



CIRCUITO DE COMPENSAÇÃO DE JUNÇÃO FRIA PARA TERMOPAR

BRITO, FABIO (1); BARATA, RUI (2); VELEZ, FERNANDO J. (3); REIS, ANTONIO D. (4)

(1) Universidade da Beira Interior, E-mail: fabio.brito@ubi.pt

(2) Universidade da Beira Interior, E-mail: rbarata@ubi.pt

(3) Instituto de Telecomunicações e UBI, E-mail: fjv@ubi.pt

(4) Universidade da Beira Interior, E-mail: adreis@ubi.pt

RESUMO

Este documento tem como objetivo testar a efetividade prática de um circuito de condicionamento de sinal de um sensor de temperatura, nomeadamente um termopar. Antes de adquirir o sinal de um sensor para digitalização, um dos requisitos no condicionamento de sinal, consiste na implementação de um circuito de compensação de junção fria, para a obtenção mais precisa do valor de tensão obtido. O termopar permite medir a temperatura através da diferença de potencial entre dois metais distintos. Com base neste contexto, outra tensão é gerada na conexão entre o termopar e o terminal do dispositivo de aquisição de sinal. O circuito de compensação de junção fria melhora a medição ao providenciar a temperatura nesta junção e aplica a correção necessária. Inicialmente procedeu-se ao estudo de circuitos de compensação de junção fria para dispositivos de aquisição de sinais. O circuito de compensação de junção fria do termopar depende do tipo de termopar que se pretende utilizar. A calibração do circuito, graças à utilização de potenciômetros, permite ajustar a tensão de referência do circuito de compensação de junção fria e assim obter valores muito próximos aos valores de referência da tabela do termopar. A diminuição e o aumento significativo de temperatura no sensor, permitiu analisar o comportamento do circuito de compensação de junção fria e verificar que os valores obtidos eram consistentes e coerentes com os valores de referência da tabela do termopar. Além disso, permitiu saber aproximadamente qual a temperatura da fonte de calor utilizada.

Palavras-chave: Termopar, Aquisição de Sinais, Circuito de Compensação de Junção Fria.

ABSTRACT

This document aims to test the practical effectiveness of a signal conditioning circuit for a temperature sensor, namely a thermocouple. Before acquiring the signal from the sensor for digitization, one of the signal conditioning requirements consists of implementing a cold junction compensation circuit, to obtain a more accurate voltage value. The thermocouple allows temperature to be measured through the potential difference between two different metals. Based on this context, another voltage is generated in the connection between the thermocouple and the signal acquisition device terminal. The cold junction compensation circuit improves the measurement by taking the temperature at this junction and applying the necessary correction. Initially, the study of cold junction compensation circuits for signal acquisition devices was carried out. The thermocouple cold junction compensation circuit depends on the type of thermocouple to be used. Calibrating the circuit, thanks to the use of potentiometers, allows adjusting the reference voltage of the cold junction compensation circuit and thus obtaining values very close to the reference values in the thermocouple table. The significant decrease and increase in temperature in the sensor made it possible to analyze the behavior of the cold junction compensation circuit and verify that the values obtained were consistent and coherent with the reference values in the thermocouple table. Furthermore, it allowed us to know approximately the temperature of the heat source used.




Keywords: Thermocouple, Signal Acquisition, Cold Junction Compensation Circuit.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de efetuar medições estruturais ou ambientais encontra amplamente disseminada e desempenha um papel fundamental em diversas áreas da ciência e da engenharia. Diversas aplicações envolvem a medição de temperatura. Essa medição pode ser efetuada por via de diversas técnicas e métodos, mas no caso do uso de sensores de temperatura, a sua utilização requer um condicionamento ao sinal, de maneira a que o equipamento possa facultar dados de uma forma eficaz e com precisão. Condicionar o sinal consiste num dos passos mais importantes num sistema de aquisição de dados, uma vez que sem a correta otimização do sinal analógico, o mundo digital não consegue operar com a devida precisão.

