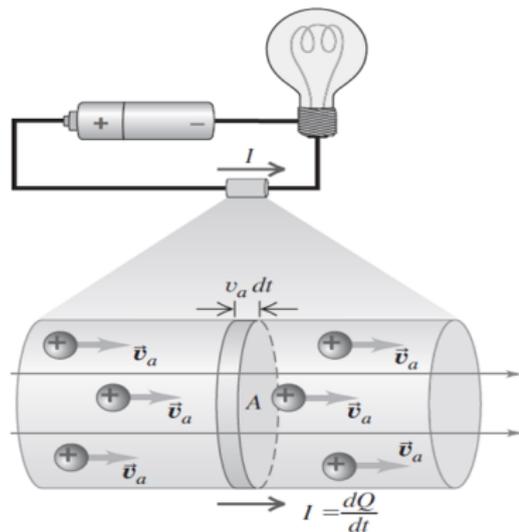
Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.



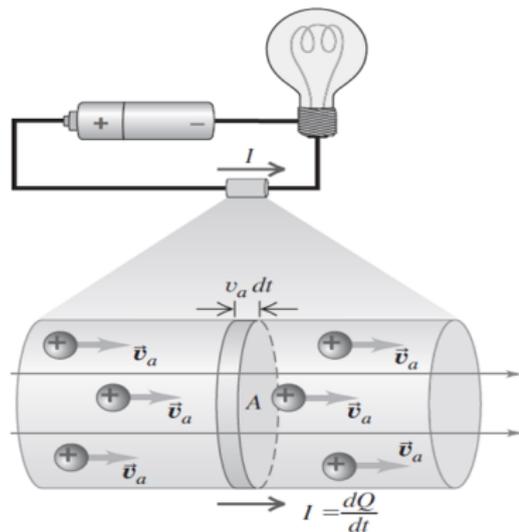
Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- ▶ Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.
- ▶ Considere que existam n partículas carregadas por unidade de volume. ($n = \frac{N_{part}}{V}$)



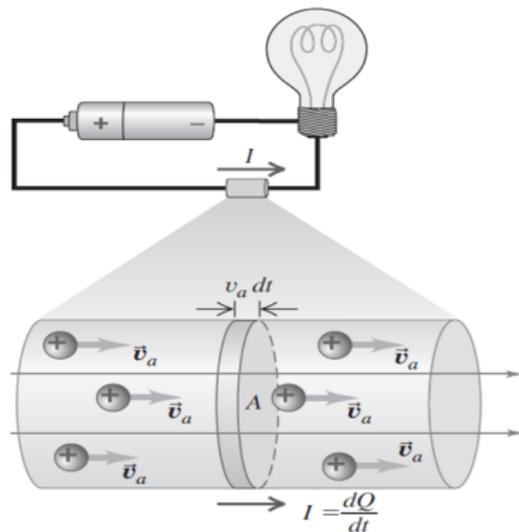
Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- ▶ Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.
- ▶ Considere que existam n partículas carregadas por unidade de volume. ($n = \frac{N_{part}}{V}$)
- ▶ Considere que todas as partículas possuem velocidade de arraste \vec{v}_a .



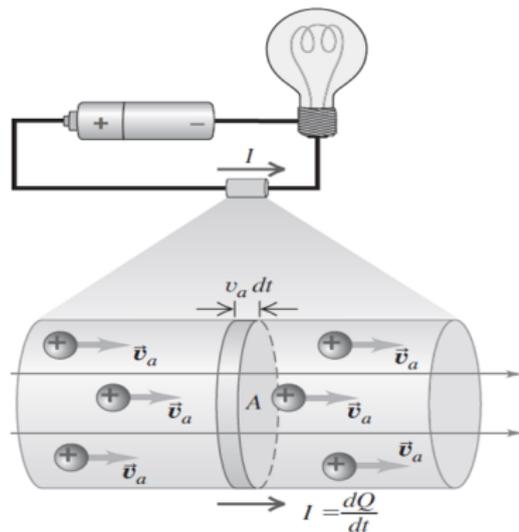
Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- ▶ Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.
- ▶ Considere que existam n partículas carregadas por unidade de volume. ($n = \frac{N_{part}}{V}$)
- ▶ Considere que todas as partículas possuem velocidade de arraste \vec{v}_a .
- ▶ Logo, em um intervalo de tempo dt , as partículas se moveram, $dl = v_a dt$.



Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

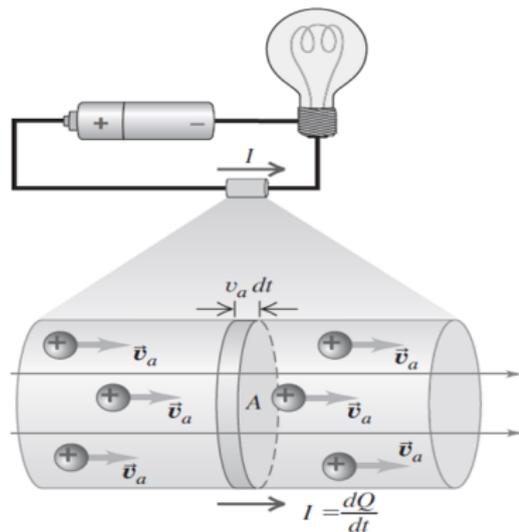
- ▶ Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.
- ▶ Considere que existam n partículas carregadas por unidade de volume. ($n = \frac{N_{part}}{V}$)
- ▶ Considere que todas as partículas possuem velocidade de arraste \vec{v}_a .
- ▶ Logo, em um intervalo de tempo dt , as partículas se moveram, $d\ell = v_a dt$.
- ▶ O número de partículas que atravessaram a área A é $dN = n dV = n A d\ell = n A v_a dt$.



Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- ▶ Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.
- ▶ Considere que existam n partículas carregadas por unidade de volume. ($n = \frac{N_{part}}{V}$)
- ▶ Considere que todas as partículas possuem velocidade de arraste \vec{v}_a .
- ▶ Logo, em um intervalo de tempo dt , as partículas se moveram, $d\ell = v_a dt$.
- ▶ O numero de partículas que atravessaram a área A é $dN = n dV = n A d\ell = n A v_a dt$.
- ▶ Se cada partícula possui carga q então a carga total dQ que atravessou a área A é,

$$dQ = q(n A v_a dt) = n q v_a A dt$$

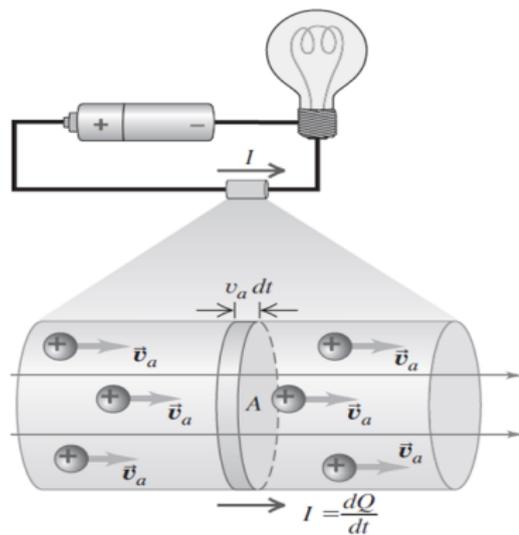


Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- ▶ Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.
- ▶ Considere que existam n partículas carregadas por unidade de volume. ($n = \frac{N_{part}}{V}$)
- ▶ Considere que todas as partículas possuem velocidade de arraste \vec{v}_a .
- ▶ Logo, em um intervalo de tempo dt , as partículas se moveram, $d\ell = v_a dt$.
- ▶ O numero de partículas que atravessaram a área A é $dN = n dV = n A d\ell = n A v_a dt$.
- ▶ Se cada partícula possui carga q então a carga total dQ que atravessou a área A é,

$$dQ = q(n A v_a dt) = n q v_a A dt$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = n q v_a A$$



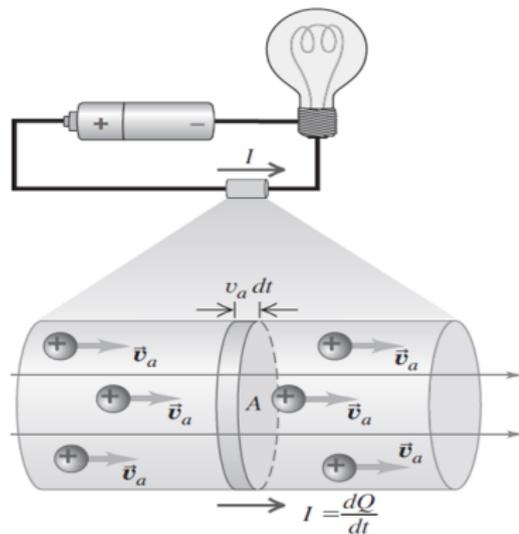
Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- ▶ Considere um condutor com seção reta A e um campo elétrico \vec{E} da esquerda para direita.
- ▶ Considere que existam n partículas carregadas por unidade de volume. ($n = \frac{N_{part}}{V}$)
- ▶ Considere que todas as partículas possuem velocidade de arraste \vec{v}_a .
- ▶ Logo, em um intervalo de tempo dt , as partículas se moveram, $d\ell = v_a dt$.
- ▶ O numero de partículas que atravessaram a área A é $dN = n dV = n A d\ell = n A v_a dt$.
- ▶ Se cada partícula possui carga q então a carga total dQ que atravessou a área A é,

$$dQ = q(n A v_a dt) = n q v_a A dt$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = n q v_a A$$

- ▶ A **densidade de corrente** J é definida pela corrente que flui por unidade de área da seção reta: $J = \frac{I}{A} = n q v_a$



Corrente, velocidade de arraste e densidade de corrente

- ▶ A **densidade de corrente** J é definida pela corrente que flui por unidade de área da seção reta: $J = \frac{I}{A} = nqv_a$
- ▶ O vetor **densidade de corrente** será definido por: $\vec{J} = nq\vec{v}_a$
- ▶ Se $q > 0 \rightarrow \vec{v}_a$ tem o mesmo sentido ao de \vec{E} .
- ▶ Se $q < 0 \rightarrow \vec{v}_a$ tem o sentido contrario ao de \vec{E} .
- ▶ Em ambos os casos \vec{J} tem o mesmo sentido ao de \vec{E} .
- ▶ Se uma corrente é estacionária, então, $\frac{d\vec{J}}{dt} = 0 \rightarrow \vec{J} = \text{constante}$.
- ▶ Isso implica, que a corrente é a mesma através de qualquer seção reta do circuito.

Resistividade

- ▶ A densidade de corrente \vec{J} em um condutor depende do campo elétrico \vec{E} e das propriedades do material.

Resistividade

- ▶ A densidade de corrente \vec{J} em um condutor depende do campo elétrico \vec{E} e das propriedades do material.
- ▶ Para metais, \vec{J} é quase diretamente proporcional a \vec{E} . ($\vec{J} \sim \vec{E}$)

Resistividade

- ▶ A densidade de corrente \vec{J} em um condutor depende do campo elétrico \vec{E} e das propriedades do material.
- ▶ Para metais, \vec{J} é quase diretamente proporcional a \vec{E} . ($\vec{J} \sim \vec{E}$)
- ▶ A razão entre os módulos de E e J permanece uma constante. ($E/J = \text{Constante}$)

Resistividade

- ▶ A densidade de corrente \vec{J} em um condutor depende do campo elétrico \vec{E} e das propriedades do material.
- ▶ Para metais, \vec{J} é quase diretamente proporcional a \vec{E} . ($\vec{J} \sim \vec{E}$)
- ▶ A razão entre os módulos de E e J permanece uma constante. ($E/J = \text{Constante}$)
- ▶ Essa relação é chamada de "Lei de Ohm".

Resistividade

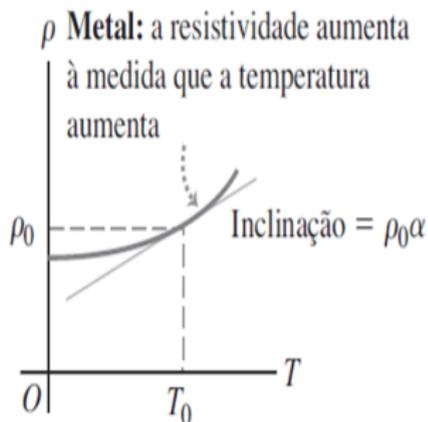
- ▶ Definimos a **resistividade**, ρ como a razão entre o modulo do campo elétrico e o modulo da densidade de corrente:

$$\rho = \frac{E}{J}$$

- ▶ O inverso da **resistividade**, é a **condutividade**.
- ▶ **Condutores** - resistividade baixa.
- ▶ **Isolantes** - resistividade alta.
- ▶ **Semi-condutores** - resistividade intermediária entre um metal e um isolante.
- ▶ *Condutor ôhmico/linear* para uma dada temperatura, ρ é independente de \vec{E} .
- ▶ *Condutor não-ôhmico/não-lineares* para uma dada temperatura, ρ depende de \vec{E} de modo complexo.

Resistividade e temperatura

- ▶ A resistividade de um condutor metálico quase sempre cresce com o aumento da temperatura.

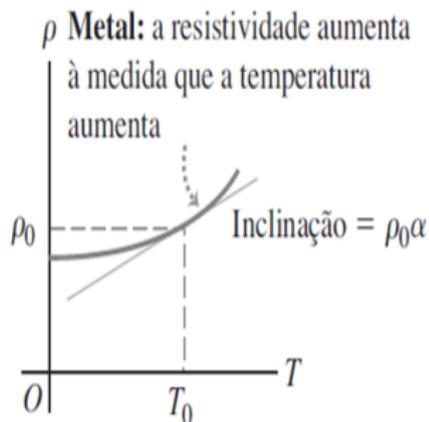


Resistividade e temperatura

- ▶ A resistividade de um condutor metálico quase sempre cresce com o aumento da temperatura.
- ▶ Em um pequeno intervalo de temperatura, a resistividade de um material pode ser aproximada por:

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

- ▶ O fator α denomina-se coeficiente de temperatura da resistividade.

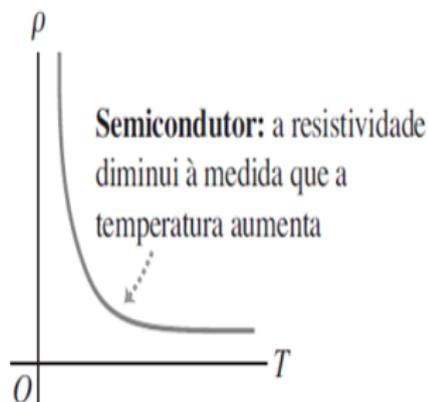


Resistividade e temperatura

- ▶ A resistividade de um condutor metálico quase sempre cresce com o aumento da temperatura.
- ▶ Em um pequeno intervalo de temperatura, a resistividade de um material pode ser aproximada por:

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

- ▶ O fator α denomina-se coeficiente de temperatura da resistividade.

