

Sensores de Temperatura

Na indústria podemos citar e exemplificar inúmeras aplicações para uma variedade muito grande de sensores que são responsáveis por enviar as informações do “chão de fábrica” para os controladores universais e dispositivos programáveis (como CLPs), a medição e o controle de temperatura está presente em quase todos os segmentos industriais, que vão desde a indústria petroleira até as indústrias alimentícias, farmacêuticas, metalúrgicas etc. Por essa razão iremos abordar neste capítulo os mecanismos e os tipos de sensores utilizados para monitoramento e controle de temperatura em ambiente industrial. Esses sensores são fabricados em diversos tipos de material, que são indicados para aplicações específicas, abordaremos também de forma sistemática os diversos tipos existentes e os princípios de funcionamento nos quais são baseados.

Definição de Temperatura e Calor

Todas as substâncias são constituídas de pequenas partículas, as moléculas, que se encontram em contínuo movimento. Quanto mais rápido o movimento das moléculas, mais quente se apresenta o corpo e, quanto mais lento, mais frio se apresenta o corpo.

“Então podemos definir temperatura como o grau de agitação térmica das moléculas”

O termo calor significa energia em trânsito ou a forma de energia que é transferida por meio da fronteira de um sistema em virtude da diferença de temperatura.

Escalas de Temperatura

A primeira escala de temperatura foi a de Farenheit em 1714, o qual convencionou 32 °F para a temperatura de congelamento de uma mistura entre gelo e amônia e 212 °F para a temperatura de ebulição da água. A diferença entre esses pontos foi dividida em 180 partes iguais, à qual se deu o nome de grau Farenheit.

Mais tarde, Celsius, tomando os mesmos dois pontos, definiu 0°C para o congelamento da água e 100°C para a ebulição da água, ambas à pressão atmosférica, à qual se deu o nome de graus Celsius ou centígrados.

No princípio de 1800, Thonsom (Lord Kelvin) desenvolveu uma escala termodinâmica universal, com base no coeficiente de expansão de um gás ideal. Kelvin estabeleceu o conceito de zero absoluto e a sua escala permanece como padrão para a termometria moderna.



Zero Absoluto ou Zero Kelvin é a menor temperatura que um corpo pode alcançar, 0 K equivale a $-273,15^{\circ}\text{C}$.

As equações de conversão das unidades mais usadas na termometria moderna são:

Para converter graus Fahrenheit em graus Celsius

$$^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{F} - 32 \times \frac{5}{9}$$

Para converter graus Celsius em graus Fahrenheit

$$^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9} \times ^{\circ}\text{C} + 32$$

Para converter graus Celsius em graus Kelvin

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$$

Para converter graus Kelvin e graus Celsius

$$^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K} - 273,15$$

Existem outras escalas como a Rankine e a Réamur, todavia são de pouco uso, no entanto, como as anteriores, também pode ser convertida , acompanhe:

Para conversão de graus Fahrenheit em Rankine

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,17$$

Para conversão de graus Celsius para Réamur

$$^{\circ}\text{Re} = \frac{4}{5} \times ^{\circ}\text{C} \times 1,3$$

Escala Internacional de Temperatura (ITS - 90)

Para melhor expressar as leis da termodinâmica, foi criada uma escala baseada em fenômenos de mudança de estado físico de substâncias puras, que ocorrem em condições únicas de temperatura e pressão. São chamados de pontos fixos de temperatura.

Chama-se essa escala de IPTS - Escala Prática Internacional de Temperatura. A primeira escala prática internacional de temperatura surgiu em 19207, modificada em 1948 (IPTS-48). Em 1960 mais modificações foram



feitas e em 1968 uma nova Escala Prática Internacional de Temperatura foi publicada (IPTS-68).

A ainda atual IPTS-68 cobre uma faixa de $-259,34$ a $1064,34$ °C, baseada em pontos de fusão, ebulição e pontos triplos de certas substâncias puras como, por exemplo, o ponto de fusão de alguns metais puros.

Hoje já existe a ITS-90 Escala Internacional de Temperatura, que define os fenômenos determinantes de temperatura. Para elementos conhecidos, temos os seguintes valores:

Pontos Fixos	IPTS - 68	ITS - 90
Ebulição do Oxigênio	- 182,962 °C	- 182,954 °C
Ponto Triplo da Água	+ 0,010 °C	+ 0,010 °C
Solidificação do Estanho	+ 231,968 °C	+ 231,928 °C
Solidificação do Zinco	+ 419,580 °C	+ 419, 527 °C
Solidificação da Prata	+ 961,930 °C	+ 961,780 °C
Solidificação do Ouro	+ 1064,430 °C	+ 1064,180 °C

Tabela 8A

Normas e Padrões Internacionais

Com o desenvolvimento tecnológico diferente em diversos países, criou-se uma série de normas e padronizações, cada uma atendendo uma dada região. As mais importantes são:

ISA – AMERICANA
DIN – ALEMÃ
JIS – JAPONESA
BS – INGLESA
UNI – ITALIANA

Para atender às diferentes especificações técnicas na área da termometria, cada vez mais se somam os esforços com o objetivo de unificar essas normas. Para tanto, a Comissão Internacional Etrotécnica IEC, vem desenvolvendo um trabalho com os países envolvidos no processo normativo, não somente para obter normas mais completas e aperfeiçoadas mas também para prover meios para a internacionalização do mercado de instrumentação relativo a termopares.

Como um dos participantes dessa comissão, o Brasil por intermédio da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, está também diretamente interessado no desdobramento do assunto e vem adotando tais especificações como Normas Técnicas Brasileiras.



8.1. Tipos de Sensores

Sensores, detectores ou elementos primários de temperatura, são transdutores que alteram algumas de suas características físicas ao se equalizar com o meio a ser determinada a temperatura. Como exemplo poderíamos citar a dilatação do mercúrio num termômetro de vidro, a geração de tensão num termopar, a variação de resistência ôhmica num termistor entre outras.

Dos inúmeros tipos de sensores de temperatura existentes, como termômetros de vidro, termômetros bimetálicos, termômetros a gás, termistores, termômetros de quartzo, termopares, termorresistência, termômetros de germânio e outros; os mais utilizados industrialmente e em laboratórios são os termopares e as termorresistências.

