

Termopares - Um Tutorial

José Alexandre de França

Relatório de disciplina submetido à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II como parte dos requisitos necessários para conclusão da disciplina Instrumentação Eletrônica

Área de Concentração: Processamento da Informação

Raimundo Carlos Silvério Freire, Dr.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©José Alexandre de França, Agosto de 1997

Termopares - Um Tutorial

José Alexandre de França

Relatório de disciplina apresentado em Agosto de 1997

Raimundo Carlos Silvério Freire, Dr.
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil, Agosto de 1997

Resumo

Neste trabalho apresenta-se os conceitos básicos da medição de temperatura utilizado termopares. São apresentados os principais conceitos relacionados à este tipo de sensor, algumas técnicas de medição, além de alguns circuitos que podem ser utilizados em conjunto com tal sensor.

Sumário

Resumo	iii
Lista de Figuras	v
1 Fundamentos Teóricos	6
1.1 Termopares	6
1.2 Medindo Temperatura com Termopares	7
1.3 Compensação da Junção Fria	7
1.4 Compensação por <i>Hardware</i>	10
1.5 Compensação por <i>Software</i>	10
1.6 Procedimento I - Método da Adição Direta da Tensão	11
1.7 Procedimento II - Método da Adição da Temperatura	11
1.8 Linearização dos dados	13
2 Circuitos Relacionados	15
2.1 Transdutores de Temperatura	15
2.2 Circuito Condicionador	17
3 Conclusão	19

Lista de Figuras

1.1	Características dos principais termopares existentes.	7
1.2	Termopar tipo-J.	7
1.3	Medição tradicional de temperatura com a junção de referência a $0^{\circ}C$	8
1.4	Lei do metal intermediário.	9
1.5	Um condutor extra foi inserido em uma região isoterma.	9
1.6	Coefficientes do polinômio para uma conversão tensão-para-temperatura ($T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_nv^n$).	12
1.7	Coefficientes do polinômio para uma conversão temperatura-para-tensão ($v = c_0 + c_1T + c_2T^2 + \dots + c_nT^n$).	14
2.1	Circuito de compensação da junção fria de termopares baseado no CI LM 335.	15
2.2	Esquema em ponte para compensação automática da junção fria de termopares.	16
2.3	Circuito de compensação da junção fria de termopares utilizado no projeto de medição de temperatura.	16
2.4	Característica do circuito utilizado para compensação da junção fria de termopares.	17
2.5	Circuito para amplificação das tensões geradas por termopares baseado no CI LM725.	18

Capítulo 1

Fundamentos Teóricos

1.1 Termopares

Os termopares são um dos sensores de temperatura mais usados, principalmente pelo seu baixo custo e larga faixa de operação [1]. Um termopar surge sempre que dois metais diferentes são unidos por uma de suas extremidades. Neste caso, surge nos terminais do termopar (formados pelas extremidades livres dos dois metais) uma tensão de circuito aberto (V_S) proporcional à temperatura na junção do termopar (T_{TC}). Esta tensão é chamada de *Tensão de Seebeck*, devido ao seu descobridor Thomas Seebeck.

A relação entre T_{TC} e V_S é dada pela Equação 1.1

$$\Delta V_S = S(T_{TC})T_{TC}. \quad (1.1)$$

Na qual, $S(T_{TC})$ é o *Coefficiente de Seebeck* que depende do tipo de termopar e é função da temperatura T_{TC} . A dependência de S com a temperatura provoca uma certa não-linearidade na característica tensão vs temperatura do termopar. Contudo, para uma "pequena" faixa de temperatura, a Equação 1.1 pode ser aproximada por

$$\Delta V_S = S \times T_{TC}. \quad (1.2)$$

Na qual, S é uma constante que depende do tipo do termopar.

Vários tipos de termopares estão disponíveis comercialmente. Cada tipo, que depende dos metais envolvidos na sua confecção, é designado por uma letra maiúscula de acordo com o *American National Standards Institute* (ANSI). Por exemplo, um termopar tipo-T é constituído por um fio de ferro e outro de constantan (uma liga de cobre e níquel). Na Figura 1.1, apresenta-se uma tabela com algumas informações sobre os principais tipos de termopares [2].

