

	<b>Nota Técnica</b>		<b>Código</b>	NT-011	<b>Revisão</b>	00
			<b>Data</b>	06/2013	<b>Paginação</b>	1 de 8
<b>Título</b>	<b>Termistores</b>					
<b>Autoria</b>	Analogica Instrumentação e Controle	<b>Campo Aplicação</b>	Analogica, clientes e outras partes interessadas			

## 1. INTRODUÇÃO

Termistor, termo derivado da combinação das palavras termo (temperatura) e resistor. Essa denominação passou a ser atribuída à classe de componentes eletrônicos semicondutores, cuja resistência elétrica é fortemente influenciada pela variação da temperatura, que altera a concentração de portadores de carga no dispositivo. Tal como as termoresistências (RTD), o termistor é também um resistor sensível à temperatura, que prima por sua altíssima sensibilidade, e, dessa forma, traduz pequenas variações de temperatura em grandes variações na resistência elétrica do dispositivo, seguindo uma relação é exponencial. Em termometria, é consenso que os termopares se destacam pela simplicidade e pela versatilidade; as termoresistências, pela estabilidade; os termistores, pela sensibilidade. Nos termistores, o ganho de sensibilidade tem como contraponto uma forte não linearidade na curva de resposta.

Historicamente, os estudos que deram origem aos termistores foram iniciados em 1833 com Michael Faraday (França), que pela primeira vez registrou e noticiou o acentuado decréscimo da resistividade elétrica do sulfeto de prata em função do aumento da temperatura. Todavia, foi a partir dos trabalhos práticos realizados em 1930 por Samuel Ruben (USA), fundador da Duracell<sup>®</sup>, que a indústria de componentes eletroeletrônicos deu início a produção comercial dos atuais termistores. Hoje, termistores são mundialmente encontrados em uma variada gama de formatos, tipos de encapsulamento e formas de ligação, inclusive para montagem em placas de circuito por tecnologia SMD (surface-mount technology).

Termistores são dispositivos aplicados numa faixa de temperatura que começa em valores criogênicos, da ordem de  $-260^{\circ}\text{C}$ , e podem ser utilizados até  $300^{\circ}\text{C}$ . Entretanto, dificuldades construtivas, decorrentes do próprio princípio operacional, comercialmente limita a maioria das aplicações à faixa de  $-60^{\circ}\text{C}$  e  $160^{\circ}\text{C}$ .

Embora essa questão venha a ser melhor detalhado em tópicos à frente, aqui vale destacar que os termistores podem ter uma infinidade de aplicações na ciência, na indústria, nas atividades comerciais e domésticas. Podem ser empregados como elementos sensores na construção de sondas para medição absoluta ou relativa de temperatura, no controle e na proteção térmica de motores e nos eletrodomésticos, em instrumentos de pesquisa científica, como sensores térmicos no monitoramento e acionamentos em automóveis e aviões, em dispositivos de e equipamentos para as telecomunicações, dentre outros. Por ser dispositivos pequenos e muito sensíveis, merece destaque a ampla e importante utilização dos termistores nas aparelhagens médico-hospitalares e nos processos vinculados à indústria farmacêutica, incluindo algumas aplicações para medições *in situ* no campo da biologia.



**Tipos e Formatos Comerciais de Termistores PTC e NTC** (Fotos: Fornecedores)

## 2. TIPOS DE TERMISTORES.

Os termistores cujas resistividades (resistências) aumentam com o aumento da temperatura são chamados PTC, devido sua denominação “positive thermal coefficient” na língua inglesa. Por outro lado, aqueles cujas resistências diminuem com a elevação da temperatura, são denominados NTC, seguindo a terminologia equivalente “negative thermal coefficient”.