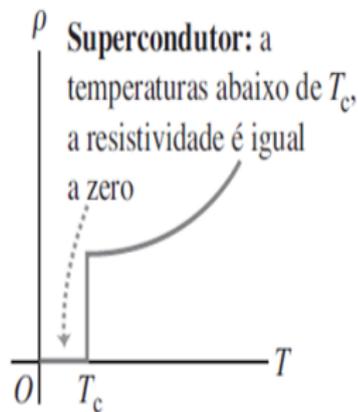


Resistividade e temperatura

- ▶ A resistividade de um condutor metálico quase sempre cresce com o aumento da temperatura.
- ▶ Em um pequeno intervalo de temperatura, a resistividade de um material pode ser aproximada por:

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

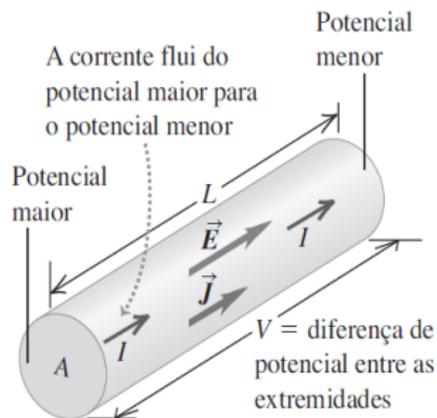
- ▶ O fator α denomina-se coeficiente de temperatura da resistividade.



Resistência

- Para um dado condutor podemos escrever:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \rightarrow E = \rho J$$

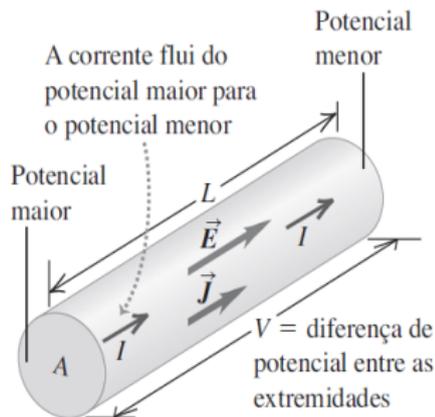


Resistência

- ▶ Para um dado condutor podemos escrever:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \rightarrow E = \rho J$$

- ▶ Como, $I = JA$ e $E = V/L$ obtemos:



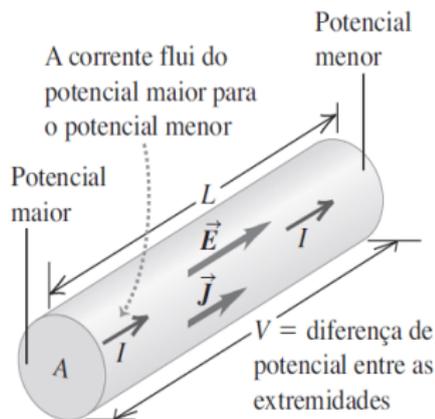
Resistência

- ▶ Para um dado condutor podemos escrever:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \rightarrow E = \rho J$$

- ▶ Como, $I = JA$ e $E = V/L$ obtemos:

$$\frac{V}{L} = \frac{\rho l}{A} \text{ ou } V = \frac{\rho LI}{A}$$



Resistência

- ▶ Para um dado condutor podemos escrever:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \rightarrow E = \rho J$$

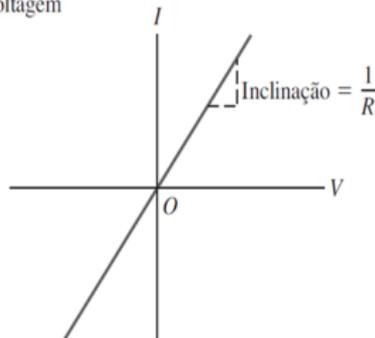
- ▶ Como, $I = JA$ e $E = V/L$ obtemos:

$$\frac{V}{L} = \frac{\rho l}{A} \text{ ou } V = \frac{\rho l I}{A}$$

$$V = RI$$

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Resistor ôhmico (p. ex. um fio metálico comum):
a uma dada temperatura, a corrente é proporcional
à voltagem



Resistência

- Para um dado condutor podemos escrever:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \rightarrow E = \rho J$$

- Como, $I = JA$ e $E = V/L$ obtemos:

$$\frac{V}{L} = \frac{\rho l}{A} \text{ ou } V = \frac{\rho L I}{A}$$

$$V = RI$$

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

- Como, $\rho = \rho(T)$ então R também será, assim:

$$R(T) = \frac{\rho_0 L}{A} [1 + \alpha(T - T_0)] = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

Diodo semiconductor: um resistor não-ôhmico

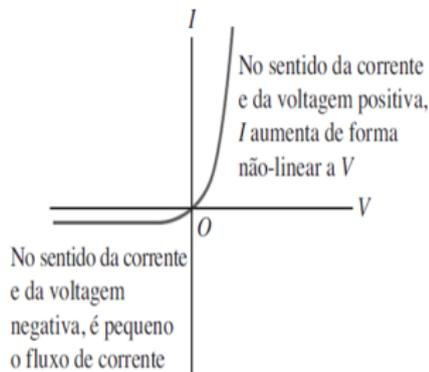
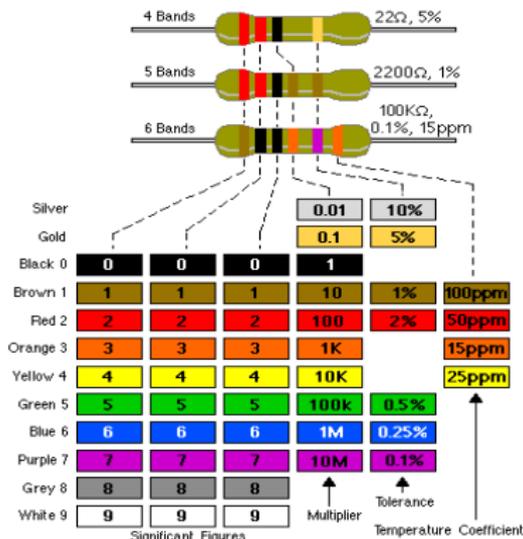
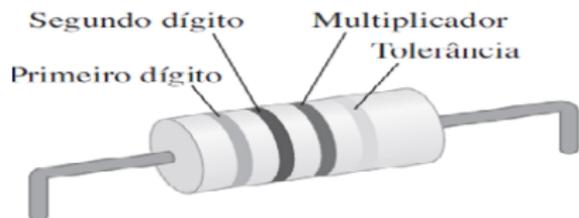


Tabela de cores para resistores

Cor	Valor do dígito	Valor do multiplicador
Preta	0	1
Marrom	1	10
Vermelha	2	10 ²
Laranja	3	10 ³
Amarela	4	10 ⁴
Verde	5	10 ⁵
Azul	6	10 ⁶
Violeta	7	10 ⁷
Cinza	8	10 ⁸
Branca	9	10 ⁹



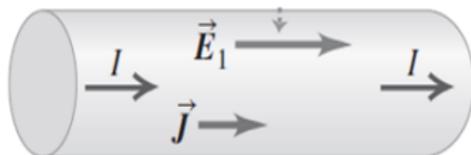
► Tolerância: Sem faixa= ±20%, Prata= ±10% , Dourado= ±5%

Força eletromotriz

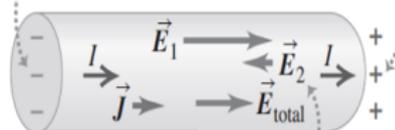
- ▶ Para que um condutor possua uma corrente estacionária, ele deve ser parte de uma trajetória fechada ou **circuito completo**.

Força eletromotriz

- ▶ Para que um condutor possua uma corrente estacionária, ele deve ser parte de uma trajetória fechada ou **circuito completo**.
- ▶ Se aplicarmos $\vec{E}_T = \vec{E}_1$ no interior de um condutor isolado de resistividade ρ então $\vec{J} = \vec{E}_1/\rho$.
- ▶ O acúmulo de cargas gera um campo elétrico posto \vec{E}_2 no interior do condutor de modo que $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.



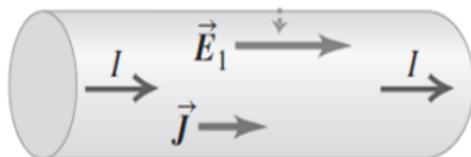
Essa corrente produz um acúmulo de cargas nas extremidades do condutor



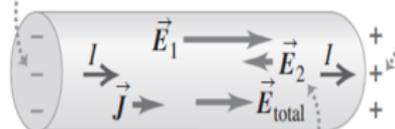
O acúmulo de cargas cria um campo elétrico \vec{E}_2 , em sentido oposto ao de \vec{E}_1 , reduzindo a corrente

Força eletromotriz

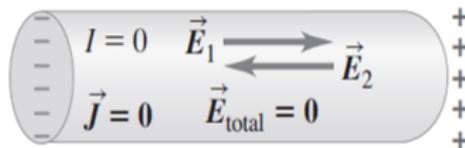
- ▶ Para que um condutor possua uma corrente estacionária, ele deve ser parte de uma trajetória fechada ou **circuito completo**.
- ▶ Se aplicarmos $\vec{E}_T = \vec{E}_1$ no interior de um condutor isolado de resistividade ρ então $\vec{J} = \vec{E}_1/\rho$.
- ▶ O acúmulo de cargas gera um campo elétrico posto \vec{E}_2 no interior do condutor de modo que $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.
- ▶ Rapidamente, $|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$ e assim $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$ que leva à $\vec{J} = 0$ e assim $I = 0$.



Essa corrente produz um acúmulo de cargas nas extremidades do condutor



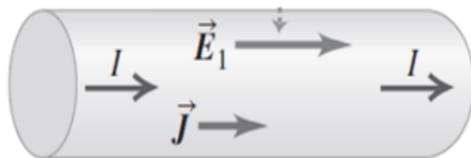
O acúmulo de cargas cria um campo elétrico \vec{E}_2 , em sentido oposto ao de \vec{E}_1 , reduzindo a corrente



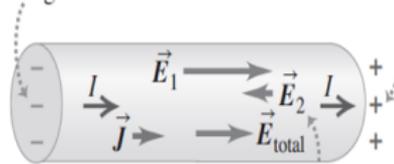
Força eletromotriz

- ▶ Para que um condutor possua uma corrente estacionária, ele deve ser parte de uma trajetória fechada ou **circuito completo**.
- ▶ Se aplicarmos $\vec{E}_T = \vec{E}_1$ no interior de um condutor isolado de resistividade ρ então $\vec{J} = \vec{E}_1/\rho$.
- ▶ O acúmulo de cargas gera um campo elétrico posto \vec{E}_2 no interior do condutor de modo que $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.
- ▶ Rapidamente, $|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$ e assim $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$ que leva à $\vec{J} = 0$ e assim $I = 0$.
- ▶ **Logo, é impossível haver uma corrente estacionária em um circuito aberto ou incompleto.**

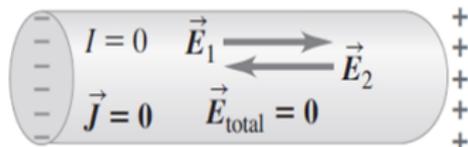
Para manter uma corrente estacionária temos de lembrar de dois fator básico:



Essa corrente produz um acúmulo de cargas nas extremidades do condutor



O acúmulo de cargas cria um campo elétrico \vec{E}_2 , em sentido oposto ao de \vec{E}_1 , reduzindo a corrente

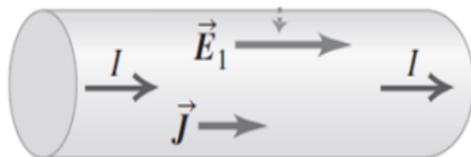


Força eletromotriz

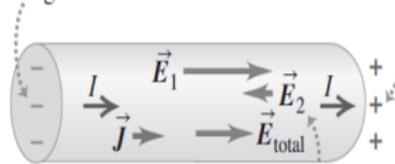
- ▶ Para que um condutor possua uma corrente estacionária, ele deve ser parte de uma trajetória fechada ou **circuito completo**.
- ▶ Se aplicarmos $\vec{E}_T = \vec{E}_1$ no interior de um condutor isolado de resistividade ρ então $\vec{J} = \vec{E}_1/\rho$.
- ▶ O acúmulo de cargas gera um campo elétrico posto \vec{E}_2 no interior do condutor de modo que $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.
- ▶ Rapidamente, $|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$ e assim $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$ que leva à $\vec{J} = 0$ e assim $I = 0$.
- ▶ **Logo, é impossível haver uma corrente estacionária em um circuito aberto ou incompleto.**

Para manter uma corrente estacionária temos de lembrar de dois fator básico:

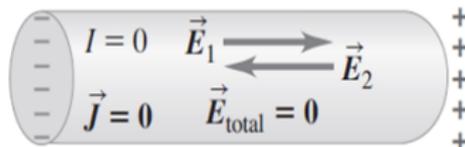
- ▶ Quando uma carga percorre um caminho fechado, a energia potencial no início e no fim da trajetória são iguais.



Essa corrente produz um acúmulo de cargas nas extremidades do condutor



O acúmulo de cargas cria um campo elétrico \vec{E}_2 , em sentido oposto ao de \vec{E}_1 , reduzindo a corrente

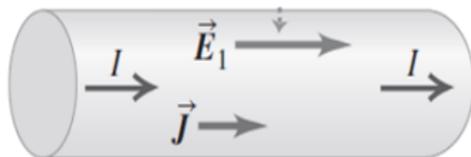


Força eletromotriz

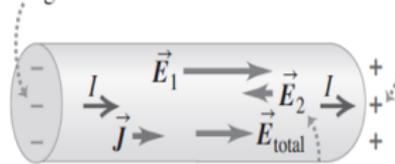
- ▶ Para que um condutor possua uma corrente estacionária, ele deve ser parte de uma trajetória fechada ou **circuito completo**.
- ▶ Se aplicarmos $\vec{E}_T = \vec{E}_1$ no interior de um condutor isolado de resistividade ρ então $\vec{J} = \vec{E}_1/\rho$.
- ▶ O acúmulo de cargas gera um campo elétrico posto \vec{E}_2 no interior do condutor de modo que $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.
- ▶ Rapidamente, $|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$ e assim $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$ que leva à $\vec{J} = 0$ e assim $I = 0$.
- ▶ **Logo, é impossível haver uma corrente estacionária em um circuito aberto ou incompleto.**

Para manter uma corrente estacionária temos de lembrar de dois fator básico:

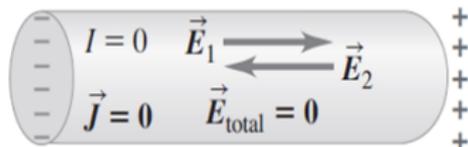
- ▶ Quando uma carga percorre um caminho fechado, a energia potencial no início e no fim da trajetória são iguais.
- ▶ Sempre existe uma diminuição da energia potencial quando cargas se movem em um material condutor normal com resistência não nula.