8.1.1 Termopares

A medição de temperatura baseada em sensores do tipo termopar parte do princípio de que dois condutores metálicos diferentes “X” e “Y”, unidos em uma de suas extremidades, quando expostos a uma variação de temperatura, geram uma tensão elétrica, ou seja, geram uma força eletromotriz (F.E.M). A intensidade dessa F.E.M está relacionada diretamente com a temperatura ao qual a junção está submetida. Junção, como é chamada, é o nome dado ao ponto onde os metais se unem em um ponto comum, ou seja, na ligação física entre os metais “X” e “Y”.

Essas propriedades termoelétricas foram descobertas pelo pesquisador Seebeck em 1821, que identificou que em um circuito fechado construído a partir de dois elementos diferentes “X” e “Y” ocorre a geração de uma corrente elétrica quando em uma das extremidades existir uma diferença de temperatura. A existência de uma F.E.M térmica “XY” no circuito é definida como efeito Seebeck em homenagem ao pesquisador que a descobriu. Quando a temperatura da junta de referência é mantida constante, verifica-se que a F.E.M. térmica é uma função da temperatura da junta de medida. Esse fato permite utilizar um par termoelétrico como um termômetro.

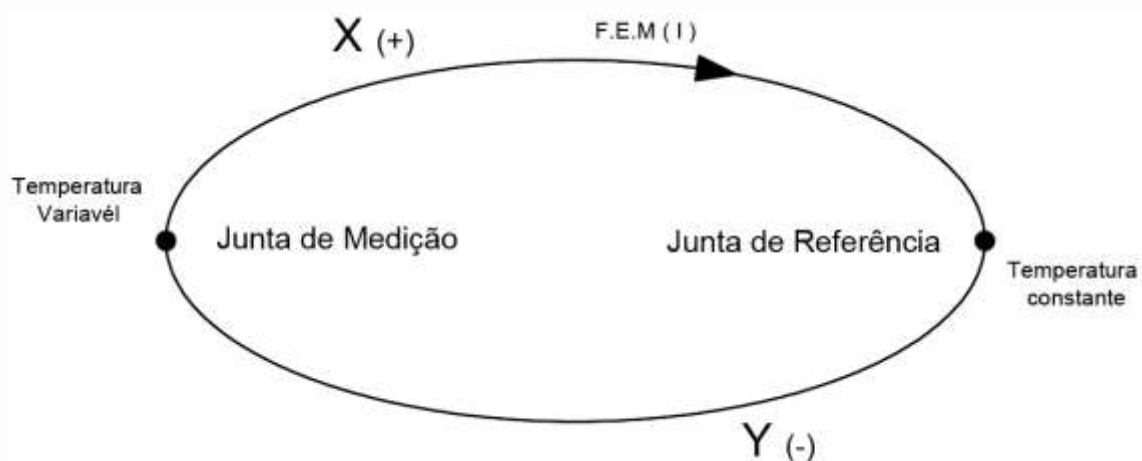


Figura 8.1

O efeito Seebeck se produz pelo fato de que os elétrons livres de um metal diferem de um condutor para outro e dependem da temperatura. Quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas são mantidas em diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons nas junções se produz em ritmos diferentes.

Com base nesse fenômeno, podemos estabelecer uma série de valores de tensão relacionados à temperatura e com isso criar um mapa ou tabela que relaciona a temperatura com um valor em tensão, portanto, quando conhecemos esse mapa, podemos facilmente converter um valor de tensão em temperatura correspondente em graus ($^{\circ}\text{C}$), dessa forma os dispositivos eletrônicos podem indicar e controlar sistemas baseados neste princípio.

Em aplicações na indústria os termopares se apresentam nesta configuração:

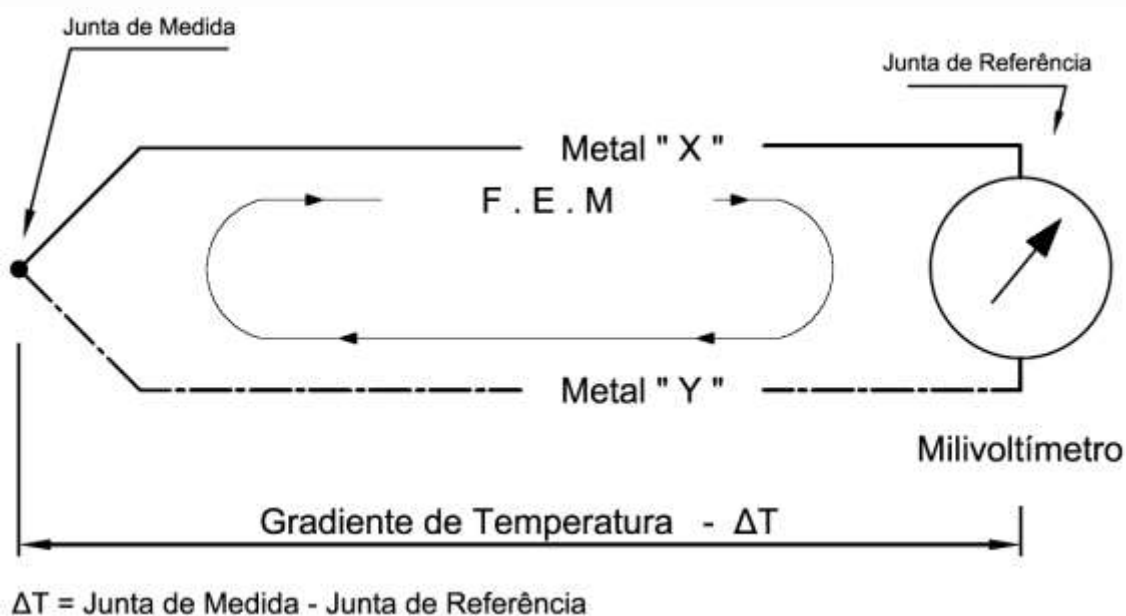


Figura 8.2

Na figura 8.2 podemos visualizar um modelo típico de um termopar, os metais empregados na composição do sensor variam de acordo com as características de leitura e faixa de temperatura de trabalho, para cada modelo existe um mapa diferente de tensão X temperatura.

Os metais mais utilizados para fabricação de termopares são selecionados de modo a se obter um melhor coeficiente de temperatura, são eles: cobre; ferro; chromel; platina; constantan; alumel; nicrosil e nisil.

