

# Circuitos Resistivos

## Introdução

Os circuitos elétricos constituídos por resistências são amplamente utilizados tanto para alimentação (polarização) por tensão ou corrente contínua como por tensão variável. Neste capítulo será feita a revisão de circuitos alimentados por corrente contínua (abreviado por cc) que são os circuitos constituídos por elementos resistivos alimentados por uma fonte de tensão ou corrente contínua.

## Grandezas elétricas: tensão e corrente

### Diferença de potencial e tensão elétrica

A passagem de corrente elétrica num condutor resulta do movimento de elétrons de um ponto a outro do condutor. Uma propriedade básica do elétron é a sua carga ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C). A força aplicada por uma carga sobre outra é devido ao campo elétrico produzido por aquela e que tem a capacidade de fornecer a energia necessária para movimentar a carga. Quando uma carga se move sob o campo elétrico de outra, trabalho deve ser fornecido. A quantidade de trabalho por unidade de carga é chamada de diferença de potencial (ddp). Como o trabalho de movimentação de uma carga é sempre relativo, a diferença de potencial deve ser sempre relativa a um ponto de referência. Na maioria das vezes, sempre que nos referimos ao potencial estamos nos referindo à *diferença de potencial* e omitimos o ponto de referência. Nesses casos, admitimos implicitamente que o ponto de referência é a Terra (ou pelo menos, o solo, que apresenta um nível de potencial relativo igual a zero) e essa referência é denominada **terra**. Na língua inglesa, essa ambigüidade lingüística não ocorre, pois o terra de referência do potencial é chamado *ground* (GND), enquanto que o planeta Terra é grafado *earth*. Esse referencial é considerado como um absorvedouro de carga infinita, isto é, não importa qual o nível da diferença de potencial, toda a carga que puder ser movimentada por ele será absorvida pela Terra sem alterar as suas características elétricas. Na prática, como o nível de potencial é finito, todo o tipo de aterramento que puder escoar a carga movimentada por uma diferença de potencial pode ser considerado como um ponto de referência. Frequentemente, o estabelecimento de um referencial é desnecessário e uma conexão comum (ou de referência) ao chassis metálico de um instrumento é suficiente para esse propósito.

Como a diferença de potencial é o trabalho realizado por unidade carga, a unidade física de ddp é joule/coulomb. No SI, a unidade de ddp é o volt (V), de modo que,

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule/coulomb} \qquad (1 \text{ V} = 1 \text{ J/C})$$

Por causa da unidade, muitas pessoas se referem à diferença de potencial como “voltagem”, embora essa designação não seja correta. Mais comum (e corretamente) é expressar a ddp como tensão elétrica ou, simplesmente como tensão, que é o termo que utilizaremos neste texto.

## Fonte de tensão

Para produzir uma tensão (ou fornecer a energia necessária para criar uma diferença de potencial) é comum o uso de fontes de tensão. As principais fontes de tensão são os dispositivos de conversão química de energia (pilhas e baterias), os conversores eletromecânicos (geradores elétricos) e a fonte de tensão regulada, que é um equipamento constituído de dispositivos eletrônicos semicondutores.

A tabela 1 lista as características de pilhas e baterias.

TABELA 1 – Características elétricas de pilhas e baterias

|                            | Bateria                 |                       |                          |              |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------|
|                            | Zinco-carbono           | Alcalina              | Íon Lítio                | Chumbo-ácido |
| Tipo                       | primária                | primária              | secundária               | secundária   |
| Energia ( $J/m^3$ )        | 2                       | 2 – 3,5               | 8 – 15                   |              |
| Tensão nominal (V)         | 1,5                     | 1,5                   | 2,8                      | 12           |
| Densidade de corrente      | 15,5 mA/cm <sup>2</sup> | 31 mA/cm <sup>2</sup> |                          |              |
| Impedância                 | baixa                   | muito baixa           | < 1 $\Omega$             | baixa        |
| Forma da curva de descarga | reta inclinada          | reta inclinada        | plana                    | plana        |
| Aplicação                  | geral                   | geral                 | dispositivos eletrônicos | automotiva   |

A capacidade de uma bateria é a medida da quantidade de carga elétrica, expressa em ampère-hora (A-h), obtida durante um ensaio de descarga com corrente constante, durante um tempo  $t$  do regime de descarga, referido à temperatura de 25°C, até a tensão final de descarga por elemento. Deste modo, a capacidade é o produto da corrente em ampéres pelo tempo em horas, corrigido para a temperatura de referência, fornecida pela bateria em determinado regime de descarga. Para baterias automotivas chumbo-ácido de 12 V, a capacidade nominal é definida para um regime de descarga de 10 horas, em corrente constante, à temperatura de 25°C, até tensão final de 1,75 V por elemento.

Como elemento de circuito elétrico, as fontes de tensão utilizam a simbologia apresentada na figura 1.

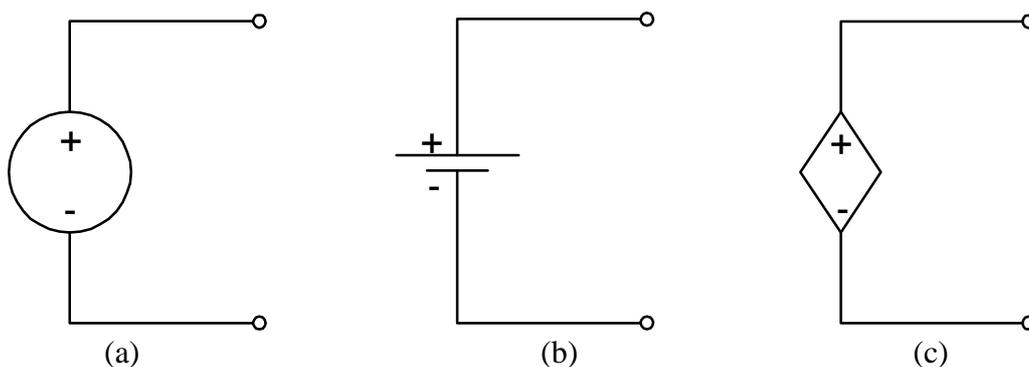


Fig. 1 - Símbolos de fontes utilizados em diagramas de circuitos elétricos: (a) fonte de tensão independente, (b) bateria ou fonte de tensão cc e (c) fonte de tensão dependente.

