

Efeitos magnético da corrente elétrica

Um condutor, percorrido por uma corrente elétrica, cria, na região próxima a ele, um campo magnético.

Primeira Lei de Ohm

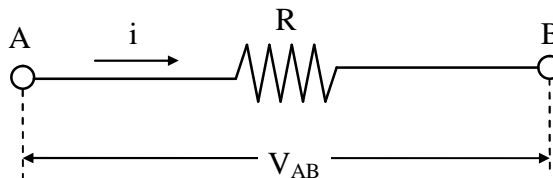
Quando um pedaço de fio metálico fino é ligado a uma tomada, nota-se que a intensidade de corrente i é aproximadamente proporcional à tensão V aplicada, desde que a temperatura seja mantida constante. Em outras palavras, se V duplicar, i duplicará; se V triplicar, i triplicará etc.

Todo sistema elétrico para o qual a tensão V é proporcional à intensidade de corrente i é um resistor simples ou um **resistor ôhmico**. O pedaço de fio metálico citado é um exemplo de resistor simples.

Uma vez que V é proporcional a i , pode-se escrever:

$$\frac{V_{AB}}{i} = \text{constante}$$

$$R = \frac{V_{AB}}{i} \text{ ou } V_{AB} = R \cdot i$$



A unidade de resistência elétrica no SI é o **ohm** (símbolo Ω).

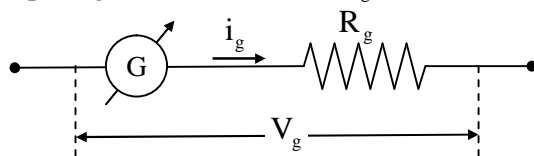
$$1 \text{ ohm} = \frac{1 \text{ volt}}{\text{ampère}} \text{ ou } 1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{\text{A}}$$

Galvanômetro

Qualquer aparelho que indica a presença de corrente elétrica em um circuito é denominado *galvanômetro*. O primeiro galvanômetro foi criado por Hans Christian Oarsted em 1820.

Quando incluído num circuito elétrico, o galvanômetro comporta-se como um resistor de pequena resistência, representada por R_g , chamada de *resistência interna* do galvanômetro.

O maior valor de corrente que o galvanômetro mede é i_g , denominada *corrente de fundo de escala*.



Os aparelhos de medida de corrente e diferença de potencial, amperímetro e voltímetro respectivamente, são construídos a partir de um galvanômetro.

Amperímetro

A passagem de corrente de intensidade superior ao valor de seu fundo de escala danifica o galvanômetro. Para sanar esse inconveniente, ligamos em paralelo à R_g outra resistência R_p , bem menor que R_g , denominada *shunt*.

Sendo R_p muito menor que R_g , ela desvia a maior parte da corrente i para si. Desse modo apenas uma pequena fração de i atravessa o galvanômetro que, assim, não se danifica.

A associação do *shunt* com o galvanômetro forma o **amperímetro**, que mede uma corrente i superior à do fundo de escala do galvanômetro.

As correntes i_g e i_p estão assim relacionadas:

$$\left. \begin{aligned} V_{AB} &= R_g \cdot i_g \\ V_{AB} &= R_p \cdot i_p \end{aligned} \right\} R_p \cdot i_p = R_g \cdot i_g \Rightarrow i_p = i_g \cdot \frac{R_g}{R_p}$$

de $i = i_g + i_p$ temos que $i = i_g + i_g \cdot \frac{R_g}{R_p} \rightarrow i = i_g \cdot \left(1 + \frac{R_g}{R_p}\right)$ em que $\left(1 + \frac{R_g}{R_p}\right)$ é chamado de fator de multiplica-

ção do shunt (F_s): $i = i_g \times F_s$

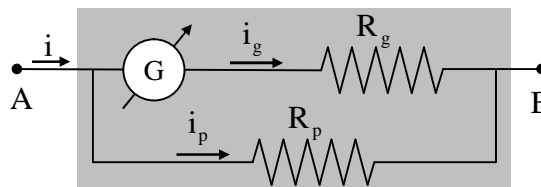
Na prática o amperímetro já vem com o shunt interno e graduado para leitura.