Essa corrente produz um acúmulo de cargas nas extremidades do condutor



O acúmulo de cargas cria um campo elétrico \vec{E}_2 , em sentido oposto ao de \vec{E}_1 , reduzindo a corrente

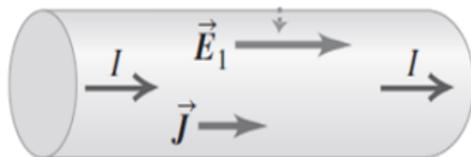


Força eletromotriz

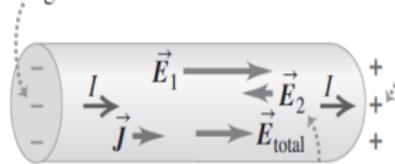
- ▶ Para que um condutor possua uma corrente estacionária, ele deve ser parte de uma trajetória fechada ou **circuito completo**.
- ▶ Se aplicarmos $\vec{E}_T = \vec{E}_1$ no interior de um condutor isolado de resistividade ρ então $\vec{J} = \vec{E}_1/\rho$.
- ▶ O acúmulo de cargas gera um campo elétrico posto \vec{E}_2 no interior do condutor de modo que $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.
- ▶ Rapidamente, $|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$ e assim $\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$ que leva à $\vec{J} = 0$ e assim $I = 0$.
- ▶ **Logo, é impossível haver uma corrente estacionária em um circuito aberto ou incompleto.**

Para manter uma corrente estacionária temos de lembrar de dois fator básico:

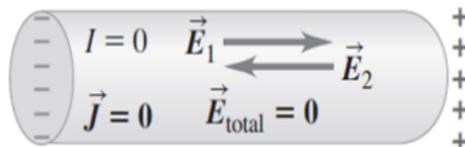
- ▶ Quando uma carga percorre um caminho fechado, a energia potencial no início e no fim da trajetória são iguais.
- ▶ Sempre existe uma diminuição da energia potencial quando cargas se movem em um material condutor normal com resistência não nula.



Essa corrente produz um acúmulo de cargas nas extremidades do condutor



O acúmulo de cargas cria um campo elétrico \vec{E}_2 , em sentido oposto ao de \vec{E}_1 , reduzindo a corrente



Força eletromotriz

- ▶ **Portanto, deve existir alguma parte do circuito na qual a energia potencial aumenta.**
- ▶ Nesta parte do circuito, as cargas se deslocam de uma energia potencial mais baixa para um energia potencial mais elevada.



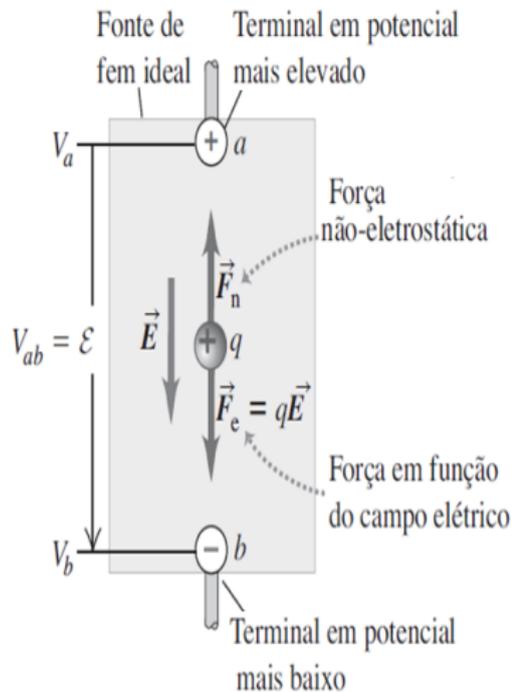
Força eletromotriz

- ▶ **Portanto, deve existir alguma parte do circuito na qual a energia potencial aumenta.**
- ▶ Nesta parte do circuito, as cargas se deslocam de uma energia potencial mais baixa para um energia potencial mais elevada.
- ▶ *Mesmo as forças eletrostáticas empurrando as carga de uma energia potencial mais alta para uma mais baixa!*
- ▶ **O agente que faz a corrente fluir de um potencial mais baixo para um mais elevado denomina-se **força eletromotriz (*fem*)**. O dispositivo que fornece uma *fem* é chamado de **fonte de *fem***.**



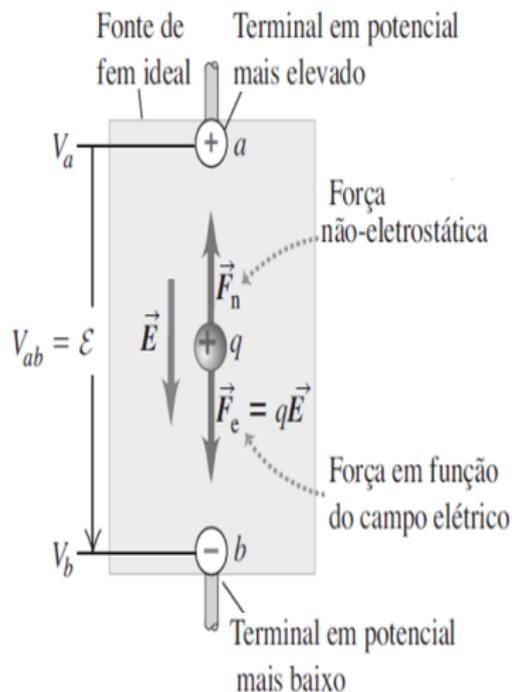
Força eletromotriz

- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.



Força eletromotriz

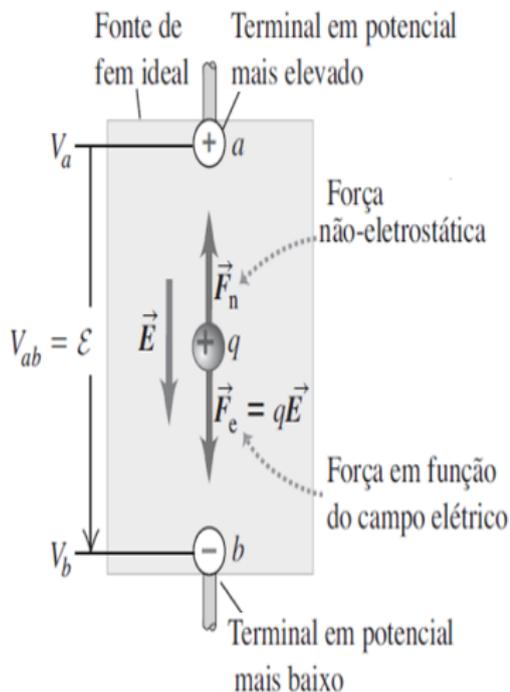
- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.
- ▶ O trabalho feito pela força eletrostática \vec{F}_e é $W_e = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$ é oposto a W_n de modo que a energia potencial associada cresceu.



Força eletromotriz

- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.
- ▶ O trabalho feito pela força eletrostática \vec{F}_e é $W_e = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$ é oposto a W_n de modo que a energia potencial associada cresceu.
- ▶ Para uma fonte de fem ideal,

$$\begin{aligned} W_n &= W_e \\ q\varepsilon &= qV_{ab} \\ \varepsilon &= V_{ab} \end{aligned}$$



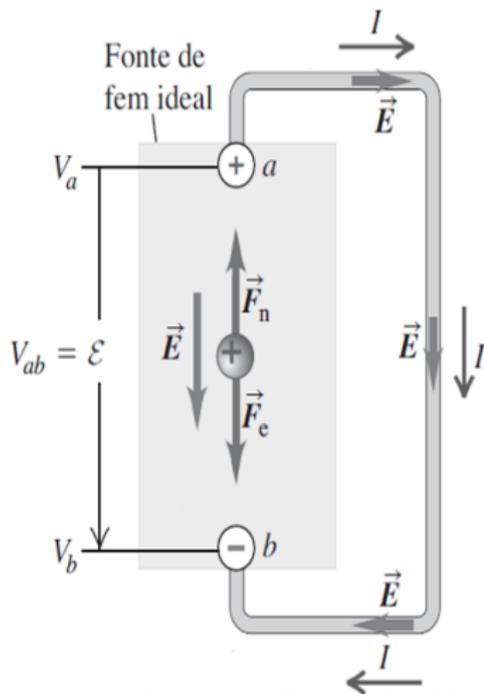
Força eletromotriz

- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.
- ▶ O trabalho feito pela força eletrostática \vec{F}_e é $W_e = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$ é oposto a W_n de modo que a energia potencial associada cresceu.
- ▶ Para uma fonte de fem ideal,

$$\begin{aligned} W_n &= W_e \\ q\varepsilon &= qV_{ab} \\ \varepsilon &= V_{ab} \end{aligned}$$

- ▶ Quando conectamos a fonte de fem em um fio de resistência R , o aumento de potencial ε na fonte é igual à queda de potencial $V_{ab} = IR$ quando a corrente passa pelo restante do circuito.

$$\varepsilon = V_{ab} = IR$$



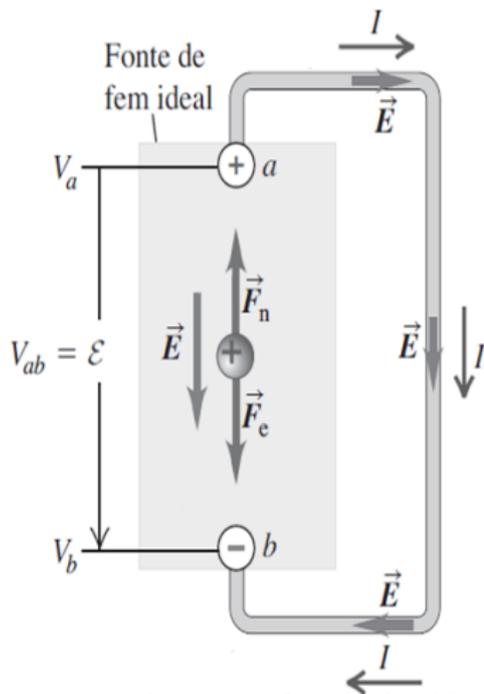
Força eletromotriz

- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.
- ▶ O trabalho feito pela força eletrostática \vec{F}_e é $W_e = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$ é oposto a W_n de modo que a energia potencial associada cresceu.
- ▶ Para uma fonte de fem ideal,

$$\begin{aligned} W_n &= W_e \\ q\varepsilon &= qV_{ab} \\ \varepsilon &= V_{ab} \end{aligned}$$

- ▶ Quando conectamos a fonte de fem em um fio de resistência R , o aumento de potencial ε na fonte é igual à queda de potencial $V_{ab} = IR$ quando a corrente passa pelo restante do circuito.

$$\varepsilon = V_{ab} = IR$$



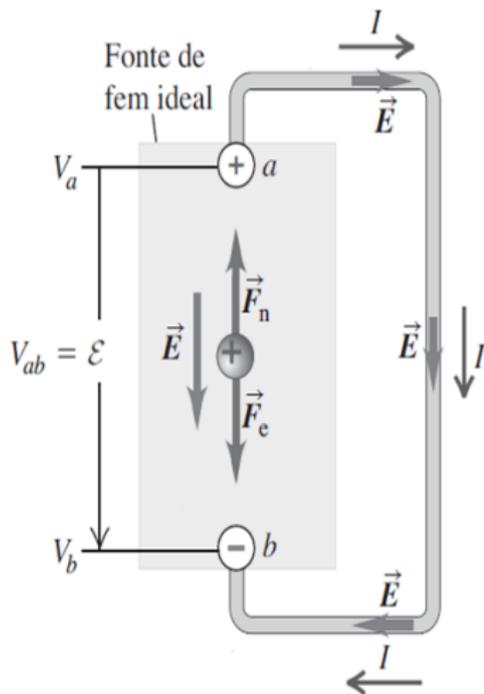
Força eletromotriz

- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.
- ▶ O trabalho feito pela força eletrostática \vec{F}_e é $W_e = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$ é oposto a W_n de modo que a energia potencial associada cresceu.
- ▶ Para uma fonte de fem ideal,

$$\begin{aligned} W_n &= W_e \\ q\varepsilon &= qV_{ab} \\ \varepsilon &= V_{ab} \end{aligned}$$

- ▶ Quando conectamos a fonte de fem em um fio de resistência R , o aumento de potencial ε na fonte é igual à queda de potencial $V_{ab} = IR$ quando a corrente passa pelo restante do circuito.

$$\varepsilon = V_{ab} = IR$$



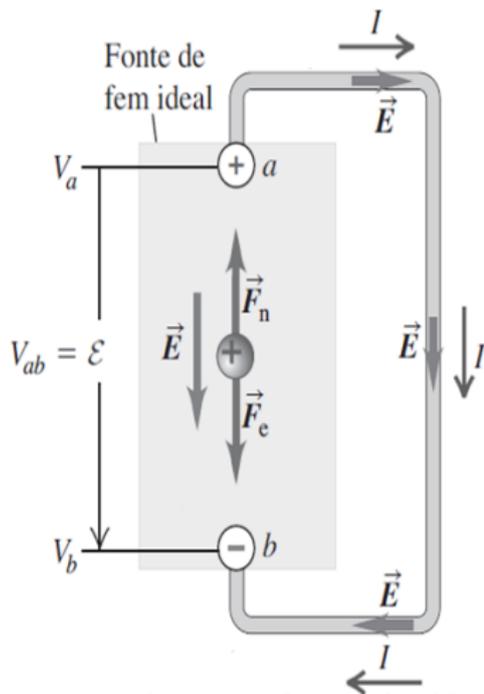
Força eletromotriz

- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.
- ▶ O trabalho feito pela força eletrostática \vec{F}_e é $W_e = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$ é oposto a W_n de modo que a energia potencial associada cresceu.
- ▶ Para uma fonte de fem ideal,

$$\begin{aligned} W_n &= W_e \\ q\varepsilon &= qV_{ab} \\ \varepsilon &= V_{ab} \end{aligned}$$