Existe alguns tipos de termopares disponíveis no mercado, no entanto, para este trabalho, optou-se pelo termopar tipo J. A escolha sobre este tipo de termopar teve em conta os seguintes fatores: é o mais barato entre todos os tipos de termopares, a 20 graus C gera uma tensão de saída de 1 mV e possui uma gama de utilização até 760 graus C, o que é aceitável e possuiu bastante utilização em aplicações industriais. Este tipo de sensor é constituído pela união de dois metais distintos, o terminal positivo é constituído por ferro e o terminal negativo é constituído por uma liga de cobre e níquel, designada por Constantan. Deve-se evitar a sua utilização em atmosferas oxidantes e possui uma sensibilidade de aproximadamente 50 mV por grau C. Dependendo da região do globo o termopar tipo J difere na cor do isolante dos metais. Na Tabela 1 é possível observar as diferentes normas usadas para a identificação do termopar, nos EUA a norma ANSI/MC96.1 é a utilizada, sendo que no Japão é a JIS C 1610-1981 segundo [1]:

Tabela 1 – Diferentes combinações de cores dos condutores do termopar tipo J.

Norma	IEC 5843:1989	ANSI/MC96.1	JIS C 1610-1981
Tipo de combinação do condutor - Tipo J			

Dependendo do tipo de sensor a utilizar, as necessidades de condicionamento de sinal mudam bastante, e cada tipo de sensor está normalmente associado a um tipo de condicionamento diferente. Compreender bem o circuito de condicionamento de sinal necessário, de maneira a certificar-se que a medição é precisa, consiste no passo fundamental para ser bem-sucedido [2]. Os termopares geram sinais de tensão muito baixos, logo necessitam de amplificação, filtragem e linearização. Estas tecnologias de preparação consistem em formas de condicionamento de sinal. No âmbito deste trabalho irá ser explorada a tecnologia de compensação de junção fria, utilizada em termopares.

A compensação de junção fria permite obter medições de temperatura precisas do sensor de temperatura mais vulgarmente utilizado, o termopar. A compensação de junção fria aplica uma correção na junção do terminal do termopar com o dispositivo de aquisição de dados, uma vez que esta união, gera outra tensão adicional, para além da tensão gerada entre os dois metais diferentes do termopar. Devido às suas características físicas, este tipo de sensores tem requisitos de condicionamento de sinal muito específicos. A Figura 1 ilustra o somatório de tensões adicionais quando se aplica um termopar num terminal de conexão [3]:

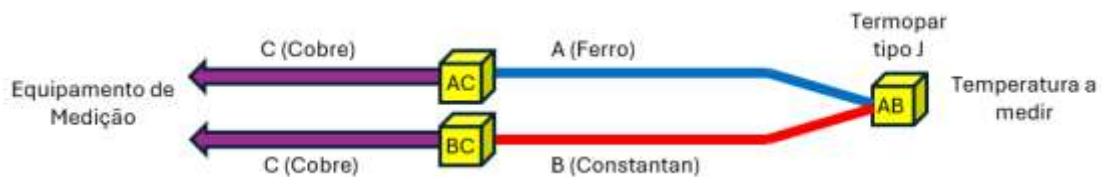


Figura 1 - A junção fria acrescenta um erro à medição do termopar.

Neste caso a medição desejada é AB, no entanto, o que é realmente medido é um somatório de várias tensões, ou seja, $AB+AC+BC$, resultando no erro das junções frias, uma vez que os terminais do equipamento de medição são constituídos por outro material diferente. O erro é eliminado ao subtrair o valor das temperaturas conhecidas em AC e BC ao resultado da medição, com o objetivo de conhecer a verdadeira temperatura em AB, esta técnica é conhecida como a compensação de junção fria. A maioria dos dispositivos de medição que usam termopares integram o referido circuito de compensação.

De salientar que a integração do circuito de compensação de junção (CFJ) fria pode causar erros. Esse erro pode advir do próprio circuito de CJF, pode advir do equipamento que mede a CJF bem como do gradiente entra o circuito de CJF e a junção fria. Uma das formas de mitigar o erro, consiste em colocar o circuito de CJF o mais próximo possível dos terminais onde á conectado o termopar.

No sentido de reduzir os erros no equipamento de medição, dimensionou-se um circuito que possui a capacidade de calibração conforme necessário. Para além disso o terminal de ligação ao dispositivo de medição serve para minimizar erro na junção fria, uma vez que é constituído pelos mesmos materiais que o termopar. Este tipo de conectores evita a necessidade de montar diretamente o sensor, com ajuda de solda, o que ainda iria acrescentar mais fontes de erros. A ligação à terra isola a ligação entre o dispositivo de medição e o termopar melhorando significativamente o ruído, e conseqüentemente outra fonte de erro que afeta a medição [3].