Thermocouple Type	Conductor		Temperature Range (°C)	Voltage Range (mV)	Seebeck Coefficient (µV/°C)
	Positive	Negative			
E	Chromel	Constantan	-270° to 1,000°	-9.835 to 76.358	58.70 at 0° C
J	Iron	Constantan	-210° to 1,200°	-8.096 to 69.536	50.37 at 0° C
K	Chromel	Alumel	-270° to 1,372°	-6.548 to 54.874	39.48 at 0° C
T	Copper	Constantan	-270° to 400°	-6.258 to 20.869	38.74 at 0° C
S	Platinum-10% Rhodium	Platinum	-50° to 1,768°	-0.236 to 18.698	10.19 at 600° C
R	Platinum-13% Rhodium	Platinum	-50° to 1,768°	-0.226 to 21.108	11.35 at 600° C

Figura 1.1: Características dos principais termopares existentes.

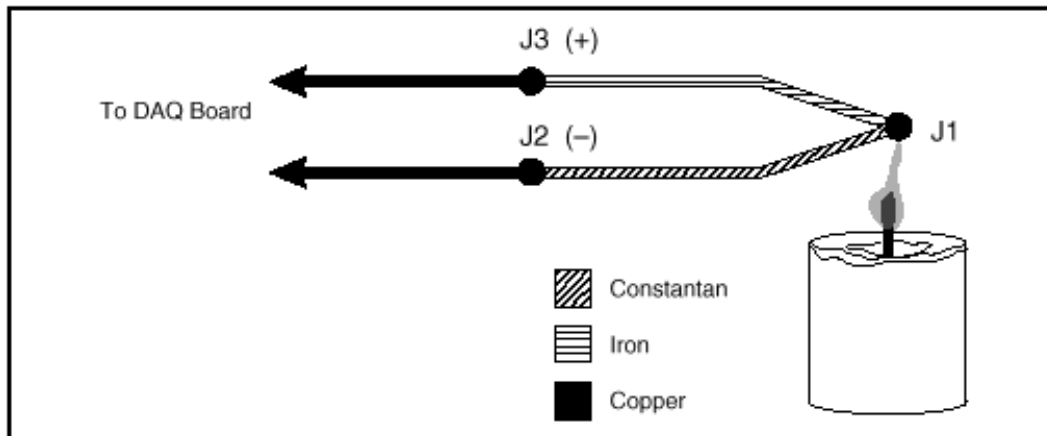


Figura 1.2: Termopar tipo-J.

1.2 Medindo Temperatura com Termopares

Considere o circuito da Figura 1.2, no qual um termopar tipo-J está sobre a chama de uma vela, cuja a temperatura deseja-se medir. As duas extremidades do termopar são conectadas ao sistema de medição. Note que o circuito tem três junções de metais diferentes J1, J2 e J3. Por isso, para medir-se a *Tensão de Seebeck* do termopar, não se pode simplesmente conectar o termopar ao sistema de medição, pois nas junções J2 e J3, Figura 1.2, surgem termopares espúrios. A junção J1 gera uma *Tensão de Seebeck* proporcional a temperatura da chama da vela. Cada uma das junções J2 e J3 gera sua própria tensão termoelétrica proporcional à tensão nos terminais do termopar. Logo, para determinar-se a contribuição de tensão de J1, é necessário conhecer a tensão nas junções J2 e J3, assim como a relação tensão vs temperatura de cada uma delas.