As curvas características tensão-corrente ( $V-I$ ) de uma fonte de tensão são mostradas na figura 2 para uma fonte ideal e para uma fonte real, juntamente com o esquema do circuito equivalente de uma fonte de tensão real. A resistência interna da fonte  $R_{int}$  é a responsável pela gradativa redução da tensão de saída  $V_i$  da fonte, devido à dissipação da tensão  $R_{int} I$  que ocorre no interior da fonte. Dessa forma, uma fonte de tensão adequada deve ter uma baixa resistência interna.

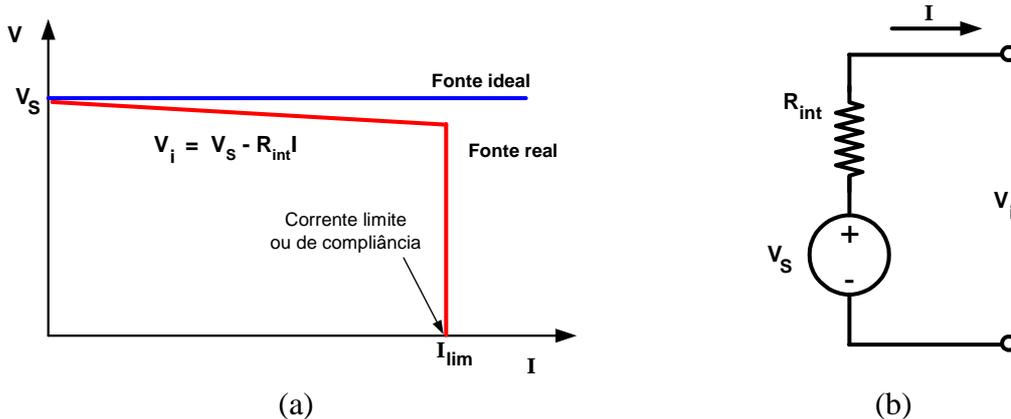


Fig. 2 – (a) Curvas características de fontes de tensão ideal e real, na qual a corrente de compliância  $I_{lim}$  é definida pela potência máxima que uma fonte pode fornecer. (b) Circuito equivalente de uma fonte real, no qual  $R_{int}$  é a resistência interna da fonte.

## Corrente Elétrica

O movimento de carga elétrica é chamado corrente, denotado pela letra  $I$  quando for uma corrente constante e pela letra  $i$  quando se tratar de corrente variável no tempo.

A corrente é definida matematicamente pela expressão:

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

na qual  $q$  é a carga elétrica que circula por unidade de tempo  $t$ . A unidade de corrente no SI é o ampère (A), que equivale à passagem de 1 coulomb/segundo (C/s).

O sentido convencional da corrente é o sentido do movimento de cargas positivas. No caso de elétrons, que possuem carga negativa, o sentido convencional da corrente é com sinal oposto (-) ao sentido do movimento de elétrons livres, responsáveis pelo transporte de carga elétrica em materiais condutores (figura 3).

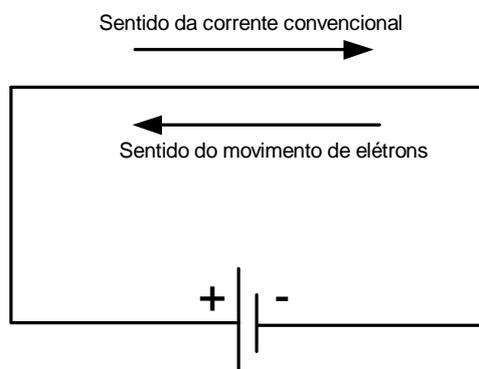


Fig. 3 – Diagrama ilustrando o sentido da corrente convencional (+) contrário ao sentido da corrente de elétrons livres (-).

Uma fonte de alimentação que fornece uma corrente constante na saída é denominada fonte de corrente. A fonte de corrente é representada esquematicamente pelos símbolos mostrados na figura 4.

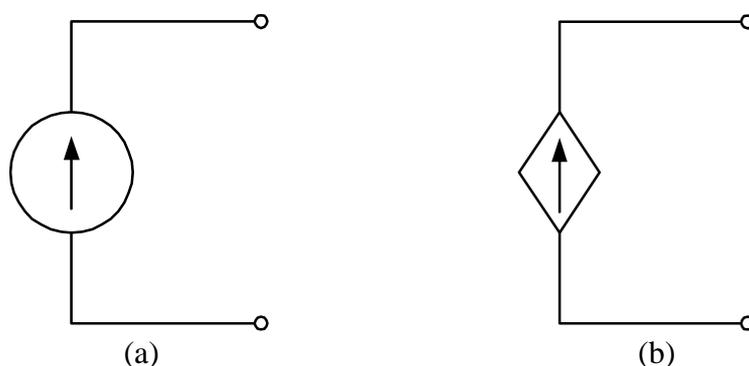


Fig. 4 - Símbolos de fontes utilizados em diagramas esquemáticos de circuitos elétricos. (a) fonte de corrente independente e (c) fonte de corrente dependente.

As curvas características corrente- tensão ( $I$ - $V$ ) de uma fonte de corrente são mostradas na figura 5 para uma fonte ideal e para uma fonte real, juntamente com o esquema do circuito equivalente de uma fonte de corrente real. A resistência interna da fonte  $R_{int}$  é caracterizada pela resistência dos componentes eletrônicos que constituem o circuito da fonte e é representado por uma resistência em paralelo à fonte de corrente ideal. A corrente real  $I_o$  entregue pela fonte é o valor da corrente nominal da fonte  $I_S$  subtraída pela corrente carregada pela resistência interna  $V_S / R_{int}$ , na qual  $V_S$  é a tensão de saída da fonte. Dessa forma, uma fonte de corrente adequada deve ter uma resistência interna mais elevada possível.