### 2.1. Termistores Tipo NTC.

Nos termistores tipo NTC o aumento da temperatura provoca o aumento o número de elétrons livres na banda de condução, resultando na diminuição da resistividade e da resistência elétrica. NTC's são tipicamente produzidos a partir de óxidos de metais de transição (níquel, cobalto, cobre, titânio), que podem receber adição de dopantes para adequar algumas de suas propriedades. O processo de produção contempla diversas etapas, podendo exigir conformações mecânicas em altas pressões e temperaturas para se obter grau adequado de sinterização. Os dispositivos podem se confeccionados no formato de “chips”, em que os óxidos são depositados sobre um substrato isolante por meio de imersão, aspersão ou serigrafia, ou, em casos mais simples, diretamente sobre fios condutores de ligação. As conexões elétricas podem ser feitas por uma combinação de tintas condutoras à base de prata ou ouro e fios de ligação (leads) são de materiais condutores, como cobre, prata e ouro, ou ligas desses metais. Os chips podem alcançar dimensões diminutas, algo como  $1\text{mm}^2$  e espessura de 0,2mm. NTC's também podem ser fabricados em outros formatos, dependendo do processo de fabricação ou exigência da destinação. Matematicamente, um NTC responde eletricamente conforme a seguinte equação:

$I = \eta \cdot S \cdot v \cdot \epsilon$ , onde:

$I$  = Corrente elétrica (A)

$\eta$  = Densidade de portadores de carga (contagem /  $\text{m}^3$ )

$S$  = Área da secção transversal do material ( $\text{m}^2$ )

$v$  = Velocidade de portadores de carga (m / s)

$\epsilon$  = Carga de um elétron (coulomb) =  $1.602 \times 10^{-19}$  coulomb.

### 2.2. Termistores Tipo PTC.

Termistores do tipo PTC dispositivos utilizados em circuitos de comando e proteção térmica de motores elétricos, transformadores, aparelhos eletrônicos de som e imagem, dentre outros. São tipicamente confeccionados a partir de uma matriz de cerâmica policristalina, dopada com titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ), podendo conter outros compostos minoritários. A constante dielétrica desse material, enquadrado na classe dos ferroelétricos, varia com a temperatura. Abaixo da temperatura Curie, a constante dielétrica é elevada e impede a formação de potenciais barreiras entre os grãos do cristal, condição em que a resistividade elétrica da matriz é baixa, podendo apresentar um coeficiente levemente negativo com ralação a temperatura. No ponto de Curie, a constante dielétrica cai e permite a formação de potencial de barreira nos limites de grão, provocando um aumento abrupto da resistência elétrica. Em temperaturas ainda mais elevadas, o material volta a ter o comportamento de um NTC. As equações que modelam esse comportamento foram obtidas por W. Heywang e G.H. Jonker na década de 1960.

Outro tipo de termistor PTC são os chamados poliméricos. Consistem em uma lâmina de plástico recoberta por grãos de carbono. Quando o plástico esfria, os grãos de carbono aumentam o contato entre si, aumentando a condutividade ao longo do dispositivo. Quando aquecido, o plástico expande e aumenta a separação dos grãos de carbono, provocando aumento acentuado da resistência. Similarmente ao PTC de  $\text{BaTiO}_3$ , os poliméricos também têm uma curva de resposta resistência x temperatura fortemente não linear, e podem ser utilizados como “chaves” de interrupção quando apropriadamente integrados em circuitos elétricos de comando e proteção.

Ainda pouco conhecido e aplicado, há um outro tipo de termistor, comercialmente chamado *silistor*. São confeccionados a partir de silício semicondutor e apresenta uma curva de resposta mais linear da resistência em função da variação de temperatura.

### 3. CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DOS TERMISTORES.

#### 3.1. Tempo de Resposta.

Tempo de resposta, ou constante de tempo, é o tempo necessário para o termistor alcançar 63% do valor de uma mudança abrupta. Por exemplo: atingir 63°C após uma mudança de 100°C.