1.3 Compensação da Junção Fria

O uso de termopares para medição de temperatura requer alguma compensação para os termopares parasitas. Esta compensação é feita inserido-se mais uma junção no

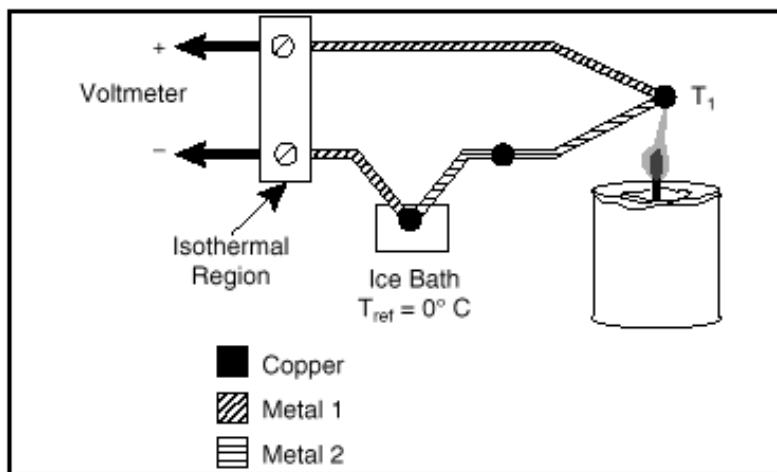


Figura 1.3: Medição tradicional de temperatura com a junção de referência a $0^\circ C$.

termopar, de tal forma que as junções do termopar sejam iguais duas a duas (Figura 1.3) [3]. Desse modo, as junções J2 e J3 (Figura 1.3) são iguais e suas contribuições anulam-se, porém as junções J1 e J4 (apesar de serem iguais) não se anulam, pois estão em temperaturas diferentes. Contudo, a característica tensão vs temperatura de J4 é conhecida, tornando mais fácil a compensação.

O termo junção fria vem da tradicional técnica de manter a junção de referência (J4, Figura 1.3) a $0^\circ C$, em um depósito com gelo; neste caso, T_{ref} é $0^\circ C$. Sobre estas condições, se a temperatura medida está acima de $0^\circ C$, o termopar tem uma tensão positiva, caso contrário, a saída é negativa [3]. As tabelas de referência para termopares são criadas usando-se este esquema [2].

A compensação através de um depósito de gelo é bastante exata, porém nem sempre é prática. Uma abordagem mais prática é medir-se a temperatura de referência (T_{ref} , Figura 1.3) com um sensor de temperatura qualquer e subtrair a contribuição da tensão termoelétrica parasita. Este processo é chamado de *compensação da junção fria*. Pode-se simplificar o processo de compensação tirando vantagem de algumas características dos termopares.

Usando-se a *Lei do Metal Intermediário* e fazendo algumas considerações, pode-se notar que a tensão medida depende somente do tipo do termopar, da *Tensão de Seebeck*, e da temperatura na *junção fria* [4]. A tensão medida é de fato independente da composição da ponta de prova e da junção fria [5].

De acordo com a *Lei do Metal Intermediário*, ilustrada na Figura 1.4, *não produz nenhum efeito inserir-se um fio de algum tipo de metal no circuito do termopar, caso o metal intermediário esteja em uma região isotérmica* [2].

Considere o circuito na Figura 1.5. Este circuito é similar ao da Figura 1.2, mas um

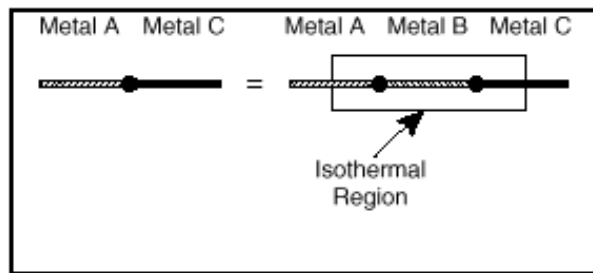


Figura 1.4: Lei do metal intermediário.