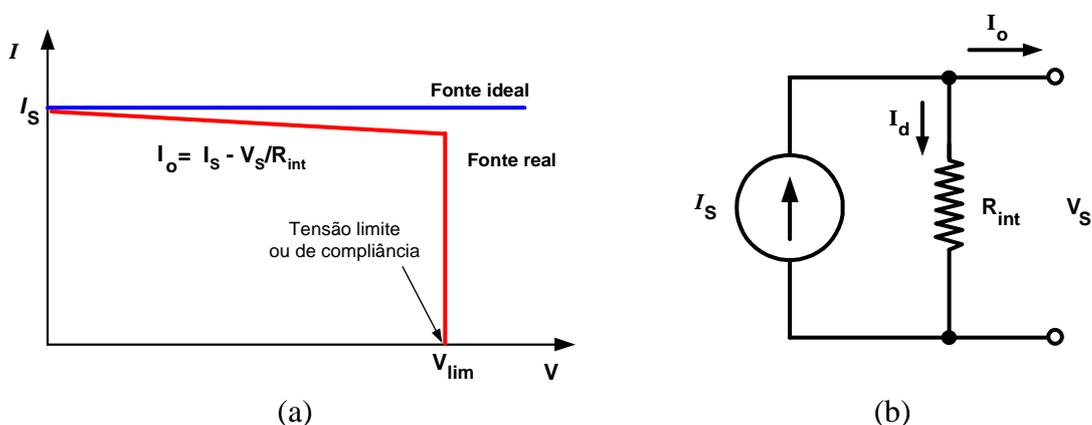


Fig. 5 – (a) Curvas características de fontes de corrente ideal e real, na qual a tensão de compliância  $V_{lim}$  é definida pela potência máxima que uma fonte pode fornecer. (b) Circuito equivalente de uma fonte real, no qual  $R_{int}$  é a resistência interna da fonte.

## Resistência Elétrica

A resistência elétrica é a medida da dificuldade da passagem de corrente sobre um dispositivo e é definida pela equação:

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

na qual:

$\rho$  – resistividade ( $\Omega \cdot m$ )

$\ell$  - comprimento do resistor (m)

A - área de seção transversal ( $m^2$ )

## Resistividade

A resistividade é um parâmetro físico do material e independe da geometria e da posição da amostra. No caso dos materiais metálicos, a resistividade é influenciada pela pureza do material, pelo seu estado mecânico (deformado ou não-deformado) e pelas variáveis metalúrgicas (precipitados, inclusões, etc). A tabela 2 apresenta os valores típicos de resistividade de alguns materiais à temperatura ambiente.

TABELA 2 – Resistividade de alguns materiais a 25°C

| Material             | Resistividade $\rho$ ( $10^{-8} \Omega \cdot m$ ) |
|----------------------|---|
| Prata                | 1,5   |
| Ouro                 | 2,4   |
| Alumínio             | 2,6   |
| Cobre                | 1,7   |
| Latão (Cu-Zn)        | 6,0   |
| Níquel               | 7,8   |
| Nichrome (Ni-Cr)     | 100,0   |
| Tungstênio           | 5,6   |
| Manganin* (Cu-Ni-Mn) | 48,2  |
| Constantan (Cu-Ni)   | 49  |
| Carbono              | 350   |

\*Liga de cobre com 4% de níquel e 12% de manganês, que possui baixa sensibilidade à temperatura e deformação.

## Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é definida como o inverso da resistividade:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

A unidade da condutividade elétrica no SI é o siemens/metro (S/m), sendo o siemens a unidade da condutância G que é definida como o inverso da resistência R. Desta forma, o siemens é equivalente a  $\Omega^{-1}$ .

A condutividade elétrica é uma propriedade que para os materiais em geral varia 26 ordens de grandeza, como pode ser observado no diagrama da figura 6. Na faixa de condutividade  $\sigma > 10^4$  S/m estão situados os materiais condutores, na faixa intermediária de condutividade  $10^4 < \sigma < 10^{-6}$  S/m estão os materiais semicondutores e na faixa de condutividade  $\sigma < 10^{-6}$  S/m os materiais são considerados isolantes elétricos.

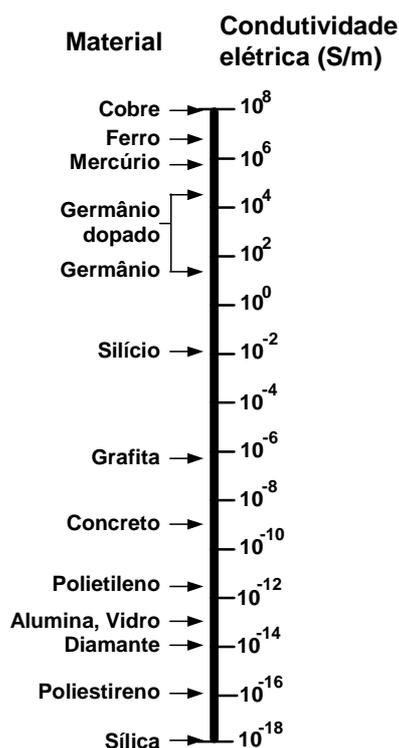


Fig. 6 – Faixas de condutividade elétrica dos materiais.

## Dependência da resistividade com a temperatura

A resistividade dos materiais, em geral, varia com a temperatura e a dependência da resistividade com a temperatura é determinada pelo coeficiente de temperatura da resistividade  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

A unidade do coeficiente de temperatura da resistividade no SI é  $\Omega/\Omega/K$  que é equivalente à  $\Omega/\Omega/^\circ C$  ou simplesmente  $K^{-1} = ^\circ C^{-1}$ .

A figura 7 apresenta as curvas de resistência elétrica relativa versus temperatura para um material condutor (platina) e um material semiconductor (carbono) exibindo diferentes coeficientes de temperatura da resistividade

Os materiais metálicos apresentam coeficiente de temperatura positivo (*positive temperature coefficient* - PTC), enquanto que os materiais semicondutores, como o carbono, apresentam coeficiente de temperatura negativo (*negative temperature coefficient* - NTC). Ambos os tipos de resistências podem ser empregados como sensores de temperatura. Geralmente para medições de temperatura na faixa de temperatura acima da ambiente são usados os metais, tais como a platina e o níquel, sendo denominados genericamente como RTD (*Resistance temperature dependent*) ou termorresistências pelo fato de possuírem coeficiente positivo de temperatura. Por outro lado, resistências NTC, que são chamados termistores, são mais utilizados para temperaturas próximo e abaixo da temperatura ambiente. Os termistores geralmente são produzidos com óxidos metálicos que apresentam características elétricas semicondutoras.