A combinação correta destes metais forma um termopar, e, para cada combinação, podemos criar termopares para classes de temperatura diferentes. Esses termopares, classificados de acordo com sua faixa de



temperatura, recebem um nome que segue normas internacionais de acordo com a classe de temperatura para aplicação, portanto são definidos como:

Termopar Tipo “T”, - 184 °C a 370 °C

Essa classe de termopar é formada pela junção dos elementos cobre e constantan, sendo o cobre o elemento positivo e o constantan o elemento negativo, podem ser utilizados em aplicações em que a temperatura esteja na faixa de -184 °C a 370 °C. Possuem as vantagens de serem resistentes à atmosfera corrosiva, aplicáveis em atmosferas redutoras ou oxidantes abaixo de 370 °C. Possuem estabilidade em temperaturas abaixo de 0 °C e apresentam boa precisão na faixa de utilização. Têm somente uma desvantagem: apresentam oxidação em temperaturas acima de 310 °C.

Termopar Tipo “J”, 0 °C a 760 °C

Esse é sem dúvida o mais popular dos termopares, sua junção é composta pelos elementos ferro e constantan, sendo o ferro o elemento positivo e o constantan o elemento negativo, podem ser aplicados em faixas de temperatura que variam de 0 °C a 760 °C, e trazem como principal vantagem o baixo custo. Talvez por isso seja um dos mais populares e comuns no mercado. Outra vantagem é a indicação para operarem em regimes contínuos em temperaturas de até 760 °C, tanto em atmosferas neutras quanto redutoras. Suas desvantagens são: oxidação do ferro a temperaturas próximas a 760 °C, e a necessidade de se utilizar tubos ou ilhas de proteção em temperaturas acima de 480 °C.

Termopar Tipo “E”, 0 °C a 870 °C

Esse tipo de termopar é formado pela junção dos elementos chromel e constantan, sendo o chromel o elemento positivo e o constantan o elemento negativo, podem ser aplicados em sistemas em que a temperatura de trabalho esteja na faixa de 0°C a 870°C. Possuem a grande vantagem de ter uma junção com alta potência termoelétrica, podendo ser utilizados em grandes distâncias, e outra vantagem é a resistência à corrosão, isso permite a utilização em atmosfera oxidante. Têm somente a desvantagem de apresentar baixa estabilidade em atmosferas redutoras.

Termopar Tipo “K”, 0 °C a 1260 °C

O termopar tipo “K” é formado pela junção dos elementos chromel e alumel, sendo o chromel o elemento positivo e o alumel o elemento negativo, podem ser empregados em sistemas que trabalham com altíssima temperatura, ou seja, na faixa de 0 °C a 1260 °C. Possuem as vantagens de poder trabalhar em ambientes com atmosfera oxidante e, quando utilizados em faixas de temperaturas elevadas, apresentam melhor rigidez mecânica, o que garante uma vida útil mais longa. Têm as desvantagens de que, quando utilizados em ambientes redutores, atmosferas sulfurosas ou em gases como



H₂S ou SO₂, requerem uma forte proteção adicional.

Termopar Tipo “S”, 0 °C a 1480 °C

Esse tipo de termopar, ao contrário dos outros tipos, é formado pelo mesmo conjunto de metais: platina / platina, com uma única diferença: a liga que compõe o elemento positivo é acrescida de 10% de rhódio, assim são indicados para trabalhar em altíssimas temperaturas, nas faixas de 0 °C a 1480 °C, e trazem como vantagens a ótima precisão acima da faixa dos 800 °C, e a indicação de utilização em ambientes oxidantes. Já as desvantagens podem ser descritas como a vulnerabilidade em atmosferas que não sejam oxidantes e, quando utilizados em altas temperaturas, devem ser protegidos em tubos ou ilhas de medição construídos em alta alumina.

Termopar Tipo “B”, 870 °C a 1705 °C

Esse termopar, como o tipo “S” possui os mesmos metais para formação da junção, platina / platina, a diferença entre o termopar do tipo “S” é o teor de rhódio para formação dos elementos positivo e negativo. Nesse modelo é utilizado cerca de 30 % de rhódio para o elemento positivo e cerca de 6% para o elemento negativo, isso torna o termopar capaz de realizar medições em ambientes que variam de 870 °C a 1705 °C, a grande maioria dos termopares não resistiria a essa temperatura. As vantagens desse termopar estão relacionadas a uma melhor estabilidade quando comparados aos termopares anteriores para altas temperaturas, além de apresentar alta resistência mecânica, que aumenta consideravelmente a sua vida útil. E trazem como desvantagem a vulnerabilidade em atmosferas que não sejam oxidantes, além de necessitarem de proteção adicional quando utilizados.

Termopar Tipo “N”, 0 ° a 1260 °C

O termopar tipo “N” é formado pela junção dos elementos nicrosil e nisil, sendo o nicrosil o elemento positivo e o nisil o elemento negativo, são utilizados em sistemas em que a faixa de temperatura varia de 0 °C a 1260 °C, possuem a vantagem em relação ao termopar do tipo “K” de manter a estabilidade em altas temperaturas. O aumento de sua vida útil, quando aplicados em ambientes onde exista a presença de enxofre, em atmosfera oxidante, apresenta melhor resistência. Trazem a desvantagem de apresentar melhor desempenho somente quando construído com isolamento mineral.

O mapa de F.E.M X temperatura dos termopares, em geral, pode ser obtido por meio de uma expressão matemática polinomial. Esse polinômio foi obtido por meio das medições dos diversos tipos de termopares em laboratório. A função matemática que representa com precisão o comportamento da F.E.M X temperatura desses tipos de sensores, foi elaborada tomando por base polinômios de 5º até 9º ordem, cujo coeficientes e a expressão polinomial estão descritos a seguir:

Coeficientes:

A_n	
----------------------	--



Ordem	Termopares				
	"T"	"J"	"E"	"K"	"S"
A0	0.100860910	-0.048868252	0.104967248	0.226584602	0.927763167
A1	25727.94369	19873.14503	17189.45282	24152.10900	169526.5150
A2	-767345.8295	-218614.5353	-282639.0850	67233.4248	-31568363.94
A3	78025595.81	11569199.78	12695339.5	2210340.682	8990730663
A4	-9247486589	-264917531.4	-448703084.6	860963914.9	-1.63565E + 12
A5	6.97688E + 11	2018441314	1.10866E + 10	4.83506E + 10	1.88027E + 14
A6	-2.66192E + 13	---	-1.76807E + 11	-1.18452E + 12	-1.37241E + 16
A7	3.94078E + 14	---	1.71842E + 12	1.38690E + 13	6.17501E + 17
A8	---	---	-9.19278E + 12	-6.33708E + 13	-1.56105E + 19
A9	---	---	2.06132E + 13	---	1.69535E + 20