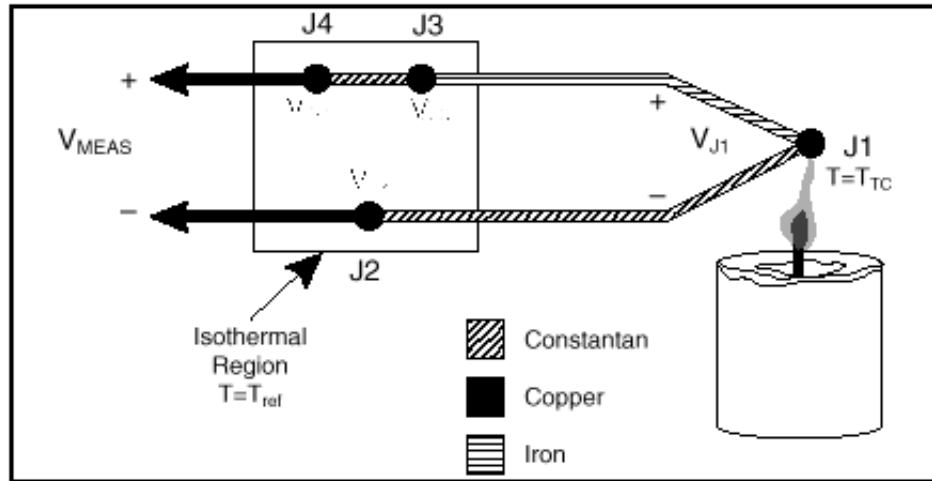


Figura 1.5: Um condutor extra foi inserido em uma região isotermica.

Um fio curto de constantan foi inserido antes da junção J3 (Figura 1.2). Assumindo que a junção J3 e J4 estão na mesma temperatura, a *Lei do Metal Intermediário* indica que o circuito da Figura 1.5 é eletricamente equivalente ao circuito da Figura 1.2. Conseqüentemente, alguma conclusão chegada sobre o circuito da Figura 1.5 também aplica-se ao da Figura 1.2 [2].

Na Figura 1.5, as junções J2 e J4 são do mesmo tipo de metal (cobre-constantan), pois ambos estão em uma região isotérmica. As junções ocorrem em direções opostas, portanto, sua contribuição na tensão medida é zero. As junções J1 e J3 são ambas de ferro-constantan e também ocorrem em direções opostas, mas estão em temperaturas diferentes. Portanto, as junções J1 e J3 são as únicas junções que contribuem para a tensão medida.

Usando a notação $V_{J_x}(T_y)$ para indicar a tensão gerada pela junção J_x à temperatura T_y , o problema da junção fria do termopar resume-se a Equação 1.3

$$V_{MEAS} = V_{J1}(T_{TC}) + V_{J3}(T_{ref}). \quad (1.3)$$

Na qual, V_{MEAS} é a tensão medida, T_{TC} é a temperatura do termopar na junção J1, e

T_{ref} é a temperatura da junção de referência.

Devido a junção J3 ser do mesmo tipo da junção J1, porém em sentido contrário, $V_{J3}(T_{ref}) = -V_{J1}(T_{ref})$. Chamando J1 de TC , tem-se que a Equação 1.3 pode ser reescrita como

$$V_{MEAS} = V_{TC}(T_{TC}) - V_{TC}(T_{ref}). \quad (1.4)$$

Logo, medindo-se V_{MEAS} e T_{ref} , e conhecendo a característica tensão vs temperatura do termopar, pode-se determinar a temperatura na junção TC .

Existem duas técnicas para implementar-se a compensação da junção fria dos termopares: a compensação por *hardware* e a por *software*. Ambas as técnicas requerem que a temperatura da junção de referência seja "sentida" por um sensor. Sensores semicondutores, termistores, ou RTD's são comumente usados para este fim.

1.4 Compensação por *Hardware*

Com a compensação por *hardware*, uma fonte de tensão variável é inserida no circuito para cancelar a tensão termoelétrica parasita. A fonte de tensão variável gera uma tensão de compensação de acordo com a temperatura ambiente, e então, esta tensão pode ser adicionada a V_{MEAS} para cancelar os sinais espúrios. Quando estes sinais parasitas são cancelados, o único sinal que o sistema de medição registra é tensão da junção do termopar, T_{TC} . A maior desvantagem da compensação por *hardware* é que cada tipo de termopar precisa ter um circuito de compensação separado que adiciona a tensão de compensação correta, o que torna o sistema caro. Além disso, a compensação por *hardware* é geralmente menos exata que a compensação por *software* [6].