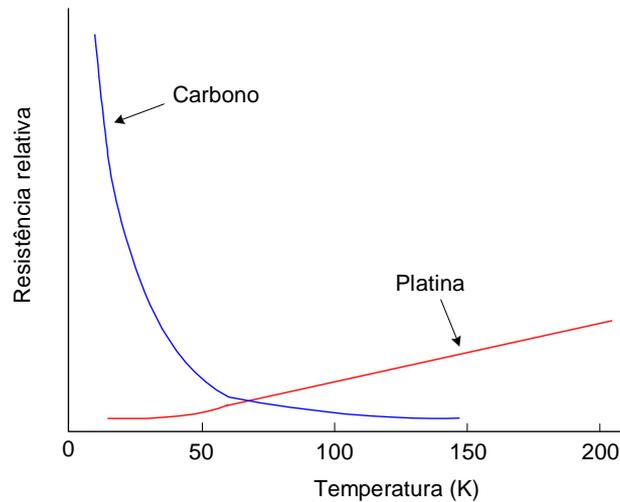


Fig. 7 – Curvas de resistência elétrica relativa versus temperatura para um material condutor e um material semiconductor exibindo diferentes coeficientes de temperatura da resistividade.

Para os materiais condutores a resistividade varia com a temperatura segundo uma expressão linear do tipo:

$$R(T) = R(T_R) \cdot [1 + \alpha(T - T_R)]$$

na qual  $\alpha$  é chamado *coeficiente de temperatura* do material resistivo e varia entre  $2 \cdot 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$  e  $2 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  para vários materiais e  $T_R$  é uma temperatura de referência. A tabela 3 lista o coeficiente de temperatura para alguns materiais.

TABELA 3 – Coeficientes de temperatura para alguns materiais.

| Material   | Coeficiente de temperatura $\alpha$ ( $10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) |
|------------|---|
| Níquel     | 6,7   |
| Ferro      | 4   |
| Cobre      | 4,3   |
| Prata      | 4,1   |
| Platina    | 3,92  |
| Mercúrio   | 0,99  |
| Ni-Cr      | 0,44  |
| Manganin   | 0,002   |
| Constantan | 0,008   |
| Carbono    | - 0,7   |

### Razão de Resistividade Residual (RRR)

Um parâmetro físico que determina a influência do grau de pureza e do estado metalúrgico de metais puros (Cu e Al, principalmente) é a razão de resistividade residual (RRR) definido como:

$$RRR = \frac{\rho(20^\circ C)}{\rho_0} = \frac{R(20^\circ C)}{R_0}$$

Na equação acima,  $\rho(20^\circ C)$  é a resistividade à  $20^\circ C$  e  $\rho_0$  é a resistividade residual ( $T = 0 K$ ), determinada geralmente para temperaturas inferiores a  $20 K$ .

## Resistores

Os resistores são elementos de circuito confeccionados com materiais resistivos e são utilizados para as seguintes finalidades:

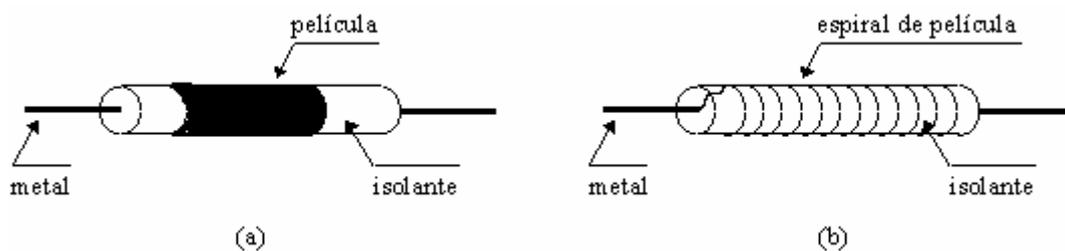
- Polarização de dispositivos ativos, como diodos e transistores;
- Limitação de corrente e tensão;
- Dissipação de energia e aquecimento por efeito Joule;
- Combinados com capacitores atuam como filtro;
- Medição de corrente (“shunt”);
- Medição de temperatura (termorresistências e termistores);
- Descarga de capacitores;
- Outras.

TABELA 4 - Tipos de resistores e características principais

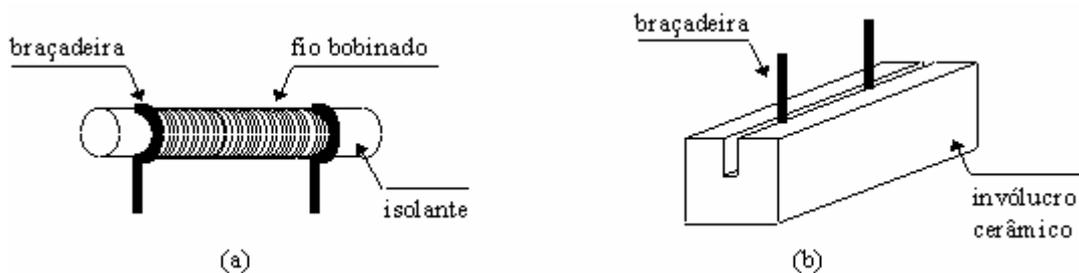
| Tipo                  | Custo relativo | Coefficiente de temperatura | Tamanho relativo | Potência | Precisão nominal | Ruído |
|-----------------------|----------------|-----------------------------|------------------|----------|------------------|-------|
| Filme de Carbono      | Baixo          | Alto                        | Pequeno          | < 2 W    | 5%               | Sim   |
| Fio metálico enrolado | Alto           | Baixo                       | Grande           | < 50 W   | > 1%             | Não   |