O tempo de resposta dos termistores, seja um NPT ou PTC, depende das dimensões, das propriedades físicas dos materiais constituintes, e, também, das propriedades físicas e dinâmicas do meio em que o termistor está inserido. Pode variar de uma fração de segundo a minutos.

Não obstante a outros fatores, termistores que operam expostos respondem com maior rapidez, e, quase sempre, os de menores dimensões também têm menor tempo de resposta. Proteção adicional, feita por tubos de proteção, encapsulamento, ou ambos, sempre atrasam a resposta, notadamente quando os materiais empregados têm massa significativa quando comparada à do termistor, têm grande capacidade térmica e baixa condutividade de calor.

O tipo e a dinâmica do meio também influem no tempo de resposta. Por exemplo, o tempo de resposta de um sensor imerso em um líquido, como água ou óleo, é menor do que quando imerso em um gás, com o ar. Da mesma forma, meios agitados ou circulantes propiciam respostas mais rápidas. A título de exemplo, termistores nus e suspensos num banho de óleo agitado têm constante de tempo da ordem de 1s, mas essa constante sobe para 2,5s quando envoltos por teflon e expostos ao ar.

#### 3.2. Auto Aquecimento.

Uma corrente  $I$  percorre um termistor com resistência  $R$ , há uma dissipação de calor  $W=RI^2$  que provoca um aumento da temperatura do termistor e do meio circunvizinho. Caso esse termistor seja utilizado para medir a temperatura desse meio, erro significativamente pode ocorrer se uma adequada correção não for aplicada. A potência dissipada em um termistor, que provoca seu auto-aquecimento, deve ser mantida a um nível muito baixo, para assegurar que o erro induzido na medição da temperatura seja insignificante. No entanto, cuidados especiais devem ser tomados em aplicações que demandam grande exatidão, nas quais a dissipação térmica do termistor utilizado como sensor foi baixa devido ao volume e as propriedades de dissipação de calor no meio de imersão, tais como em aplicações que incluam a detecção de nível de líquido, medição do fluxo de líquido e medição do fluxo de ar.

#### 3.3. Exatidão, Estabilidade e Resolução.

A exatidão de termistores é normalmente expressa como um valor percentual da temperatura medida, ou de uma faixa de medição. Especificações comerciais obtidas de fabricantes e vendedores de termistores por ocasião da elaboração desta NT-011 apontam a disponibilidade de dispositivos com classe de exatidão de 0,1%; 0,2% ; 0,5% e 1,0%.

Termistores são, geralmente, muito precisos e estáveis. Porém, condições operacionais adversas, tais como excesso de temperatura, exposição à umidade, danos mecânicos ou corrosão podem causar alterações irreversíveis na correlação resistência versus temperatura do dispositivo.

Cada termistor possui curva de resposta particular. Por isso, podem ser relevantes os erros decorrentes da troca desse tipo de componente em aplicações em que também não é possível a troca dos coeficientes de Steinhart-Hart nos instrumentos de medição (indicadores, atuadores, condicionadores de sinal, etc. Como forma de assegurar a compatibilidade de termistores nessas trocas, alguns fornecedores fornecem dados sobre os limites de erros que podem decorrer nessas permutas, estabelecendo faixas de 0,1°C e 0,2°C, dentro de faixas delimitadas de temperatura.

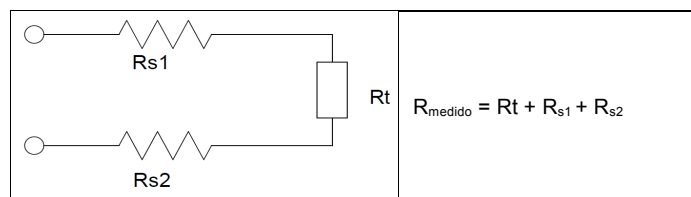
#### 3.4. Ligação de termistores para uso em medições.