1.5 Compensação por *Software*

Alternativamente, pode-se usar programação para compensar a junção fria. Após uma leitura no sensor de temperatura, um programa pode adicionar o valor de tensão apropriado para eliminar os efeitos dos termopares parasitas.

Dado a tensão V_{MEAS} e a temperatura T_{ref} , existem dois meios de determinar-se a temperatura T_{TC} . O primeiro método é mais preciso, mas o segundo requer menos passos computacionais.

1.6 Procedimento I - Método da Adição Direta da Tensão

O método mais exato usa dois passos de conversão tensão-para-temperatura. Da Equação 1.4, pode-se notar a verdadeira tensão de circuito aberto que o termopar produz quando a tensão de referência está a $0^{\circ}C$, como mostra a Equação 1.5

$$V_{TC}(T_{TC}) = V_{MEAS} + V_{TC}(T_{ref}). \quad (1.5)$$

Logo, este método requer os seguintes passos [2]:

1. Mede-se a temperatura da junção de referência, T_{ref} ;
2. Converte-se esta temperatura em uma tensão compatível com o tipo de termopar sob teste, $V_{TC}(T_{ref})$. Para isto, pode-se usar uma tabela como a apresentada na Figura 1.6;
3. Adiciona-se esta tensão a tensão medida, V_{MEAS} , para obter-se a verdadeira tensão de circuito aberto que o termopar produziria com a junção de referência a $0^{\circ}C$, $V_{TC}(T_{TC})$, e;
4. Converte-se a tensão resultante em uma temperatura; esta temperatura é a temperatura do termopar, T_{TC} .

Este método requer uma conversão da temperatura da junção na tensão do termopar seguida por uma conversão da nova tensão em temperatura. Cada uma dessas conversões requer a computação de um polinômio ou uma consulta a uma tabela. Contudo, este é mais exato que o método seguinte.

1.7 Procedimento II - Método da Adição da Temperatura

Uma segunda abordagem é fazer uso do fato que a tensão de saída do termopar é aproximadamente linear para pequenos desvios na temperatura. Portanto, para pequenos desvios, pode-se usar a Equação 1.6

$$V_{TC}(T_1) - V_{TC}(T_2) = V_{TC}(T_1 - T_2) \quad (1.6)$$

	Thermocouple Type					
	E	J	K	R	S	T
Range	0° to 1,000 °C	0° to 760 °C	0° to 500 °C	-50° to 250 °C	-50° to 250 °C	0° to 400 °C
a ₀	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
a ₁	1.7057035E -2	1.978425E -2	2.508355E -2	1.8891380 E-1	1.84949460E -1	2.592800E -2
a ₂	-2.3301759E -7	-2.001204E -7	7.860106E -8	-9.3835290E -5	-8.00504062E -5	-7.602961E -7
a ₃	6.5435585E -12	1.036969E -11	-2.503131E -10	1.3068619E -7	1.02237430E -7	4.637791E -11
a ₄	-7.3562749E -17	-2.549687E -16	8.315270E -14	-2.2703580E -10	-1.52248592E -10	-2.165394E -15
a ₅	-1.7896001E -21	3.585153E -21	-1.228034E -17	3.5145659E -13	1.88821343E -13	6.048144E -20
a ₆	8.4036165E -26	-5.344285E -26	9.804036E -22	-3.8953900E -16	-1.59085941E -16	-7.293422E -25
a ₇	-1.3735879E -30	5.099890E -31	-4.413030E -26	2.8239471E -19	8.23027880E -20	
a ₈	1.0629823E -35		1.057734E -30	-1.2607281E -22	-2.34181944E -23	
a ₉	-3.2447087E -41		-1.052755E -35	3.1353611E -26	2.79786260E -27	
a ₁₀				-3.3187769E -30		
Error	±0.02° C	±0.05° C	±0.05° C	±0.02° C	±0.02° C	±0.03° C

Figura 1.6: Coeficientes do polinômio para uma conversão tensão-para-temperatura ($T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_nv^n$).

