

### 3 Transdutores de temperatura

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM 2008), sensores são elementos de sistemas de medição que são diretamente afetados por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida [VIM 2009]. Já um transdutor é um dispositivo utilizado em **medição**, que fornece uma **grandeza** de saída, a qual tem uma relação especificada com uma grandeza de entrada.

**Transdutor de Medição:** “Dispositivo que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação determinada com a grandeza de entrada.”

Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)

A temperatura termodinâmica, uma das sete grandezas de base do Sistema Internacional de Grandezas [Ref IEC 80000 Quantities and units, Vim 2008], pode ser medida por meio do contato físico de dispositivos mecânicos ou elétricos, que requerem o equilíbrio térmico, ou sem contato utilizando pirômetros para medir a radiação emitida pelos corpos cuja temperatura deve ser medida.

Dentre os transdutores para medição de temperatura por meio de contato, têm-se termômetros de líquido em vidro, termômetros bimetálicos, termômetros de gás, termopares, termistores, termômetros de resistências.

Cada transdutor possui características como faixa de operação, sensibilidade, incerteza de medição, condições de funcionamento, estabilidade, repetitividade, velocidade de resposta, potência termoelétrica, exatidão, custo e outras.

**Condição de Funcionamento:** “Deve ser cumprida durante uma medição para que um instrumento de medição ou um sistema de medição funcione como projetado.”

Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)

**Intervalo de Medição:** “Conjunto de valores de grandezas do mesmo tipo que pode ser medido por um dado instrumento de medição ou sistema de medição com incerteza especificada, sob condições determinadas.”

Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)

**Tempo de resposta a um degrau:** “Intervalo de tempo entre o instante em que um valor de entrada de um instrumento de medição ou de um sistema de medição é submetido a uma variação brusca entre dois valores constantes especificados e o instante em que a indicação correspondente se mantém entre limites especificados em torno do seu valor final estável.”

Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)

Para um dado valor de entrada, cada transdutor responde de acordo com as suas características. A Figura 5 ilustra o sinal de saída relativa de alguns transdutores de temperatura como função da temperatura.

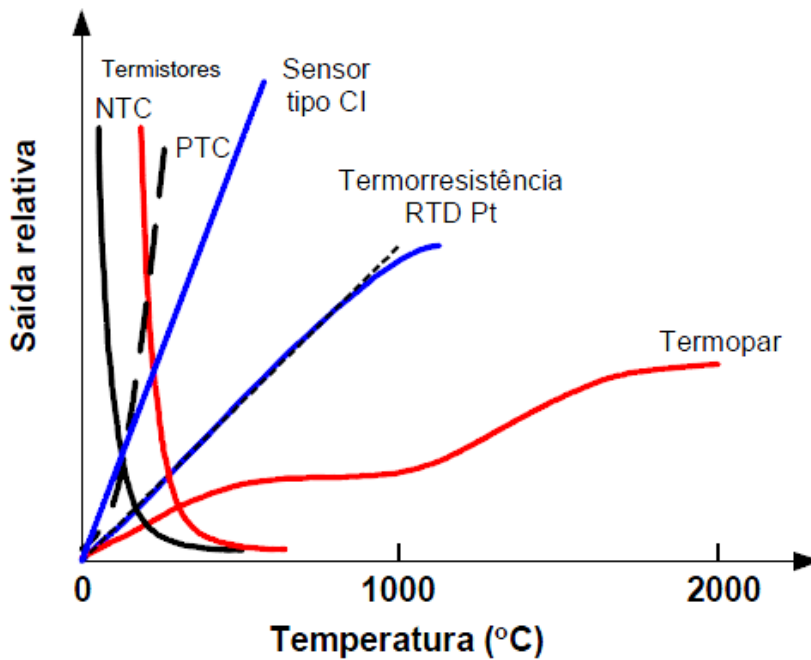


Figura 5: Comparação entre sensores de temperatura [25]

Quando se visualiza a faixa de trabalho para leitura da temperatura, os termopares possuem uma faixa maior do que as termorresistências (RTD) e termistores. Em compensação, quando avaliada a saída relativa, as termorresistências apresentam comportamento praticamente linear.