A Figura 2 ilustra o que foi descrito anteriormente num sistema de medição com termopares:

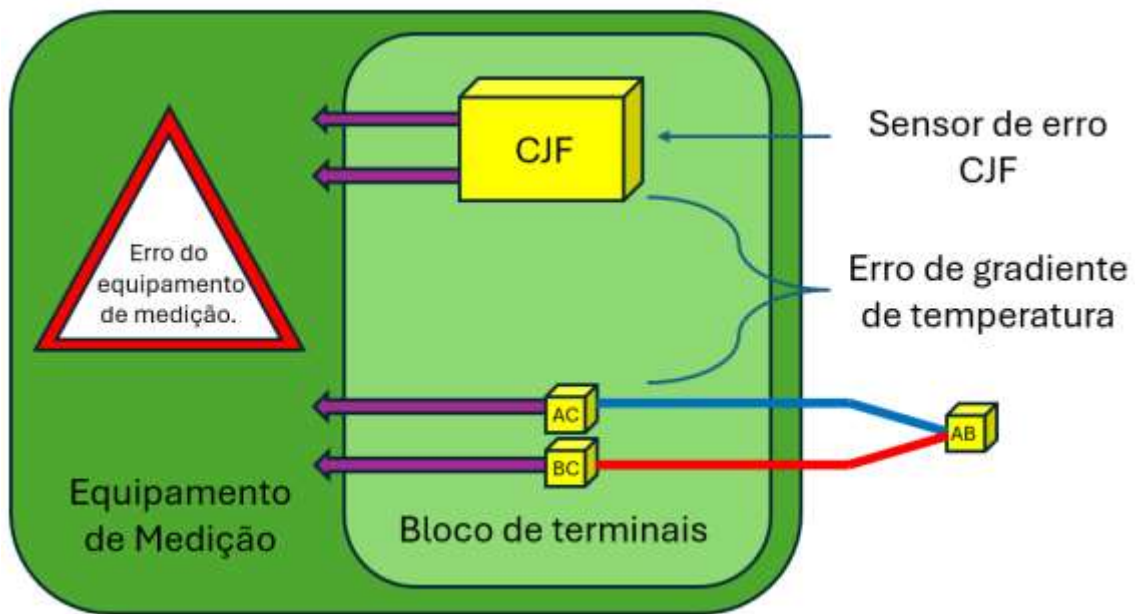


Figura 2 - Sistema de medição com termopares.

O design do circuito de C/JF tem como base o circuito LM335, que consiste num sensor de temperatura de precisão e é bastante útil para o dimensionamento da compensação de junção fria do termopar [4].

2 DESENVOLVIMENTO

Inicialmente procedeu-se ao estudo de circuitos de compensação de junção fria para dispositivos de aquisição de dados. No projeto de dimensionamento do circuito foi utilizado um componente da Texas Instruments para sensores de temperatura de precisão, o LM335 [4]. O circuito de compensação de junção fria do termopar depende do tipo de termopar que se pretende utilizar. Neste trabalho, como referido anteriormente, pretende-se utilizar um termopar do tipo J.

2.1 Dimensionamento do circuito de CJF

No sentido de testar o comportamento deste circuito em ambiente laboratorial, procedeu-se à montagem do circuito em *breadboard* e os respetivos componentes. Alimentou-se a tensão de referência a 15V como indica o circuito da Figura 3 [4].

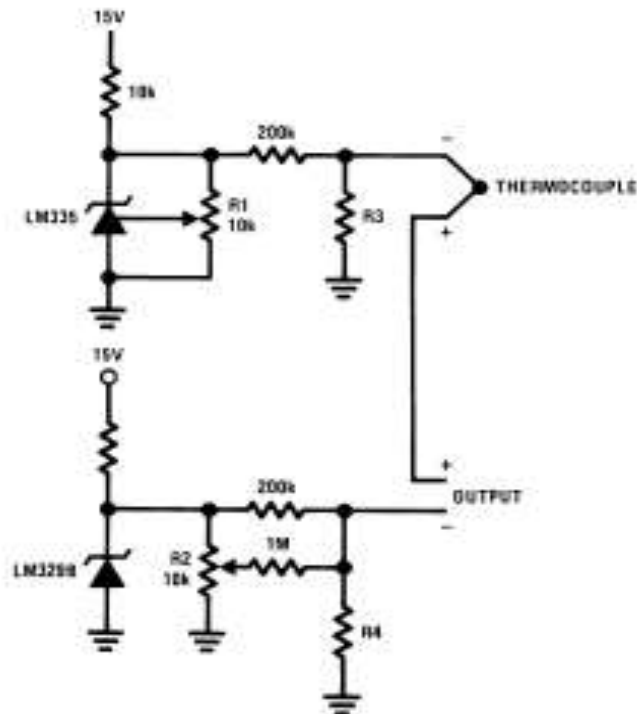


Figura 3 Circuito de compensação de junção fria [4].