Esta consideração é verdadeira se T_1 é muito próxima de T_2 , pois a curva tensão vs temperatura do termopar é aproximadamente linear para pequenos desvios de temperatura. Assumindo que a temperatura do termopar é próxima da temperatura de referência, pode-se reescrever a Equação 1.4 da forma

$$V_{MEAS} = V_{TC}(T_{TC} - T_{ref}) \quad (1.7)$$

Esta equação sugere o seguinte método [2]:

1. Mede-se a temperatura na junção de referência, T_{ref} ;
2. Converte-se a tensão medida, V_{MEAS} , em uma temperatura usando a relação tensão-temperatura do termopar. Esta temperatura é aproximadamente $T_{TC} - T_{ref}$; e;
3. Adiciona-se a temperatura da junção de referência, T_{ref} , a este valor. O resultado é a temperatura do termopar.

Este método elimina um passo de computação, porém é menos exato que o primeiro.

1.8 Linearização dos dados

A tensão de saída dos termopares é altamente não-linear. O *Coefficiente de Seebeck* pode variar por um fator de três ou mais sob a faixa de operação de alguns termopares [1]. Por esta razão, é necessário aproximar-se a curva tensão vs temperatura dos termopares por polinômios ou usando-se uma tabela. Estes polinômios têm a seguinte forma

$$T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_nv^n \quad (1.8)$$

Na qual, v é a tensão do termopar em volts, T é a temperatura em graus Celsius, e a_0 até a_n são coeficientes que são específicos de cada tipo de termopar. A Figura 1.6 lista os coeficientes para vários tipos de termopares sobre sua faixa de atuação [2]. Os erros listados na Figura 1.6 aplicam-se apenas ao cálculo dos polinômios, e não levam em consideração erros introduzidos durante as medições.

Voltando ao Procedimento I (Seção 1.6), este também requer um passo de conversão temperatura-para-tensão para converter a temperatura da junção de referência na tensão equivalente para um determinado tipo de termopar. Novamente, pode-se usar uma tabela ou aproximar a curva por um polinômio da forma

$$v = c_0 + c_1T + c_2T^2 + \dots + c_nT^n \quad (1.9)$$

Na qual, c_0 até c_n são os coeficientes que são específicos para cada tipo de termopar. A Figura 1.7 lista os coeficientes da Equação 1.9 para vários tipos de termopares [2].

	Thermocouple Type					
	E	J	K	R	S	T
Range	0° to 1,000 °C	-210° to 760 °C	0° to 1372°C	-50° to 1,064 °C	-50° to 1,064 °C	0° to 400 °C
c_0	0.0	0.0	-17.600413686	0.0	0.0	0.0
c_1	58.665508710	50.38118782	38.921204975	5.28961729765	5.40313308631	38.748106364
c_2	4.503227558E -2	3.047583693E -2	1.85587700E -2	1.3916658978E -2	1.2593428974E -2	3.32922279E -2
c_3	2.890840721E -5	-8.56810657E -5	-9.9457593E -5	-2.388556930E -5	-2.324779687E -5	2.06182434E -4
c_4	-3.30568967E -7	1.322819530E -7	3.18409457E -7	3.5691600106E -8	3.2202882304E -8	-2.18822568E -6
c_5	6.50244033E -10	-1.7052958E -10	-5.607284E -10	-4.62347666E -11	-3.314651964 -11	1.09968809E -8
c_6	-1.9197496E -13	2.09480907E -13	5.6075059E -13	5.007774410E -14	2.557442518E -14	-3.0815759E -11
c_7	-1.2536600E -15	-1.2538395E -16	-3.202072E -16	-3.73105886E -17	-1.25068871E -17	4.54791353E -14
c_8	2.14892176E -18	1.56317257E -20	9.7151147E -20	1.577164824E -20	2.714431761E -21	-2.7512902E -17
c_9	-1.4388042E -21		-1.210472E -23	-2.81038625E -24		
c_{10}	3.59608995E -25		NOTE A			

Figura 1.7: Coeficientes do polinômio para uma conversão temperatura-para-tensão ($v = c_0 + c_1T + c_2T^2 + \dots + c_nT^n$).