Sendo a corrente i_g uma fração da corrente i , podemos demonstrar que $i_g = \frac{R_p}{R_p + R_g} \cdot i$

Demonstração:

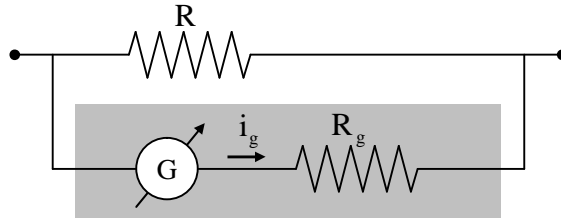
$$i = i_g \cdot \left(1 + \frac{R_g}{R_p}\right) \Rightarrow i = i_g \cdot \left(\frac{R_p + R_g}{R_p}\right) \Rightarrow i_g = \frac{R_p}{R_p + R_g} \cdot i$$

O amperímetro ideal possui resistência interna nula.

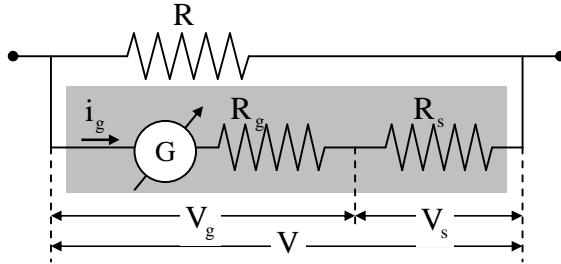


Voltímetro

Para medir a diferença de potencial (ddp) num elemento de circuito, coloca-se o galvanômetro, graduado em unidades de ddp, em paralelo ao elemento de que se quer medir a ddp.



Para o galvanômetro não interferir significativamente no circuito, deve receber do mesmo uma corrente i_g desprezível. Nesse caso, deve-se associar em série com o galvanômetro um resistor de resistência R_s muito grande.



Da figura, vem:

$$V = V_g + V_s \Rightarrow V = R_g \cdot i_g + R_s \cdot i_g$$

$$V = (R_g + R_s) \cdot i_g$$

$$V = (R_g + R_s) \cdot \frac{V_g}{R_g} \Rightarrow V = V_g \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_g}\right)$$

Esse arranjo (sombreado) é denominado de voltímetro e $R_V = R_g + R_s$ é a resistência interna do voltímetro. Um bom voltímetro deve possuir uma resistência interna elevada (centenas de $k\Omega$) e um galvanômetro bastante sensível, pois deverá defletir o ponteiro para correntes muito pequenas.

O voltímetro ideal possui resistência interna infinita.

III - TEORIA DA MEDIDA:

Medida de Corrente

Se quisermos medir uma corrente devemos antes saber que medidor devemos utilizar. Para isto, devemos conhecer a ddp á qual está submetido o circuito e a resistência mínima que o circuito terá. Assim em um circuito onde temos aplicada uma tensão de 10V a uma resistência de 10 $k\Omega$, pela lei de Ohm devemos ter um amperímetro capaz de medir uma corrente igual a:

$$i = \frac{V}{R} = \frac{10}{10000} = 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

Suponha, agora, que queremos medir uma corrente superior a 1 mA, mas só dispomos de um amperímetro que mede uma corrente máxima de 1 mA. Para conseguir isto teremos que desviar o excesso de corrente do amperímetro. Criando este desvio (R_p) e sabendo a corrente que o atravessa podemos medir uma corrente superior a 1 mA.

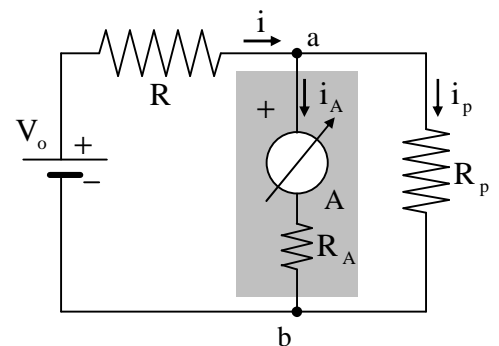
Considere o circuito ao lado:

V_o = fonte de tensão

R = resistência

R_p = resistência do desvio (shunt)

R_A = resistência interna do amperímetro



A diferença de potencial entre os pontos **a** e **b**, onde foi colocado o amperímetro é igual a:

$$V_{ab} = R_A \cdot i_A \text{ e } V_{ab} = R_p \cdot i_p \Rightarrow R_A \cdot i_A = R_p \cdot i_p \Rightarrow R_p = \frac{i_A}{i - i_A} \cdot R_A \text{ como } i = i_A + i_p \text{ temos: } R_p = \frac{i_A}{i - i_A} \cdot R_A$$

Deste modo, a partir de um amperímetro que possa medir uma corrente máxima de 1 mA, podemos, obter amperímetros para medir quaisquer corrente superior a 1 mA.

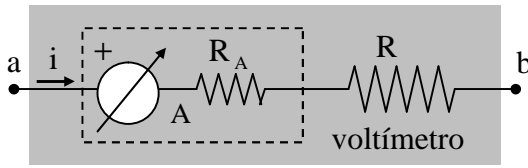
Observação: A associação em paralelo da resistência R_A com R_p passa a ser considerada como a nova resistência interna (R'_A) do amperímetro. Vimos que o fundo de escala aumenta e que a resistência interna do amperímetro diminui.

$$R'_A = \frac{R_A \cdot R_p}{R_A + R_p}$$

Transformação de Amperímetro em Voltímetro

Um voltímetro é um galvanômetro com uma grande resistência (em relação ao trecho no qual se quer medir a ddp). Vamos ver como transformar um amperímetro em um voltímetro.

Suponha que contamos com um amperímetro de 1 mA e que queremos medir uma tensão de, no máximo, 10 V. Veja o esquema.



Onde $R_V = R + R_A$, resistência interna do voltímetro.

Devemos ajustar o valor de R tal que quando entre os pontos a e b , para uma ddp seja de 10 V, circulará uma corrente de 1 mA.

$$V_{ab} = (R + R_A) \cdot i_A \Rightarrow R = \frac{V_{ab}}{i_A} - R_A$$

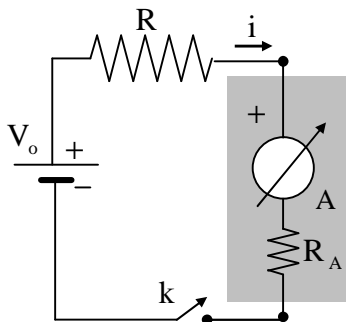
IV - PARTE EXPERIMENTAL:

Lista de material

- Fonte de tensão
- Década de resistores (duas)
- Amperímetro
- Chave liga-desliga
- Placa de ligação
- Fios

IV.1 - Medida de corrente menor que o fundo de escala do amperímetro

Observamos o seguinte circuito:



$V_o =$ fonte de tensão **3,92 V** e $DV_o = 0,01 V$

$R =$ década de resistores e para leitura na década $DR = \pm 5 \%$

$A =$ amperímetro com fundo de escala **10 mA** e $Di = 0,1 mA$

$K =$ chave liga-desliga

Com o auxílio da lei de Ohm, determinamos o valor de $R_{min.}$ para que a corrente no amperímetro não ultrapasse o fundo de escala do mesmo (10 mA)

$$R = \frac{V_o}{i_{máx.}} = \frac{3,92}{10 \cdot 10^{-3}} = 392 \Omega$$

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial V} \cdot \Delta V + \frac{\partial R}{\partial i} \cdot \Delta i = \frac{1}{i} \cdot \Delta V + \frac{V}{i^2} \cdot \Delta i =$$

$$\Delta R = \frac{1}{10^{-2}} \cdot 0,01 + \frac{3,92}{(10^{-2})^2} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 5 \Omega$$

$$R = (392 \pm 5) \Omega$$

Calculamos também o valor de R , que permite uma corrente mínima de 1 mA, para a mesma tensão de 3,92 V.

$$R = \frac{V_o}{i} = \frac{3,92}{1 \cdot 10^{-3}} = 3920 \Omega$$

$$\Delta R = \frac{1}{10^{-3}} \cdot 0,01 + \frac{3,92}{(10^{-3})^2} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 400 \Omega \quad \mathbf{P}$$

$$R = (3920 \pm 400) \Omega$$

Ao colocarmos o valor da resistência mínimo calculada na década de resistores, notamos que o amperímetro indicou **(9,8 ± 0,1) mA** que é um valor menor que **(10,0 ± 0,1) mA**. Atribuímos esse fato à resistência interna do amperímetro.

Então ajustamos o valor da resistência mínima na década de resistores (resistência mínima experimental) e chegamos ao valor de $(382 \pm 5\%) \text{ W}$ para uma corrente de $(10,0 \pm 0,1) \text{ mA}$.

A partir da **resistência mínima experimental** (382 W), inclusive, ajustamos na década dez valores de resistência e anotamos o resultado na tabela abaixo.

$R \text{ (W)}$ = resistência do resistor da década; $i_m \text{ (mA)}$ = corrente medida no amperímetro;

$i_c \text{ (mA)}$ = corrente calculada.

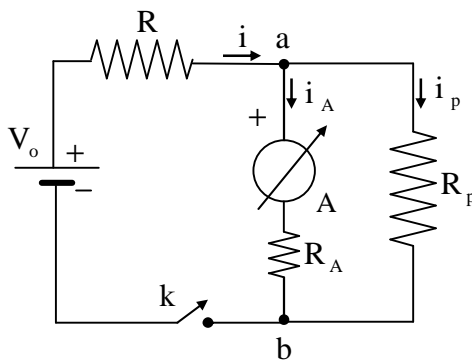
R (Ω)	i_m (mA)	i_c (mA)	$i_c - i_m$ (mA)	R (Ω)	i_m (mA)	i_c (mA)	$i_c - i_m$ (mA)
1) 382	10	10,3	0,3	9) 900	4,4	4,4	0,0
2) 400	9,6	9,8	0,2	10) 1100	3,6	3,6	0,0
3) 430	9,0	9,1	0,1	11) 1300	3,0	3,0	0,0
4) 450	8,6	8,7	0,1	12) 1500	2,6	2,6	0,0
5) 500	7,8	7,8	0,0	13) 1900	2,0	2,1	0,1
6) 550	7,0	7,1	0,1	14) 2500	1,6	1,6	0,0
7) 600	6,5	6,5	0,0	15) 3920	1,0	1,0	0,0
8) 700	5,6	5,6	0,0				

Observamos que para pequenas resistências $i_m > i_c$, pois com o aumento de R em relação a R_A temos:

$$i = \frac{V}{R + R_A} = \frac{V}{R}$$

IV.2 - Determinação da resistência interna do amperímetro

Montamos o circuito abaixo.



V_o = fonte de tensão **3,92 V**

R = década de resistores

R_p = década de resistores

A = amperímetro com fundo de escala **10 mA**

K = chave liga-desliga

Neste arranjo consideramos a resistência R_A do amperímetro muito pequena, então a resistência equivalente de $R_A // R_p$ é menor ainda e pode ser desprezada, logo vamos considerar a resistência do circuito como sendo apenas R . Então se colocarmos na década de resistência R o valor da resistência calculada (392 W) o valor da corrente total do circuito deve ser aproximadamente 10 mA .

Vamos ajustar na década de resistência R o valor da resistência mínima calculado ($R = 392 \text{ W}$) e na década de resistência R_p o valor $R_p = 0$.

Ligamos a chave e lemos no amperímetro **0,5 mA**, que teoricamente deveria ser zero pois toda a corrente elétrica passaria por R_p ($R_p = 0$), mas como os fios da década de R_p possuem uma pequena resistência, parte da corrente passou pelo amperímetro.

Neste experimento consideramos o desvio avaliado do amperímetro como $0,1 \text{ mA}$ que é a metade da menor medida identificada no amperímetro.



Aumentamos gradativamente a resistência de R_p (de 1 em 1 Ω) até obtermos 5 mA no medidor (metade da corrente total de 10 mA). Nessa situação metade da corrente passa por R_p e a outra metade passa pelo medidor, conforme tabela abaixo. Como R_A e R_p estão em paralelo logo, sob a mesma ddp.

R_p (Ω)	I (mA)	R_p (Ω)	I (mA)
1	1,2	7	3,8
2	1,8	8	4,2
3	2,4	9	4,4
4	2,8	10	4,6
5	3,2	11	4,8
6	3,6	12	5,0

$$V_A = V_p$$

$$R_A \cdot i_A = R_p \cdot i_p$$

$$R_A \cdot 5 = 12 \cdot 5 \Rightarrow R_A = 12 \Omega$$

O desvio avaliado do amperímetro comoserá a metade da menor medida ou seja: $\Delta i = 0,1 \text{ mA}$

A resistência do amperímetro também pode ser dada pela relação

$$R_A = \frac{i - i_A}{i_A} \cdot R_p \rightarrow \begin{cases} i = (10 \pm 0,1) \text{ mA} \\ i_A = (5,0 \pm 0,1) \text{ mA} \\ R_p = (12 \pm 5\%) \Omega \end{cases}$$

$$\Delta R_A = \frac{\partial i}{\partial R_A} \cdot \Delta i + \frac{\partial i_A}{\partial R_A} \cdot \Delta i_A + \frac{\partial R_p}{\partial R_A} \cdot \Delta R_p =$$

$$\Delta R_A = \frac{R_p}{i_A} \cdot \Delta i + \frac{i \cdot R_p}{(i_A)^2} \cdot \Delta i_A + \frac{i - i_A}{i_A} \cdot \Delta R_p =$$

$$\Delta R_A = \frac{12}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 12}{(5 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + \frac{10 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,6 = 1,32 \Rightarrow \Delta R_A = 2 \Omega$$

$$\text{então } R_A = (12 \pm 2) \Omega$$

Agora, conhecendo-se:

$$R = (392 \pm 5) \Omega \text{ (calculado);}$$

$$R_A = (12 \pm 2) \Omega \text{ (calculado);}$$

$R_p = (12 \pm 0,6) \Omega$ (medido), vamos calcular i do circuito.

$$i = \frac{V_o}{R + R_{Ap}} = \frac{3,92}{392 + 6} = 9,8 \text{ mA e}$$

$$\Delta i = \frac{\partial V_o}{\partial i} \cdot \Delta V_o + \frac{\partial R}{\partial i} \cdot \Delta R = \frac{1}{R} \cdot \Delta V_o + \frac{V_o}{R^2} \cdot \Delta R = \frac{1}{392} \cdot 0,1 + \frac{3,92}{392^2} \cdot 5 = 0,4 \text{ mA}$$

Portanto, $i = (9,8 \pm 0,4) \text{ mA}$ calculado é um valor bem próximo de **10,0 mA**, ótima aproximação.

IV.3 - Transformação da faixa de medida de um amperímetro

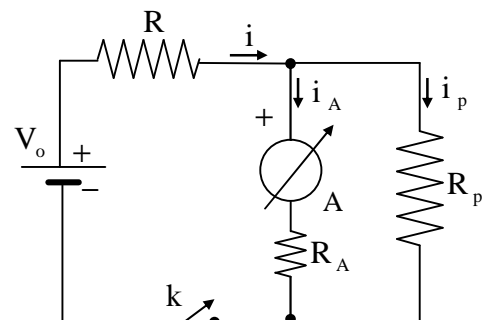
Quando queremos alterar a faixa de medida de um amperímetro associamos em paralelo a ele um resistor R_p , tal que:

$$V_p = V_A$$

$$R_p \cdot i_p = R_A \cdot i_A \quad \text{como } i = i_A + i_p \quad \mathbf{P} \quad i_p = i - i_A$$

$$R_p = R_A \cdot \frac{i_A}{i_p}$$

$$R_p = R_A \cdot \frac{i_A}{i - i_A}$$



i - Duplicação do fundo de escala do amperímetro

Vamos calcular o valor de R_p (resistência em paralelo ao amperímetro) para que o amperímetro possa fazer uma leitura de no máximo 20 mA.

$$R_p = R_A \cdot \frac{i_A}{i - i_A} \quad R_p = 12 \cdot \frac{10}{20 - 10} = 12 \Omega$$

Agora vamos ajustar a década para os valores calculados ($R_p = 12 \text{ W}$) e sem modificar a resistência R_p vamos duplicar sucessivamente a resistência R até um total de cinco medidas.