- ▶ Quando conectamos a fonte de fem em um fio de resistência R , o aumento de potencial ε na fonte é igual à queda de potencial $V_{ab} = IR$ quando a corrente passa pelo restante do circuito.

$$\varepsilon = V_{ab} = IR$$



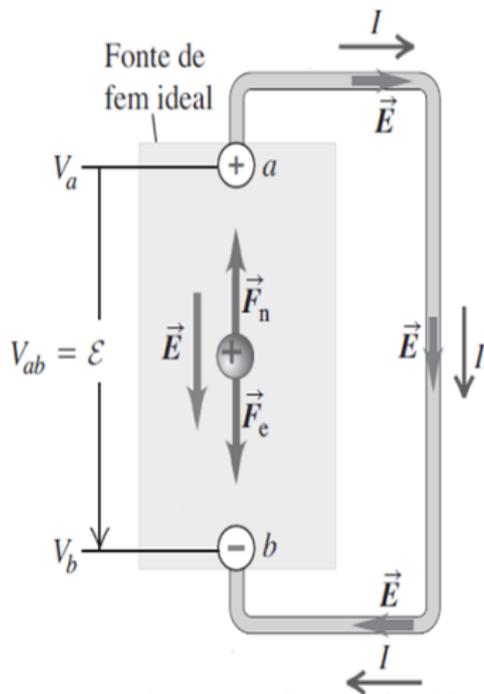
Força eletromotriz

- ▶ Quando uma carga q se move de b para a no interior de uma fonte, a força não eletrostática \vec{F}_n realiza trabalho positivo $W_n = q\varepsilon$ sobre a carga.
- ▶ O trabalho feito pela força eletrostática \vec{F}_e é $W_e = qV_{ab} = q(V_a - V_b)$ é oposto a W_n de modo que a energia potencial associada cresceu.
- ▶ Para uma fonte de fem ideal,

$$\begin{aligned} W_n &= W_e \\ q\varepsilon &= qV_{ab} \\ \varepsilon &= V_{ab} \end{aligned}$$

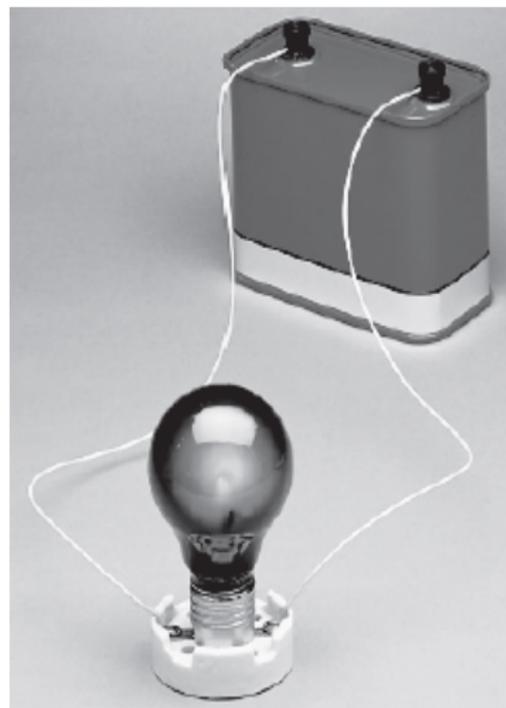
- ▶ Quando conectamos a fonte de fem em um fio de resistência R , o aumento de potencial ε na fonte é igual à queda de potencial $V_{ab} = IR$ quando a corrente passa pelo restante do circuito.

$$\varepsilon = V_{ab} = IR$$



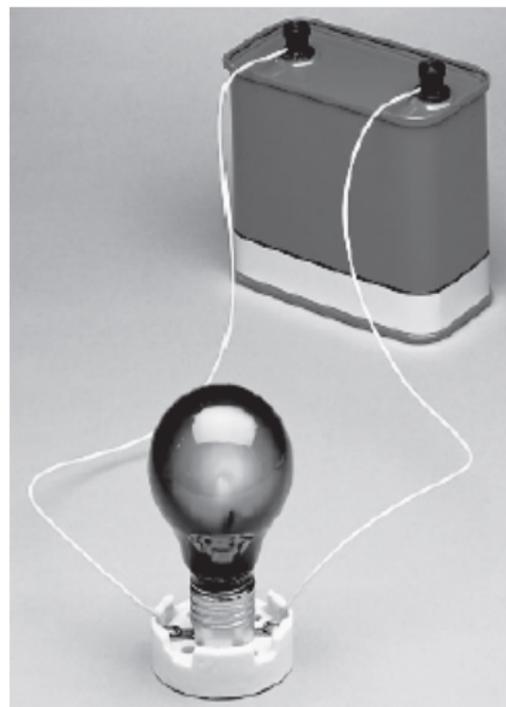
Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (\mathcal{E}).



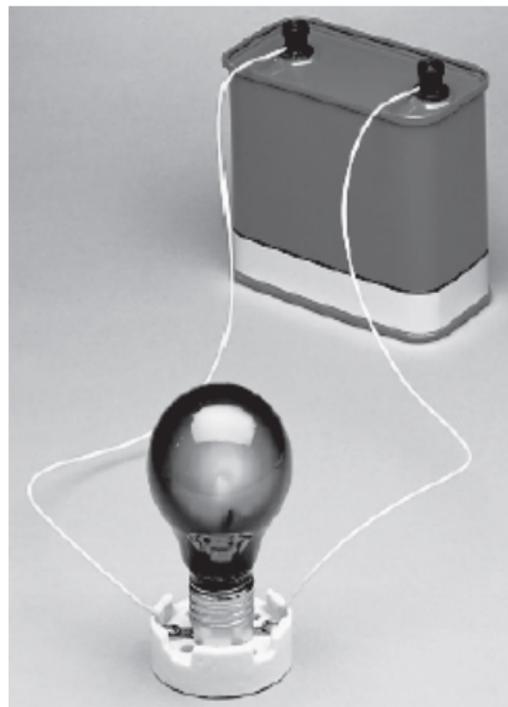
Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (\mathcal{E}).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.



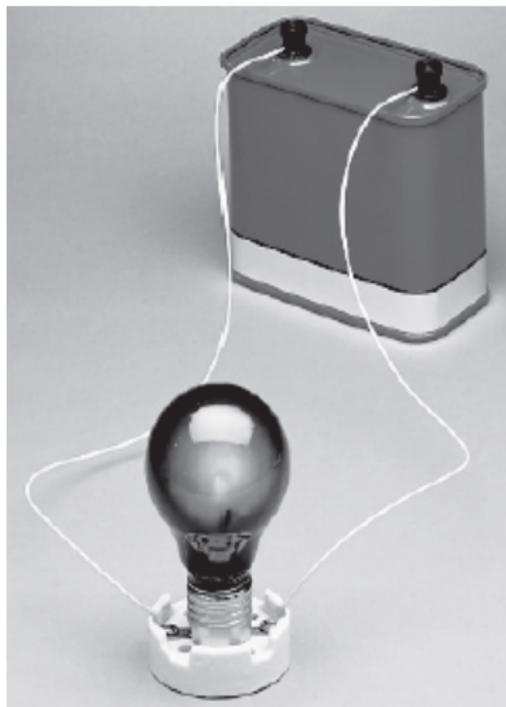
Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (\mathcal{E}).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.
- ▶ Essa é chamada de **resistência interna** da fonte, designada pela letra r .



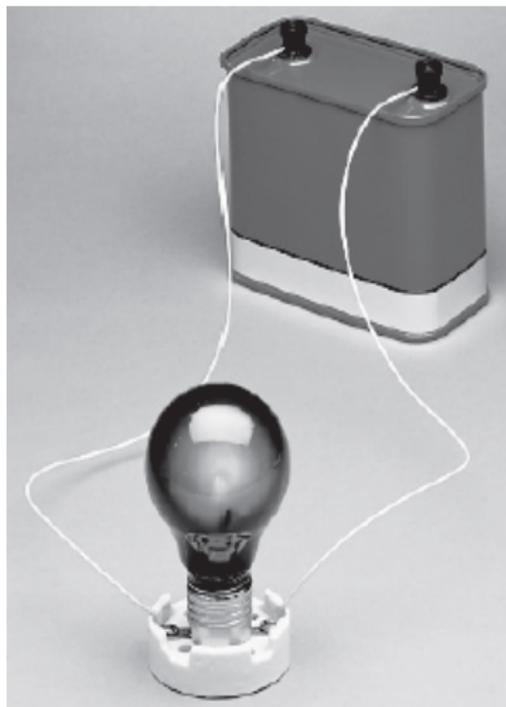
Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (\mathcal{E}).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.
- ▶ Essa é chamada de **resistência interna** da fonte, designada pela letra r .
- ▶ Se r segue a Lei de Ohm, então ela deve ser constante e independente da corrente I .



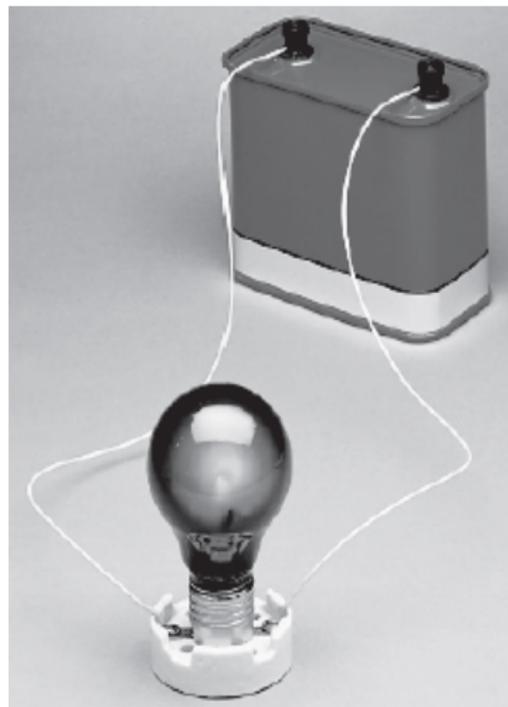
Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (\mathcal{E}).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.
- ▶ Essa é chamada de **resistência interna** da fonte, designada pela letra r .
- ▶ Se r segue a Lei de Ohm, então ela deve ser constante e independente da corrente I .
- ▶ Assim, quando uma corrente I passar pela bateria ela sofrerá uma queda de potencial igual à Ir .



Resistência interna

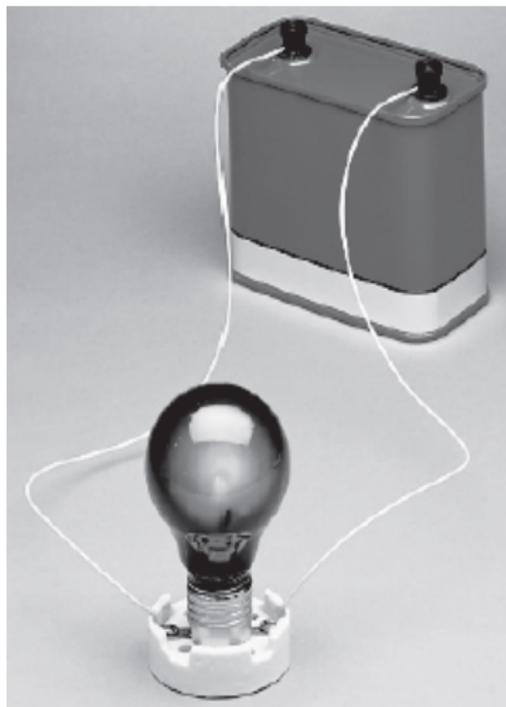
- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (\mathcal{E}).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.
- ▶ Essa é chamada de **resistência interna** da fonte, designada pela letra r .
- ▶ Se r segue a Lei de Ohm, então ela deve ser constante e independente da corrente I .
- ▶ Assim, quando uma corrente I passar pela bateria ela sofrerá uma queda de potencial igual à Ir .
- ▶ Portanto, a diferença de potencial V_{ab} na bateria será dada por:



Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (ε).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.
- ▶ Essa é chamada de **resistência interna** da fonte, designada pela letra r .
- ▶ Se r segue a Lei de Ohm, então ela deve ser constante e independente da corrente I .
- ▶ Assim, quando uma corrente I passar pela bateria ela sofrerá uma queda de potencial igual à Ir .
- ▶ Portanto, a diferença de potencial V_{ab} na bateria será dada por:

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$



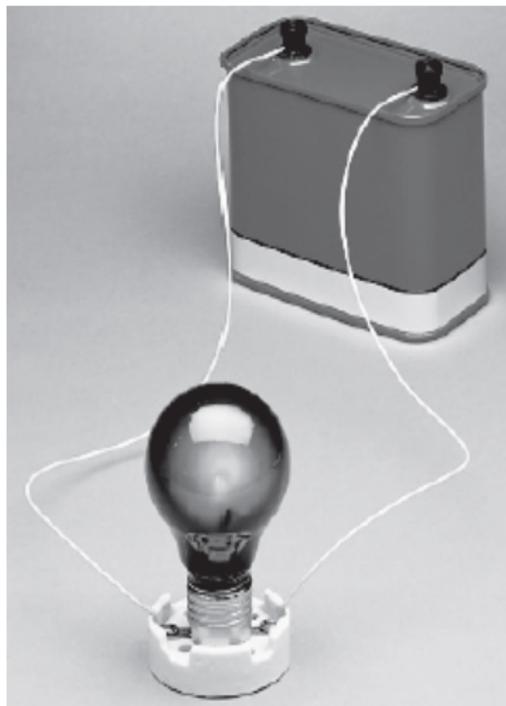
Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (ε).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.
- ▶ Essa é chamada de **resistência interna** da fonte, designada pela letra r .
- ▶ Se r segue a Lei de Ohm, então ela deve ser constante e independente da corrente I .
- ▶ Assim, quando uma corrente I passar pela bateria ela sofrerá uma queda de potencial igual à Ir .
- ▶ Portanto, a diferença de potencial V_{ab} na bateria será dada por:

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

- ▶ Quando ligarmos uma bateria real em uma resistência R teremos que,

$$\begin{aligned}\varepsilon - Ir &= IR \\ I &= \frac{\varepsilon}{R + r}\end{aligned}$$



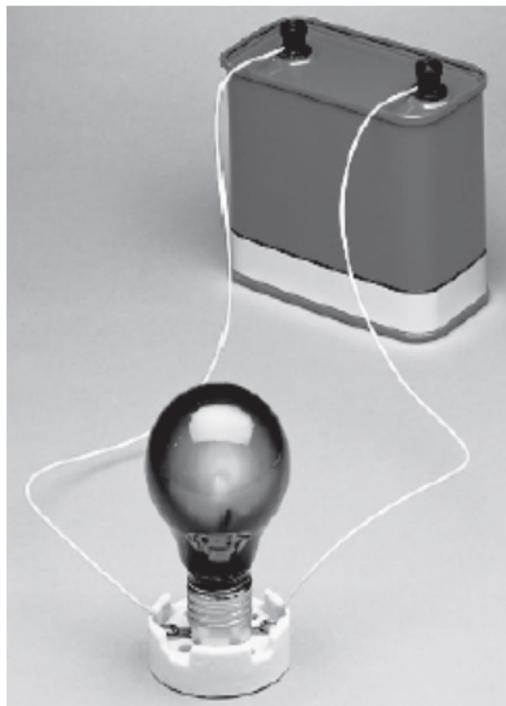
Resistência interna

- ▶ A diferença de potencial (V_{ab}) em uma fonte real, não é igual à fem (ε).
- ▶ A razão é que quando uma carga se move no interior de uma fonte real encontra uma resistência.
- ▶ Essa é chamada de **resistência interna** da fonte, designada pela letra r .
- ▶ Se r segue a Lei de Ohm, então ela deve ser constante e independente da corrente I .
- ▶ Assim, quando uma corrente I passar pela bateria ela sofrerá uma queda de potencial igual à Ir .
- ▶ Portanto, a diferença de potencial V_{ab} na bateria será dada por:

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

- ▶ Quando ligarmos uma bateria real em uma resistência R teremos que,

$$\begin{aligned}\varepsilon - Ir &= IR \\ I &= \frac{\varepsilon}{R + r}\end{aligned}$$

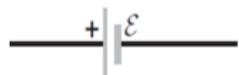


Símbolos usados nos diagramas de circuito

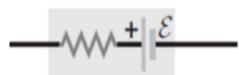
- ▶ **Voltímetro(Ideal):** *Mede a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito. Possui resistência interna infinita e, quando mede um diferença de potencial, nenhuma corrente é desviada para ele.*
(Obs.: Deve sempre ser ligado em paralelo).