Coeficientes para obtenção de relação F.E.M x Temperatura Termopares

$$T_{°C} = A_0 + A_1 \cdot X_v + A_2 \cdot X_v^2 + A_3 \cdot X_v^3 + \dots + A_n \cdot X_v^n$$

Sendo que: T: é a temperatura em graus Celsius

An: é o coeficiente matemático para cada termopar [tabela abaixo]

X: é o valor da F.E.M em volts

n: é o número da ordem do polinômio

De posse dos valores para os coeficientes de cálculo definidos na tabela, podemos estimar com muita precisão os valores de temperatura em que estão submetidos os termopares. Para tal basta realizar a medição da F.E.M dos termopares com um milivoltímetro convencional, acompanhe o exemplo abaixo:

Exemplo: *Um termopar tipo "J" está ligado a um processo industrial e o técnico em instrumentação realizando uma medição de tensão no termopar identificou uma tensão de 5,269 mV, qual é a temperatura a que o termopar está submetido?*

Dados : Termopar Tipo "J"
Polinômio de 5ª ordem
Coeficientes A₀ a A₅ [tabela]
X = 5,269 mV = 0,005269 V

Aplicando a fórmula:

$$T_{°C} = A_0 + (A_1 \cdot X_v) + (A_2 \cdot X_v^2) + (A_3 \cdot X_v^3) + (A_4 \cdot X_v^4) + (A_5 \cdot X_v^5)$$



$$T_{^{\circ}C} = -0,048868252 + (19873,14503 \times 0,005269) + (-218614,5353 \times 0,005269^2) + (11569199,78 \times 0,005269^3) + \dots \\ (-264917531,4 \times 0,005269^4) + (2018441314 \times 0,005269^5)$$

$$T \cong 100^{\circ} C$$

8.1.2 Junta de Referência

Os valores mapeados da relação entre a F.E.M X temperatura dos termopares consideram uma temperatura fixa de 0 °C para junta de referência, que especifica o ponto de solidificação da água. Junta de referência é a definição dada ao ponto de conexão entre o sensor e o instrumento que realizará a leitura. Na prática esse ponto não está submetido à temperatura de 0 °C, mas sim na temperatura ambiente, portanto os instrumentos devem realizar a correção dos sinais enviados pelo sensor para que a leitura esteja correta. Os dispositivos podem realizar essas correções de forma automática ou manual.

Os instrumentos utilizados para medição de temperatura com termopares costumam fazer a correção da junta de referência automaticamente, sendo um dos métodos utilizados para realização da correção a medição da temperatura nos terminais do instrumento por meio de um circuito eletrônico, o qual adiciona o valor correspondente a diferença de temperatura de 0 °C à temperatura medida nos terminais do instrumento ao sinal proveniente do sensor. Dessa forma são compensados os valores reais do sensor em razão da medição. Existem também alguns instrumentos em que a compensação da temperatura é fixa em 20 °C ou 25 °C. Nesse caso, se a temperatura ambiente for diferente do valor fixo, o instrumento indicará a temperatura com um erro que será tanto maior quanto maior for a diferença de temperatura ambiente e do valor fixo.

8.1.3 Condutores de Compensação

Na maioria dos sistemas industriais em que utilizamos sensores do tipo termopar para medição ou controle de temperatura, o sensor geralmente não está próximo ao elemento indicador ou controlador. Para essas situações existe um condutor apropriado que ameniza as perdas e que possui características similares aos termopares. Esses condutores são chamados de “Condutores de Compensação” ou “Fios de Extensão”.

Os condutores de compensação, também definidos como fios ou cabos de compensação, são produzidos com material diferente dos utilizados na construção dos termopares, porém possuem a seguinte característica: quando utilizados na faixa recomendada, apresentam uma curva característica de F.E.M X temperatura equivalente a dos termopares definidos, podem ser definidos para os termopares S, R e B, e são descritos pelas siglas “SX” e “BX”, respectivamente. Abaixo podemos visualizar as características elétricas desses dispositivos.

Termopar	
----------	--



	Condutor de Compensação				
	Tipo	Material condutor		Faixa de Utilização	Limite de Erro
		Positivo	Negativo		
S, R	SX	cobre	cobre níquel	0 a 200 °C	± 0,057 mV
B	BX	cobre	cobre	0 a 100 °C	± 0,000 mV / - 0,033mV

Tabela condutores de compensação para termopares S, R e B, segundo a norma ASTM E - 230

Tabela 8C

Os termopares do tipo S, R e B, não apresentam linearidade na relação F.E.M X temperatura, nessa situação o erro adicionado à instalação pelo condutor de compensação poderá variar quando definido em graus Celsius. Assim os valores descritos na tabela tomaram por base as seguintes condições das juntas de medição, tipo SX = ± 5 °C para 0,057 mV e tipo BX = 0 °C para 0,000 mV / -3,7 °C para - 0,033 mV.

Os fios de extensão ou cabos de extensão são produzidos com os mesmos materiais utilizados para fabricação dos termopares e devem ser utilizados exclusivamente com o termopar específico. São indicados para utilização na maioria das aplicações em que se tenha presente um sensor do tipo termopar, sua utilização é recomendada para ambientes com até 200 °C, em casos extremos de temperatura deverão ser observados a classe e o material de isolamento.

Os fios de extensão são designados de acordo com o termopar específico e seguem a seguinte metodologia, para termopares tipo “T” fios de extensão “TX”, para termopares tipo “J” fios de extensão “JX”, e assim por diante. Abaixo podemos visualizar uma tabela com as características elétricas para cada aplicação.

Termopar	Fio de Extensão				
	Tipo	Material condutor		Faixa de Utilização	Limite de Erro
		Positivo	Negativo		
T	TX	Cobre	Constatan	- 60 a 100 °C	± 1,0 °C
J	JX	Ferro	Constatan	0 a 200 °C	± 2,2 °C
E	EX	Chromel	Constatan	0 a 200 °C	± 1,7 °C
K	KX	Chromel	Alumel	0 a 200 °C	± 2,2 °C
N	NX	Nicrosil	Nisil	0 a 200 °C	± 2,2 °C

Tabela de fios de extensão para termopares T, J, E, K e N, segundo a norma ASTM E - 230

Tabela 8D



Os condutores de compensação e os fios de extensão devem ser produzidos seguindo normas rígidas de qualidade, assim como na fabricação dos próprios termopares, em razão disso os condutores de compensação e os fios de extensão seguem normas internacionais que garantem a qualidade e características elétricas, afim de evitar erros ou imprecisões nas instalações em que são utilizados. Essas mesmas normas também definem um código com base em cores para identificação do tipo de material empregado na fabricação do condutor e outro código de cores para identificação de polaridade. A seguinte tabela demonstra o código de cores segundo as normas ANSI, DIN e IEC.