Com recurso ao datasheet do LM335, dimensionou-se o valor das resistências R3 e R4 para o circuito, com base no tipo de termopar utilizado. Para isso consultou-se a tabela que consta no documento técnico onde indica o coeficiente de Seebeck para o tipo de termopar em causa. A Tabela 2 [4] auxilia no dimensionamento ao facultar os valores necessários:

Tabela 2 - Valores de referência das resistências para diferentes tipos de termopares [4].

Termopar	R3	R4	Coefficiente de Seebeck
J	1.05 K Ω	385 Ω	52.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
T	856 Ω	315 Ω	42.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	816 Ω	300 Ω	40.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
S	128 Ω	46.3 Ω	6.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

A Figura 4 ilustra o resultado do circuito na placa de testes, no entanto, há que salientar que foi efetuada uma alteração face ao circuito de Figura 3, tendo-se substituído LM329B por um diodo Zener 1N4735, por motivos de disponibilidade no laboratório de eletrônica.

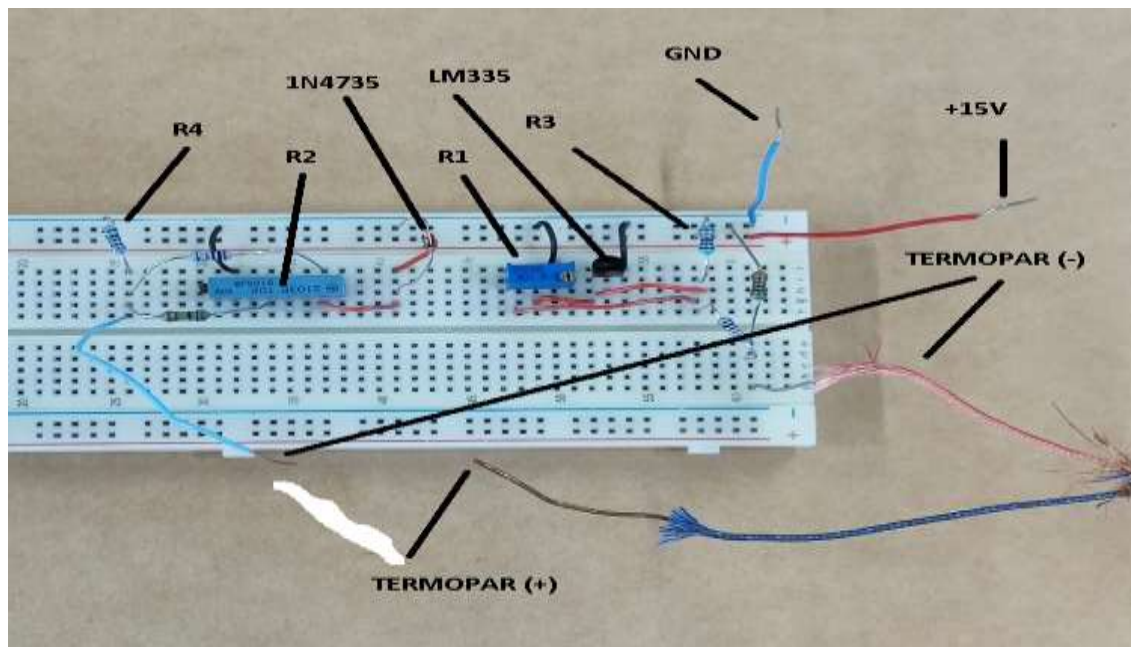


Figura 4 - Montagem do circuito de compensação em placa de teste.

Na Figura 4, os componentes R1 e R2 correspondem a potenciômetros de 10 K Ω .

2.2 Calibração do circuito para a temperatura ambiente

Com recurso a um termómetro digital, obteve-se a temperatura do laboratório. A temperatura indicada era de 25 graus. Nesta fase o objetivo é a calibração do circuito antes de amplificar o sinal, pelo que os resultados experimentais são apresentados em valores de tensão absolutos em milivolts. Posto isto, procedeu-se à regulação dos potenciômetros no sentido de obter o valor de tensão esperado, face aos valores tabelados para o termopar tipo J. O valor de tensão para 25 graus é de 1.277mV, como se pode verificar na Tabela 3, pelos valores numa tabela de correlação de força eletromotriz em função da temperatura para termopares tipo J [5]:

Tabela 3 - Tabela de correlação para termopares tipo J (FEM x TEMP).