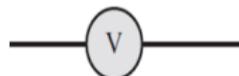
 Condutor com resistência desprezível

 Resistor

 Fonte de fem

 Fonte de fem com resistência interna r
ou

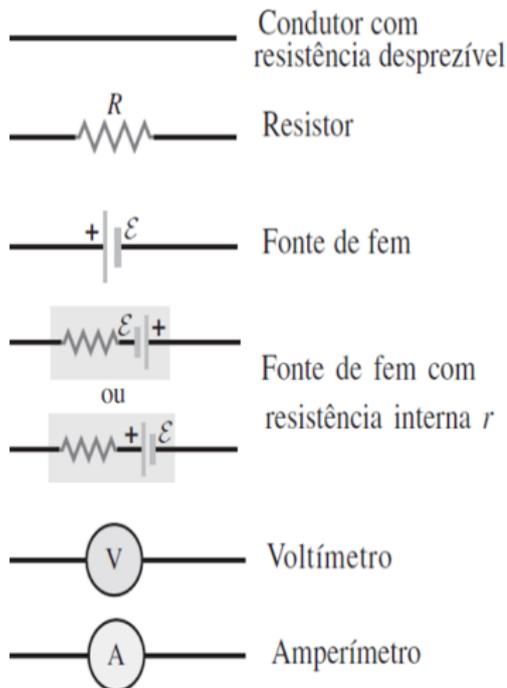


 Voltímetro

 Amperímetro

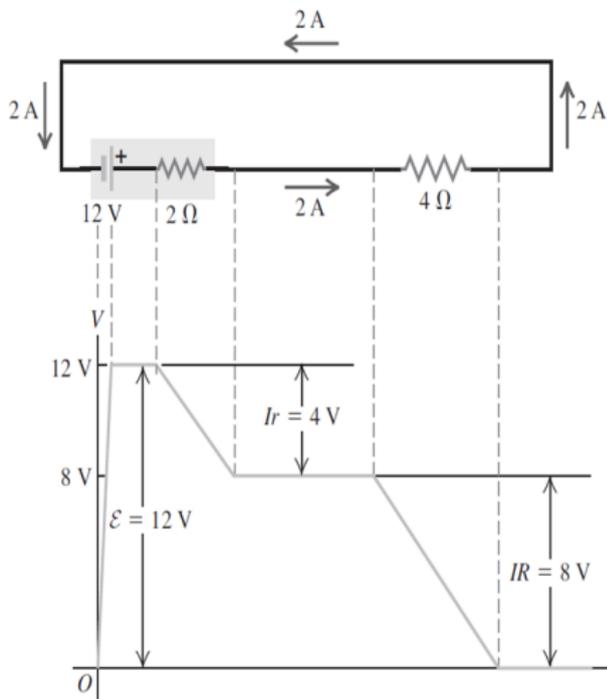
Símbolos usados nos diagramas de circuito

- ▶ **Voltímetro(Ideal):** *Mede a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito. Possui resistência interna infinita e, quando mede um diferença de potencial, nenhuma corrente é desviada para ele. (Obs.: Deve sempre ser ligado em paralelo).*
- ▶ **Amperímetro(Ideal):** *Mede a corrente que passa através dele. Possui resistência interna nula e, não apresenta nenhuma diferença de potencial entre seus terminais. (Obs.: Deve sempre ser ligado em serie).*



Variações de potencial em torno de um circuito

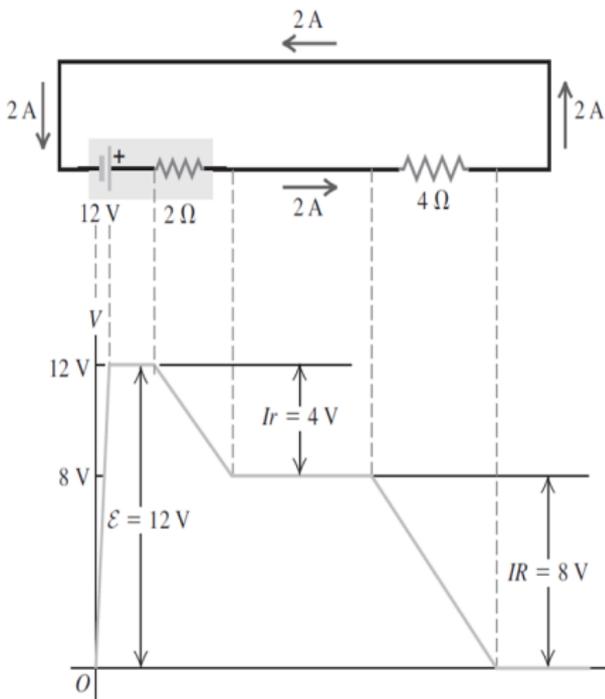
- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.



Variações de potencial em torno de um circuito

- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.

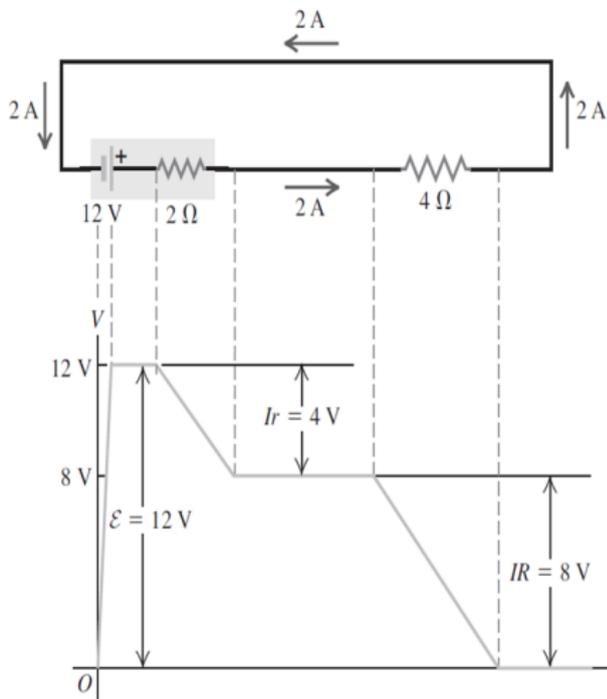
$$\varepsilon - IR - Ir = 0$$



Variações de potencial em torno de um circuito

- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.

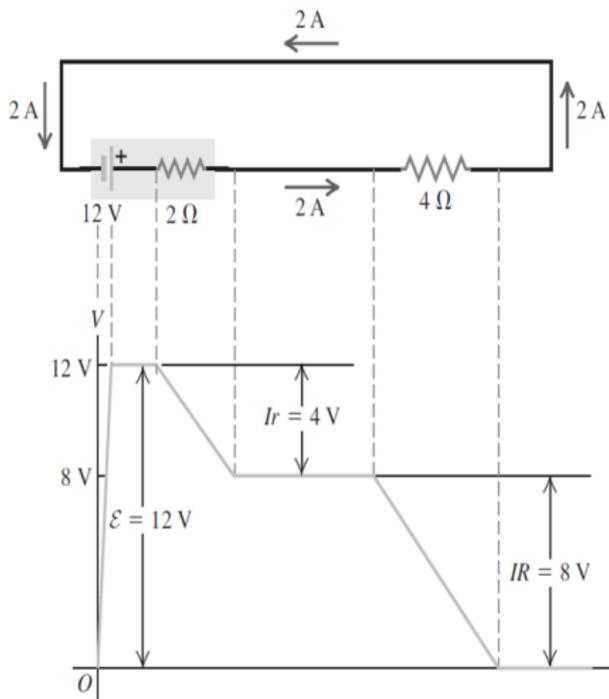
$$\varepsilon - IR - Ir = 0$$



Variações de potencial em torno de um circuito

- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.

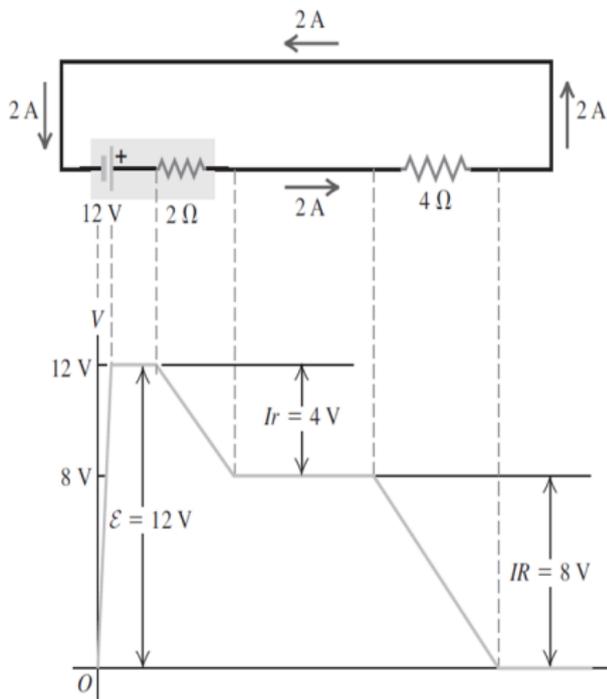
$$\varepsilon - IR - Ir = 0$$



Variações de potencial em torno de um circuito

- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.

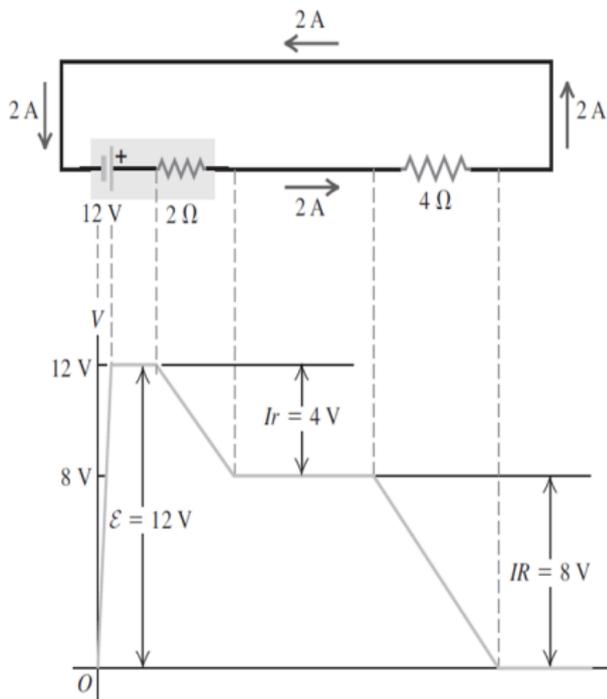
$$\varepsilon - IR - Ir = 0$$



Variações de potencial em torno de um circuito

- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.

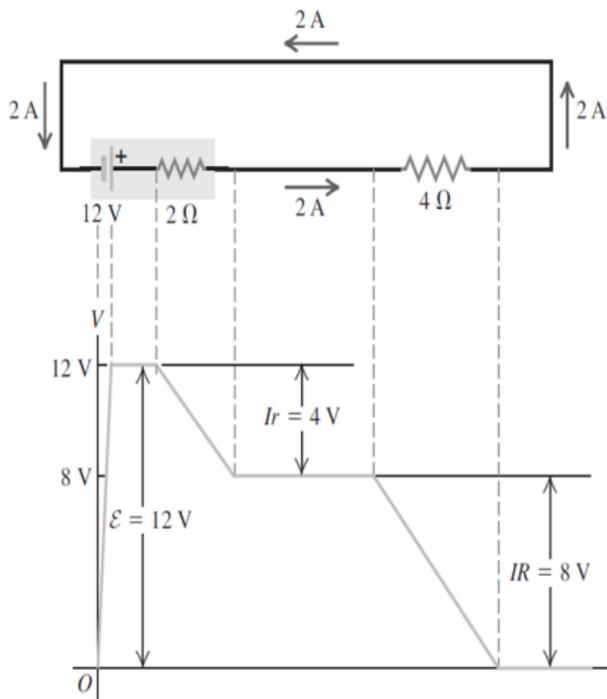
$$\varepsilon - IR - Ir = 0$$



Variações de potencial em torno de um circuito

- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.