Aplicações de termistores envolvem medição de resistência, o que, por decorrência, exige a passagem de uma corrente de excitação produzida por uma fonte externa e a leitura da queda de tensão provocada pelo termistor.

Diferentemente do que acontece nas aplicações de termoresistências, os valores nominais das resistências dos termistores são elevados, conseqüentemente, as resistências dos fios de ligação têm pouca ou insignificante interferência nos resultados das medições. Por isso, as medições podem ser feitas a 2 fios, sem grande prejuízo nas exatidões das medidas. Todavia, nas aplicações que exigem a alta resolução ou grande exatidão, as medições da resistência também podem ser feitas a 3 e 4 fios, com eliminação da resistências parasitas introduzidas pelos fios de ligação. Nos tópicos a seguir são mostrados diagramas de ligação a 2,3 e 4 fios, nos quais  $R_t$  é a resistência do termistor:

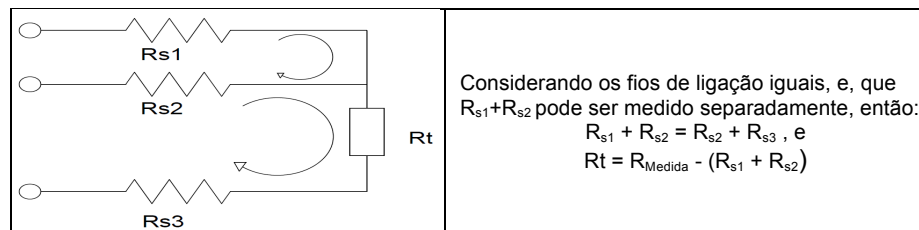
### 3.4.1. Ligação a 2 fios

No processo de medição, a corrente de excitação percorre o mesmo circuito em que é feita a leitura da queda de tensão, e, portanto, as resistências dos fios de ligação são somadas à resistência do termistor.



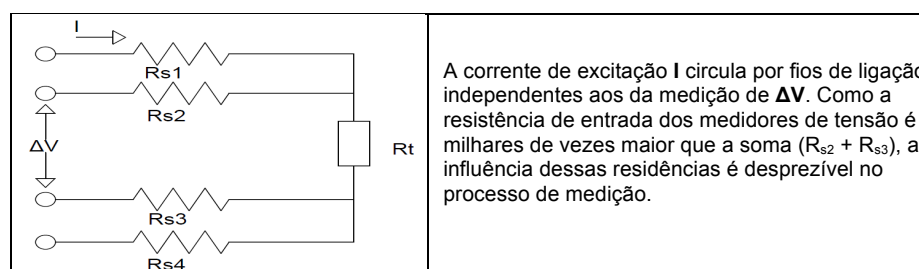
### 3.4.2. Ligação a 3 fios

Na ligação a 3 fios as resistências dos fios de ligação podem ser eliminadas, tanto analogicamente por arranjos feitos em circuito de Ponte de Wheatstone, quanto por compensação algébrica do valor da resistência do "loop" inativo, cuja resistência dos fios é igual ou muito próxima à dos fios do circuito ativo que contém o termistor. Tais compensações passaram a ser facilmente feitas nos equipamentos dotados de capacidade matemática realizadas pro microprocessadores.



### 3.4.3. Ligação a 4 fios

A ligação a 4 fios é aplicada nos casos que demanda alta exatidão, tais como em experimentos laboratoriais, calibrações ou processos onde a temperatura precisa ser medida e controlada com margem muito estreita de tolerância. Nessa forma de ligação, a corrente elétrica de excitação circula por condutores independentes aos utilizados na medição da queda de tensão no termistor. Como os equipamentos nessa medição (termômetros, indicadores e controladores) possuem alta resistência de entrada, a influencia pela resistência dos fios de ligação torna-se desprezível.