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	0
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916	0.968	1.019	10
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485	1.537	20
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006	2.059	30
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532	2.585	40

No sentido de se obter no voltímetro o valor pretendido, regularam-se os potenciômetros, sendo o valor da resistência em R1 de 10k Ω e em R2 de 8.2684k Ω . O resultado obtido após a regulação pode verificar-se na Figura 6:



Figura 5 - Medição da temperatura ambiente com o termopar tipo J.

2.3 Calibração do circuito para 0° C

O seguinte teste tem como objetivo melhorar a calibração do circuito e testar o seu desempenho. No sentido de testar a efetividade do circuito recorreu-se a água no estado sólido, a uma temperatura em torno de zero graus centígrados e colocou-se o termopar dentro de um copo de plástico, mau condutor de calor, com alguns cubos de gelo. Segundo a tabela de correlação do termopar o valor de tensão esperado é de zero, como se pode verificar na Tabela 4:

Tabela 4 - Valor de tensão em milivolt para uma temperatura de zero graus centígrados.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	0
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916	0.968	1.019	10
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485	1.537	20
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006	2.059	30
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532	2.585	40

A Figura 6 mostra o sensor junto a cubos de gelo e no multímetro o respetivo valor de tensão aos terminais do circuito de compensação de junção fria:

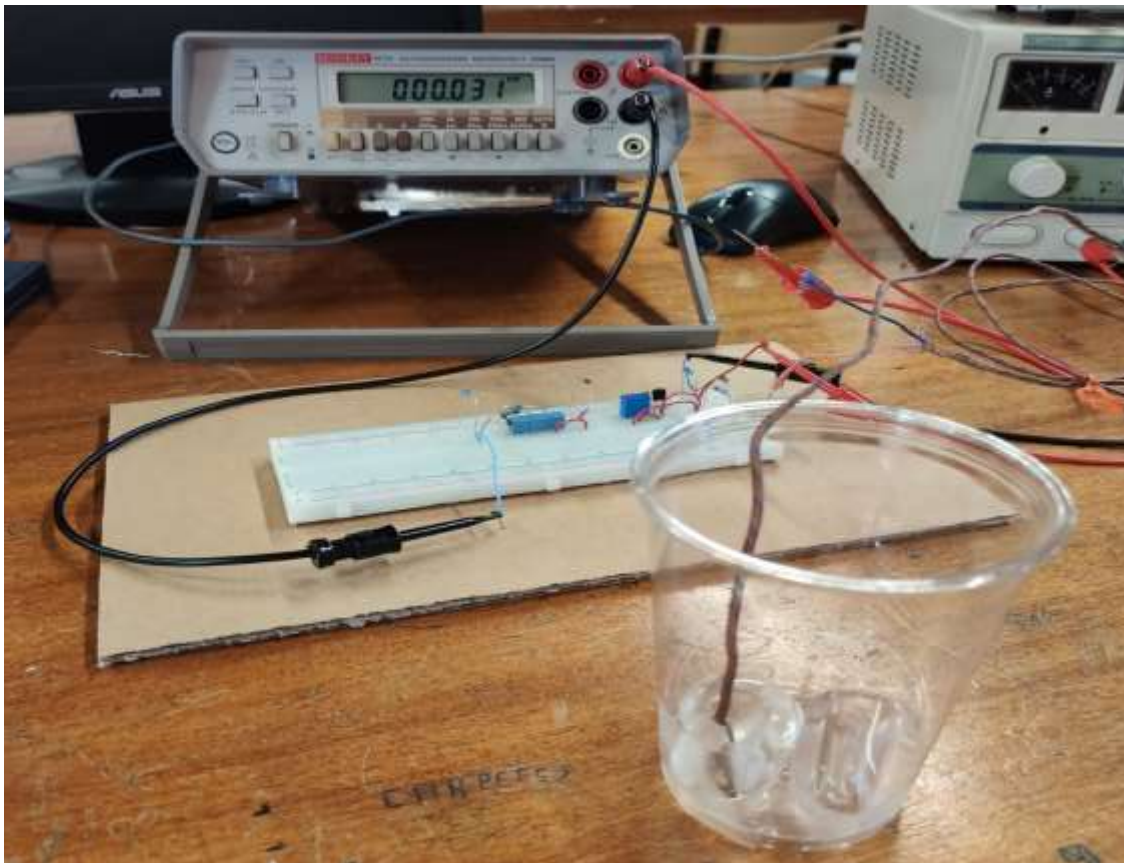


Figura 6 - Teste ao circuito com o termopar colocado em água no estado sólido.