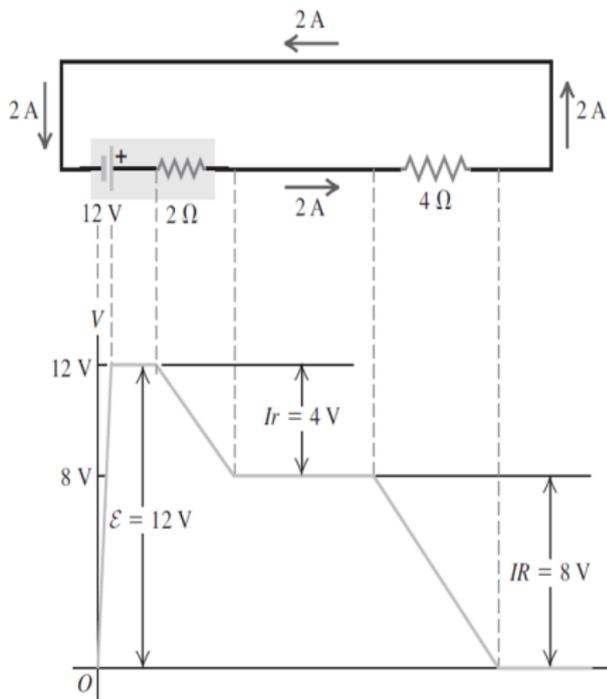
$$\varepsilon - IR - Ir = 0$$



Variações de potencial em torno de um circuito

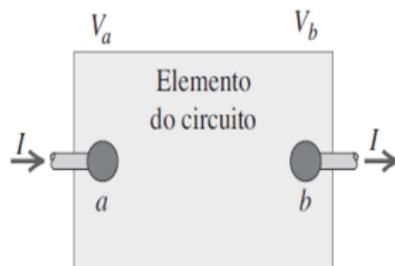
- ▶ A variação total da energia potencial de uma carga q que percorre um circuito fechado é nula.

$$\varepsilon - IR - Ir = 0$$



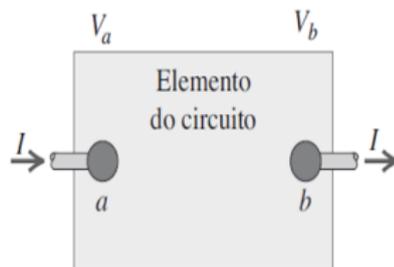
Energia e potência em circuitos elétricos

- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).



Energia e potência em circuitos elétricos

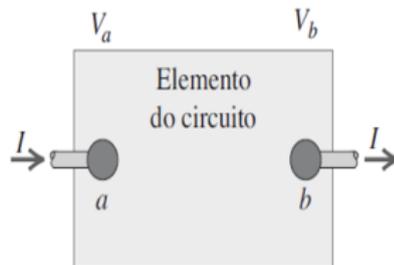
- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.



Energia e potência em circuitos elétricos

- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.
- ▶ Para uma corrente I que flui em um elemento sob uma diferença de potencial V_{ab} , a carga que passa em um dado intervalo de tempo dt será,

$$dQ = I dt$$



Energia e potência em circuitos elétricos

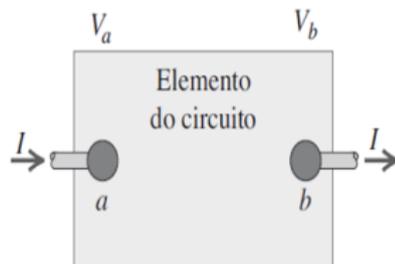
- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.
- ▶ Para uma corrente I que flui em um elemento sob uma diferença de potencial V_{ab} , a carga que passa em um dado intervalo de tempo dt será,

$$dQ = I dt$$

- ▶ Assim o trabalho realiza, dW será dado por,

$$dW = V_{ab} dQ = V_{ab} I dt$$

$$Pot = \frac{dW}{dt} \rightarrow Pot = V_{ab} I$$



Energia e potência em circuitos elétricos

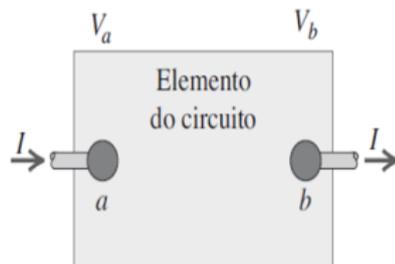
- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.
- ▶ Para uma corrente I que flui em um elemento sob uma diferença de potencial V_{ab} , a carga que passa em um dado intervalo de tempo dt será,

$$dQ = I dt$$

- ▶ Assim o trabalho realiza, dW será dado por,

$$dW = V_{ab} dQ = V_{ab} I dt$$

$$Pot = \frac{dW}{dt} \rightarrow Pot = V_{ab} I$$



Energia e potência em circuitos elétricos

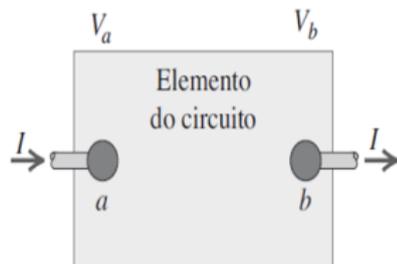
- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.
- ▶ Para uma corrente I que flui em um elemento sob uma diferença de potencial V_{ab} , a carga que passa em um dado intervalo de tempo dt será,

$$dQ = Idt$$

- ▶ Assim o trabalho realiza, dW será dado por,

$$dW = V_{ab}dQ = V_{ab}Idt$$

$$Pot = \frac{dW}{dt} \rightarrow Pot = V_{ab}I$$



Energia e potência em circuitos elétricos

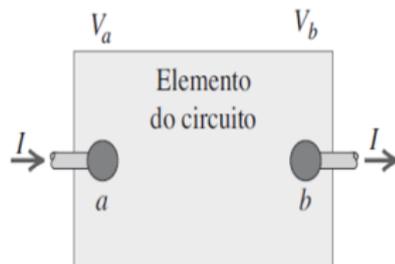
- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.
- ▶ Para uma corrente I que flui em um elemento sob uma diferença de potencial V_{ab} , a carga que passa em um dado intervalo de tempo dt será,

$$dQ = I dt$$

- ▶ Assim o trabalho realiza, dW será dado por,

$$dW = V_{ab} dQ = V_{ab} I dt$$

$$Pot = \frac{dW}{dt} \rightarrow Pot = V_{ab} I$$



Energia e potência em circuitos elétricos

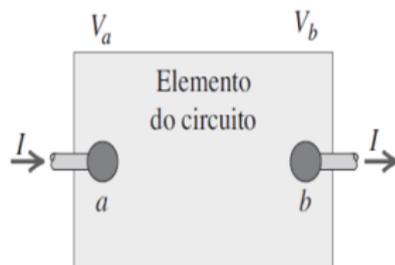
- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.
- ▶ Para uma corrente I que flui em um elemento sob uma diferença de potencial V_{ab} , a carga que passa em um dado intervalo de tempo dt será,

$$dQ = I dt$$

- ▶ Assim o trabalho realiza, dW será dado por,

$$dW = V_{ab} dQ = V_{ab} I dt$$

$$Pot = \frac{dW}{dt} \rightarrow Pot = V_{ab} I$$



Energia e potência em circuitos elétricos

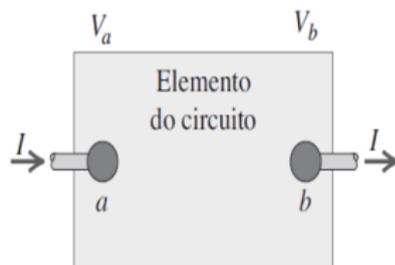
- ▶ Qualquer que seja o elemento da figura ao lado, à medida que uma carga q flui pelo elemento, o campo elétrico realiza um trabalho dado por ($W_{ab} = qV_{ab}$).
- ▶ O trabalho, $W_{ab} = qV_{ab}$, pode ser tanto a energia fornecida(fonte) ou absorvida(resistor) por um elemento.
- ▶ Para uma corrente I que flui em um elemento sob uma diferença de potencial V_{ab} , a carga que passa em um dado intervalo de tempo dt será,

$$dQ = I dt$$

- ▶ Assim o trabalho realiza, dW será dado por,

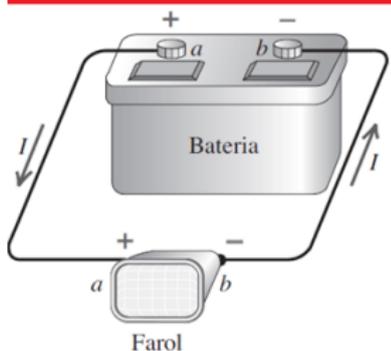
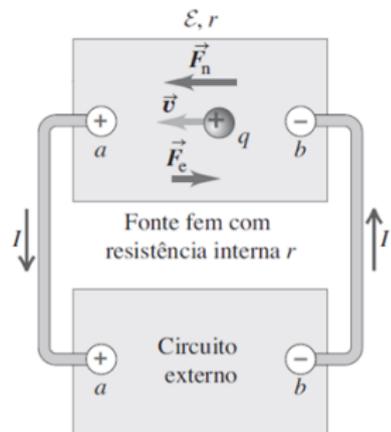
$$dW = V_{ab} dQ = V_{ab} I dt$$

$$Pot = \frac{dW}{dt} \rightarrow Pot = V_{ab} I$$



Potência fornecida por uma fonte

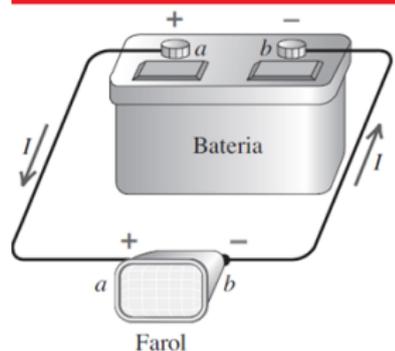
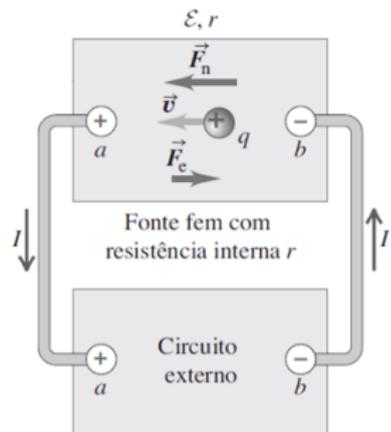
- ▶ Para uma fonte real vimos que,



Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vimos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

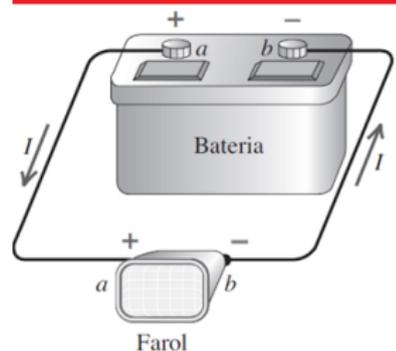
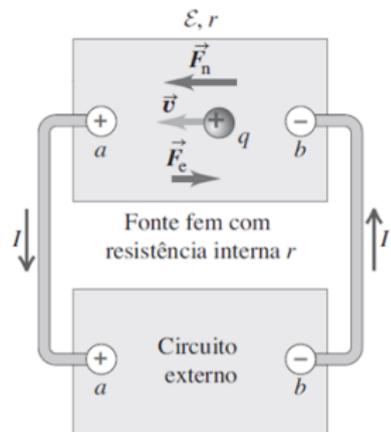


Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vimos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I - I^2 r$$



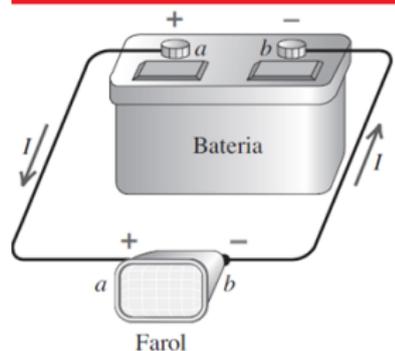
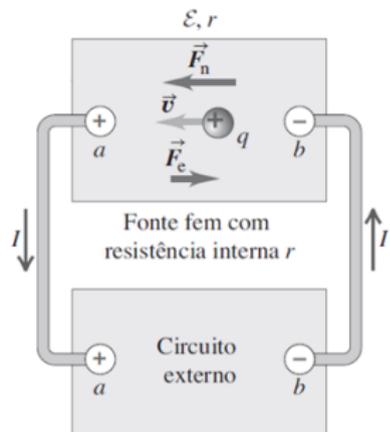
Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vemos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I - I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia não eletrostática** em **energia elétrica**.



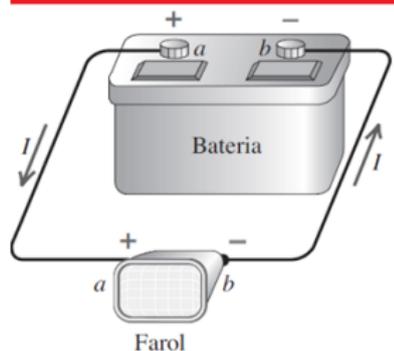
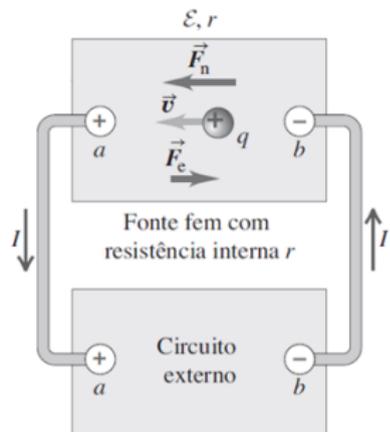
Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vimos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I - I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia não eletrostática** em **energia elétrica**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia da fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I - I^2 r$ é a potência líquida **fornecida** pela fonte ao circuito.



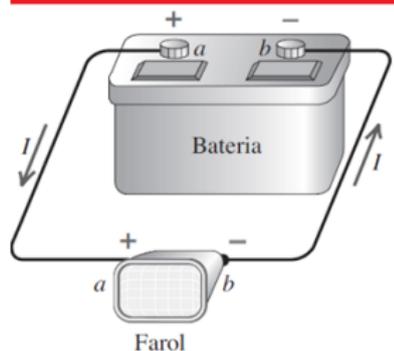
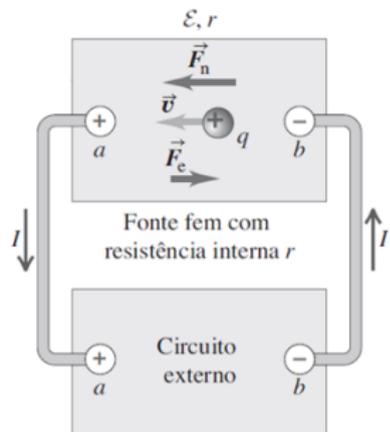
Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vimos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I - I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia não eletrostática** em **energia elétrica**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia da fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I - I^2 r$ é a potência líquida **fornecida** pela fonte ao circuito.