Os transdutores do tipo circuito integrado (CI) são fabricados por técnica de fabricação de circuito integrado, que incorporam num “chip” o termoelemento junto ao circuito eletrônico de condicionamento de sinal [25].

A Tabela 1 apresenta alguns tipos de transdutores e suas respectivas faixas de operação.

**Tabela 1: Tipos de transdutores para medição de temperatura e sua faixa de operação**

| <b>Tipo de transdutor</b>      | <b>Temperatura de Operação</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Termopares                     | -200°C a 1700°C                |
| Termômetros de Resistência     | -200°C a 850°C                 |
| Termômetro de Líquido em Vidro | -100°C a 70°C (álcool etílico) |
| Termômetro Bimetálico          | -50°C a 800°C                  |
| Termômetro a Gás               | -60°C a 600°C                  |
| Termistor                      | -50°C a 150°C                  |
| Pirômetro                      | acima de 600°C                 |

A Figura 6 permite uma análise comparativa das vantagens e desvantagens de transdutores comumente utilizados como: termopares, RTD, termistores e sensores do tipo circuito integrado.

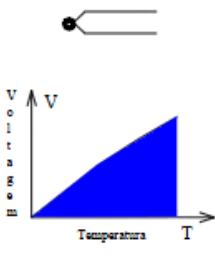
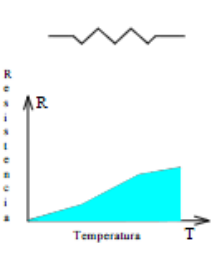
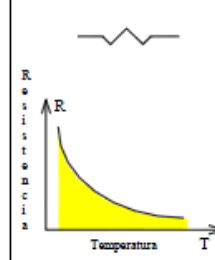
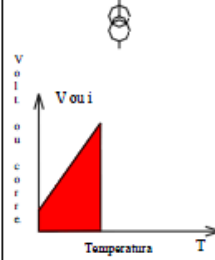
|              | Termopares   | RTD   | Termistores  | Sensores integrados   |
|--------------|--|---|--|---|
|              |   |    |    |    |
| Vantagens    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto excitado</li> <li>• Simples</li> <li>• Robusto</li> <li>• Baixo custo</li> <li>• Grande variedade</li> <li>• Grande intervalo de operação</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais estável</li> <li>• Mais preciso</li> <li>• Mais linear que termopar</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta sensibilidade</li> <li>• Rápido</li> <li>• Medida com dois fios</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais linear</li> <li>• Maior saída</li> <li>• Baixo custo</li> </ul>   |
| Desvantagens | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Não linear</li> <li>• Baixa sensibilidade</li> <li>• Voltagem de referência necessária</li> <li>• Menos estável</li> <li>• Baixa voltagem</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caro</li> <li>• Fonte de corrente necessária</li> <li>• Pequeno DR</li> <li>• Baixa resistência</li> <li>• Auto aquecimento</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Não linear</li> <li>• Pequeno intervalo de temperatura</li> <li>• Frágil</li> <li>• Fonte de corrente necessária</li> <li>• Auto aquecimento</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura &lt;200 0°C</li> <li>• Fonte de potência necessária</li> <li>• Lento</li> <li>• Auto aquecimento</li> <li>• Configurações limitadas</li> </ul> |

Figura 6: Vantagens e desvantagens dos transdutores de temperatura [26]

A seguir é realizada descrição mais detalhada sobre os transdutores dos tipos Termopar, Termômetro de Líquido em Vidro e Termômetro de Resistência (RTD), os quais podem ser utilizados para medição de temperaturas inferiores a -65°C, como as necessárias para o armazenamento de determinados produtos hemoterápicos.

### 3.1. Termopares

São os transdutores mais utilizados por indústrias, devido a sua simplicidade, confiabilidade, baixo custo e robustez [26]. O termopar é um transdutor ativo que não necessita de alimentação externa, isto é, o próprio transdutor gera uma força eletromotriz.

O termopar é um transdutor que basicamente tem seu funcionamento baseado na junção de dois metais diferentes, condutores ou semicondutores. Uma junção é chamada de junta de referência ou junta fria, da qual a temperatura é conhecida (por exemplo, com o auxílio de um banho de gelo); e a junta de medição ou junta quente se encontra no local em que se deseja medir/conhecer a temperatura.