O valor de tensão medido foi de 0.031mV, como se pode verificar, um valor muito próximo para uma temperatura medida em torno dos zero graus centígrados, como esperado. No sentido de calibrar o circuito regulou-se R1 para 10k Ω , mantendo assim o valor anterior e R2 para 9,5815k Ω .

2.4 Calibração do circuito para elevadas temperaturas

O último teste tem como objetivo verificar a resposta do circuito de compensação de junção fria a um significativo aumento de temperatura, mantendo os potenciômetros R1 e R2 ajustados na mesma configuração do teste anterior, ou seja, com o termopar colocado no gelo. Foi utilizado um isqueiro de bolso da marca "Bic", com combustível isobutano puro, para aumentar a temperatura do sensor. Na Figura 7 é possível observar o valor de tensão medido à saída do circuito de compensação de junção fria:

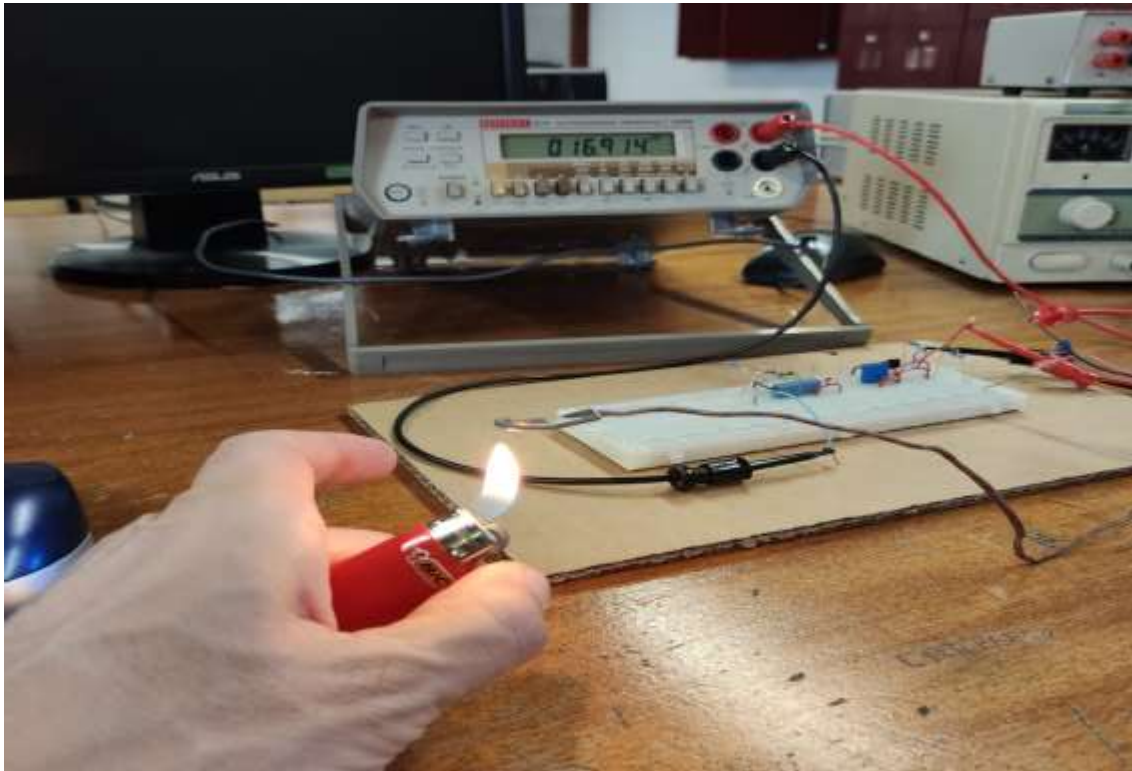


Figura 7 - Aumento da temperatura do termopar.