Termopar	Compensação Extensão	Material		Código de Cores								
				ANSI			DIN			IEC		
		+	-	⊖	+	-	⊖	+	-	⊖	+	-
T	TX	Cobre	Constatan	AZ	AZ	VM	MR	VM	MR	MR	MR	BR
J	JX	Ferro	Constatan	PT	BR	VM	AZ	VM	AZ	PT	PT	BR
E	EX	Chromel	Constatan	RX	RX	VM	-	-	-	VL	VL	BR
K	KX	Chromel	Alumel	AM	AM	VM	VD	VM	VD	VD	VD	BR
K	WX	Ferro	Cupronel	BR	VD	VM	VD	VM	VD	-	-	-
S, R	SX	Cobre	Cu / Ni	VD	PT	VM	BR	VM	BR	LR	LR	BR
B	BX	Cobre	Cobre	CZ	CZ	VM	-	-	-	-	-	-
N	NX	Nicrosil	Nisil	LR	LR	VM	-	-	-	RS	RS	BR

Tabela de Cores para Condutores de Compensação e Fios de Extensão Normalizada

Legenda: [⊖ Capa Externa] [ANSI MC 96.1 1982] [DIN 43710 – 4] [IEC 584 – 3]
 [AZ: Azul] [PT: Preto] [BR: Branco] [VM: Vermelho] [MR: Marrom] [RX: Roxo] [VL: Violeta]
 [AM: Amarelo] [VD: Verde] [LR: Laranja] [RS: Rosa] [CZ: Cinza]

Tabela 8E

8.1.4 Termômetros de Resistência

Os termômetros de resistência são dispositivos capazes de detectar variações de temperatura com base no princípio de variação da resistência elétrica em certos tipos de metais, são construídos a partir de fios de platina, níquel ou cobre, e são utilizados materiais com alto grau de pureza. Esses metais são os mais utilizados por possuírem um alto grau de estabilidade térmica e mecânica, além de apresentarem um coeficiente térmico de resistência X temperatura praticamente linear, e não apresentam desgaste ou erros com o passar do tempo.

Os sensores com base em resistividade proporcionam uma alta amplitude no sinal elétrico de saída, isso facilita a leitura e garante menos interferência da instalação. Esses dispositivos são utilizados em laboratórios de calibração e são considerados um padrão mundial para medições de temperatura nas faixas de – 270 °C até 962 °C.



Na indústria é um dos sensores mais utilizados, é conhecido comumente pela sigla PT100 ou RTD, tem a característica de possuir incrível precisão e estabilidade, indispensáveis nos processos industriais.

O princípio de funcionamento de um termômetro de resistência é baseado em um fio de alta pureza, encapsulado em um tubo ou bainha de proteção. Os valores de saída seguem padrões internacionais, o termômetro PT100, por exemplo, apresenta resistência 100 Ω para 0 °C, e, de acordo com o aumento de temperatura, o valor da resistência aumenta proporcionalmente.

Os circuitos utilizados para medição de temperatura com base nesses sensores eram normalmente produzidos utilizando o princípio da ponte de resistência. Atualmente com o advento dos microchips e os microcontroladores, esta tarefa ficou mais fácil. Com a aplicação de um nível de tensão no sensor e identificando a queda de tensão em seus terminais, os microcontroladores atuais são capazes, com poucas operações matemáticas, de identificar o valor exato da temperatura do local a que o sensor está submetido.

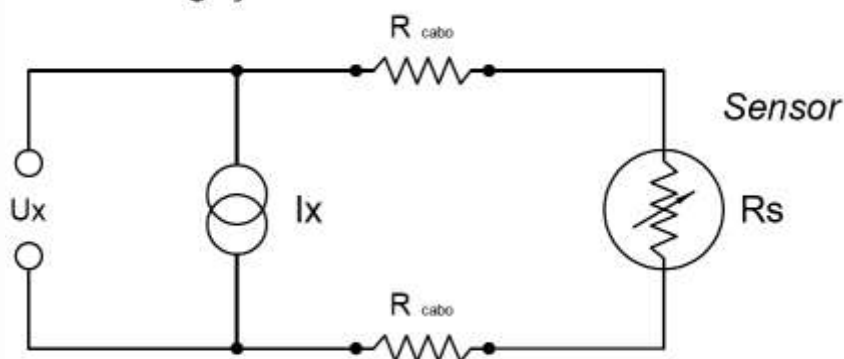
Os termômetros de resistência podem ser construídos de três maneiras diferentes que determinam particularidades na ligação, que podem aumentar consideravelmente sua precisão no processo, são elas:

Duas Vias ou Dois Fios

A configuração em duas vias ou dois fios determina uma ligação para cada terminal do sensor, é a configuração mais simples e atende facilmente à maioria das aplicações industriais. É indicada para aplicações em que a resistência do cabo de conexão entre o sensor e o leitor/controlador pode ser ignorada. Nesse tipo de aplicação os valores indicados podem sofrer pequenas variações devido à variação da resistência do cabo de ligação. Isso acontece devido às variações de temperatura do ambiente a que o cabo está submetido (tubulações, calhas etc.).

Esse tipo de sensor não é indicado para instalações em que o sensor esteja a mais de 10 metros do indicador/controlador, e quando a instalação não exija alta precisão de leitura.

Ligação em Duas Vias



$$U_x = I_x \cdot (2 R_{cabo} + R_s)$$

Figura 8.3

Na figura 8.3 podemos visualizar o diagrama equivalente de um sistema de medição de temperatura utilizando um sensor do tipo resistivo. Note que a conexão dos cabos do sensor ao ponto de conexão ao instrumento de leitura/controlador é considerada como um resistência aditiva ao circuito, portanto, se os valores de resistência dos cabos alterarem devido às variações de temperatura, a variação será somada à referência do sensor, provocando um erro na leitura, porém essas variações são muito pequenas, então se o sistema não necessitar de precisões extremas, o sensor pode ser utilizado sem maiores problemas.