A diferença de temperatura entre a junta quente e a junta fria pode ser obtida por meio da medição da diferença de potencial (ddp) gerada entre as juntas (Figura 7).

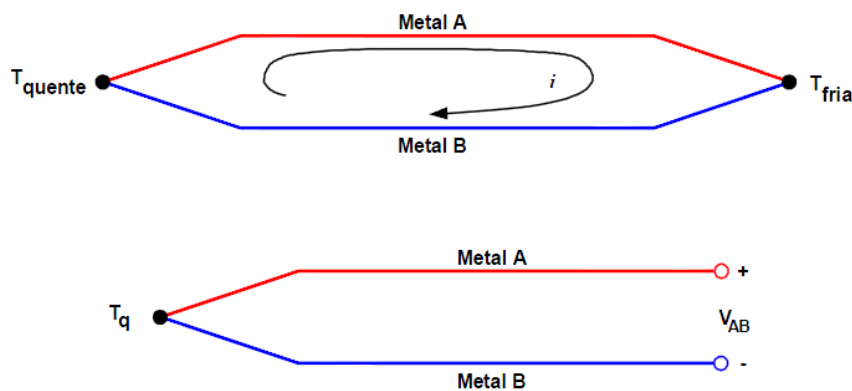


Figura 7: Representação da montagem do Termopar [25]

Este fenômeno foi descoberto por Thomas Seebeck e por esse motivo a tensão gerada chama-se Efeito Seebeck [25]. Para uma pequena diferença de temperatura, a tensão Seebeck medida será proporcional à temperatura representada na expressão:

$$\Delta V_{AB} = \alpha_S \cdot \Delta t \quad (2)$$

Onde  $\alpha_S$  é o coeficiente de Seebeck ou coeficiente de proporcionalidade entre a tensão de Seebeck e a diferença de temperatura [25].

Outros fenômenos também se aplicam aos termopares, como o Efeito Peltier e o Efeito Thomson. Estes dois fenômenos descrevem o transporte de energia em forma de calor por intermédio de uma corrente elétrica.

As combinações de pares de ligas metálicas existentes em termopares podem ser divididas em 3 grupos: termopares nobres (tipo S, tipo B e tipo R), termopares básicos (Tipo T, Tipo J, Tipo E, Tipo K) e termopares especiais (Tipo C e Tipo N). A Tabela 2 mostra a designação dos tipos de termopares, sem incluir os termopares especiais, com base na ABNT Norma Brasileira (NBR) 12771 [27] que apresenta faixa de operação e respectiva tolerância (Tabela 3).

**Tabela 2: Designação dos tipos de Termopares [27]**

| Letra de código | Termoelemento        |                                  |
|-----------------|----------------------|----------------------------------|
|                 | Positivo             | Negativo                         |
| R               | Platina - 13% ródio  | Platina                          |
| S               | Platina - 10% ródio  | Platina                          |
| B               | Platina - 30% ródio  | Platina - 6% ródio               |
| J               | Ferro                | Cobre-níquel                     |
| T               | Cobre                | Cobre-níquel                     |
| E               | Níquel-cromo         | Cobre-níquel                     |
| K               | Níquel-cromo         | Níquel-manganês-silício-alumínio |
| N               | Níquel-cromo-silício | Níquel-silício                   |

**Tabela 3: Classe de Tolerância para os termopares (junção de referência a 0°C)  
[NBR12771]**

| Tipo  | Classe 1                |                      | Classe 2                |               | Classe 3                |                   |
|-------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|-------------------|
|       | Faixa de temperatura °C | Tolerância °C        | Faixa de temperatura °C | Tolerância °C | Faixa de temperatura °C | Tolerância °C     |
| ReS   | 0 a 1 100               | ± 1                  | 0 a 600                 | ± 1,5         | -                       | -                 |
|       | 1 100 a 1 600           | ± [1+0,003 (t-1100)] | 600 a 1 600             | ± 0,0025(t)   | -                       | -                 |
| B     | -                       | -                    | 600 a 800               | ± 0,0025(t)   | 600 a 1 700             | ± 4 ou ± 0,005(t) |
|       | -                       | -                    | 800 a 1 700             | ± 0,005(t)    | -                       | -                 |
| J     | -40 a 375               | ± 1,5                | -40 a 333               | ± 2,5         | -                       | -                 |
|       | 375 a 750               | ± 0,004(t)           | 333 a 750               | ± 0,0075(t)   | -                       | -                 |
| T     | -40 a 125               | ± 0,5                | -40 a 133               | ± 1           | -67 a 40                | ± 1               |
|       | 125 a 350               | ± 0,004(t)           | 133 a 350               | ± 0,0075(t)   | -200 a -67              | ± 0,015(t)        |
| E     | -40 a 375               | ± 1,5                | -40 a 333               | ± 2,5         | -167 a 40               | ± 2,5             |
|       | 375 a 800               | ± 0,004(t)           | 333 a 900               | ± 0,0075(t)   | -200 a -167             | ± 0,015(t)        |
| K e N | -40 a 375               | ± 1,5                | -40 a 333               | ± 2,5         | -167 a 40               | ± 2,5             |
|       | 375 a 1 000             | ± 0,004(t)           | 333 a 1 200             | ± 0,0075(t)   | -200 a -167             | ± 0,015(t)        |

NOTA - Para a classe 3 os materiais dos termopares são normalmente fornecidos para se enquadrar nas tolerâncias de fabricação especificadas na tabela 2 para temperaturas acima de - 40°C. Estes materiais, entretanto, podem não se enquadrar nas tolerâncias de fabricação para baixas temperaturas dadas pela classe 3 para tipos T, E, K e N. Se os termopares forem referidos para atender os limites da classe 3, bem como os da classe 1 e 2, o comprador deve especificá-los, uma vez que o material deve ser selecionado.

Devido à quantidade de tipos de termopares, para realizar medições em grandes faixas de temperatura, comparados com outros transdutores, este é o mais adequado. A Figura 8 apresenta outra comparação de faixas de temperatura entre alguns transdutores de temperatura.



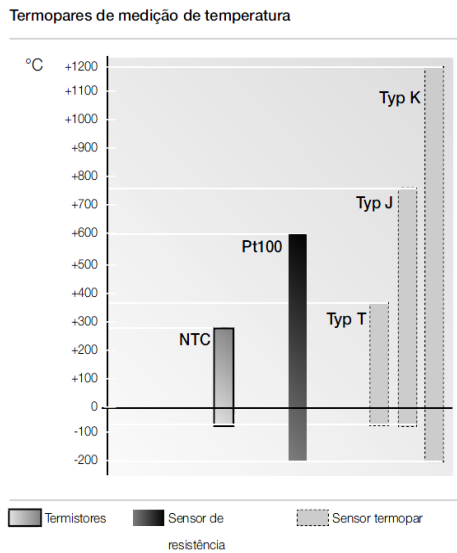


Figura 8: Comparando faixa de temperatura entre sensores [26]

A Tabela 4 apresenta os limites de erro para cada tipo de termopar, de acordo com a ASTM E-230.

Tabela 4: Limites de erro para termopares, de acordo com ASTM E-230 (com junta de referência a 0°C) [27]

| Sensor | Faixa de Utilização (°C) | Limite de Erro (Escolher o maior) |                  |
|--------|--------------------------|-----------------------------------|------------------|
|        |                          | Padrão                            | Especial         |
| E      | 0 - 870<br>-200 a 30     | ± 1,7 °C ou 0,5%                  | ± 1 °C ou 0,4%   |
| J      | 0 - 760                  | ± 2,2 °C ou 0,75%                 | ± 1,1 °C ou 0,4% |
| K, N   | 0 - 1260<br>-200 a 30    | ± 2,2 °C ou 0,75%                 | ± 1,1 °C ou 0,4% |
| T      | 0 - 370<br>-200 a 30     | ± 1 °C ou 0,75%                   | ± 0,5 °C ou 0,4% |
| R, S   | 0 - 1480                 | ± 1 °C ou 1,5%                    | -                |
| B      | 870 - 1700               | ± 0,5%                            | -                |

### 3.2. Termômetro de líquido em vidro

O termômetro de líquido em vidro é confeccionado por meio de um líquido dentro de uma cápsula (reservatório) de vidro, o qual tem uma proteção, com um tubo capilar de seção uniforme, de acordo com a sensibilidade. Os líquidos mais usados na confecção destes termômetros são mercúrio, tolueno, álcool e acetona.

A Tabela 5 apresenta as faixas de operação para o termômetro líquido em vidro.

Tabela 5: Termômetro de Vidro: Materiais e Faixa de Operação [28]

| Líquido        | Ponto de Solidificação (°C) | Ponto de Ebulição (°C) | Faixa de Operação (°C) |
|----------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| Mercúrio       | -39                         | 357                    | -38 a 550              |
| Tolueno        | -92                         | 110                    | -80 a 100              |
| Álcool Etílico | -115                        | 78                     | -100 a 70              |

Baseados na lei da expansão volumétrica de um líquido contido em recipiente fechado de vidro, o líquido expande com a variação de temperatura. Esta variação é regida pela Equação 3.

$$V_t = V_0 \cdot [1 + \beta_1 \cdot (\Delta t) + \beta_2 \cdot (\Delta t)^2 + \beta_3 \cdot (\Delta t)^3] \quad (3)$$

Onde:

$t$  = temperatura do líquido em °C

$V_0$  = volume do líquido à temperatura inicial de referência  $t_0$

$V_t$  = volume do líquido à temperatura  $t$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  = coeficientes de expansão do líquido a °C<sup>-1</sup>

$\Delta t = t - t_0$

Na Equação 3 os termos de segunda e terceira ordem são desprezíveis, logo ela se torna uma relação linear (Equação 4):

$$V_t = V_0 \cdot [1 + \beta_1 \cdot (\Delta t)] \quad (4)$$

Este tipo de termômetro não é indicado para a prática de mapeamento de temperatura, pois não oferece uma otimização do sistema de medição, podendo ser automatizado um sinal de saída para armazenagem e tratamento dos dados.

### 3.3. Termômetro de Resistência (RTD)

As termoresistências ou bulbos de resistência ou termômetro de resistência ou *resistance temperature detector* (RTD) são transdutores que se baseiam no princípio de variação da resistência ôhmica em função da temperatura. Estes transdutores de temperatura possuem grande exatidão e excelente repetitividade de leitura (Figura 9).

O elemento sensor da termorresistência consiste em uma resistência na forma de fio, que pode ser de platina com alta pureza, de níquel ou de cobre, encapsulado num bulbo de cerâmica ou de vidro [29].

O material mais utilizado é a platina, a qual se padronizou, pois apresenta uma ampla escala de temperatura, uma alta resistividade permitindo assim uma maior sensibilidade, um alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura, uma boa linearidade da resistência *versus* temperatura, por ter rigidez e ductibilidade para ser transformada em fios finos, além de ser obtida em forma puríssima [29].

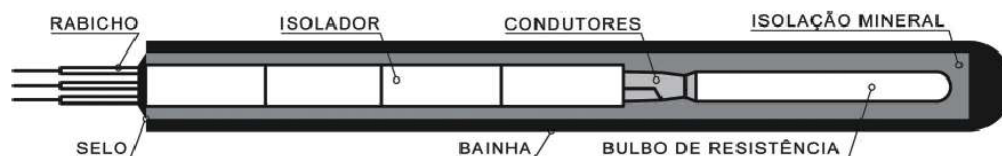


Figura 9: Representação esquemática de um termômetro de resistência [30]

Atualmente o termômetro de resistência de Platina (Pt) mais utilizada na indústria e em estudo laboratoriais é o Pt-100, cujo sufixo numérico corresponde a sua resistência elétrica quando submetida a 0°C. Outros tipos de termorresistência de platina:

Pt 0,25  $\Omega$  a 0°C, normalmente utilizada na faixa de 0°C a 1070°C;

Pt 2,5  $\Omega$  a 0°C, normalmente utilizada na faixa de 0°C a 1070°C;

Pt 25  $\Omega$  a 0°C, normalmente utilizada na faixa de -200°C a 661°C;

Pt 100  $\Omega$  a 0°C, normalmente utilizada na faixa de -200°C a 850°C; [31]

O primeiro a usar o termômetro de platina foi William Siemens em 1871 [32]. No entanto, a termometria de precisão com platina só foi iniciada com a publicação do trabalho de Hugh Callendar em 1887 [32].

A equação matemática que rege a variação de resistência em função da temperatura é equação Callendar-Van Dusen. Esta equação apresenta um terceiro termo quando a temperatura é negativa.

Assim, a Equação 5 é utilizada para calcular a resistência relativa em função da variação de temperatura, na faixa de temperaturas positivas, e a Equação 6 é utilizada para calcular a resistência relativa em função da variação de temperatura para temperaturas negativas.

Para a faixa de temperatura de 0°C a 850°C:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + At + Bt^2] \quad (5)$$

Para a faixa de temperatura de - 200°C a 0°C:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + Bt^2 + Ct^3 \cdot (t - 100)] \quad (6)$$

Onde:

$R_t$  = resistência na temperatura "t" °C, de acordo com a ITS 90;

$R_0$  = resistência a 0°C;

t = temperatura em °C;

A, B e C = coeficientes determinados pela calibração:

$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ ;

$B = -5,802 \cdot 10^{-1} \text{ (}^\circ\text{C}^{-2}\text{)}$ ;

$C = -4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ (}^\circ\text{C}^{-4}\text{)}$ . [33]

Outro aspecto importante das termoresistências é o seu coeficiente de variação térmica, alfa ( $\alpha$ ), que é definido pela Equação 7:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad (7)$$

Onde:

$R_{100}$  = resistência na temperatura de 100°C;

$R_0$  = resistência na temperatura de 0°C.

Os valores mais comuns de alfa são:

$$0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$0,00375 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$0,00392 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. [32]$$

A relação inversa da equação de Callendar-Van Dusen, isto é, calcular a temperatura em função da variação da resistência, na faixa de temperatura negativa, não é facilmente deduzido. A norma ASTM 1137, sugere as seguintes equações de inversão para temperatura negativa (Equação 8) e positiva (Equação 9) [32].

De  $-200^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$ :

$$t = \sum_{i=0}^4 D_i \cdot \left( \frac{R_t}{R_0} - 1 \right)^i \quad (8)$$

De  $0^\circ\text{C}$  a  $650^\circ\text{C}$ :

$$t = \frac{\sqrt{A^2 - 4B \left( 1 - \frac{R_t}{R_0} \right)} - A}{2B} \quad (9)$$

Onde:

$t$  = temperatura (ITS-90)  $^\circ\text{C}$ ;

$R_t$  = resistência na temperatura " $t$ " $^\circ\text{C}$

$R_0$  = resistência a  $0^\circ\text{C}$ ;

Valores típicos para  $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [34]

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2};$$

$$D_1 = 255,819^\circ\text{C};$$

$$D_2 = 9,14550^\circ\text{C};$$

$$D_3 = -2,92363^\circ\text{C};$$

$$D_4 = 1,79090^\circ\text{C};$$

O termômetro de resistência caracteriza-se por sua linearidade, grande exatidão e repetitividade [32]. A Tabela 6 mostra o erro na medição de temperatura para as classes A e B para os termômetros de resistências [33].

Tabela 6: Erros apresentados por termômetros de resistências [33]

| Classe | Tolerância<br>$\pm \text{ }^\circ\text{C}$ |
|--------|--|
| A      | $0,15 + 0,002  t ^a$                       |
| B      | $0,30 + 0,005  t ^a$                       |

<sup>a</sup>  $|t|$  - módulo da temperatura, em graus Celsius.

Para utilizar o termômetro de resistência como medidor de temperatura, normalmente são utilizados ohmímetros ou circuitos do tipo Ponte de Wheatstone, com o circuito balanceado, mas a maneira mais popular de utilização de RTDs é por meio de uma fonte de corrente para excitar o sensor a tensão sobre o mesmo (Figura 10).

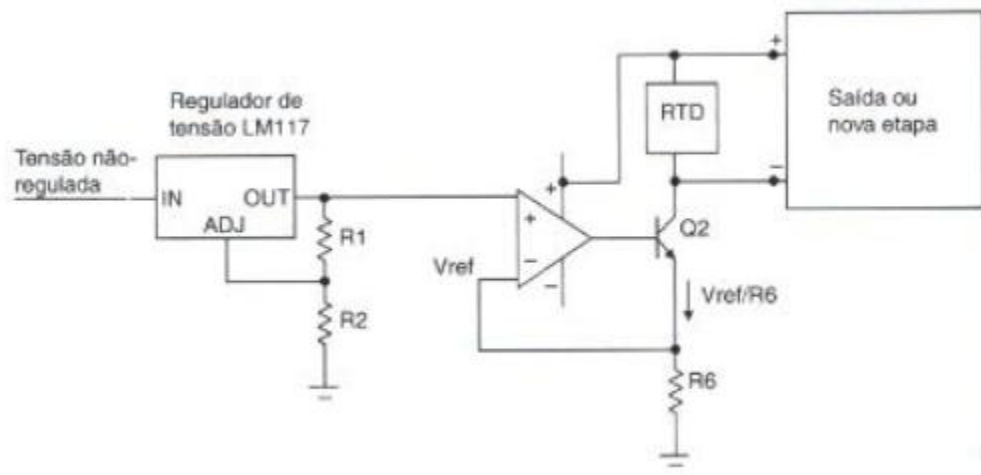


Figura 10: Fonte de corrente excitando um RTD

Para a utilização através de Ponte de Wheatstone existem 3 tipos de montagem: ligação de 2, 3 e 4 fios. Esses tipos de ligação são importantes pois os cabos de contato oferecem resistências, e estas podem somar-se à resistência do transdutor, logo o tipo de montagem pode minimizar esses efeitos.

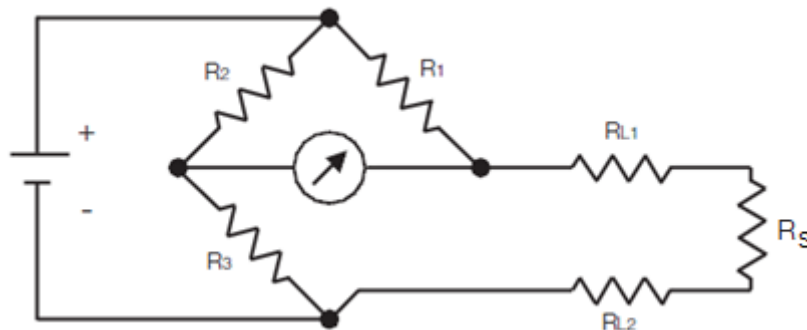
No caso do circuito de dois fios (Figura 11), a resistência do condutor é totalmente medida pelo circuito fazendo com que aumente muito a sua

resistência e diminua sua sensibilidade. Isso resultará em erro na medição da temperatura pois, embora a resistência dos fios não se altere, os mesmos estão sujeitos às variações da temperatura ambiente causando uma variação na resistência, o que introduz outra possível fonte de incerteza na medição. [REF]

A diferença entre essas montagens é que, na ligação a dois fios, haverá influência dos cabos de ligação na tensão de saída. Na condição de equilíbrio da ponte, que ocorre quando o galvanômetro "G" indica zero, tem-se a seguinte relação entre as resistências (Equação 10):

$$R_S + R_{L1} + R_{L2} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} \quad (10)$$

Se  $R_3 = R_2$  então  $R_S + R_{L1} + R_{L2} = R_1$ . Uma vez que  $R_1$  é conhecido, fica determinado o valor de  $R_S + R_{L1} + R_{L2}$ . Fica evidente que ao valor da resistência do bulbo estão acrescidos os valores da resistência dos fios de ligação, fato que diminui a qualidade da medição com o conseqüente erro na determinação da temperatura.

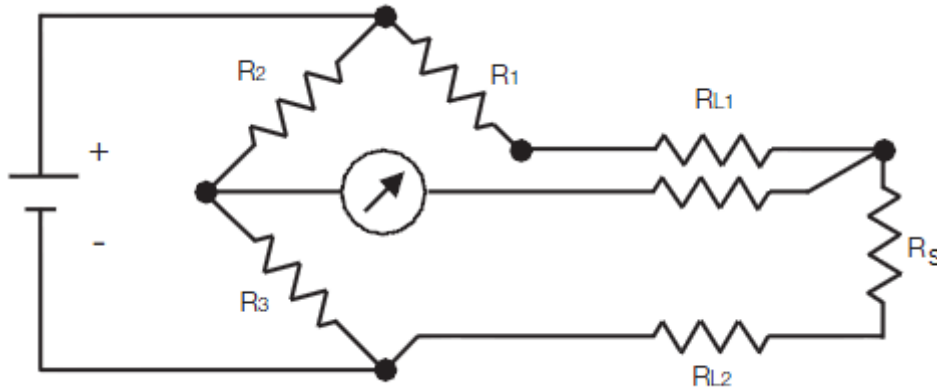


**Figura 11: Representação da ligação do RTD a 2 fios**

A utilização do RTD ligado a 3 fios é o mais utilizado na indústria. Nesse tipo de ligação, (Figura 12), a resistência do condutor é eliminada (ponte de medição Wheatstone), fazendo com que a alimentação fique o mais próximo possível do transdutor, permitindo que a  $R_{L1}$  passe para o outro braço da ponte, balanceando o circuito. Considerando novamente que  $R_2 = R_3$ , o equilíbrio da ponte resultará da condição (Equação 11):

$$R_S + R_{L2} = R_1 + R_{L1} \quad (11)$$

Como é possível, com boa aproximação, considerar  $R_{L1}$  aproximadamente igual a  $R_{L2}$  aproximadamente igual a  $R_{L3}$ , o efeito dos fios compensa a queda de tensão devido à resistência dos cabos de ligação, ficando assim muito atenuado.



**Figura 12: Representação de ligação de RTD a 3 fios**

Nas ligações a quatro fios (Figura 13) as medições são mais exatas. Mas como essa montagem é trabalhosa e complexa, acaba sendo menos utilizada na indústria, sendo mais aplicada em laboratórios de calibração. A ligação a 4 fios torna-se mais exata, devido a ter duas ligações em cada terminal do bulbo, fazendo com que ocorra um balanceamento total das resistências dos fios, de modo que, quando são interligadas adequadamente ao instrumento de indicação, essas resistências adicionais praticamente tornam-se desprezíveis. Pode-se seguir o mesmo raciocínio da ligação a tres fios, quando a resistência do RTD ( $R_S$ ) for igual a  $R_2$ , o equilíbrio é estabelecido e a tensão dos cabos se torna desprezível.



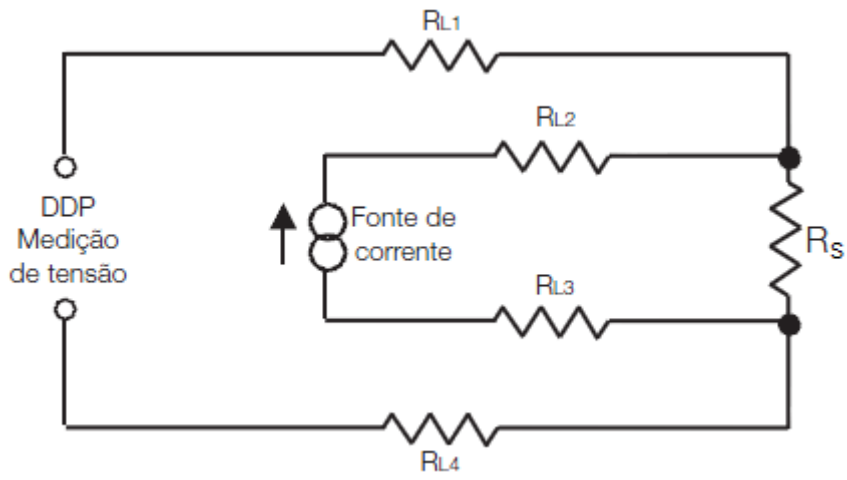


Figura 13: Representação de ligação de RTD a 4 fios