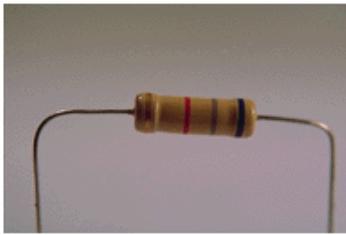
### Tipos de resistores

#### Resistores de filme

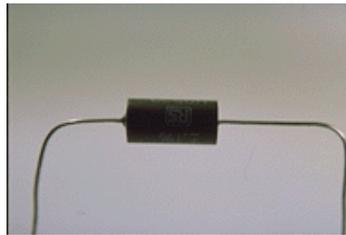


#### Resistores de fio bobinado

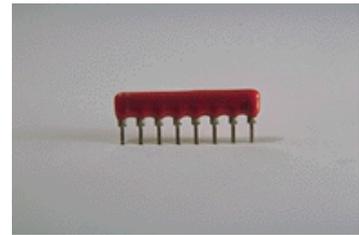




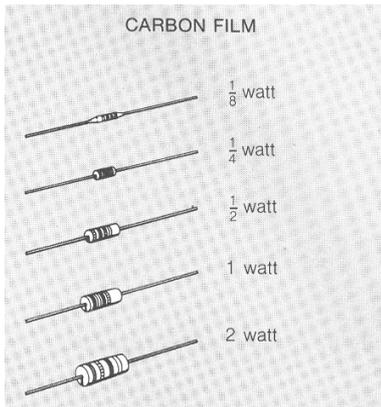
Resistor de carbono



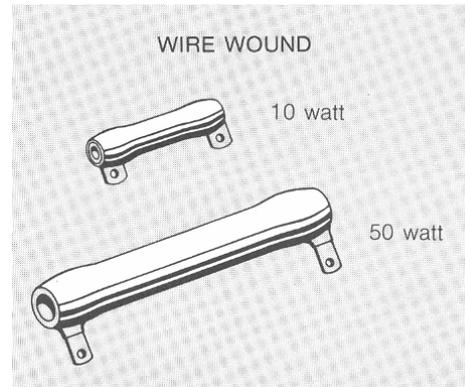
Resistor de fio bobinado de alta precisão



Rede de quatro resistores



(a)



(b)

Fig. 8 – Tipos e tamanhos de resistores de (a) filme de carbono e (b) fio metálico enrolado.

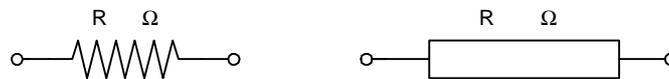


Fig. 9 – Símbolo para o resistor fixo.

### Resistores variáveis e ajustáveis

Em várias aplicações, utiliza-se um resistor variável para controlar a tensão ou corrente de um circuito. Esses resistores variáveis são denominados potenciômetros ou reostatos (também chamados *trimmers* ou *trimpots*) e existem diversos modelos com características próprias para cada aplicação. A figura 10 mostra o desenho interno de um potenciômetro constituído por um enrolamento helicoidal de fio metálico, chamado comercialmente “*Helipot*”.

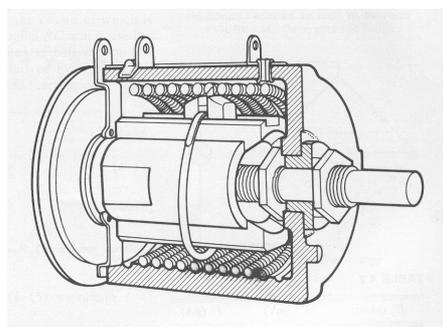


Fig. 10 – Esquema interno de um potenciômetro de precisão “*Helipot*”.

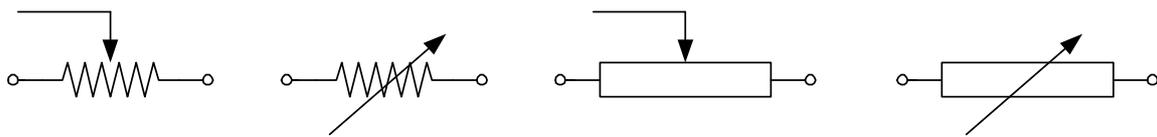


Fig. 11 – Representações esquemáticas para potenciômetro e resistores variáveis.

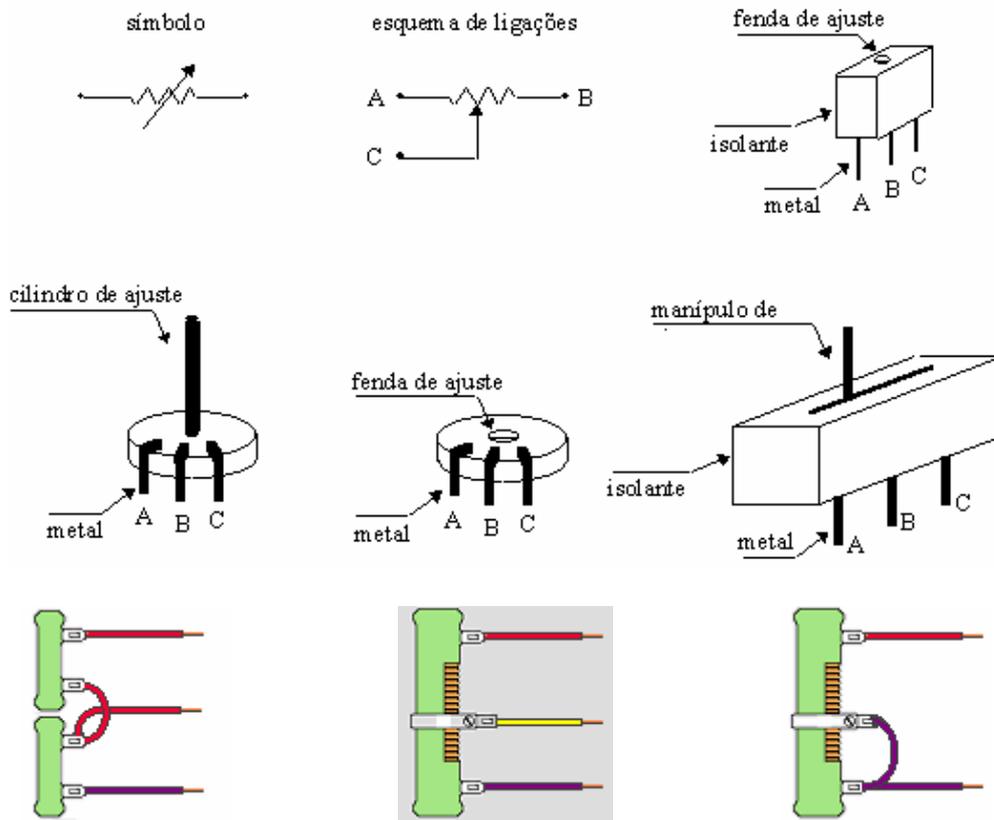
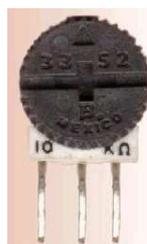


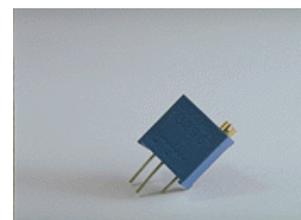
Fig. 12 – Tipos e esquemas elétricos de resistores variáveis.