Três Vias ou Três Fios

Nesse tipo de configuração o sensor é conectado ao leitor/controlador por meio de três fios, ou seja, uma ligação em uma das extremidades do sensor e outras duas na outra extremidade. Nessa situação obtemos a compensação da resistência do cabo, dessa maneira identificamos as variações de resistência decorrentes da variação do ambiente e o leitor/controlador pode ajustar automaticamente essas variações e corrigir a leitura. Esse método é o mais utilizado atualmente nas indústrias.

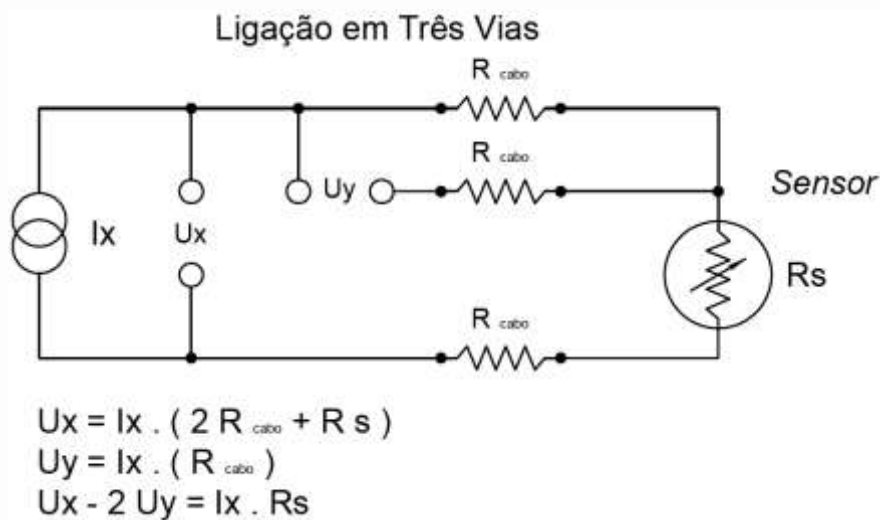


Figura 8.4

Quatro Vias ou Quatro Fios

Nessa configuração o sensor é conectado aos dispositivos de leitura ou controle por meio de 4 fios, dois em cada extremidade do sensor. Essa configuração é altamente precisa, e não é muito usual, porém, se a aplicação necessitar de um sistema de leitura extremamente preciso, como em laboratórios, por exemplo, ela é indicada.



Ligação em Quatro Vias

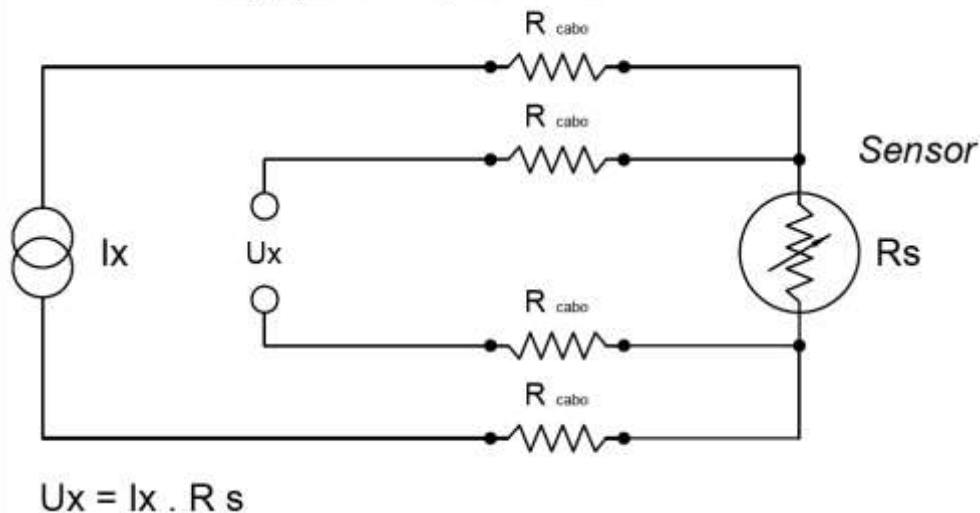


Figura 8.5

Os sensores de resistência são fabricados segundo normas internacionais, que, além da qualidade e linearidade do sensor, estabelecem uma faixa de erro compatível com a escala de temperatura utilizada. As normas internacionais DIN / IEC 751 estabelecem duas classes para limites de erro: Classe “A” e Classe “B”, sendo o sensor atribuído à classe “A” com menor faixa de erro e a classe “B” com maior faixa de erro.

Temperatura [°C]	Classe “A” [°C]	Classe “B” [°C]
-200	0,55	1,3
-100	0,35	0,8
0	0,15	0,3
100	0,35	0,8
200	0,55	1,3
300	0,75	1,8
400	0,95	2,3
500	1,15	2,8

Tabela de erros para termorresistência tipo PT100 DIN/IEC 751

Tabela 8F

Os sensores de termorresistências também podem ser encontrados com outras faixas de resistência, por exemplo “PT 50” ou “PT 1000”, que representa um dispositivo com termorresistência de platina (PT) que, quando submetido a zero grau apresenta uma resistência de 50 Ω , o mesmo se aplica ao PT1000, que corresponde a 1000 Ω quando submetido a zero grau Celsius, no entanto não são muito comuns em meios industriais.



Os dispositivos construídos a base de níquel ou cobre também possuem as mesmas características de ligação e faixas de erro, entretanto o cobre possui uma escala diferente entre resistividade e temperatura. A tabela abaixo exemplifica os três tipos.

Platina	100 Ω a 0 °C
Cobre	10 Ω a 25 °C
Níquel	100 Ω a 0 °C

8.2. Aplicações em Processos Industriais

Na maioria das aplicações industriais em que se necessita controlar ou monitorar temperaturas são utilizados sensores do tipo termopar ou termoresistência, ligados a controladores universais, indicadores analógicos ou digitais, mas atualmente, com o advento dos CLPs o usuário pode praticamente desenvolver sua própria lógica de controle e ligar os sensores diretamente em módulos específicos, que podem ser configurados para receber uma grande faixa de sinais e tipos diferentes de termopares ou termorresistências.