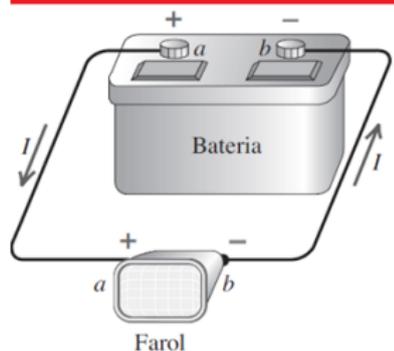
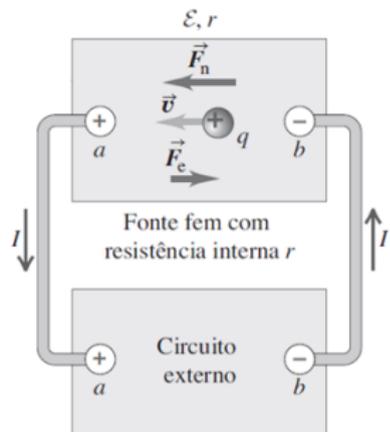
Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vimos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I - I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia não eletrostática** em **energia elétrica**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia da fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I - I^2 r$ é a potência líquida **fornecida** pela fonte ao circuito.



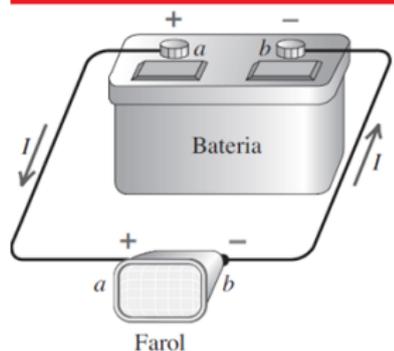
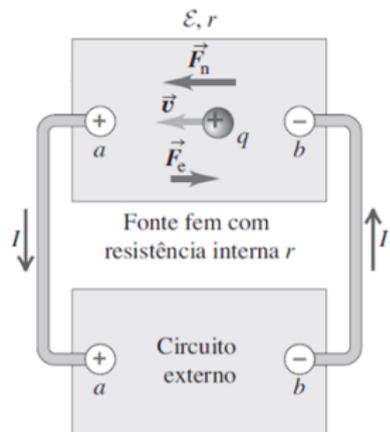
Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vimos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I - I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia não eletrostática** em **energia elétrica**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia da fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I - I^2 r$ é a potência líquida **fornecida** pela fonte ao circuito.



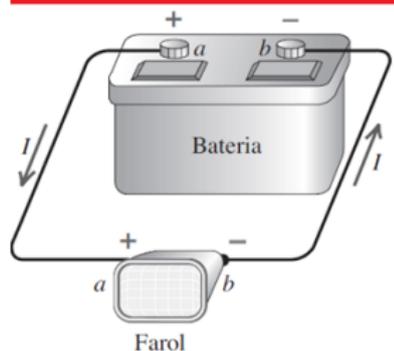
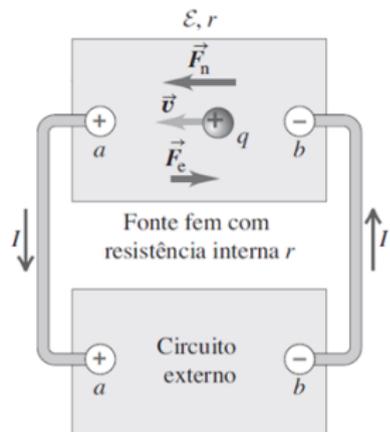
Potência fornecida por uma fonte

- ▶ Para uma fonte real vimos que,

$$V_{ab} = \varepsilon - Ir$$

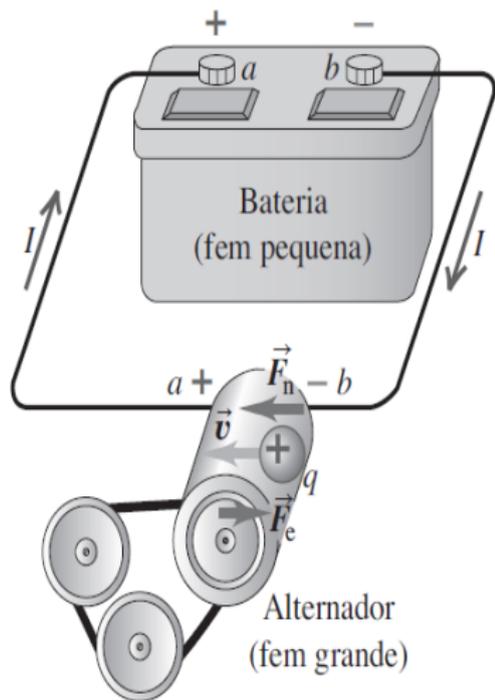
$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I - I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia não eletrostática** em **energia elétrica**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia da fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I - I^2 r$ é a potência líquida **fornecida** pela fonte ao circuito.



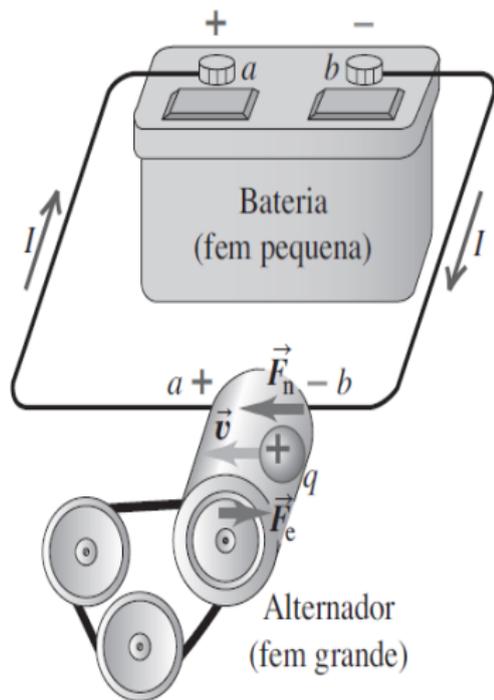
Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.



Potência absorvida por uma fonte

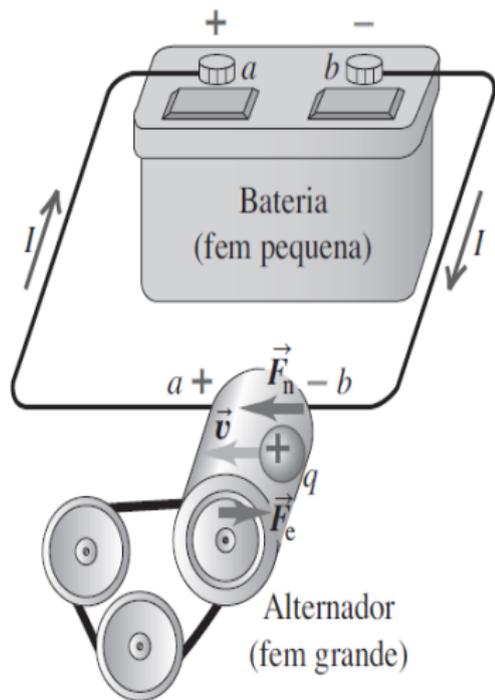
- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.



Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.
- ▶ Desta situação podemos ver que,

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$



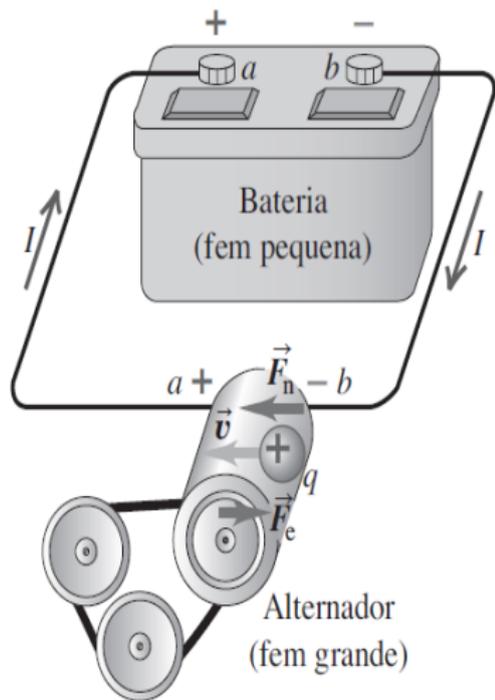
Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.
- ▶ Desta situação podemos ver que,

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I + I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia elétrica** em **energia não eletrostática (carregamento)**.



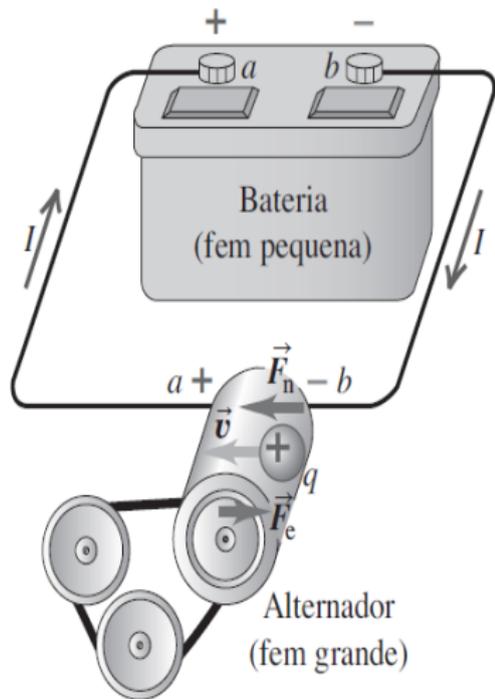
Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.
- ▶ Desta situação podemos ver que,

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I + I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia elétrica** em **energia não eletrostática (carregamento)**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia na fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I + I^2 r$ é a **potência líquida absorvida** pela fonte.



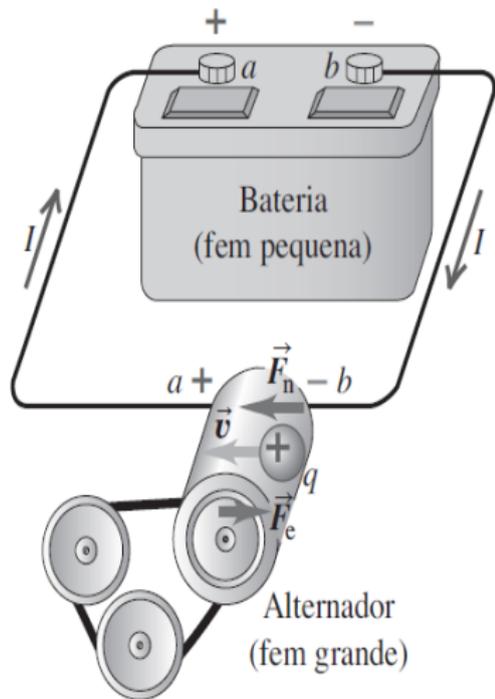
Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.
- ▶ Desta situação podemos ver que,

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I + I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia elétrica** em **energia não eletrostática (carregamento)**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia na fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I + I^2 r$ é a **potência líquida absorvida** pela fonte.



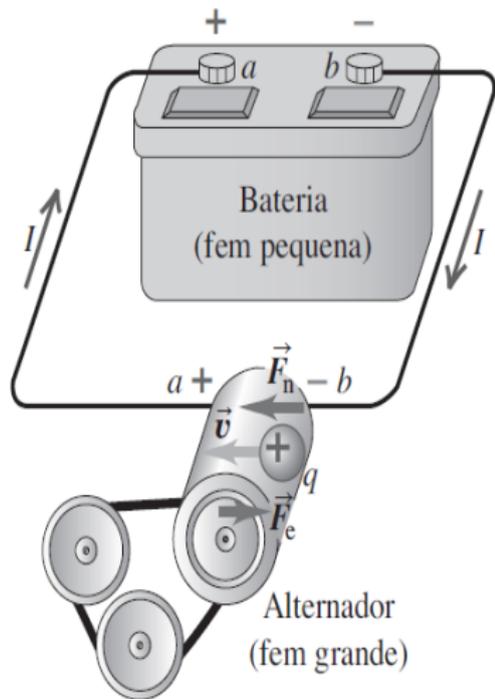
Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.
- ▶ Desta situação podemos ver que,

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I + I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia elétrica** em **energia não eletrostática (carregamento)**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia na fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I + I^2 r$ é a **potência líquida absorvida** pela fonte.



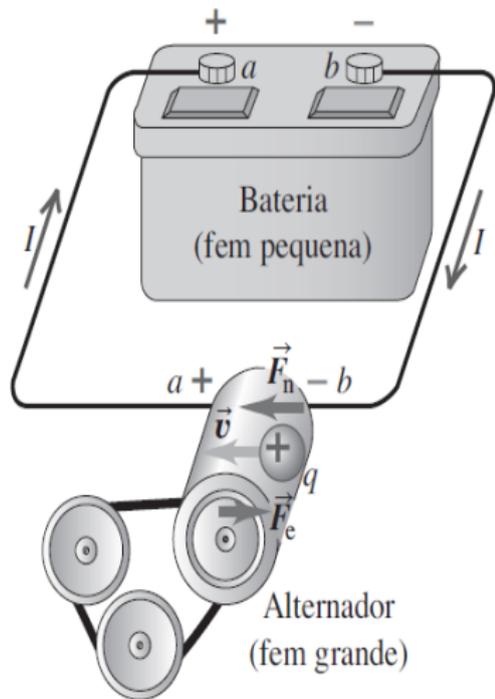
Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.
- ▶ Desta situação podemos ver que,

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$

$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I + I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia elétrica** em **energia não eletrostática (carregamento)**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia na fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I + I^2 r$ é a **potência líquida absorvida** pela fonte.