Capítulo 2

Circuitos Relacionados

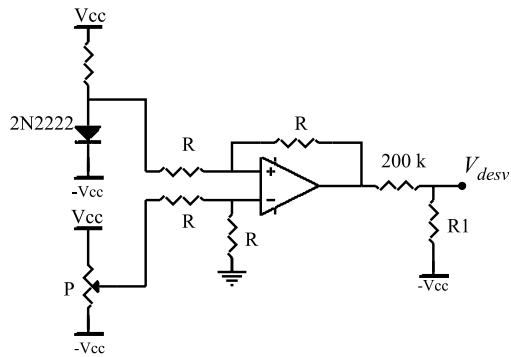
2.1 Transdutores de Temperatura

Tanto na compensação por *hardware* como na por *software*, é necessário o uso de algum transdutor de temperatura para o uso com termopares. Existem vários sensores em circuitos integrados que podem ser usados para esta função, como por exemplo o LM135, o LM235 e o LM335 [3]. Na Figura 2.1 apresenta-se um circuito baseado em um desses sensores e no LM329B que pode ser utilizado para efetuar-se uma compensação da junção fria por *hardware* [7]. No qual, $R3$ e $R4$ têm que ser selecionados de acordo com o tipo de termopar.

Outra alternativa para este tipo de transdutor, é o circuito da Figura 2.2 [1]. Neste circuito um termistor, R_T , é colocado em contato térmico com a junção de referência em T_a graus. Quando $T_a \neq 0^\circ C$, a ponte está desequilibrada, pois $R1 \times R3 \neq R2 \times R_T$. E então, é produzida uma tensão de compensação que pode ser adicionada à tensão do termopar, V_{MEAS} .

Uma solução mais simples é apresentada na Figura 2.3 [8]. Neste caso, é usada a dependência da tensão de condução do diodo com a temperatura. O circuito é baseado no transistor de uso geral o 2N2222 (que foi utilizado como um diodo). O princípio é o mesmo da Figura 2.1, porém, neste caso, usou-se um transistor comum e não um circuito integrado comercial.

Na Figura 2.4 é apresentado a característica *Temperatura* \times *Tensão* do circuito, para $R1 = 3\text{ k}\Omega$, para uma pequena faixa de temperatura [8]. Como pode-se ver, o circuito apresenta uma característica bastante linear.



1. Escolha R1 tal que a variação da tensão na saída do circuito seja igual ao coeficiente de Seebeck, e ;
2. Ajuste P tal que a tensão na saída do circuito seja igual ao coeficiente de Seebeck do termopar vezes a temperatura ambiente.

Figura 2.3: Circuito de compensação da junção fria de termopares utilizado no projeto de medição de temperatura.