Em aplicações de engenharia, ligações de termistores a 3 e a 4 fios são raras. Utiliza-se, comumente, ligação a 2 fios, visto que as resistências dos fios de ligação são baixas ( $\approx 1\Omega$ ) quando comparadas às do termistor ( $\approx 10^3\Omega$ ).

### 3.5. Formas de Proteção e Montagem.

Os tipos e formas de montagens de termistores dependem da aplicação, e, em certo grau, é parecida com as utilizadas nas aplicações de termoresistências, resguardadas as características dimensionais dos termistores, geralmente muito menores que as termoresistências. Não obstante as inúmeras possibilidades de arranjos nas montagens, duas formas se destacam: com e sem proteção.

**Sem Proteção:** É a forma mais comum quando o meio não é agressivo e o tempo de resposta é um resultado importante. O termistor é interconectado aos fios de ligação (a 2, 3 ou 4 fios), sem qualquer tipo de proteção, ou, em alguns casos, apenas recoberto com tinta ou verniz isolante apropriados.

**Com Proteção:** O termistor é interconectado aos fios de ligação (a 2, 3 ou 4 fios), e o conjunto é inserido em uma bainha de proteção metálica ou não metálica. A proteção pode ser feita por meio de tubos rígidos ou flexíveis, encapamento com fita ou cola polimérica, dentre outros. Nesses casos, os espaços entre a bainha e o termistor podem ser preenchidos com algum tipo de material que propicie melhorar a troca térmica e serva para aumentar as proteções elétrica e mecânica.

Como nas montagens para termopares e termoresistências, é possível utilizar acessórios complementares, tais como cabeçotes, tubos de proteção, poços termométricos, buçim, niples, etc.

### 3.6. Instrumentação Associada.

As medições com termistores demandam equipamentos de medição de resistência elétrica, que podem produzir valores em unidades de resistência ( $\Omega$ ), ou diretamente em unidades de temperatura. Há uma boa disponibilidade no mercado dispositivos (termômetros) analógicos e digitais para uso com termistores. Também há uma variada gama de outros tipos medidores, autoportantes ou na forma de cartões de aquisição de dados vinculados a computadores, todos com algoritmos internos ou dependente de processamento externo apropriados a termistores. Independente do tipo de medidor, o uso de termistores requer cuidados específicos, visto que a maioria dos termistores têm comportamento não linear e dependem de excitação externa de corrente.

### 3.7. Aplicações Típicas de Termistores.

Como já foi citado, anteriormente, termistores podem ter uma infinidade de aplicações. A seguir, adicionalmente, são incluídos mais alguns exemplos de onde termistores podem ser utilizados e apresentar bons resultados.

- Como dispositivo limitador de corrente, até mesmo como substitutos de fusíveis.
- Como dispositivo temporizador de fluxo de corrente em aplicações diversas, como em circuitos de controle de bobina de desmagnetização;
- Como dispositivo controlador de aquecimento inicial em automóveis (cabine, óleo de motor, injeção de motores à álcool e a diesel)
- Como sensores em sondas de medição de baixas e médias temperaturas..
- Controles térmicos em impressoras.
- Controle na manipulação de alimentos.
- Aplicação no controle e acionamento térmicos de eletrodomésticos (torradeiras, cafeteiras, refrigeradores, congeladores, secadores de cabelo, etc.).
- Controle e alarme térmicos de motores e geradores elétricos.

### 3.8. Vantagens e Desvantagens na Escolha do Bulbo de Resistência

#### A - Vantagens

- a) Possuem a mais alta sensibilidade dentre todos os outros tipos de sensores.
- b) Tem boas características de estabilidade e repetibilidade.

- c) Dispensa o uso de fios e cabos especiais, sendo necessário somente fios de cobre comuns.
- d) Se adequadamente protegido, permite a utilização em qualquer ambiente.
- e) Baixo tempo de resposta.