Potenciômetro (Trimpot)



Trimer



Trimer

Fig. 13 – Fotos de resistores variáveis.

### Código de cores de resistores

Um esquema de rápida identificação do valor da resistência de resistores é através de faixas de cores impressas sobre a superfície dos mesmos e utilizando o código de cores mostrado na figura 14 para leitura da resistência nominal e da tolerância do valor de resistência.

## Código de Cores para Resistores

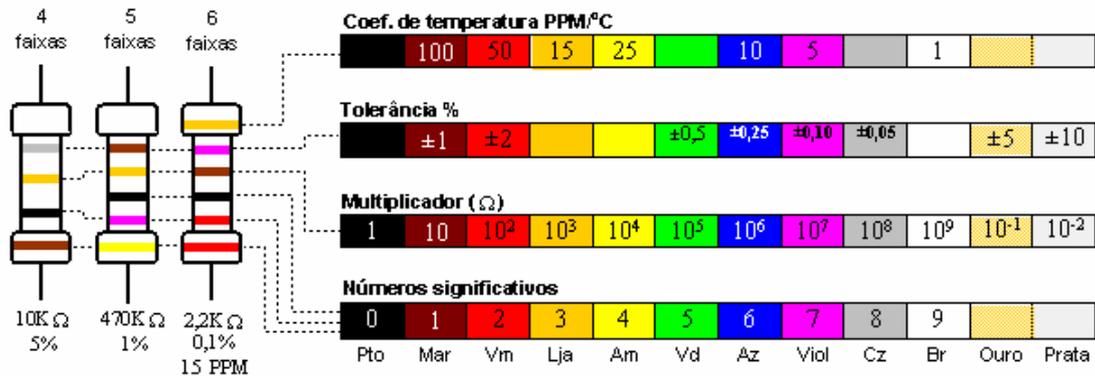


Fig. 14 – Código de cores para identificação de resistores componentes eletrônicos.

## Varistor

Um varistor é uma resistência não linear fabricada com materiais semicondutores, geralmente óxidos metálicos como óxido de estanho e óxido de zinco, usado geralmente como fusível de proteção contra curto-circuito (figura 15).

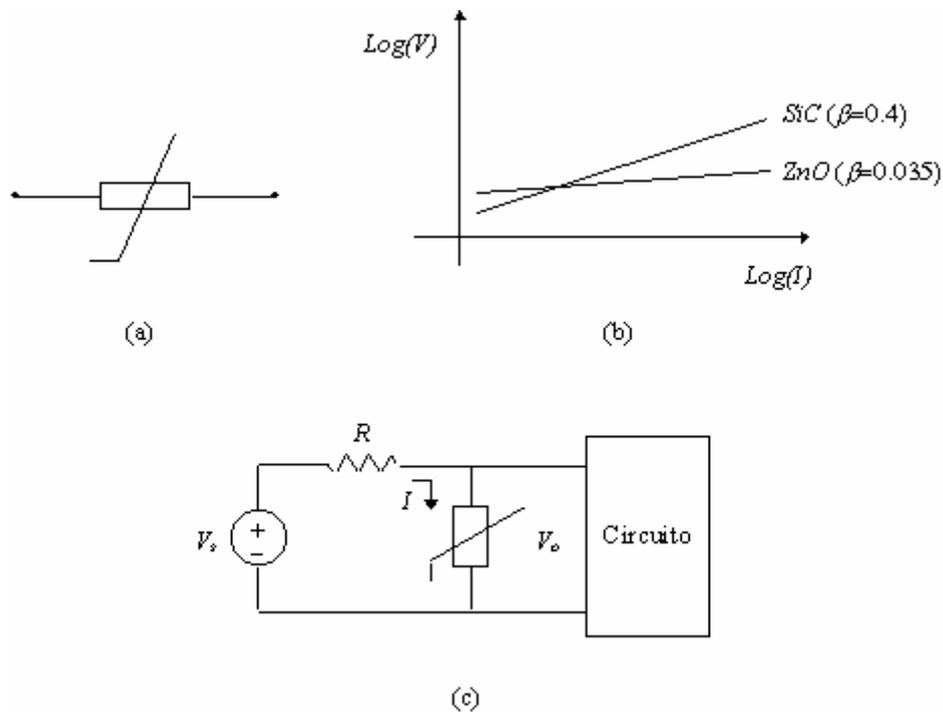


Fig. 15 – (a) Símbolo elétrico do varistor, (b) curva característica V-I de um varistor e (c) circuito elétrico com varistor para proteção.

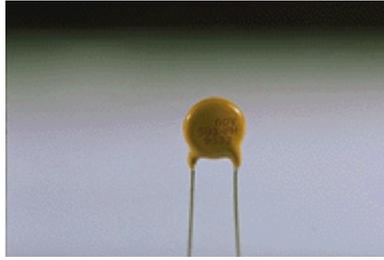


Fig. 16 – Foto de um típico varistor.

## Lei de Ohm

A lei de Ohm é uma relação constitutiva que relaciona a tensão sobre um elemento de circuito com a corrente que o atravessa, na forma:

$$V = RI$$

O coeficiente de proporcionalidade é a resistência elétrica  $R$ . Para um resistor linear, a curva tensão  $\times$  corrente é uma reta, cuja inclinação representa o valor da resistência. A figura 17 mostra a curva VI para um resistor linear e para um resistor não-linear.