Para que o usuário possa obter o máximo de rendimento de seu sistema com um mínimo erro e uma boa precisão, deve se preocupar com alguns detalhes que geralmente passam despercebidos pela maioria dos profissionais com pouca experiência e que, se levados em consideração, podem evitar situações de falhas ou imprecisão na aquisição dos dados de temperatura em “chão de fábrica”. A seguir estão descritas algumas dicas para instalação adequada desses dispositivos.

- Nunca conduza a fiação de interligação do sensor junto com fiações de potência de motores ou outros dispositivos da instalação. Se possível construa tubulação ou eletrocalhas exclusivas para instrumentação e potência.
- Se a instalação do sensor estiver próxima à fiação elétrica de motores acionados por inversores de frequência, tome cuidado: o princípio de funcionamento dos inversores baseia-se em chaveamento do tipo PWM, que, em níveis elevados, geram “ruídos elétricos” na instalação e interferem fortemente em instrumentos de medição e controle.
- Sempre utilize fiação blindada e aterrada para conexão do sensor ao medidor / controlador. Se estiver utilizando sensores do tipo termopar e a distância ultrapassar 10 metros, utilize condutores de compensação para conexão do sensor ao medidor / controlador.
- Para obter vida útil e exatidão na leitura da temperatura, a maioria dos termopares em aplicação industrial são protegidos de danos físicos,



corrosão e contaminação por tubos de proteção metálicos ou cerâmicos. Os tubos metálicos são geralmente usados com termopares básicos e selecionados para ajustar-se à temperatura, pressão e atmosfera. Os tubos cerâmicos são usados em aplicações em que a contaminação de ambientes hostis e a ação constante de concentrados, choque direto de chama são fatores primordiais e condições que usualmente também excedem a temperatura do ponto de fusão de metais comuns.

- Para todos os tipos de sensores, seja termopares seja termorresistências, devemos evitar ao máximo realizar emendas na fiação de ligação. Como a ordem de grandeza dos sinais elétricos que trafegam na rede está na faixa de milivolts, qualquer pequena resistência adicional pode causar erros ou imprecisões nas leituras. Se for necessária a realização de emendas, certifique-se de que sejam bem elaboradas e protegidas de umidade, poeiras ou agentes em suspensão no ambiente.

São dicas simples e ações fáceis de se realizar que auxiliarão o profissional a obter o máximo de exatidão em seu projeto de instrumentação e controle de temperatura industrial.

8.3. Interface de Sensores de Temperatura com o CLP

Atualmente, com o avanço da automação e a popularização dos controladores lógicos programáveis, a utilização de CLPs em sistemas que controlam ou monitoram temperaturas não é mais tão rara como há alguns anos. Hoje existem vários fabricantes de CLPs que produzem módulos capazes de realizar leituras de diversos tipos de sensores e disponibilizar os valores lidos diretamente nos registradores internos do programa. Assim o programador pode utilizar os dados diretamente em rotinas de controle ou em IHMs para visualização do usuário, ou seja, o programador pode literalmente construir um controlador universal dentro do CLP, utilizando os princípios básicos do controle abordados no capítulo 7 deste material e utilizando os recursos matemáticos disponíveis no programa do CLP.

Existem duas maneiras de se conectar um sensor de temperatura a um CLP: a primeira, vista anteriormente, é a instalação de um módulo de entradas analógicas específica para sensores do tipo termopar ou RTD / resistivo. Muitos fabricantes disponibilizam esses módulos em seus produtos, integrados no caso de CLPs singelos ou em módulos adicionais, para CLPs modulares, ambos os casos trazem a facilidade da leitura da temperatura diretamente na escala desejada, ou seja, o usuário configura o tipo de sensor para a entrada correspondente e o próprio módulo se encarrega de manipular o sinal elétrico, compensar a junta de referência [no caso de termopares] e fazer a correlação entre os sinais de mV em temperatura, assim o valor lido do sensor é disponibilizado diretamente nos registradores internos na escala especificada, graus Celsius ou graus Fahrenheit.

Outra maneira de se conectar um sensor de temperatura a um CLP é pela utilização de um transdutor de sinal. Esses transdutores recebem o sinal



proveniente dos sensores e convertem em sinais analógicos padrão, geralmente sinais de corrente que variam de 0/4ma a 20 ma, assim o usuário pode utilizar entradas analógicas padrão que, na maioria dos CLPs é disponibilizada de forma standard, evitando o custo de aquisição de um módulo específico para sensores de temperatura, que na maioria das aplicações têm um custo elevado.

Para que o usuário utilize transdutores de sinal para conectar sensores de temperatura a uma entrada analógica padrão, é necessário observar alguns detalhes no projeto para que a leitura esteja correta. Nesse caso o sinal não é tratado pelo módulo de entrada, o programador encontrará os dados da entrada analógica de forma binária [ou em hexadecimal], ou seja, na resolução da entrada utilizada, se a entrada analógica possuir uma resolução de 10 bits os valores possíveis vão de 0 a 1023, ou se a resolução da entrada for de 16 bits os valores podem ser de 0 a 65535, e assim por diante, lembrando que a relação entre a quantidade de bits e as combinações possíveis é representada pela equação:

$$2^{\text{número de bits}} = \text{Resolução}$$

$$2^{10} = 1024 \text{ [0 a 1023 combinações]}$$

$$2^{16} = 65536 \text{ [0 a 65535 combinações]}$$

Nesses casos os transdutores são fornecidos calibrados para uma escala conhecida de temperatura, por exemplo, um transdutor de sensores RTD/PT100 com saída em loop de corrente 4 a 20 ma calibrado para 200 °C, indica que, ao conectarmos o sensor de termorresistência ao transdutor, este apresentará na saída um sinal correspondente a de 4 ma para 0°C e 20 ma para 200°C.

Assim, ao ligarmos esse transdutor em uma entrada analógica padrão de corrente de 4 a 20 ma em um CLP com resolução de 10 bits, obtemos no registrador correspondente um valor numérico que equivale a 0 para uma temperatura de 0°C e 1023 para uma temperatura correspondente a 200 °C, valores intermediários de temperatura seguem uma proporção linear entre 0 a 1023. Dessa forma podemos elaborar, com auxílio das ferramentas matemáticas de programação do CLP, uma fórmula simples para transformação do valor numérico da entrada analógica para seu correspondente de temperatura. Essa fórmula pode ser representada por uma regra de três simples, acompanhe:

Para 0 °C sabemos que o valor numérico é “0”
Para 200 °C sabemos que o valor numérico é “1023”
Para “X °C” o valor correspondente numérico é “Y”

$$\frac{200}{X} = \frac{1023}{Y} \quad \therefore 1023 \cdot X = 200 \cdot Y \quad \therefore Y = \frac{1023 \cdot X}{200}$$



Exemplo: Qual o valor numérico para temperatura correspondente a 35 °C para uma entrada analógica com resolução de 10 bits e transdutor calibrado para 200 °C?

$$\frac{200}{35} = \frac{1023}{Y} \quad \therefore 1023 \cdot 35 = 200 \cdot Y \quad \therefore Y = \frac{35805}{200} \cong 179$$

Então, quando a temperatura no sensor estiver a 35 °C, o valor no registrador interno será de aproximadamente 179.