**B - Desvantagens**

- a) São mais caros do que os outros sensores utilizados nesta mesma faixa.
- b) Baixo alcance de medição (típico de -60 °C a 160 °C).
- c) Deterioram-se com mais facilidade, caso ultrapasse a temperatura máxima de utilização.
- d) Curva de resposta fortemente não linear..
- e) Frágil mecanicamente.

**4. MODELAMENTO MATEMÁTICO DOS TERMISTORES**

Caso a variação da resistência de um termistor em função da variação temperatura fosse linear, condição aceitável apenas para faixas muito estreitas de temperatura, a equação a seguir poderia ser aplica:

$$\Delta R = \alpha \cdot \Delta T, \text{ onde:}$$

$\Delta R$ : variação da resistência.

$\alpha$ : coeficiente dR/dT.

$\Delta T$ : variação da temperatura.

O valor de  $\alpha$  é positivo para os termistores PTC e negativo para os NTC.

Como a curva de resposta dos termistores à variação de temperatura é fortemente não linear, para faixas mais amplas uma solução adequada, que assegura desvios baixos da ordem de 0,02 °C, é a aplicação de uma equação proposta pelos professores John S. Steinhart e Stanley R. Hart, conhecida como equação de Steinhart-Hart, assim formulada:

$$1/T + A+B.\ln(R) + C.\ln(R)^3, \text{ onde:}$$

A, B, C são coeficientes Steinhart-Hart definidos para cada tipo de termistor

T = Temperatura Kelvin (T °C + 273,15);

R = Resistência do termistor na temperatura T.

Para encontrar o valor da resistência R de um termistor em uma dada temperatura, pode ser aplicada a equação inversa à de Steinhart-Hart, assim formulada:

$$R = \exp.[(x-y)^{1/3} - (x+y)^{1/3}], \text{ onde:}$$

R é a resistência em Ohm;

$$y = (A-1/T)/2C;$$

$$x = (B/3C)^{1/3} + y^2$$

Os coeficientes A, B e C da equação de Steinhart-Har podem ser experimentalmente determinados. Para isso, basta medir a resistência do termistor e três valores de temperatura, preferencialmente, bem espaçados na faixa de uso do dispositivo. Veja o exemplo a seguir:

Medições Efetuadas		Equações Decorrentes	Valores dos Coeficientes		
T(K)	R(Ω)		A	B	C
273	16.330	$A + B \ln(16330) + C [\ln(16330)]^3$	0.001284	$2.364 \times 10^{-4}$	$9.304 \times 10^{-8}$
298	5000	$A + B \ln(5000) + C [\ln(5000)]^3$			
323	1801	$A + B \ln(1801) + C [\ln(1801)]^3$			

A título de exemplo, a **Tabela 1**, mostra valores típicos de coeficientes Steinhart-Hart para um termistor comerciais (Fonte: Omega Engineering – USA).

<b>Tabela 1 – Exemplos de Coeficientes para Termistores</b>			
<b>Resistência (Ω) a 25°C</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
2252	1.468 x 10-3	2.383 x 10-4	1.007 x 10-7
3000	1.403 x 10-3	2.373 x 10-4	9.827 x 10-8
5000	1.285 x 10-3	2.362 x 10-4	9.285 x 10-8
10000	1.032 x 10-3	2.387 x 10-4	1.580 x 10-7
30000	9.376 x 10-4	2.208 x 10-4	1.276 x 10-7

Nas aplicações de termistores tipo NTC o parâmetro C pode ser tomado como 0. Em decorrência, a equação Steinhart-Hart para NTC's pode ser simplificada para:

$$1/T = 1/T_0 + 1/B \cdot \ln(R/R_0), \text{ ou em sua forma invertida de } R = R_0 \cdot \exp[B(1/T - 1/T_0)], \text{ onde:}$$

R = Resistência do NTC em uma dada temperatura K;

T = Temperatura K (T °C + 273,15);

R<sub>0</sub> = Resistência na temperatura Kelvin equivalente a 25°C, ou seja 298,15°C.