O sensor esteve exposto à chama do isqueiro durante algum tempo, o suficiente para se verificar os valores de tensão à saída do circuito a aumentar até estabilizar. Ao estabilizar, o multímetro mediu à saída dos terminais do circuito uma tensão em torno dos 17mV. Segundo a Tabela 5, este valor corresponde a uma temperatura de aproximadamente 312 graus:

Tabela 5 - Valores de tensão em mV em função da temperatura.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
VOLTAGEM TERMOELÉTRICA EM MILIVOLTS ABSOLUTOS												
250	13.555	13.611	13.666	13.722	13.777	13.833	13.888	13.944	13.999	14.055	14.110	250
260	14.110	14.166	14.221	14.277	14.332	14.388	14.443	14.499	14.554	14.609	14.665	260
270	14.665	14.720	14.776	14.831	14.887	14.942	14.998	15.053	15.109	15.164	15.219	270
280	15.219	15.275	15.330	15.386	15.441	15.496	15.552	15.607	15.663	15.718	15.773	280
290	15.773	15.829	15.884	15.940	15.995	16.050	16.106	16.161	16.216	16.272	16.327	290
300	16.327	16.383	16.438	16.493	16.549	16.604	16.659	16.715	16.770	16.825	16.881	300
310	16.881	16.936	16.991	17.046	17.102	17.157	17.212	17.268	17.323	17.378	17.434	310
320	17.434	17.489	17.544	17.599	17.655	17.710	17.765	17.820	17.876	17.931	17.986	320
330	17.986	18.041	18.097	18.152	18.207	18.262	18.318	18.373	18.428	18.483	18.538	330
340	18.538	18.594	18.649	18.704	18.759	18.814	18.870	18.925	18.980	19.035	19.090	340

O valor de temperatura medido, encontra-se a baixo dos valores de referencia para a combustão do gás isobutano puro, que variam entre os 800°C e os 1400°C. Esse valor de temperatura é atingido na ponta interna do cone azul da chama, a parte da chama onde a temperatura é mais elevada. Neste teste o sensor foi colocado na ponta do cone da chama amarela, como se pode observar na Figura 7, onde a combustão do gás não é tão eficiente. De resto, o termopar tipo J apenas possui gama de temperatura até aos 770°C como se pode observar em [5].

3 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na análise final dos dados recolhidos é necessário ter em conta a tabela de correlação, onde o fabricante indica, em função da variação de temperatura, a força electro motriz fornecida pelo termopar em valores absolutos. De entre toda a gama de temperatura de operação do termopar, escolheu-se as temperaturas à qual foram efetuados os diversos testes. Na Tabela 6 pode-se verificar um resumo dos dados obtidos, onde constam os valores dos potenciômetros R1 e R2 para os diversos tipos de testes realizados:

Tabela 6 - Valores das resistências e da tensão registada para os diferentes cenários testados.

	R1	R2	R3	R4	Tensão	Temperatura
Tmp. amb.	10k Ω	8.2684k Ω	1.1K Ω	360 Ω	1.277mV	$\approx 25^{\circ}$ C
Gelo	10k Ω	9.5815 k Ω	1.1K Ω	360 Ω	0.003mV	$\approx 0^{\circ}$ C
Chama	10k Ω	9.5815 k Ω	1.1K Ω	360 Ω	16.914mV	$\approx 313^{\circ}$ C

É possível observar que, com a colocação do circuito de compensação de junção fria entre os terminais, os valores medidos, após a calibração dos potenciômetros, encontram-se próximo do esperado, dada a gama de medição do termopar, e a sua variação dos valores de tensão em função da temperatura aumentam de modo linear, como se pode observar na Figura 8, a curva experimental dos resultados obtidos:

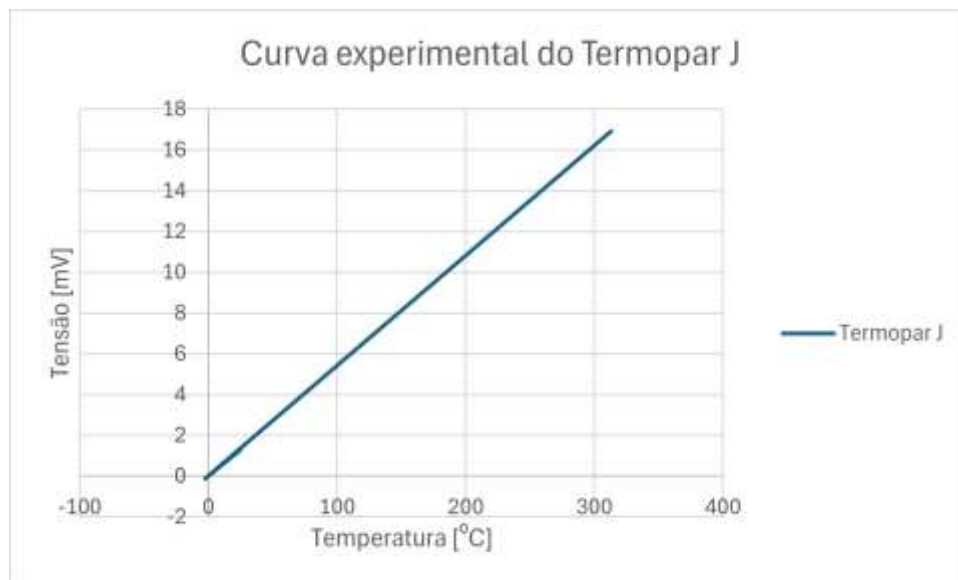


Figura 8 - Curva experimental do termopar tipo J obtida com os resultados dos testes.

No circuito de teste não foi usado um terminal fêmea para ligação dos terminais do termopar. O valor obtido para valores de temperatura mais elevados são menores do que valores de temperatura mais baixos. Com a substituição do diodo zener para um diodo com 1W de potencia e uma tensão de Zener de 6.2V obteve-se os valores de tensão esperados, face ao circuito dimensionado. O diodo quando polarizado inversamente permite manter uma tensão constante aos seus terminais, sendo por isso importante no circuito de regulação.

A calibração do circuito, graças aos potenciômetros, permite ajustar a tensão de referência do circuito de compensação de junção fria e assim obter valores próximos aos valores de referência da tabela de correlação. A colocação do sensor no gelo permitiu obter um valor de referência para os potenciômetros.

O aumento significativo de temperatura no sensor permitiu analisar o comportamento do circuito de compensação de junção fria e verificar se os valores obtidos eram consistentes e coerentes com os valores de referência da tabela do termopar tipo J, além disso, permitiu saber aproximadamente qual o valor da chama do isqueiro, não se tendo alterado o valor de calibração dos potenciômetros efetuado no teste anterior.

REFERÊNCIAS

- [1] Tempens Instruments, Type J Thermocouple, Accessed: 06 September 2024. [Online]. Available: https://tempens.com/pub/media/pdf/technical-articles/J_Type_1.pdf
- [2] Texas Instruments, "RTD Replacement for Cold Junction Compensation Reference Design in a Temperature Sensor", 2019, Accessed: 06 September 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/tiduee1a/tiduee1a.pdf>
- [3] National Instruments, "The Engineer's Guide to Signal Conditioning", David Ashlock, Anjelica Warren, Accessed: 07 September 2024. [Online]. Available: https://download.ni.com/evaluation/signal_conditioning/20712_Benefits_of_Integrated_SC_WP_HL.pdf
- [4] Texas Instruments, "LMx35, LMx35A Precision Temperature Sensors", Accessed: 07 September 2024. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm335.pdf?ts=1725704652783&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM335
- [5] ECIL, Temperatura Industrial, "Tabela de correlação para termopares tipo J (ferro/constantan)", Accessed: 07 September 2024. [Online]. Available: <https://ecil.com.br/wp-content/uploads/2019/04/J.pdf>
- [6] Klein, S. A., & Beckman, W. A. (2016). "Thermocouple Compensation Techniques: Theory and Application". *Journal of Measurement Science and Technology*.
- [7] Fraden, J. (2016). "Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications". Springer.
- [8] Meyer, J. P., & Perino, J. (2012). "Cold Junction Compensation for Thermocouples: A Review." *Sensors and Actuators A: Physical*.
- [9] Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). "Random Data: Analysis and Measurement Procedures". Wiley.
- [10] Liu, D., & Xu, H. (2018). "Design of Cold Junction Compensation Circuit for Thermocouples." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [11] Benedict, R. P. (2011). "Cold Junction Compensation Techniques for Thermocouples." *Journal of Applied Physics*.
- [12] Nicolai, A., & Strauß, R. (2017). "Advances in Thermocouple Signal Conditioning." *Measurement Science Review*.
- [13] Santos, F. R., & Lima, R. B. (2019). "Thermocouple Error Analysis in Cold Junction Compensation." *International Journal of Thermophysics*.
- [14] Teymouri, A., & Coyle, E. (2020). "Thermal Response and Compensation of Thermocouple Systems." *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*.
- [15] Rao, K. S., & Rao, A. R. (2015). "Development of Low-Cost Cold Junction Compensation for Thermocouples." *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*.