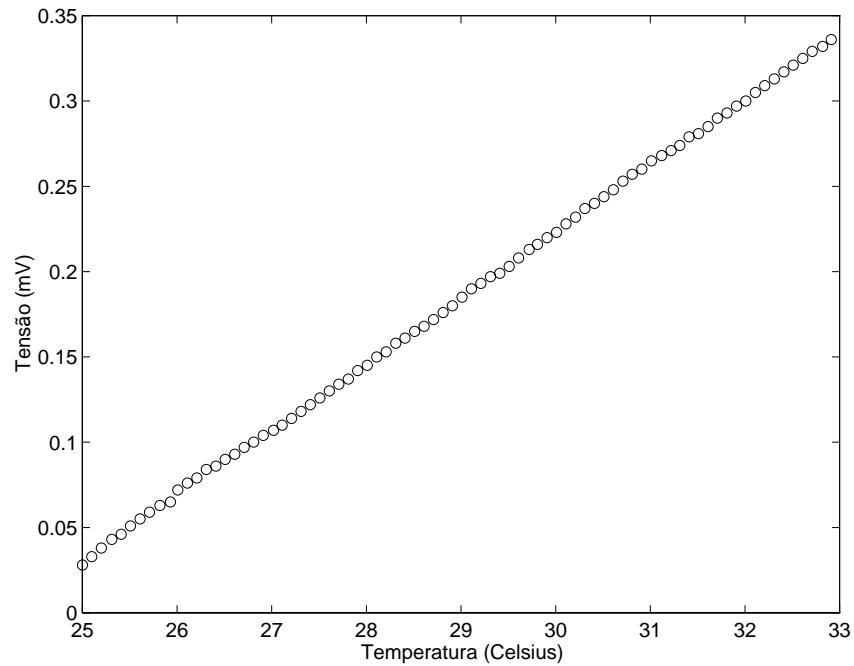


Figura 2.4: Característica do circuito utilizado para compensação da junção fria de termopares.

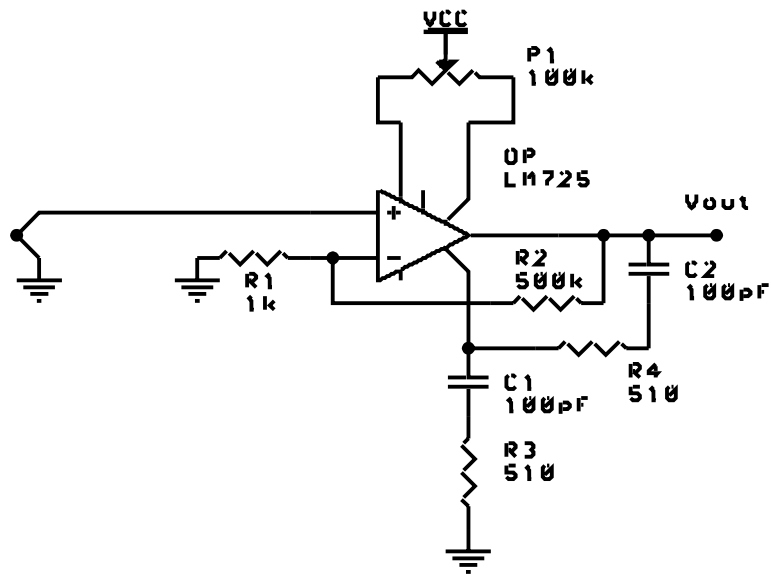


Figura 2.5: Circuito para amplificação das tensões geradas por termopares baseado no CI LM725.

Capítulo 3

Conclusão

O termopar é um dos sensores de temperatura mais usados devido a sua facilidade de uso, baixo custo e faixa de medição. Contudo, para medir-se temperatura com termopares é necessário eliminar a influência de termopares espúrios, através de um processo chamado compensação da junção fria. Esta compensação pode ser feita por *hardware*, porém através de *software* tem-se uma medição mais exata. O sensor de temperatura usado para realizar esta compensação pode ser baseado em sensores como RTD's, termistores ou mesmo CI's como o LM135, o LM235 e o LM335. Já o amplificador utilizado para amplificar o sinal do termopar deve ter um coeficiente de deriva térmica muito baixo, como por exemplo o LM725.

Referências Bibliográficas

- [1] E.O. Doebelin. *Measurement Systems (Application and Design)*. McGRAW-HILL, 1982.
- [2] D. Potter. Measuring temperature with thermocouples - a tutorial. Technical report, National Instruments, 1996.
- [3] K. Lacanette. Temperature sensor handbook. Technical report, National Semiconductor, 1997.
- [4] P.K. Stein. The unified approach to the engineering of measurement systems for test end evaluaton. Technical report, Stein Engineering Services, Inc, 1992.
- [5] National Instruments. *IEEE 488 and VXIbus Control, Data Acquisition, and Analysis*, 1993.
- [6] National Instruments. *Test and Measurement Industrial Automation*, 1997.
- [7] National Semiconductor, Inc. *National Operational Amplifiers Databook*, 1995.
- [8] José Alexandre de França. Sistemas de aquisição de dados baseados em microcontroladores. Master's thesis, Universidade Federal da Paraíba, 1997.