T<sub>0</sub> = Temperatura Kelvin equivalente a 25°C, ou seja 298,15°C.

## 5. MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE TERMISTORES

O termistor é um sensor de grande sensibilidade, boa repetibilidade e exatidão, mas sensível a fatores físicos e químicos que podem interferir no seu desempenho e na sua curva de resposta. Por isso, devem ser estabelecido e implementado um programa de verificação e de calibração que assegure a confiança nas medições. A periodicidade deve ser definida considerando a tolerância e grau de criticidade do processo, além de outros fatores. O tempo de uso, alterações físico-químicas no semicondutor podem alterar a curva característica. Para calibrar termistores pode-se empregar os métodos de pontos fixos ou calibração por comparação com outros termistores, termoresistência ou termômetro de líquido em vidro (TLV).

### 5.1. Calibração por comparação com termômetro de contato.

É o método mais aplicado nas calibrações de termistores para aplicações convencionais. Nesse processo, o termistor a ser calibrado tem suas medidas comparadas com um sensor de referência, seguindo procedimento validado. Esse sensor de referência pode ser um outro termistor com propriedade metrológicas comprovadas, porém, as comparações com uma termoresistência padrão em um meio térmico controlado é a forma mundialmente mais utilizada.

### 5.2. Método dos Pontos Fixos:

O método de calibração por pontos fixos é, sem dúvida, o mais exato, porém, quase sempre envolve maior custo e complexidade operacional. Segundo a Escala Internacional de Temperatura (ITS-90), os pontos fixos que tipicamente estão na faixa de uso dos termistores são os seguintes:

<b>Ponto Fixo</b>	<b>Valor (°C)</b>
Ponto triplo do mercúrio	-38.834
Ponto de gelo	0,01
Triplo da água	0,010
Ponto de solidificação gálio	29.764
Ponto de ebulição da água (1 atm.)	100,0
Ponto fusão do índio	156.598

Em certos casos, o ponto do gelo pode ser facilmente reproduzido, conforme Nota Técnica NT-004. Para utilizar o ponto de ebulição da água, alguns cuidados devem ser observados, com destaque para a pureza da água e a pressão atmosférica local, que tem grande influência nas temperaturas de ponto de ebulição e podem acarretar erros significativos se não for feitas as devidas compensações.

## 6. TERMISTORES PRODUZIDOS PELA ANALÓGICA.

A Analógica, a partir de componentes fornecidos por empresas de reconhecida competência, desenvolve, fabrica e comercializa termistores nus ou especificamente montados, para medição de temperatura em aplicações nas quais o termistor apresenta desempenho superior a outros tipos de sensores. Isso ocorre, notadamente, em certas aplicações laboratoriais, biológicas, médicas e farmacêuticas onde a sensibilidade, o tempo de resposta e as dimensões do sensor são variáveis preponderantes.

Esses termistores são confeccionados com componentes de superior qualidade e são observados os devidos cuidados de montagem e limpeza. Normalmente os termistores são confeccionados para ligação a 2 fios, mas ligações a 3 e 4 fios também podem ser solicitadas.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Quinn, T. J.: Temperature. Academic Press: London, 1990
2. Nicholas, J. and White, D. R.: Traceable Temperatures. John Wiley & Sons Ltd.: England, 2001.
3. BIPM: Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990. 1990.
4. U.S. Sensor, Thermistor Terminology
5. Agilent Technology - Application Note 490. Practical Temperature Measurements
6. The Resistor Guide, PTC Thermistors and Silistors
7. Thermistor Terminology. U.S. Sensor
8. McGee, Thomas (1988). Principles and Methods of Temperature Measurement. John Wiley &
9. Analógica Instrumentação e Controle Ltda. Nota Técnica NT-004 – Web Site.
10. Omega Engineering Inc. – Website.
11. Harry R. Norton: Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.