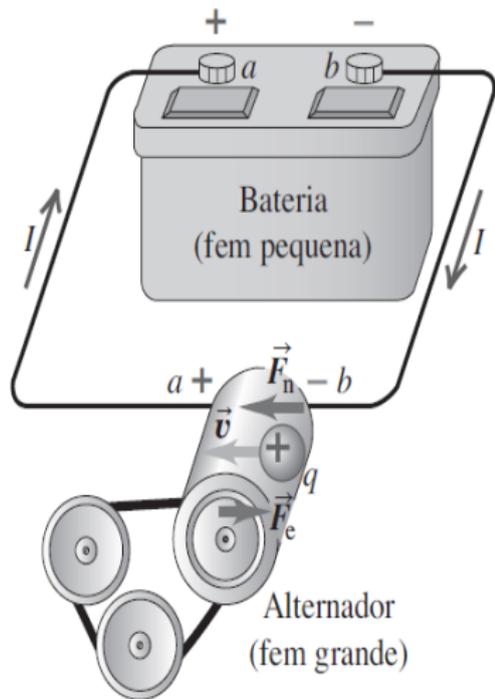
Potência absorvida por uma fonte

- ▶ Se conectarmos uma fonte com outra fonte de fem maior, porém com sentido contrário, a corrente terá o sentido oposto na fonte com fem menor.
- ▶ Vemos que a corrente I terá o sentido invertido e a fonte inferior estará injetando cargas na fonte superior.
- ▶ Desta situação podemos ver que,

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$

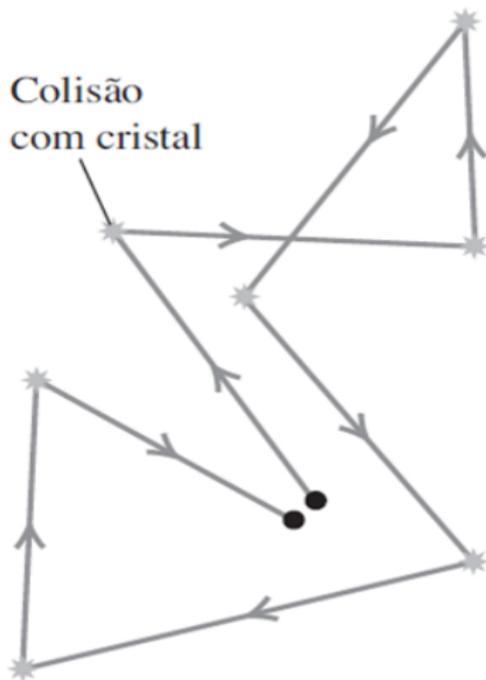
$$Pot = V_{ab}I = \varepsilon I + I^2 r$$

- ▶ O termo εI é a taxa que a fonte converte **energia elétrica** em **energia não eletrostática (carregamento)**.
- ▶ O termo $I^2 r$ é a taxa de dissipação de energia na fonte.
- ▶ A diferença $\varepsilon I + I^2 r$ é a **potência líquida absorvida** pela fonte.



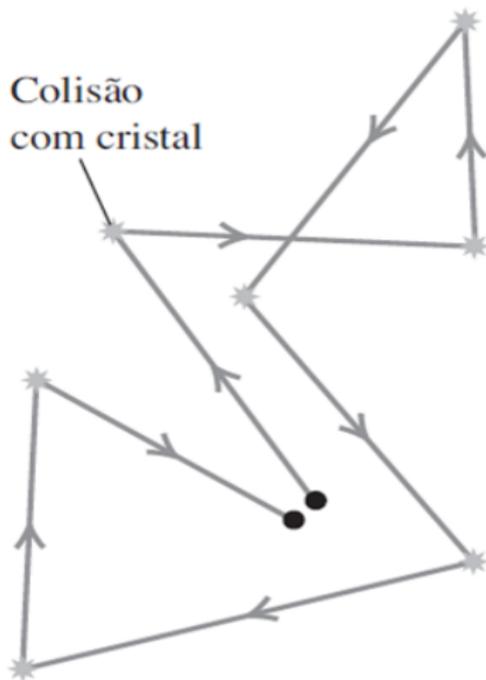
Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.



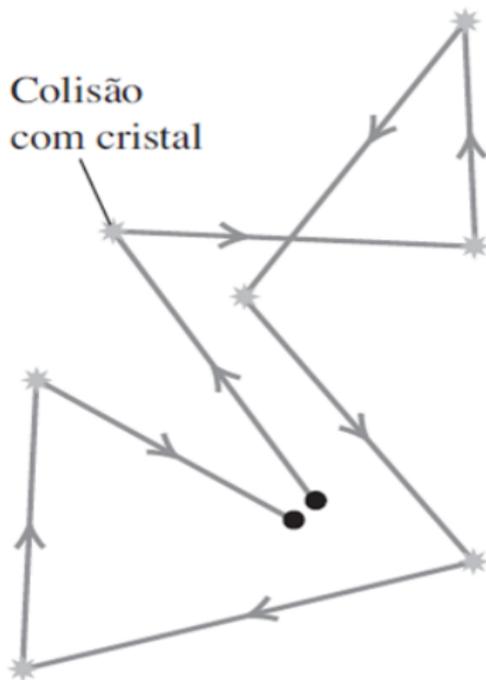
Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.



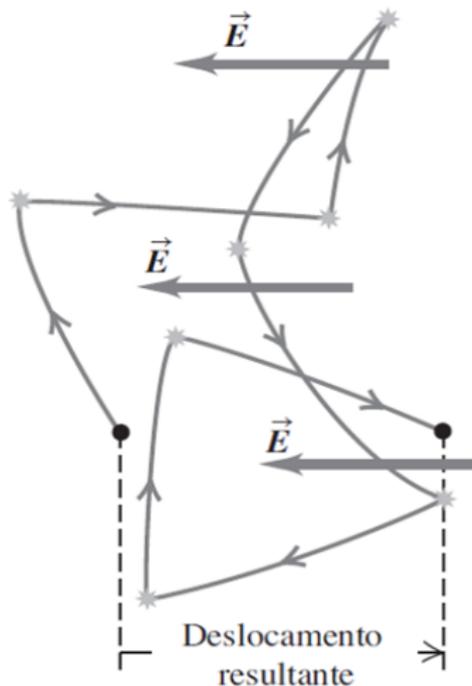
Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição. Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$



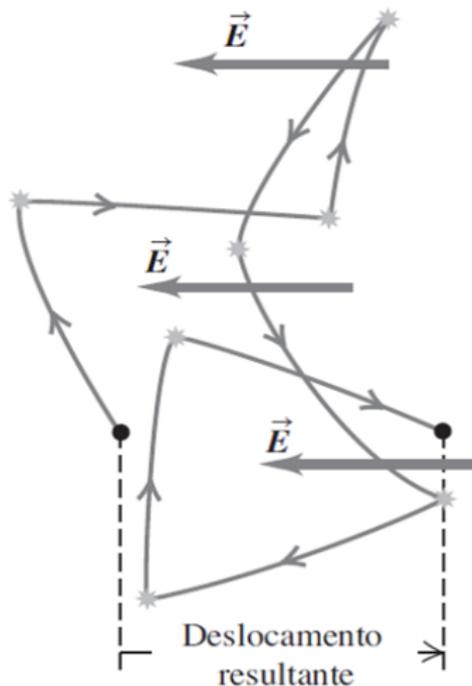
Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição. Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$
- ▶ Quando $\vec{E} \neq 0$ os elétrons suas trajetórias se encurvam em virtude de $\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$.



Teoria da condução em metais

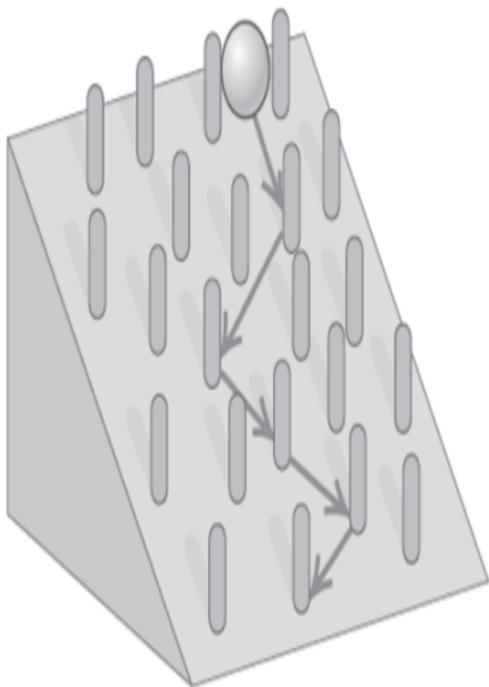
- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição. Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$
- ▶ Quando $\vec{E} \neq 0$ os elétrons suas trajetórias se encurvam em virtude de $\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$.
- ▶ Como $v_{alea} \sim 10^6 \text{ m/s}$ e $v_a \sim 10^{-4} \text{ m/s}$ definiremos o **tempo livre médio** τ como o tempo médio entre duas colisões.



Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição.
Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$
- ▶ Quando $\vec{E} \neq 0$ os elétrons suas trajetórias se encurvam em virtude de $\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$.
- ▶ Como $v_{alea} \sim 10^6 m/s$ e $v_a \sim 10^{-4} m/s$ definiremos o **tempo livre médio** τ como o tempo médio entre duas colisões.
- ▶ Assim, para um instante $t + \Delta t$ o elétron possui,

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t$$

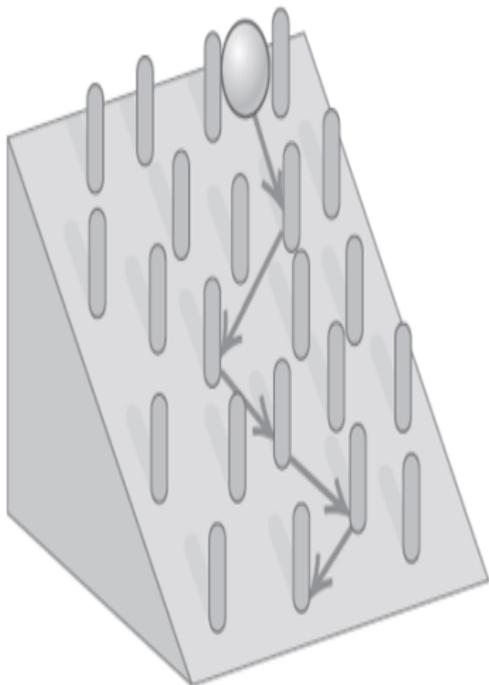


Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição. Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$
- ▶ Quando $\vec{E} \neq 0$ os elétrons suas trajetórias se encurvam em virtude de $\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$.
- ▶ Como $v_{alea} \sim 10^6 m/s$ e $v_a \sim 10^{-4} m/s$ definiremos o **tempo livre médio** τ como o tempo médio entre duas colisões.
- ▶ Assim, para um instante $t + \Delta t$ o elétron possui,

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t$$

$$\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_0 \rangle + \frac{q}{m} \vec{E} \langle \Delta t \rangle$$



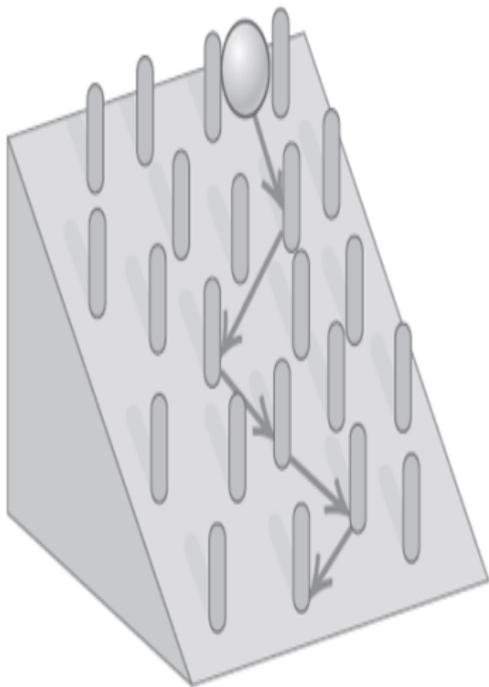
Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição. Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$
- ▶ Quando $\vec{E} \neq 0$ os elétrons suas trajetórias se encurvam em virtude de $\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$.
- ▶ Como $v_{alea} \sim 10^6 m/s$ e $v_a \sim 10^{-4} m/s$ definiremos o **tempo livre médio** τ como o tempo médio entre duas colisões.
- ▶ Assim, para um instante $t + \Delta t$ o elétron possui,

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t$$

$$\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_0 \rangle + \frac{q}{m} \vec{E} \langle \Delta t \rangle$$

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{q\tau}{m} \vec{E} = \vec{v}_a$$



Teoria da condução em metais

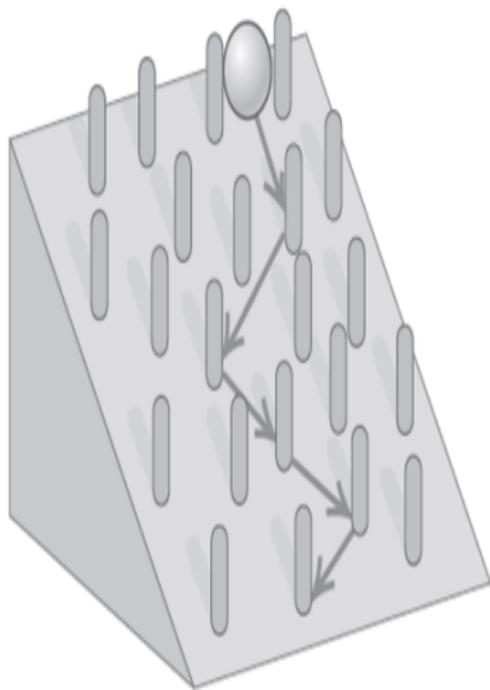
- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição. Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$
- ▶ Quando $\vec{E} \neq 0$ os elétrons suas trajetórias se encurvam em virtude de $\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$.
- ▶ Como $v_{alea} \sim 10^6 m/s$ e $v_a \sim 10^{-4} m/s$ definiremos o **tempo livre médio** τ como o tempo médio entre duas colisões.
- ▶ Assim, para um instante $t + \Delta t$ o elétron possui,

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t$$

$$\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_0 \rangle + \frac{q}{m} \vec{E} \langle \Delta t \rangle$$

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{q\tau}{m} \vec{E} = \vec{v}_a$$

$$\vec{j} = nq\vec{v}_a = \frac{nq^2\tau}{m} \vec{E}$$



Teoria da condução em metais

- ▶ Quando $\vec{E} = 0$ no interior de um metal os elétrons descrevem trajetórias retilíneas entre as colisões.
- ▶ As direções de suas velocidades são caóticas.
- ▶ Na média eles permanecem na mesma posição. Assim, $\langle \vec{v}_0 \rangle = 0$
- ▶ Quando $\vec{E} \neq 0$ os elétrons suas trajetórias se encurvam em virtude de $\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$.
- ▶ Como $v_{alea} \sim 10^6 \text{ m/s}$ e $v_a \sim 10^{-4} \text{ m/s}$ definiremos o **tempo livre médio** τ como o tempo médio entre duas colisões.
- ▶ Assim, para um instante $t + \Delta t$ o elétron possui,

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t$$

$$\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_0 \rangle + \frac{q}{m} \vec{E} \langle \Delta t \rangle$$

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{q\tau}{m} \vec{E} = \vec{v}_a$$

$$\vec{j} = nq\vec{v}_a = \frac{nq^2\tau}{m} \vec{E}$$

$$\rho = E/J = \frac{m}{ne^2\tau}$$