Exemplo: Tomando por base o exemplo anterior, qual o valor de temperatura ao qual o sensor está submetido se o valor do registrador interno do CLP marcar 850?

$$\frac{200}{X} = \frac{1023}{850} \quad \therefore 1023 \cdot X = 200 \cdot 850 \quad \therefore X = \frac{170000}{1023} \cong 166 \text{ °C}$$

Note que o usuário, utilizando-se somente das operações de multiplicação [MUL] e divisão [DIV] disponíveis dentre as funções de um CLP, pode facilmente criar uma rotina de conversão dos valores de uma entrada analógica para qualquer escala definida. Alguns CLPs já possuem essa funcionalidade incorporada em seus blocos de função no programa, verifique a disponibilidade dessa facilidade na documentação do software de programação do CLP utilizado.

8.4. Interface de Sensores de Temperatura com os Controladores Universais

Os controladores universais são os dispositivos mais comuns utilizados para controle de temperatura e, por consequência, são projetados para serem capazes de realizar leituras da grande maioria dos modelos de termopares e termorresistências, além de trazerem também a possibilidade de realizar leituras de sinais analógicos padrões de corrente e tensão. Dessa forma o dispositivo é definido literalmente como um controle universal, pois, em qualquer que seja o sinal definido para entrada, o dispositivo é capaz de calcular um erro ou desvio e gerar uma saída de controle proporcional para o processo. Abaixo é demonstrado um diagrama típico de ligação de um controlador universal.



Controlador Universal Básico / Modelo

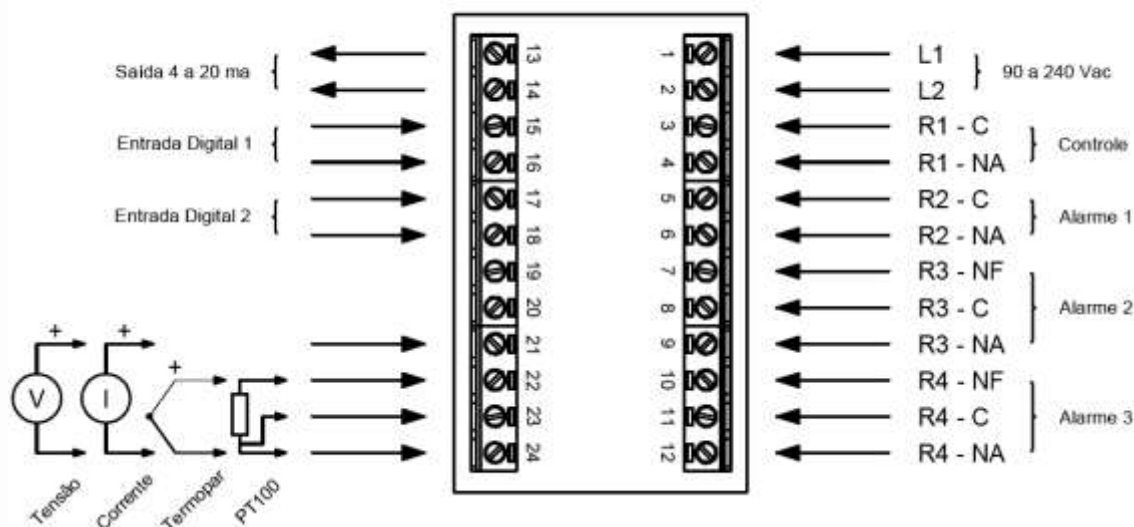


Figura 8.6

Na figura 8.6 podemos identificar um modelo básico de controlador universal, no qual notamos à direita por intermédio dos bornes 1 e 2 o ponto de ligação de energia elétrica, geralmente na ordem de 220Vca ou com escala automática que varia entre 90 a 240 Vca, modelos com tensões em 24 Vcc também são encontrados com facilidade.

Os bornes numerados de 3 até 12 estão exemplificando as saídas a relé do dispositivo, que são utilizadas para o controle no modo ON – OFF e para sinalização de alarme, os controladores mais comuns geralmente dispõem de duas ou três saídas a relé que podem ser configuradas para várias aplicações e situações de alarme, como falha de sensor aberto, por exemplo.

Os bornes 21, 22, 23 e 24 são destinados para ligação dos vários tipos de sensores existentes, bem como os sinais analógicos padrões de corrente e tensão. No ato de ligação o usuário deverá configurar o tipo de sensor que estará utilizando. No caso de sensores de temperatura, a escala é definida automaticamente de acordo com o mapa de F.E.M X temperatura do sensor. Para entradas analógicas o usuário pode indicar os valores de mínimo e máximo para escala. Desse modo o dispositivo se encarrega de linearizar o sinal da entrada de acordo com os valores estipulados.

Os bornes 13 e 14 exemplificam a saída de controle proporcional. Na maioria dos controladores, o sinal padrão é de loop de corrente na ordem de 4 a 20 ma, mas existem controladores que disponibilizam sinais de tensão na ordem de 0/2 a 10 Vcc. Essa saída é operada juntamente com o relé de controle do modo ON - OFF, ou seja, o sinal calculado para a correção da variável de processo que é aplicado no relé de controle também será aplicado nessa saída, porém de modo proporcional.

Alguns controladores também dispõem de entradas digitais que podem ser programadas para várias funcionalidades do dispositivo. No exemplo ilustramos os bornes 15 / 16 e 17 / 18. Essas entradas, quando colocadas em nível 1, por exemplo, podem inibir a ação do instrumento ou colocar o controle



no modo manual. São muito úteis quando é necessário gerenciar o dispositivo remotamente.

OBS: O exemplo, ilustra um controlador hipotético, a identificação dos bornes serve somente como referência ao exemplo, verifique a documentação de instalação do controlador antes da instalação.