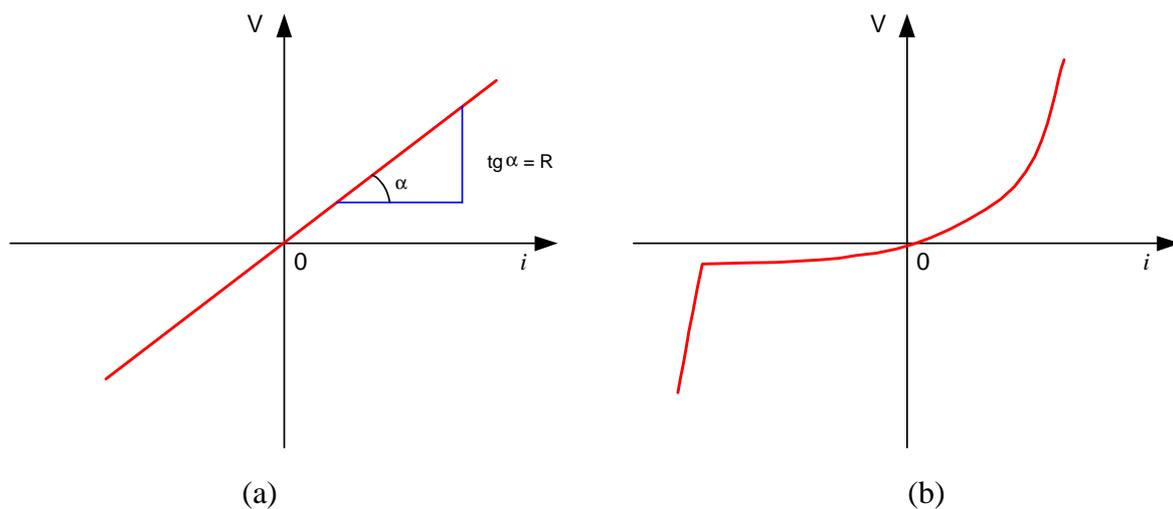


Fig. 17 – Curva característica  $V$ - $I$  para um (a) resistor linear e (b) resistor não-linear.

## Potência e Energia

A potência dissipada sobre um dispositivo submetido a uma tensão  $V$  e a uma corrente  $i$  é expressa por:

$$P = Vi$$

Para um resistor:

$$P = Ri^2 = \frac{V^2}{R}$$

A energia dissipada é a potência aplicada durante um intervalo  $\Delta t$ :

$$E = \int_{t_0}^t P dt = \int_{t_0}^t V i dt$$

Para um resistor linear:

$$E = \int_{t_0}^t V i dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt = Ri^2(t - t_0) = Ri^2 \Delta t$$

## Leis Circuitais de Kirchhoff

- Lei de Kirchhoff da Tensão (LKT)

A soma algébrica das tensões numa malha de um circuito fechado é igual a zero:

$$\sum_{k=1}^n V_k = V_1 + V_2 + \dots + V_n = 0$$

- Lei de Kirchhoff da Corrente (LKC)

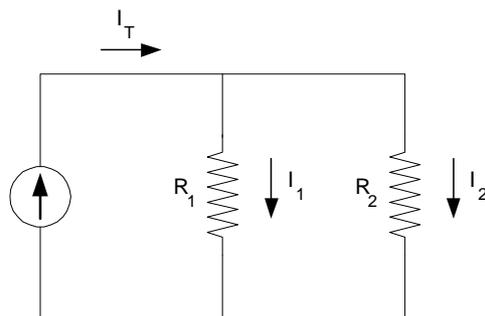
A soma algébrica das correntes num nó de um circuito é igual a zero:

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$$

## Divisor Resistivo

### Divisor de corrente

Um divisor de corrente é utilizado para reduzir ou dividir a corrente em um ramo do circuito, através da instalação de resistores em paralelo. Para um divisor de corrente com dois resistores (conforme figura seguinte), as equações são apresentadas.



$$\frac{I_1}{I_T} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{I_2}{I_T} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

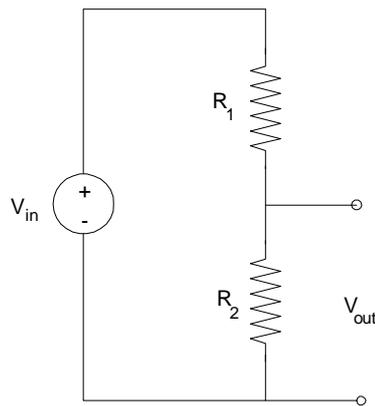
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Se um terceiro resistor for colocado em paralelo aos dois anteriores, a equação de divisão de corrente se torna:

$$\frac{I_1}{I_T} = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

### Divisor de tensão

Um circuito divisor de tensão tem por finalidade reduzir a tensão de saída  $V_{out}$  a partir de uma tensão de entrada  $V_{in}$  através da associação de dois resistores em série, conforme mostra a figura seguinte.

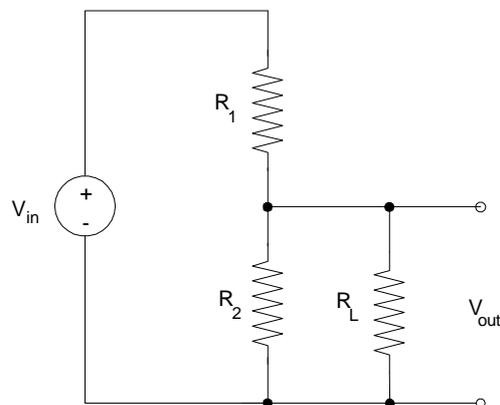


As equações para este circuito são expressas por:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

### Divisor de tensão carregado

No caso mais geral, temos que considerar a resistência da carga  $R_L$ , conforme ilustrado a seguir.