A nova resistência interna será dada por:

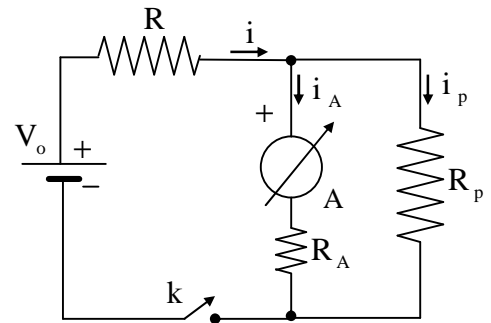
$$R' = \frac{R_A \cdot R_p}{R_A + R_p} = \frac{12 \cdot 12}{12 + 12} = 6 \Omega$$

A corrente calculada será dada por:

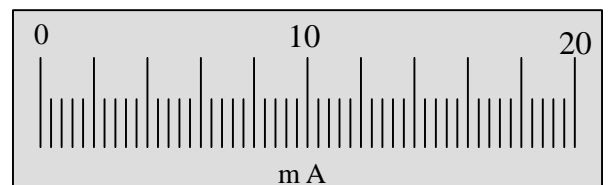
$$i = \frac{V_o}{R + R'} = \frac{3,92}{R + 6}$$

Com a duplicação do fundo de escala o desvio avaliado

Fica multiplicado por dois $\Delta i = 0,2 \text{ mA}$



$R (\Omega)$	$i_A (\text{mA})$	$i_m (\text{mA})$	$i_c (\text{mA})$	$i_c - i_m (\text{mA})$
196	10,0	20,0	19,4	- 0,6
392	5,0	10,0	9,8	- 0,2
784	2,6	5,2	5,0	- 0,2
1568	1,2	2,4	2,5	0,1
3136	0,6	1,6	1,2	-0,4



Observamos que o valor calculado de (i_c) é ligeiramente menor que o valor medido (i_m) mas continua dentro da faixa de erro.

ii - Quadruplicação do fundo de escala do amperímetro

Vamos calcular o valor de R_p (resistência em paralelo ao amperímetro) para que o amperímetro possa fazer uma leitura de no máximo 40 mA.

$$R_p = R_A \cdot \frac{i_A}{i - i_A} \quad R_p = 12 \cdot \frac{10}{40 - 10} = 4 \Omega$$

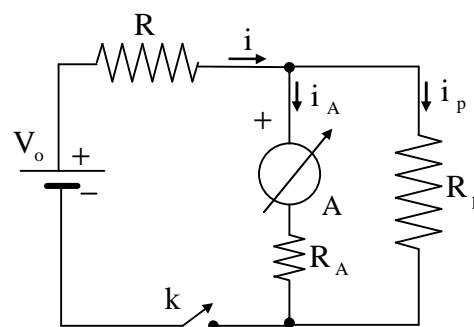
Agora vamos ajustar a década para os valores calculados ($R_p = 4 \text{ W}$) e sem modificar a resistência R_p vamos duplicar sucessivamente a resistência R até um total de cinco medidas.

A nova resistência interna será dada por:

$$R' = \frac{R_A \cdot R_p}{R_A + R_p} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2 \Omega$$

A corrente calculada será dada por:

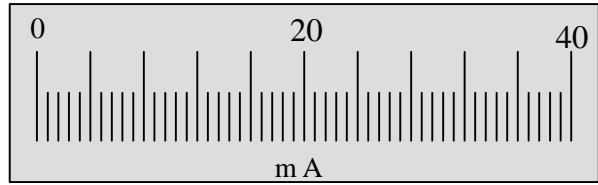
$$i = \frac{V_o}{R + R'} = \frac{3,92}{R + 2}$$



Com a quadruplicação do fundo de escala o desvio avaliado

Fica multiplicado por quatro $\Delta i = 0,4 \text{ mA}$ (vide escala)

R (Ω)	i_A (mA)	i (mA)	i_c (mA)	$i_c - i_m$ (mA)
98	10,0	40,0	39,2	- 0,8
196	5,2	20,8	19,8	- 1,0
392	2,6	10,4	9,9	- 0,5
784	1,4	5,6	5,0	- 0,6
1568	0,6	2,4	2,5	0,1

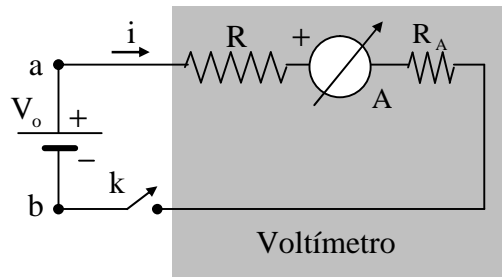


IV. 4 - Transformação de um Amperímetro em um Voltímetro

Para que possamos usar um amperímetro como voltímetro, devemos associar em série ao amperímetro uma resistência R e a tensão V_{ab} nos terminais do nosso voltímetro será dado por:

$$V_{ab} = (R + R_A) \cdot i \quad \text{onde } R_V = R + R_A$$

$$R = \frac{V_{ab}}{i} - R_A$$

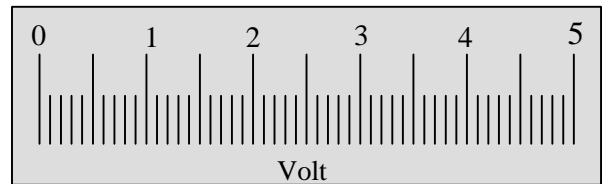


i - Voltímetro com fundo de escala de 5V

Vamos calcular o valor de R para que tenhamos no amperímetro o seu fundo de escala para uma tensão máxima de 5 V nos terminais do voltímetro (a e b).

$$R_V = R + R_A = 488 + 12 = 500 \text{ } \Omega$$

$$R = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} - 12 = 500 - 12 = 488 \text{ } \Omega$$



Na mesma escala do amperímetro, temos um desvio avaliado no voltímetro é de $\Delta V = 0,05 \text{ V}$.

Ajustamos na década os valores calculados e observamos no amperímetro uma corrente $i = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ A}$, que corresponde a uma tensão $V_{ab} = R_V \times i = 500 \times 7,8 \cdot 10^{-3} = (3,90 \pm 0,05) \text{ V}$.

Esse valor é um valor bem próximo ao indica na fonte de tensão (3,91V e 3,92V).

ii - Voltímetro com fundo de escala de 10V

Vamos calcular o valor de R para que tenhamos no amperímetro o seu fundo de escala para uma tensão máxima de 10 V nos terminais do voltímetro (a e b).

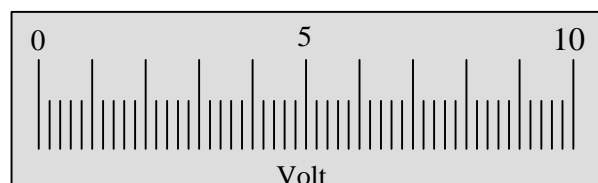
$$R_V = R + R_A = 988 + 12 = 1000 \text{ } \Omega$$

$$R = \frac{10}{10 \cdot 10^{-3}} - 12 = 1000 - 12 = 988 \text{ } \Omega$$

A resistência R é maior que a anterior.

Vamos colocar na década este valor ($R = 988 \text{ } \Omega$) e medir a diferença de potencial para 1, 2, 3, 4 e 5 elementos da bateria e indicamos os valores na tabela a seguir (vamos considerar $\Delta V = 0,1 \text{ V}$).

Nº de pilhas	I ($\times 10^{-3} \text{ A}$)	V = 1000 · i (em V)
1	1,3	1,3
2	2,6	2,6
3	3,9	3,9
4	5,2	5,2
5	6,5	6,5



Na mesma escala do amperímetro, temos um desvio avaliado no voltímetro é de $\Delta V = 0,1 \text{ V}$.