Quando consideramos a resistência da carga, a expressão original para o cálculo do divisor de tensão falha, porque não considera a corrente sobre  $R_L$ . Calculando o efeito de  $R_L$ , obtém-se:

$$V_{out} = IR_L = \frac{\frac{VR_2R_L}{R_1 + R_2}}{\frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + R_L} = \frac{VR_2}{\frac{R_1R_2}{R_L} + (R_1 + R_2)}$$

Tabela 5 – Desempenho de um divisor de tensão carregado

| $V_{in} = 10 \text{ V}$ | $R_1 = R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ | $V_{out} = 5 \text{ V (ideal)}$ |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $R_L (\Omega)$          | $V_{out} (\text{V})$            | $V_{in} - V_{out} (\text{V})$   |
| 500                     | 0,833                           | 4,167                           |
| 5 k                     | 3,333                           | 1,167                           |
| 50 k                    | 4,762                           | 0,238                           |
| 500 k                   | 4,975                           | 0,025                           |
| 5 M                     | 4,998                           | 0,002                           |
| 50 M                    | 5,000                           | 0,000                           |

## Ponte de Wheatstone ou Ponte de Resistências

Uma montagem de quatro resistências conectadas entre si na forma de um quadrado constitui-se num circuito denominado ponte de Wheatstone. A polarização da ponte pode ser feita por tensão ou corrente.

### Ponte de Wheatstone (tensão constante)

Neste esquema, a excitação da ponte é realizada por uma fonte de tensão estabilizada e constante. O circuito da figura 18 mostra a ponte alimentada por uma fonte de tensão.

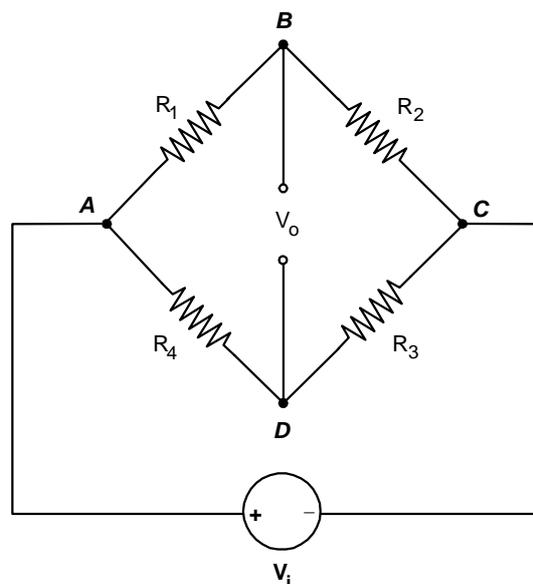


Fig. 18 - Ponte de Wheatstone alimentada com fonte de tensão.

O cálculo da tensão sobre os terminais AB e AD fornece as seguintes equações:

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_i$$

$$V_{AD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_i$$

A tensão de saída da ponte  $V_o$  é calculada como:

$$V_o = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_i$$

Quando o produto  $R_1 R_3 = R_2 R_4$  diz-se que a ponte está balanceada e a tensão de saída da ponte  $V_o = 0$ . Esta característica de balanceamento da ponte de Wheatstone torna-a muito empregada em circuitos de medição analítico de sensores resistivos.

A capacidade de balanceamento de uma ponte representa uma significativa vantagem, pois é mais fácil ler uma pequena variação de tensão  $\Delta V_o$  do que uma elevada tensão  $V_o$ . Esta vantagem ficará mais clara para uma ponte balanceada, cuja tensão de saída sofre uma pequena variação  $\Delta V_o$  causada pelas variações  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$  e  $\Delta R_4$ , respectivamente nas resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ :

$$V_o + \Delta V_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} V_i$$

Expandindo a equação acima, desprezando os termos de ordem superiores a um e substituindo o resultado na equação de balanço da ponte, resulta:

$$\Delta V_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_i$$

### **Ponte de Wheatstone (corrente constante)**

Neste esquema, a excitação da ponte é realizada por uma fonte de corrente constante. O circuito mostrado na figura 19 mostra a ponte alimentada por uma fonte de corrente.

Em comparação à ponte alimentada por tensão, o uso de uma fonte de corrente melhora a sensibilidade do circuito e elimina os efeitos não-lineares, tais como aquecimento dos resistores por efeito Joule.

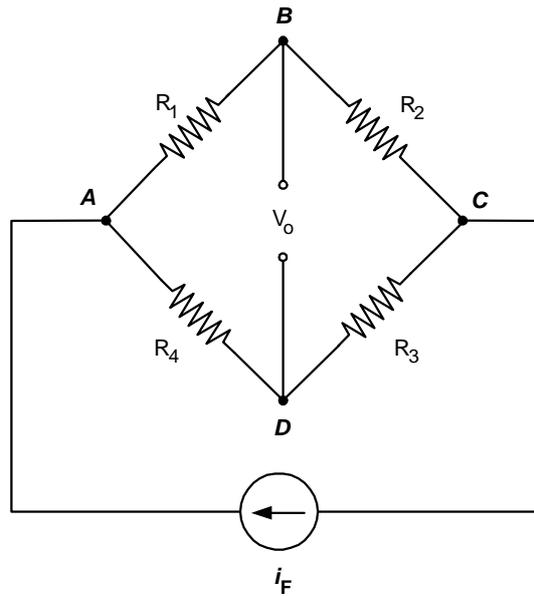


Fig. 19 - Ponte de Wheatstone alimentada com fonte de corrente.

Para o cálculo da equação da ponte, a corrente da fonte será dividida em duas correntes na ponte:

$$i_F = i_1 + i_2$$

A queda de tensão na resistência  $R_1$  é dada por  $V_{AB} = i_1 R_1$ . Analogamente, a queda de tensão sobre a resistência  $R_4$  é  $V_{AD} = i_2 R_4$ .

Assim, a tensão de saída da ponte  $V_o$  é calculada como:

$$V_o = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} = i_1 R_1 - i_2 R_4$$

Se a ponte estiver balanceada ( $V_o = 0$ ), a seguinte relação será válida:

$$i_1 R_1 = i_2 R_4$$

A equação de balanço da ponte na forma escrita acima não é útil, pois as correntes  $i_1$  e  $i_2$  são desconhecidas. Os valores dessas correntes podem ser calculados observando-se que a tensão  $V_{AC}$  pode ser expressa em termos de  $i_1$  e  $i_2$  como:

$$V_{AC} = i_1(R_1 + R_2) = i_2(R_3 + R_4)$$

$$i_1 = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} i_F, \quad i_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} i_F$$

$$\text{De onde vem que: } V_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \cdot i_F$$

Observa-se que a equação da ponte alimentada por corrente acima tem a mesma condição da equação para o balanceamento da ponte de Wheatstone alimentada por tensão, isto é,  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ .