

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**LUCAS BERTOLOSSI**

**SISTEMA EMBARCADO DE CONTROLE DE TEMPERATURA**

**ILHA SOLTEIRA  
2022**

**LUCAS BERTOLOSSI**

**SISTEMA EMBARCADO DE CONTROLE DE TEMPERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Elétrica.

Ricardo Tokio Higuti  
**Orientador**

Ilha Solteira, março de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

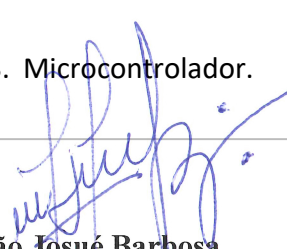
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Bertolossi, Lucas.  
B546s Sistema embarcado de controle de temperatura / Heitor Nunes Rosa. --  
Ilha Solteira: [s.n.], 2022  
40 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso ( Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Ricardo Tokio Higuti  
Inclui bibliografia

1. Medição de temperatura. 2. Controle PID discreto. 3. Microcontrolador.



**João Josué Barbosa**  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação  
Diretor Técnico  
CRB 8-5642

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos quatro dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e dois, o discente **Lucas Bertolossi**, matriculada sob o nº 151050236, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti*, o *Prof. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches* e o *Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado “**SISTEMA EMBARCADO DE CONTROLE DE TEMPERATURA BASEADO NO LAUNCHXL-F28379D**”, obtendo a nota 9,0 (nove) e conceito APROVADO.

---

Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti  
- Orientador -

---

Lucas Bertolossi  
- Discente -

---

Prof. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches  
- Membro da Banca -

---

Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago  
- Membro da Banca -

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, Ângela e Roberto, que sempre me apoiaram de todas as formas e me trouxeram até aqui.

Ao professor Ricardo Tokio, pela oportunidade de trabalhar no seu laboratório, por sua paciência e ensinamentos.

À minha namorada Lea. Sou grato por ter alguém com quem sempre posso contar. Seu companheirismo é muito valioso para mim, obrigado por tornar meus dias melhores!

Aos meus amigos. São muitos os que me apoiaram, tanto na minha cidade natal quanto em Ilha Solteira. Serei eternamente grato pelos amigos que fiz durante a graduação, especialmente: Antonio, Junio, Hugo, Giovane, Leonardo, Mateus, Bruno e Luan. Agradeço imensamente ao Jônatas Padilha, por ter acreditado em mim e por ter me dado a oportunidade de realizar meu estágio no exterior. Agradeço aos amigos que foram minha família durante o estágio, e que me fizeram sentir em casa mesmo estando tão longe: Alison, Alan, Iagoh, Júlio, Gabriel (Uri), Nicholas, Tiago e Renato.

Ao prof. Marcelo Tiago, que me auxiliou com algumas questões técnicas.

Aos demais professores e técnicos, obrigado pelos ensinamentos e por se importarem com o aprendizado dos alunos.

Aos motoristas que nos levam ao câmpus 3, aos funcionários da limpeza e da área administrativa. Obrigado!

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado de controle de temperatura. Explica-se como fazer a interface do sensor com um microcontrolador por meio de um circuito de medição de temperatura comercial, e também como implementar um controlador PID discreto para controlar a temperatura do sistema. A motivação deste trabalho é garantir a estabilidade térmica de um sistema de medição de propriedades de líquidos por ultrassom, e a ideia é implementar uma plataforma de mais baixo custo do que a utilizada atualmente, que emprega um medidor de temperatura de bancada, de elevada precisão e acurácia, mas de custo elevado. Utilizando a medição de temperatura implementada e o controlador implementado, obteve-se um desvio menor que  $0,02^{\circ}\text{C}$  em torno da temperatura estabilizada, sendo esta medida feita pelo sensor de precisão, que é uma variável externa ao controle. Esse desvio depende dos parâmetros do controlador, o qual foi sintonizado manualmente durante o projeto. O erro de exatidão foi menor que  $0,04^{\circ}\text{C}$  para a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , mas foi maior que o esperado para outras temperaturas. A medição de temperatura depende diretamente da qualidade de calibração, e tanto a calibração quanto a sintonia do controlador podem ser melhoradas futuramente.

## **Abstract**

This paper presents the development of an embedded temperature control system. It explains how to interface the sensor to a microcontroller using a commercial temperature measurement circuit, and also how to implement a discrete PID controller to control the temperature of the system. The motivation of this work is to ensure the thermal stability of a system for measuring liquid properties by ultrasound, and the idea is to implement a lower-cost platform than the one currently used, which employs a benchtop temperature meter, of high precision and accuracy, but of high cost. Using the implemented temperature gauge and the implemented controller, a deviation of less than  $0.02^{\circ}\text{C}$  was obtained around the stabilized temperature, this measurement is made by the precision sensor, which is an external variable to the control. This deviation depends on the parameters of the controller, which was tuned manually during the project. The accuracy error was less than  $0.04^{\circ}\text{C}$  for the temperature of  $25^{\circ}\text{C}$ , but it was higher than expected for other temperatures. The temperature measurement directly depends on the calibration quality, and both the calibration and the tuning of the controller can be improved in the future.

## Lista de Figuras

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Diagrama de Blocos do sistema original. . . . .  | 9  |
| 2  | Diagrama de blocos do sistema implementado. . . . .  | 11 |
| 3  | Sensor RTD para ar e gás . . . . .   | 12 |
| 4  | RTDs de dois, três e quatro fios . . . . .   | 13 |
| 5  | Sensor RTD de quatro fios . . . . .  | 13 |
| 6  | Termômetro de precisão MilliK . . . . .  | 14 |
| 7  | ADS124S08EVM . . . . .   | 15 |
| 8  | Diagrama simplificado de conexão de um RTD de 4 fios com a<br>ADS124S08EVM . . . . .                       | 16 |
| 9  | Exemplo de conexão da interface serial com o ADS124S08 . . . . .   | 17 |
| 10 | Ponte H IBT-2 . . . . .  | 23 |
| 11 | Diagrama esquemático da ponte H . . . . .  | 23 |
| 12 | Circuito <i>chopper</i> DC . . . . .   | 24 |
| 13 | Sinal PWM . . . . .  | 24 |
| 14 | Montagem do sistema . . . . .  | 27 |
| 15 | Medições utilizando os coeficientes do padrão IEC-60751 . . . . .  | 28 |
| 16 | Medições utilizando os coeficientes do padrão IEC-60751 (2) . . . . .                                      | 28 |
| 17 | Curva de calibração do RTD . . . . .   | 30 |
| 18 | Medições em regime permanente utilizando o controlador original e a<br>equação de calibração . . . . .     | 31 |
| 19 | Medições em regime permanente utilizando o controlador original e a<br>equação de calibração (2) . . . . . | 32 |
| 20 | Mudança de setpoint utilizando o controlador original . . . . .  | 33 |
| 21 | Mudança de setpoint utilizando o controlador implementado . . . . .  | 34 |
| 22 | Atuação do sistema de controle implementado, <i>set-point</i> de 25°C . . . . .                            | 35 |



# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                   | <b>8</b>  |
| 1.1      | Revisão da Bibliografia . . . . .                   | 9         |
| 1.2      | Objetivo . . . . .                                  | 10        |
| 1.3      | Descrição dos capítulos . . . . .                   | 10        |
| <b>2</b> | <b>Materiais e métodos</b>                          | <b>11</b> |
| 2.1      | Sensor utilizado . . . . .                          | 11        |
| 2.1.1    | Classe de tolerância do sensor . . . . .            | 12        |
| 2.1.2    | Configurações de fiação . . . . .                   | 12        |
| 2.2      | Sensor de referência . . . . .                      | 14        |
| 2.3      | Medição de temperatura . . . . .                    | 15        |
| 2.3.1    | Conversor analógico-digital . . . . .               | 16        |
| 2.3.2    | Comunicação do microcontrolador com o ADC . . . . . | 17        |
| 2.3.3    | Conversão da leitura em medida . . . . .            | 17        |
| 2.4      | Microcontrolador . . . . .                          | 18        |
| 2.4.1    | Programação . . . . .                               | 19        |
| 2.5      | Controle . . . . .                                  | 20        |
| 2.6      | Ponte H . . . . .                                   | 22        |
| 2.7      | Tensão aplicada nas células Peltier . . . . .       | 23        |
| 2.8      | Lista de materiais . . . . .                        | 25        |
| <b>3</b> | <b>Resultados e discussão</b>                       | <b>27</b> |
| 3.1      | Medição de temperatura . . . . .                    | 27        |
| 3.1.1    | Calibração do sensor . . . . .                      | 29        |
| 3.2      | Controle de temperatura . . . . .                   | 32        |
| <b>4</b> | <b>Comentários finais</b>                           | <b>36</b> |
|          | <b>Referências</b>                                  | <b>37</b> |

# 1 Introdução

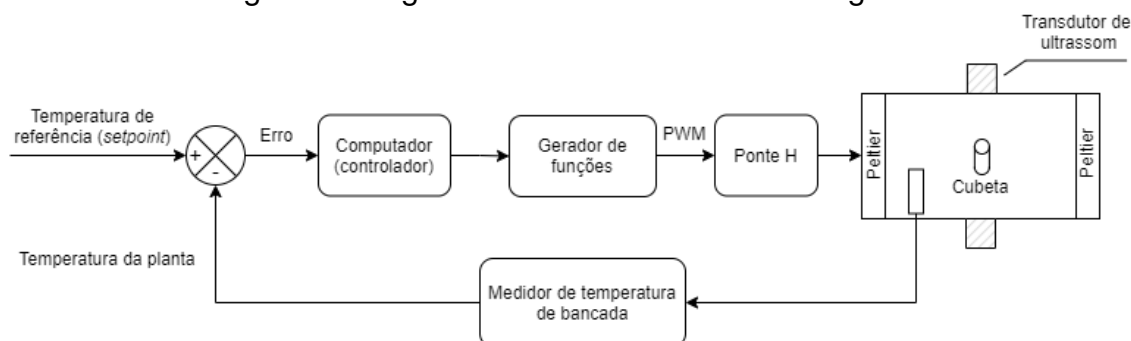
De acordo com Povey (1997), técnicas de ultrassom podem fornecer informações precisas, rápidas e confiáveis de um material opaco por um custo relativamente baixo de uma maneira rápida e não invasiva. Para caracterizar um meio utilizando ultrassom, propaga-se um sinal acústico através deste, e esse sinal é recebido por um transdutor para ser analisado e comparado com o sinal enviado. Com essas técnicas, é possível obter propriedades acústicas de líquidos, como velocidade de propagação do som no fluido e atenuação, e ainda inferir sobre outros parâmetros de maneira indireta como, por exemplo, concentração e densidade. Os métodos utilizados para caracterização de líquidos podem utilizar um transdutor operando em modo pulso-eco ou dois transdutores operando em transmissão-recepção.

No trabalho de Tiago (2018), ele e seus colaboradores desenvolveram uma célula de medição de propriedades de líquidos por ultrassom. O espectrômetro desenvolvido trabalha com um sistema de excitação pulsado, que utiliza dois transdutores operando em modo transmissão-recepção na faixa de frequência de 20 a 80 MHz e foi utilizado para medir a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação da onda propagada no líquido.

O sistema consta com uma estabilidade térmica elevada (melhor que 0,01 °C) utilizando um sistema de controle de temperatura baseado em células Peltier. A célula Peltier é um dispositivo termoelétrico que permite gerar um gradiente de temperatura cujo sentido depende da corrente elétrica que passa por ela. Uma ponte H é utilizada para que a reversão do sentido dessa corrente seja possível, permitindo que a célula possa ser utilizada como um atuador térmico capaz de controlar a temperatura de um outro sistema. É primordial que haja um controle de temperatura de alta precisão, já que esta influencia na velocidade de propagação de ondas nos materiais, parâmetro utilizado para inferir sobre as propriedades do líquido.

Lugão (2015) abordou o problema de controle da temperatura, e Visioli (2018) trabalhou com a medição e controle. No sistema utilizado por Tiago (2018), a medição de temperatura é feita por um medidor de bancada (Isotech, modelo milliK), e um computador com Matlab é utilizado para realizar o controle, com o propósito de gerar o sinal com modulação de largura de pulso (PWM) que atua nas células Peltier por meio da ponte H. Uma representação simplificada desse sistema está ilustrada no diagrama de blocos na Figura 1.

Figura 1: Diagrama de Blocos do sistema original.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 1.1 Revisão da Bibliografia

Os resfriadores termoelétricos são utilizados em uma variedade de aplicações que requerem um controle de temperatura extremamente estável. Como citado anteriormente, este controle de temperatura é primordial para aplicações de ultrassom, para que seja possível inferir sobre as características do fluido corretamente. Outra aplicação, segundo Wavelength Electronics (2020), são sistemas que requerem larguras de linha estreitas de laser (tratamentos de câncer, espectroscopia, detecção de gás, etc), e requerem um certo nível de estabilidade de temperatura. Esse tipo de sistema deve ser montado cuidadosamente, e para cada aplicação deve-se escolher apropriadamente o módulo termoelétrico, o sensor de temperatura e o controlador.

Três tipos de sensores de temperatura são utilizados na indústria. São eles: o termopar, a termorresistência (ou RTD, do inglês *Resistance Temperature Detectors*), e o termistor. Os termopares utilizam dois fios de metal para gerar uma tensão proporcional a temperatura presente na junção entre eles. As termorresistências medem temperatura baseada na mudança de resistência de um resistor de metal, que é geralmente de platina. Os termistores funcionam como as termorresistências, mas utilizam um resistor de cerâmica ou de polímero. A utilidade do sensor depende da aplicação. Os tipos que tem maior precisão são os termistores e a termorresistência. Apesar de que o termistor tenha um tempo de resposta mais rápido e seja mais barato que a termorresistência, possui baixa estabilidade a longo prazo e não é linear (Omega).

Para que a termorresistência possa ser trocada por outra facilmente, a norma IEC 60751 define padrões, como classes de tolerância e valores base de resistência. Por exemplo, o Pt-100 deve ter uma resistência inicial de  $100 \Omega$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  (WIKA).

Mais da metade dos controladores industriais utilizados na época em que Ogata (2011) escreveu seu livro eram do tipo PID ou um PID modificado. Esse tipo de controlador é muito útil pois pode ser utilizado na maioria dos sistemas de controle (OGATA, 2011). Esse tipo de controlador torna possível realizar sua sintonia sem

realizar a modelagem matemática do sistema. Existem diversas técnicas para realizar a sintonia dos parâmetros do controlador PID. Ogata (2011) apresenta algumas delas, como os dois métodos introduzidos por Ziegler e Nichols, uma abordagem por meio da resposta em frequência, e outra computacionalmente. Além disso, é possível realizar a sintonia dos parâmetros manualmente.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo do trabalho é implementar um sistema embarcado de medição e controle de temperatura, de modo a reduzir o custo e aumentar a portabilidade do sistema. O desempenho do sistema proposto deverá obedecer às seguintes especificações:

- Manter a temperatura constante em regime permanente, possuir uma exatidão de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  com um desvio não maior que  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Controlar digitalmente o sistema e ilustrar a temperatura medida e desejada;
- O tempo de estabelecimento não deve ser maior que 15 minutos.

## **1.3 Descrição dos capítulos**

Este trabalho foi dividido da seguinte forma:

No capítulo 2, apresenta-se todos os materiais utilizados, o motivo da utilização desses materiais e a conexão entre eles, e descreve-se progressivamente como o sistema foi implementado.

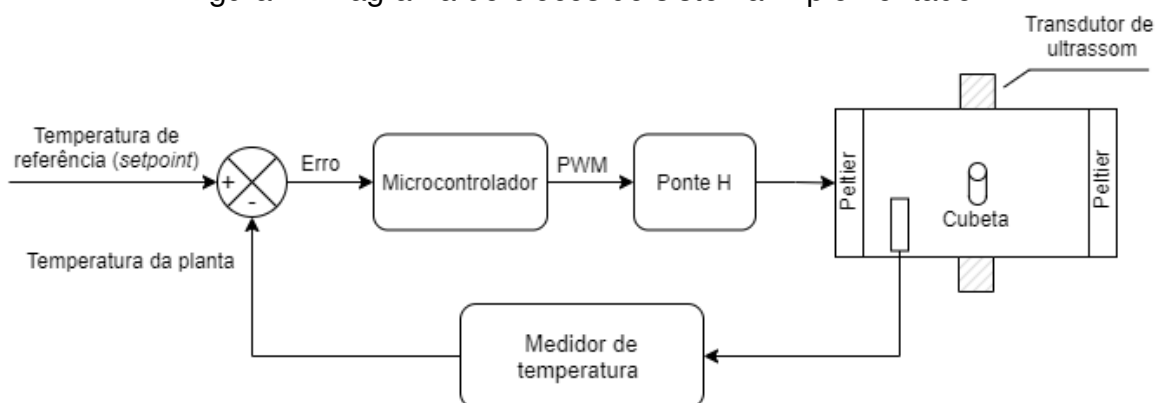
No capítulo 3, explica-se a calibração do sensor utilizado, compara-se a medição de temperatura do sensor calibrado com o sensor de precisão, são introduzidos mais detalhes sobre o controlador implementado e é demonstrado esse controlador em ação.

No capítulo 4, discute-se sobre as conclusões obtidas no decorrer do projeto, os resultados apresentados e propostas para a melhoria do sistema são apresentadas.

## 2 Materiais e métodos

No sistema do laboratório (figura 1), mede-se a temperatura dentro da caixa de isopor e também do líquido a ser analisado por meio do termômetro de precisão milliK. Neste trabalho, foi utilizado um sensor com exatidão 1/10 DIN. Foi utilizado um microcontrolador para realizar a medição de temperatura da caixa de isopor, realizar o controle digital e gerar o sinal PWM que atua nas células Peltier. O diagrama de blocos do sistema implementado pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Diagrama de blocos do sistema implementado.

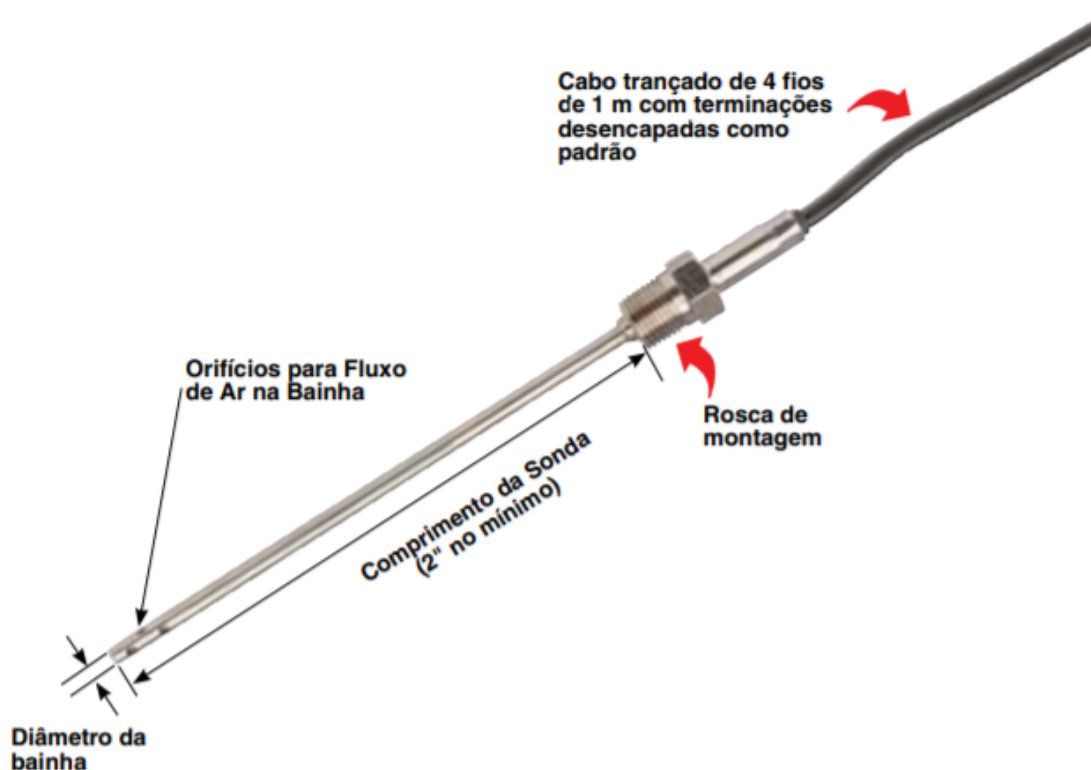


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.1 Sensor utilizado

Para este projeto, utilizou-se como sensor uma termorresistência do tipo Pt-100. Esse tipo de termorresistência é feita de platina e possui  $0 \Omega$  a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Esse tipo de sensor contém um resistor que altera o valor da resistência conforme sua temperatura se altera. Sua faixa de temperatura de operação é de  $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $850 \text{ } ^\circ\text{C}$ . O sensor, ilustrado na Figura 3, é próprio para ar e gás. Seu modelo é P-L-1/10-1/8-6-1/8-T-3, da fabricante Omega. Esse modelo tem precisão de 1/10 DIN, 150 mm de comprimento, 1/8" de diâmetro, adaptador 1/8 NPT, rabicho de 1 metro e isolamento em Teflon (OMEGA, a).

Figura 3: Sensor RTD para ar e gás



Fonte: Retirado de (OMEGA, b).

### 2.1.1 Classe de tolerância do sensor

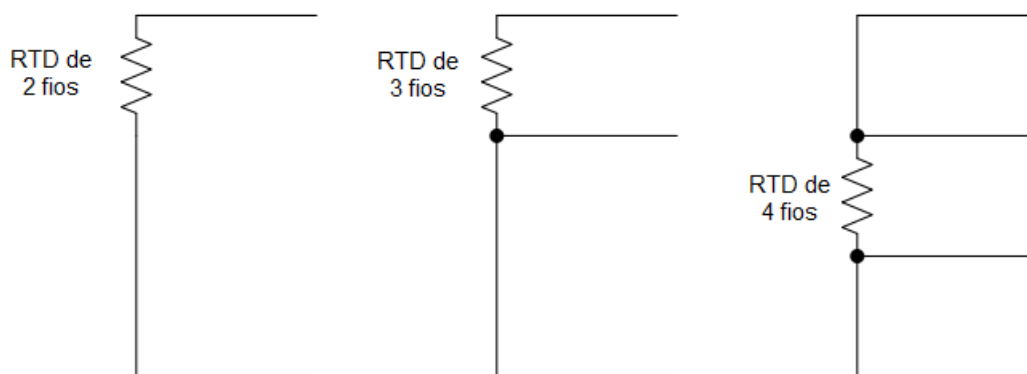
Esse tipo de sensor tem a capacidade de fazer medições com precisões menores que  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dependendo da sua classe de tolerância. A classe de tolerância do sensor utilizado é 1/10 DIN, e segundo a fabricante, sensores dessa classe tem uma tolerância de  $\pm (0.03 + 0.0005 |T|)$ , sendo T a temperatura medida em  $^{\circ}\text{C}$ .

### 2.1.2 Configurações de fiação

Os RTDs podem ser feitos em três configurações diferentes, e cada uma requer uma corrente de excitação diferente e um circuito de medição específico. Podem ser feitos na configuração de dois, três ou quatro fios (Figura 4). O sensor utilizado neste projeto é de quatro fios (Figura 5). Nessa configuração, dois fios são utilizados para a excitação do sensor com uma fonte de corrente constante, e os outros dois fios são utilizados para medir a resistência do RTD. Dessa forma, o erro introduzido pela resistência dos fios utilizados para a medição é eliminado. Essa é a configuração mais precisa e mais cara dos RTDs (Texas Instruments, 2018, p. 4). Existem conversores

analógico-digital (frequentemente abreviado por ADC) que fornecem a corrente de excitação necessária para utilizar o RTD. O ADC utilizado é apresentado na próxima seção.

Figura 4: RTDs de dois, três e quatro fios



Fonte: Adaptada de Texas Instruments (2018).

Figura 5: Sensor RTD de quatro fios



Fonte: SENMATIC.

## 2.2 Sensor de referência

Para realizar a calibração e avaliar o desempenho do sistema implementado, utilizou-se o termômetro de precisão MilliK (Figura 6), da marca Isotech (ISOTECH, a). Suas características principais são:

- Faixa de temperatura de medição:  $-270\text{ °C}$  a  $1820\text{ °C}$
- Precisão:  $\pm 0,005\text{ °C}$  ( $\pm 5\text{ mK}$ )
- Resolução:  $0,0001\text{ °C}$  ( $0,1\text{ mK}$ )
- Permite utilização de diferentes tipos de sensores (RTDs, termopares e termistores)
- Display gráfico
- Armazena até 180 dias de medidas
- Pode controlar os banhos de calibração da Isotech

Esse termômetro é utilizado no sistema original para medir a temperatura do líquido dentro da cubeta e a temperatura da caixa de isopor, por meio de dois sensores RTDs que atendem o padrão IEC 60751, do modelo 915-14-61 (ISOTECH, b). Para avaliar o desempenho do sistema implementado neste trabalho e efetuar a calibração, será utilizado apenas a medida da temperatura do ar.

Figura 6: Termômetro de precisão MilliK

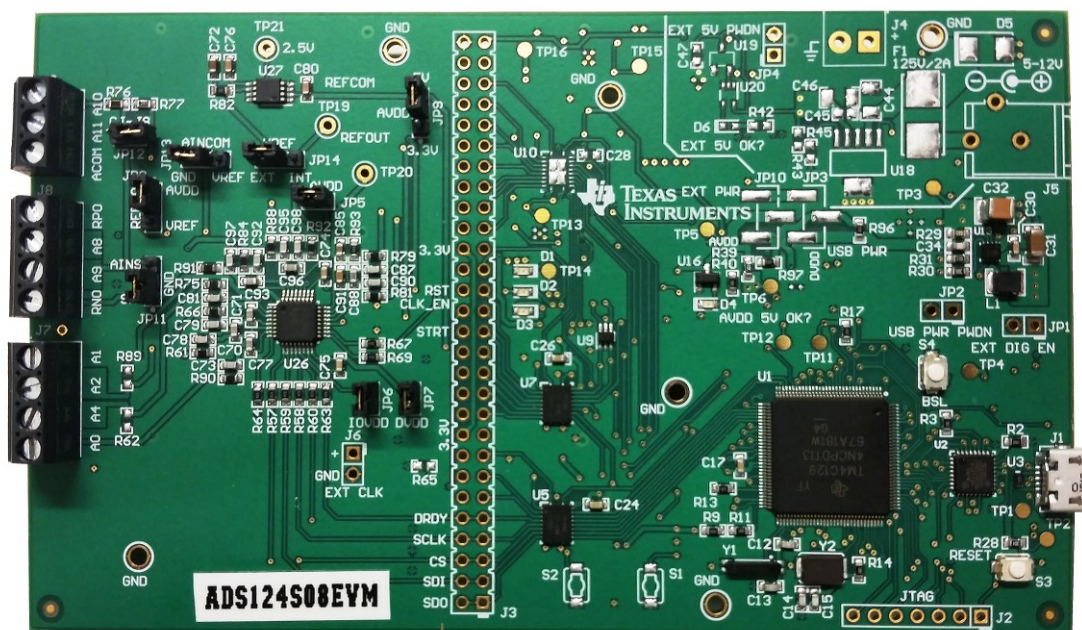




## 2.3 Medição de temperatura

Para realizar a medição de temperatura, um circuito de medição é necessário. A topologia e análise desses circuitos é discutida no "Guia Básico de Medições com RTD"(Texas Instruments, 2018). Pode-se fazer o design de um circuito específico para que as especificações do projeto sejam atendidas, porém, para simplificar o projeto, um circuito de medição comercial foi adquirido, o ADS124S08EVM (Texas Instruments, 2017a), ilustrado na Figura 7.

Figura 7: ADS124S08EVM

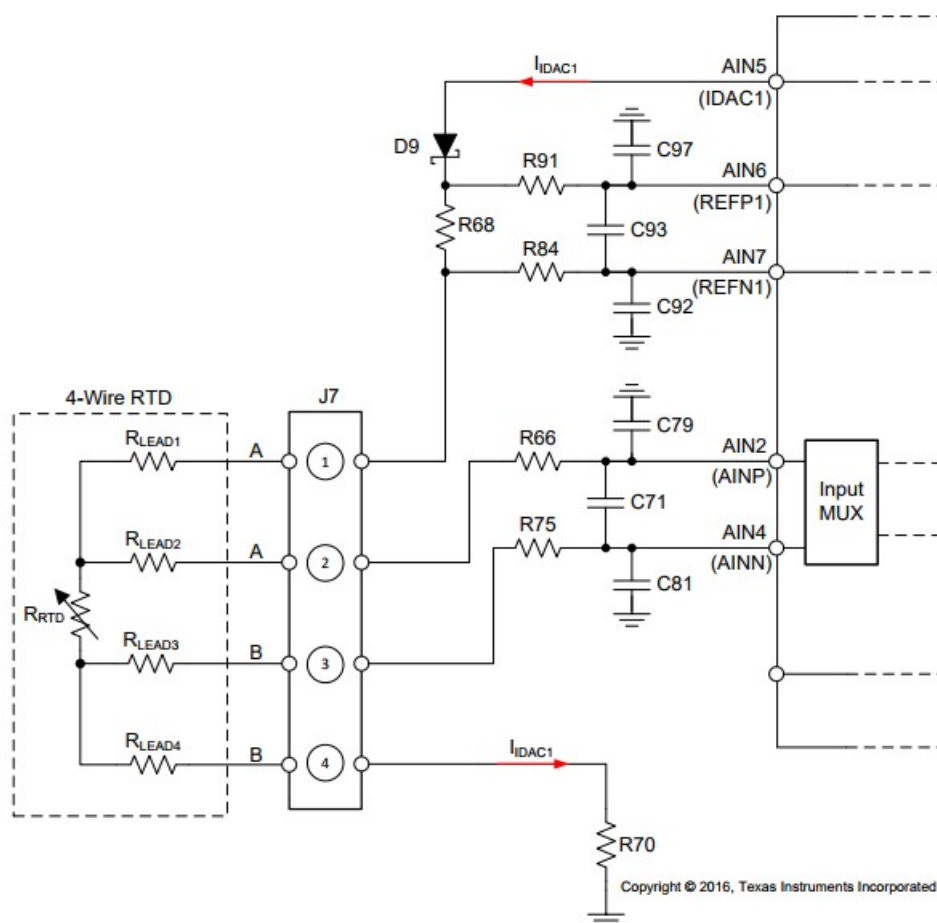


Fonte: Texas Instruments - Datasheet ADS124S08EVM (TEXAS INSTRUMENTS, 2016b)

Essa placa foi escolhida por possuir um circuito de medição de temperatura que suporta a utilização desse tipo de sensor. O ADS124S08EVM possui um microcontrolador embutido e a empresa fabricante (Texas Instruments) possui um firmware para a leitura de temperatura utilizando essa placa. No entanto, os outros pinos do microcontrolador que seriam necessários para o projeto não estão disponíveis para uso. Portanto, esse firmware foi adaptado para que a placa seja utilizada com um microcontrolador externo. Para isso, foi necessário instalar o jumper JP1 da placa (TEXAS INSTRUMENTS, 2016b, p. 27).

A conexão do sensor com a placa pode ser observada na Figura 8. Com essa conexão, o ADC pode fazer a leitura da resistência do RTD.

Figura 8: Diagrama simplificado de conexão de um RTD de 4 fios com a ADS124S08EVM



Fonte: Texas Instruments - Datasheet ADS124S08EVM (TEXAS INSTRUMENTS, 2016b)

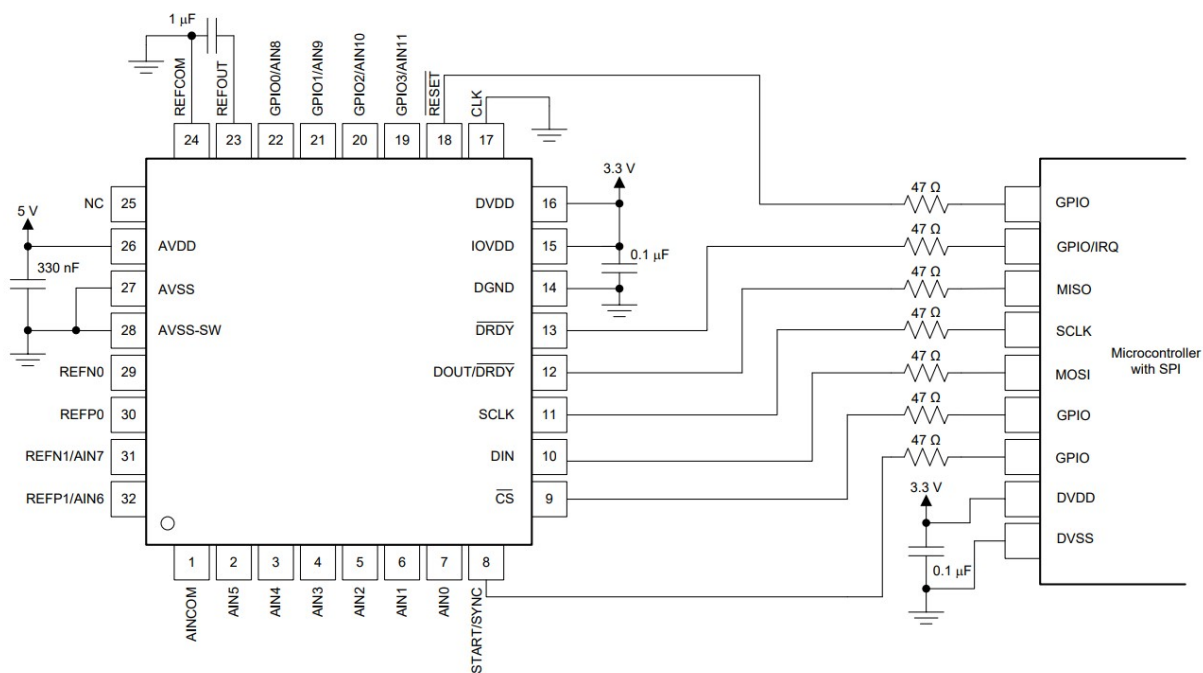
### 2.3.1 Conversor analógico-digital

O ADS124S08EVM é a placa de avaliação do ADC utilizado, o ADS124S08 (TEXAS INSTRUMENTS, 2016a). Esse ADC é próprio para medições de RTDs. Suas características mais importantes são: resolução máxima de 24 bits, sua arquitetura é delta-sigma, seu ganho é programável (PGA), tensão de referência interna, possui fonte de corrente de excitação, filtro para rejeição 50/60 Hz e filtro digital programável, comunica-se pelo protocolo SPI (do inglês *Serial Peripheral Interface*), dentre outras funcionalidades (TEXAS INSTRUMENTS, 2016a). Sua faixa de temperatura de operação é menor que a do RTD, sendo de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , sendo a temperatura limite do sistema de medição e controle implementado.

### 2.3.2 Comunicação do microcontrolador com o ADC

A comunicação do microcontrolador com o ADS124S08 é feita por meio do protocolo de comunicação SPI, utilizando os sinais digitais disponíveis no soquete J3 da placa ADS124S08EVM. Essa conexão está exemplificada na Figura 9, e mais detalhes podem ser encontrados no manual do ADC (TEXAS INSTRUMENTS, 2016a).

Figura 9: Exemplo de conexão da interface serial com o ADS124S08



Fonte: Texas Instruments - Datasheet ADS124S08 (TEXAS INSTRUMENTS, 2016a)

### 2.3.3 Conversão da leitura em medida

Com base na Figura 8 e segundo (TEXAS INSTRUMENTS, 2016b), a corrente de excitação  $I_{DAC1}$  fornecida pelo pino AIN5 gera uma tensão sobre o resistor de referência R68 que é utilizado nas entradas REF1. A mesma corrente excita o sensor RTD. O ADC mede a tensão sobre o RTD utilizando o resistor R68 como referência. Portanto, o código adquirido proveniente da leitura do ADC ( $Result_{CODES}$ ) é proporcional a relação entre a tensão sobre o RTD e a tensão sobre o resistor de referência. A queda de tensão no RTD ( $V_{RTD}$ ) é igual ao valor da tensão representada pelo bit menos significativo multiplicado pelo resultado do ADC. A escala completa é baseada na tensão de referência, que é igual a R68 multiplicada pela corrente de excitação. Dessa maneira, o valor representado pelo bit menos significativo  $V_{LSB}$  é calculado utilizando a equação 1.

$$\begin{aligned}
 V_{LSB} &= \text{Escala completa} / \text{Número total de códigos} = \\
 &= \pm V_{REF} / PGA / (2^{24} - 1) = 2 \cdot V_{REF} / PGA / (2^{24} - 1)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Dessa forma, pode-se calcular a tensão sobre o RTD com a equação 2.

$$V_{RTD} = V_{LSB} \cdot \text{Result}_{CODES} \tag{2}$$

A partir das equações 1 e 2, obtém-se  $R_{RTD}$ , que independe da corrente de excitação:

$$R_{RTD} = (2 \cdot R68 \cdot \text{Result}_{CODES} / PGA) / (2^{24} - 1) \tag{3}$$

A equação 3 é utilizada para calcular a resistência do RTD com base no resultado da leitura do ADC. Com o valor da resistência, pode-se calcular a temperatura. É possível calculá-la com a equação Callendar-Van Dusen (equações 4 e 5) utilizando os coeficientes do padrão IEC-60751, ou uma tabela de consulta baseada nessa equação e nesses coeficientes (Texas Instruments, 2018), e também com uma equação obtida com a calibração do sensor, utilizando um sensor de referência. Neste projeto, foi feita a calibração do sensor.

$$\text{para } T < 0 : R_{RTD}(T) = R_0 \cdot \{1 + (A \cdot T) + (B \cdot T^2) + [(C \cdot T^3) \cdot (T - 100)]\} \tag{4}$$

$$\text{para } T > 0 : R_{RTD}(T) = R_0 \cdot [1 + (A \cdot T) + (B \cdot T^2)] \tag{5}$$

Os coeficientes do padrão IEC-60751 são:

- $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}$
- $B = -5,775 \cdot 10^{-7}$
- $C = -4,183 \cdot 10^{-12}$

## 2.4 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado foi o presente na LAUNCHXL-F28379D (Texas Instruments, 2017b), uma plataforma de desenvolvimento do microcontrolador TMS320F28379D, da série C2000 da Texas Instruments. Essa série é utilizada em uma variedade de aplicações que foca em aquisição e processamento de sinais em alta velocidade. Esse microcontrolador é de 32 bits, opera em até 200 MHz, possui

duas CPUs, duas unidades CLA (do inglês *Control Law Accelerator*), memória *flash* de 1 MB, ADC de 16 ou 12 bits, DAC de 12 bits, HRPWMs (*High Resolution Pulse Width Modulation*, suporta comunicação SPI, e possui outras funcionalidades (Texas Instruments, 2017b). Essa plataforma de desenvolvimento possibilita a utilização dos pinos do microcontrolador e possui uma sonda de depuração isolada conectada por USB, a XDS100v2 JTAG, permitindo a depuração em tempo real e a programação da memória *flash*.

O microcontrolador possui o módulo de PWM de alta resolução (HRPWM) para realizar um controle preciso, suporta comunicação SPI para comunicar-se com o ADC e possui o número necessário de pinos de entrada e saída.

O microcontrolador foi programado para:

- efetuar a comunicação com o ADC para programá-lo e ler a resistência medida pelo sensor;
- calcular a temperatura;
- ilustrar a temperatura e o *set-point* em um display LCD;
- calcular o algoritmo de controle PID;
- gerar um sinal PWM de alta resolução (HRPWM) com o *duty cycle* calculado pelo controlador;
- controlar a ponte H para ou esquentar ou esfriar o sistema;
- receber interrupções externas por meio de botões para mudar o *set-point*.

#### 2.4.1 Programação

A programação do microcontrolador é feita na linguagem de programação C, por meio do *software* Code Composer Studio (CCS). Para consulta, utilizou-se o manual de referência técnico do microcontrolador (Texas Instruments, 2013), bibliotecas e exemplos da Texas Instruments (Texas Instruments, 2019), assim como o *firmware* exemplo para utilização da ADS124S08EVM (Texas Instruments, 2016), que foi modificado e adaptado para o microcontrolador utilizado. O acesso aos registradores foi feito pela abordagem estrutural *bit-field* (Texas Instruments, 2005). O algoritmo e o projeto CCS desenvolvido neste trabalho pode ser visualizado no git-hub: [https://github.com/lucasbertolossi/F28379D\\_temp\\_measurement](https://github.com/lucasbertolossi/F28379D_temp_measurement).

## 2.5 Controle

O sistema de controle utiliza como entrada o erro entre a temperatura medida e a desejada (chamada também de *set-point*). Esse erro é utilizado para calcular o *duty cycle* do sinal PWM (saída do controlador), que é enviado para a ponte H, atuando nas células Peltier para que elas aumentem ou diminuam a temperatura do sistema, com o propósito de atingir a temperatura desejada.

Foi utilizado neste trabalho um controlador PID (proporcional, integrador e derivativo), similar ao implementado no sistema original presente no laboratório. Esse controlador possui três termos. O termo proporcional P corresponde ao controle proporcional. O termo integral I tem uma ação controladora que é proporcional à integral do erro no tempo, tendo o objetivo de levar o erro de regime permanente a zero. O termo derivativo D é proporcional à derivada do erro no tempo, ajudando a prever erros futuros. Segundo Astrom e Hagglund (2006) esse tipo de controlador pode ser representado no domínio do tempo contínuo pela seguinte função de transferência:

$$C(s) = K \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (6)$$

Onde  $K$  é o ganho proporcional,  $T_i$  é o tempo integral e o  $T_d$  tempo derivativo. Outra representação do algoritmo PID é dada por:

$$C'(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (7)$$

Os parâmetros do controlador  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  se relacionam com a forma padrão por:

$$K_p = K \quad K_i = \frac{K}{T_i} \quad K_d = K \cdot T_d \quad (8)$$

Um problema da ação derivativa é que leva a um ganho muito alto para sinais de altas frequências, o que significa que pode levar o ruído a causar grandes variações no sinal de controle. Uma modificação que pode ser feita no controlador PID é filtrar o termo derivativo (ASTROM; HAGGLUND, 2006). A função de transferência do controlador cujo termo derivativo é filtrado usando um sistema de primeira ordem com constante de tempo  $\tau = T_d/N$  é:

$$\begin{aligned} C(s) &= K \left( 1 + \frac{1}{s \cdot T_i} + \frac{s \cdot T_d}{1 + s \cdot T_d/N} \right) = \\ &= K_p + K_i \cdot \frac{1}{s} + K_d \cdot \frac{s}{s\tau + 1} \end{aligned} \quad (9)$$

Como a entrada do controlador é o erro do sistema ( $e(t)$ ), pode-se inferir a saída do termo proporcional, integrador e derivativo,  $y_p$ ,  $y_i$ , e  $y_d$  respectivamente:

$$y_p(s) = e(s) \cdot K_p \quad (10)$$

$$y_i(s) = e(s) \cdot K_i \cdot \frac{1}{s} \quad (11)$$

$$y_d(s) = e(s) \cdot K_d \cdot \frac{s}{s\tau + 1} \quad (12)$$

Para realizar o controle digital, é necessário discretizar o controlador. Para isso, primeiramente, faz-se a mudança das equações do domínio da Transformada de Laplace para o domínio da Transformada Z, utilizando a transformada bilinear (também chamada de método de Tustin), pois segundo Haugen (2005, p. 34) é o método que teoricamente preserva ao máximo a resposta do controlador contínuo. Isso é feito substituindo a equação abaixo, sendo que  $T$  é o período de amostragem:

$$s \leftarrow \frac{2z-1}{Tz+1} \quad (13)$$

Obtém-se:

$$y_p(z) = e(z) \cdot K_p \quad (14)$$

$$y_i(z) = e(z) \cdot K_i \cdot \frac{Tz+1}{2z-1} \quad (15)$$

$$y_d(z) = e(z) \cdot K_d \cdot \frac{\frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}}{\frac{2\tau}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} + 1} \quad (16)$$

Desenvolvendo as equações 15 e 16, obtém-se:

$$y_i(z) = e(z) \cdot K_i \cdot \frac{T(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} \quad (17)$$

$$y_d(z) = e(z) \cdot K_d \cdot \frac{2(z-1)}{2\tau(z-1) + T(z+1)} \quad (18)$$

Continuando:

$$y_i(z)(1-z^{-1}) = e(z) \cdot K_i \cdot \frac{T(1+z^{-1})}{2} \quad (19)$$

$$y_d(z) \cdot ((2\tau + T)z - (2\tau - T)) = e(z) \cdot K_d \cdot 2(z-1) \quad (20)$$

A seguinte propriedade da transformada Z foi utilizada para passar as equações para o domínio discreto:

$$z^{-k}X(z) \rightarrow x[n-k] \quad (21)$$

Obtendo:

$$y_p[n] = e[n] \cdot K_p \quad (22)$$

$$y_i[n] - y_i[n-1] = e(z) \cdot K_i \cdot \frac{T}{2} \cdot (e[n] + e[n-1]) \quad (23)$$

$$y_d[n+1] - y_d[n] \cdot \frac{2\tau - T}{2\tau + T} = 2 \cdot K_d \cdot (e[n+1] - e[n]) \quad (24)$$

E assim obteve-se as equações 25, 26 e 27 para programar o controlador PID:

$$p[n] = K_p \cdot e[n] \quad (25)$$

$$i[n] = \frac{K_i \cdot T}{2} (e[n] + e[n-1]) + i[n-1] \quad (26)$$

$$d[n] = \frac{2K_d}{2\tau + T} \cdot (e[n] - e[n-1]) + \frac{2\tau - T}{2\tau + T} \cdot d[n-1] \quad (27)$$

Implementou-se as equações no domínio discreto, assim como considerações práticas, como a ação *anti-windup* do integrador, para que o integrador sature, e também considerando os limites do sistema. Será comentado sobre a sintonia dos parâmetros do controlador na seção 3 do trabalho.

## 2.6 Ponte H

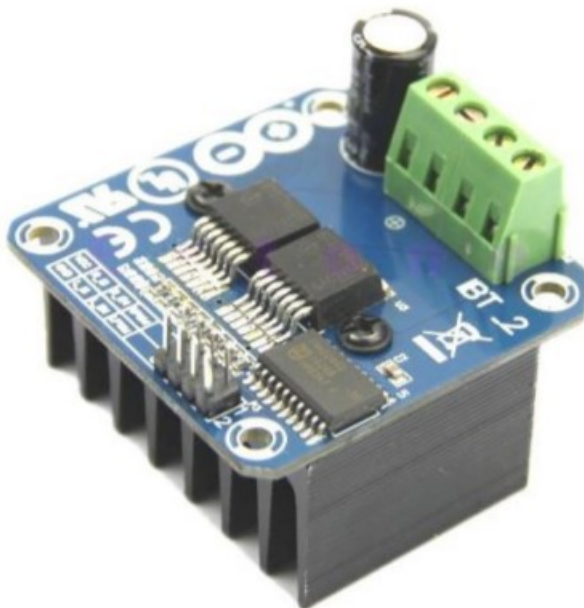
A ponte H utilizada é a IBT-2 (Figura 10). Essa placa utiliza como base duas unidades da meia ponte BTS7960, da fabricante Infineon. Cada meia ponte contém um transistor do tipo PNP e outro do tipo NPN, construindo uma ponte H completa, que pode ser observado no diagrama esquemático, na Figura 11.

O microcontrolador foi programado para controlar a ponte H, e uma porta lógica AND foi utilizada para a lógica de controle da ponte H, para que não haja curto circuito, e também para ajuste de nível de tensão. Dessa forma, habilita-se ou o sinal para que o sistema esfrie ou esquente por meio das células Peltier. Esse controle é feito por dois sinais programados no microcontrolador.

A potência entregue ao sistema depende do *duty cycle* do PWM enviado à ponte H.

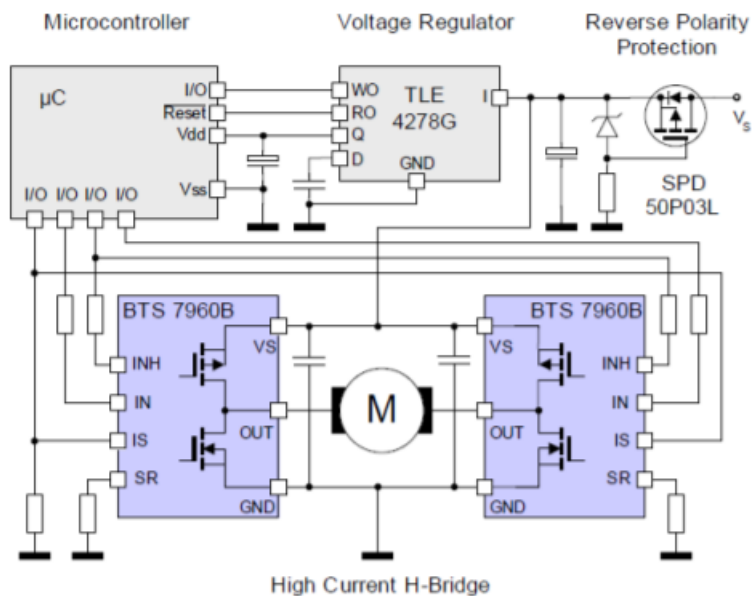


Figura 10: Ponte H IBT-2



Fonte: Datasheet IBT-2 (Handsontec)

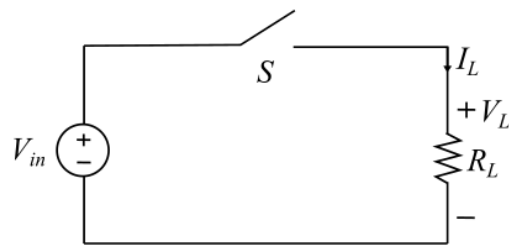
Figura 11: Diagrama esquemático da ponte H



Fonte: Datasheet IBT-2 (Handsontec)

## 2.7 Tensão aplicada nas células Peltier

Para calcular a tensão aplicada nas células Peltier, baseia-se no fundamento da modulação por largura de pulso (sinal PWM), que pode ser explicado com base no circuito da Figura 12.

Figura 12: Circuito *chopper* DC

Fonte: Elaborada pelo autor.

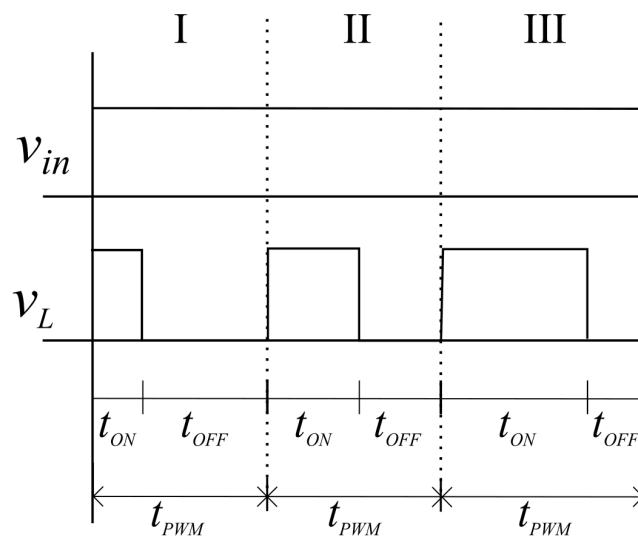
Pode-se operar a chave  $S$  para que esta feche durante um intervalo de tempo ( $T_{ON}$ ) e abra durante outro ( $T_{OFF}$ ) de maneira cíclica, sendo que  $T_{PWM} = T_{ON} + T_{OFF}$ . Considerando uma chave ideal, durante  $T_{ON}$ , a tensão na carga  $V_L$  será a tensão de entrada DC  $V_{in}$ , e durante  $T_{OFF}$ , a tensão na carga será nula.

A tensão média na carga  $R_L$  é dada por:

$$\bar{V}_L = \frac{T_{ON}}{T_{PWM}} \cdot V_{in} = d \cdot V_{in} \quad (28)$$

Onde  $d$  é a razão cíclica (também chamado de *duty cycle*). Dessa forma, pode-se variar a tensão aplicada na carga variando o *duty cycle* por meio da chave  $S$ , e esse sinal é chamado de PWM. A Figura 13 mostra um exemplo de sinal PWM ( $V_L$ ) para diferentes *duty cycles* em I, II e III.

Figura 13: Sinal PWM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, a tensão aplicada nas células peltier será dada pela multiplicação do *duty cycle* pela tensão de alimentação da ponte H.

Segundo a tabela 1, quanto menor a frequência escolhida do sinal PWM, maior a resolução do sinal. O periférico HRPWM do microcontrolador garante uma resolução de 18.1 bits para um PWM de frequência de 20 kHz. O microcontrolador foi arbitrariamente programado para que o PWM tenha uma frequência de 5 kHz, e isso garante uma resolução maior que 18.1 bits. Ou seja, para uma tensão de alimentação da ponte H de 12 V, o *duty cycle* pode controlar a ponte H em uma variação de tensão em passos menores que  $42,7 \mu\text{V}$ .

Tabela 1: Resolução para o PWM e o HRPWM

| PWM Freq<br>(kHz) | Regular Resolution (PWM)<br>100 MHz EPWMCLK |      | High Resolution (HRPWM) |       |
|-------------------|---|------|-------------------------|-------|
|                   | Bits  | %    | Bits                    | %     |
| 20                | 12.3  | 0.02 | 18.1                    | 0.000 |
| 50                | 11  | 0.05 | 16.8                    | 0.001 |
| 100               | 10  | 0.1  | 15.8                    | 0.002 |
| 150               | 9.4   | 0.15 | 15.2                    | 0.003 |
| 200               | 9   | 0.2  | 14.8                    | 0.004 |
| 250               | 8.6   | 0.25 | 14.4                    | 0.005 |
| 500               | 7.6   | 0.5  | 13.4                    | 0.009 |
| 1000              | 6.6   | 1    | 12.4                    | 0.018 |
| 1500              | 6.1   | 1.5  | 11.9                    | 0.027 |
| 2000              | 5.6   | 2    | 11.4                    | 0.036 |

Fonte: (Texas Instruments, 2013, p. 1952)

## 2.8 Lista de materiais

Neste projeto foram utilizados os materiais dispostos a seguir. Detalhes sobre eles e suas utilizações serão introduzidas posteriormente.

- 1 Sensor RTD 4 fios
- 1 Termômetro MilliK
- 1 ADS124S08EVM
- 1 LAUNCHXL-F28379D
- 1 Ponte H IBT-2
- 1 Display LCD 16x2
- 2 Chaves tácteis
- 1 Porta lógica AND

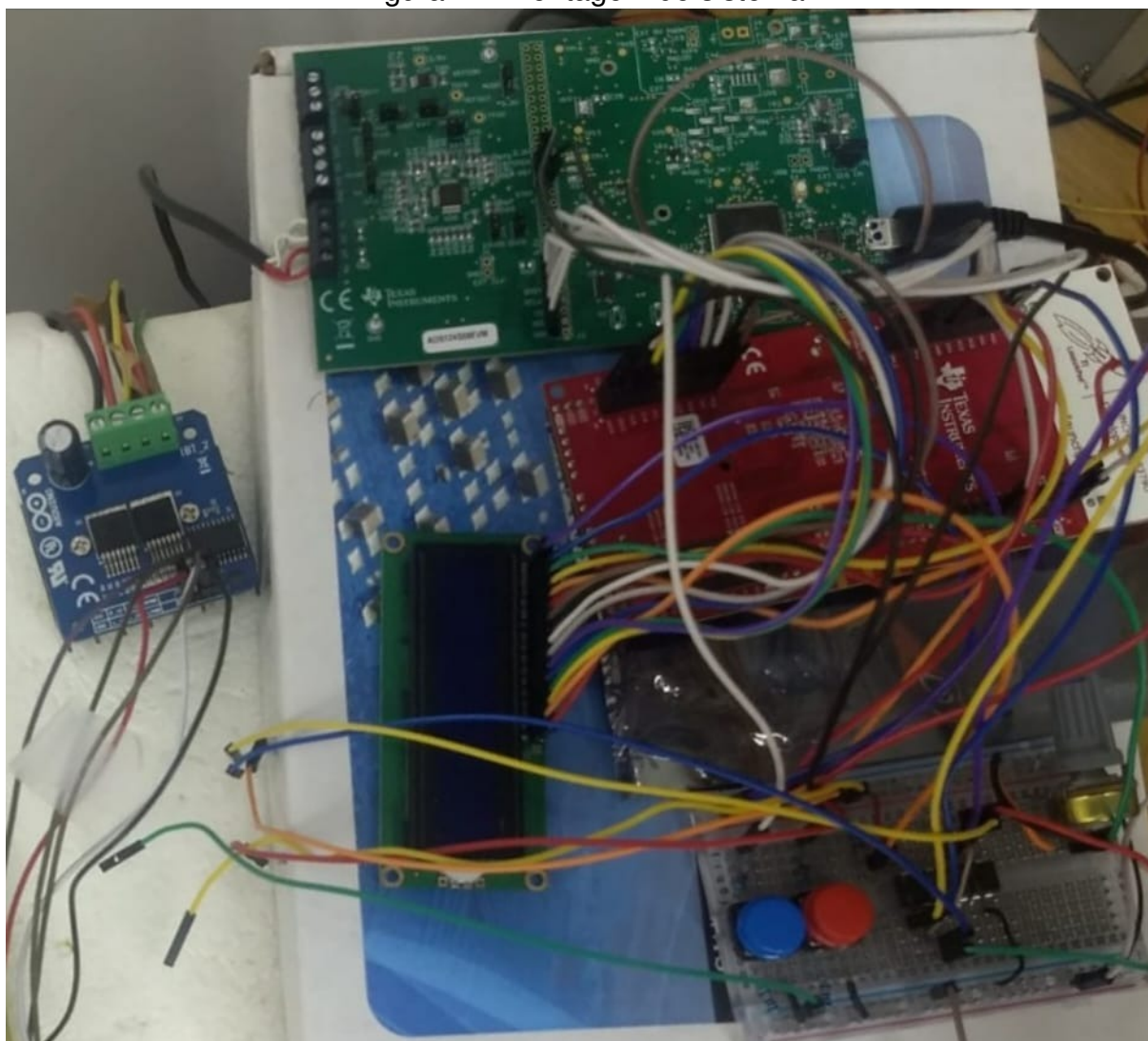
- 1 Hub USB para alimentação das placas
- Conectores dupont
- Barra de pinos, 1 jumper

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Medição de temperatura

A montagem do sistema pode ser observada na Figura 14.

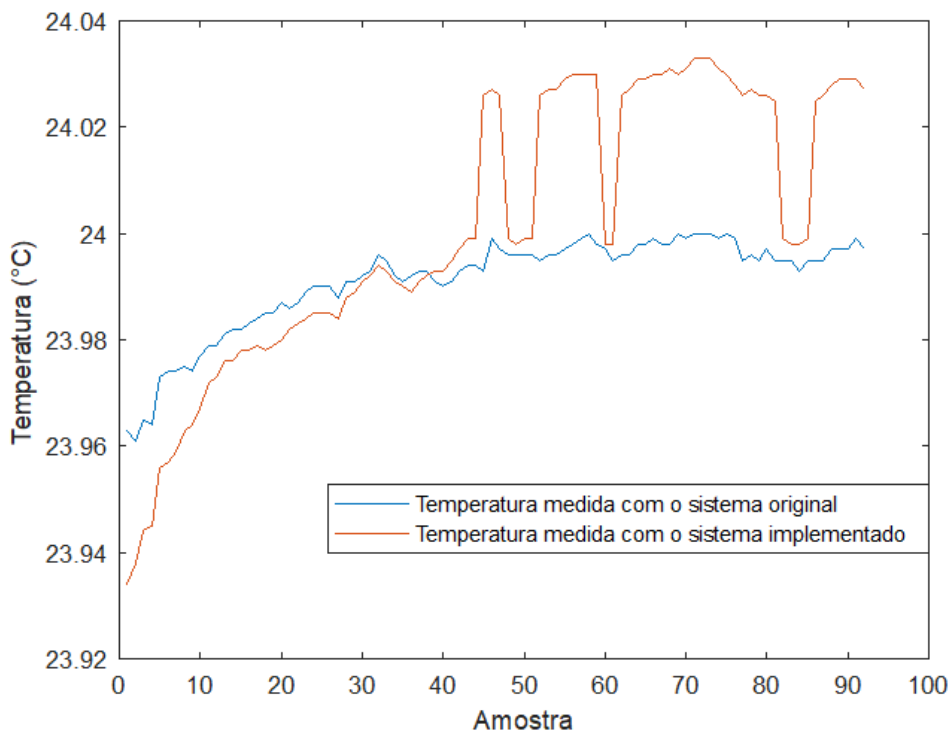
Figura 14: Montagem do sistema



Fonte: Elaborada pelo autor.

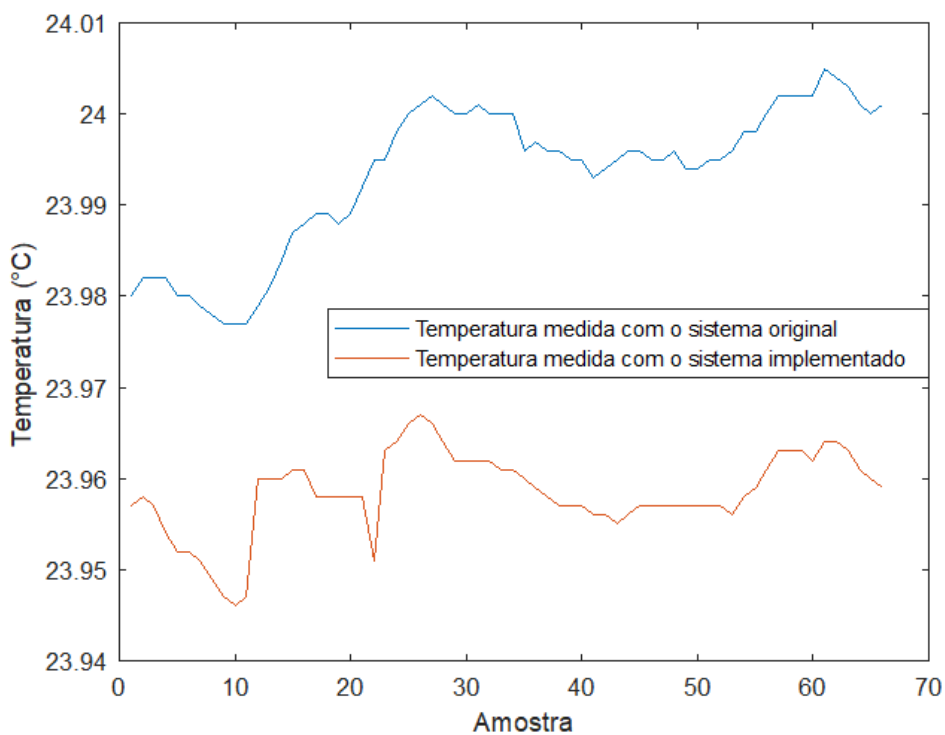
Primeiramente, a temperatura da caixa foi ajustada com uma temperatura fixa utilizando o controlador original. Os dois RTDs foram posicionados dentro da caixa e mediu-se a temperatura com o sistema original e o sistema implementado. A medição foi realizada pelo autor (não foi feita digitalmente). Nessa etapa, os valores de tensão foram convertidos para temperatura a partir da equação 5 (Callendar-Van Dusen) utilizando os coeficientes do padrão IEC-60751 e comparou-se com as medidas obtidas com o termômetro MilliK, em dois momentos diferentes. O resultado está ilustrado nas Figuras 15 e 16.

Figura 15: Medições utilizando os coeficientes do padrão IEC-60751



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16: Medições utilizando os coeficientes do padrão IEC-60751 (2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

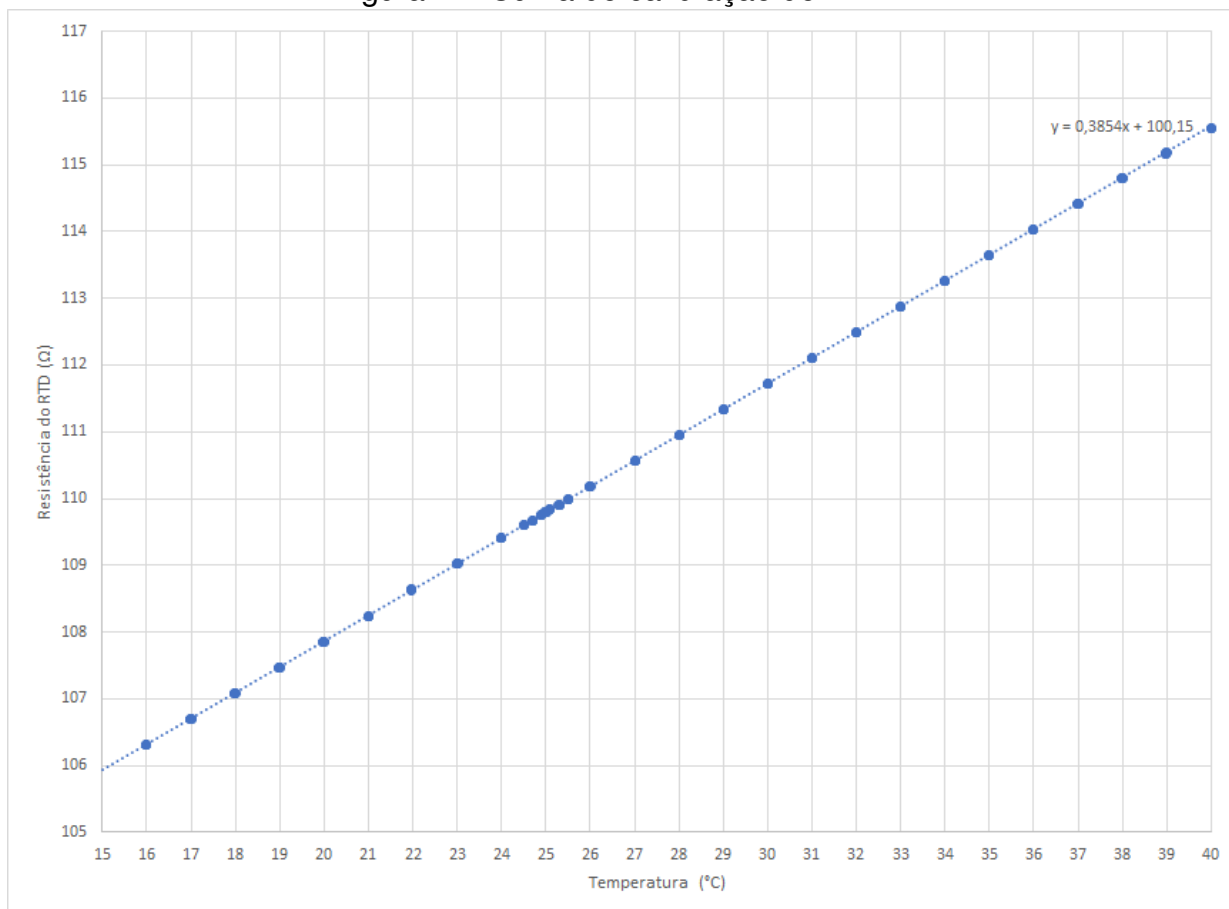
Para melhorar a exatidão da medição de temperatura, foi feita a calibração do sensor utilizado.

### 3.1.1 Calibração do sensor

A calibração é feita medindo a resistência do sensor a ser calibrado para diferentes temperaturas. A medição de temperatura nesta etapa é feita utilizando o sensor de precisão MilliK, e o sistema original foi utilizado para que a temperatura da caixa seja fixa. Com esses dados, traça-se uma curva e, com a equação desta, é possível calcular a temperatura com a resistência medida pelo sensor utilizado.

Desta forma, o sistema de controle de temperatura original foi utilizado para tornar a temperatura da caixa de isopor estável, em diferentes temperaturas. A medição de temperatura para a calibração do sensor foi feita com o sensor MilliK presente no laboratório. Mediu-se a resistência do sensor de 15°C a 40°C, de um em um grau, cinco vezes. Em torno da temperatura de 25°C, mais medidas foram feitas (25.5, 25.3, 25.1, 25, 24.9, 24.7, 24.5). Observando a medição do termômetro de precisão, ao notar que a temperatura estava estável na temperatura desejada (em torno de 10 minutos para cada *set-point*), as medições de resistência foram feitas. Com essas informações, foi feito um gráfico de pontos no Excel utilizou-se da ferramenta de ajuste polinomial para traçar a curva e obter a equação desta. O gráfico está disposto na Figura 17.

Figura 17: Curva de calibração do RTD



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, para uma curva linear, obteve-se a equação 29, que relaciona a resistência do RTD com a temperatura medida:

$$Temperatura = 2,5945 \cdot R_{RTD} - 259,84 \quad (29)$$

Fez-se o ajuste polinomial para um polinômio de segundo grau, porém o ajuste para uma curva linear (equação 29) apresentou melhores resultados. Essa equação resultante da calibração foi utilizada para calcular a temperatura a partir da resistência medida do RTD.

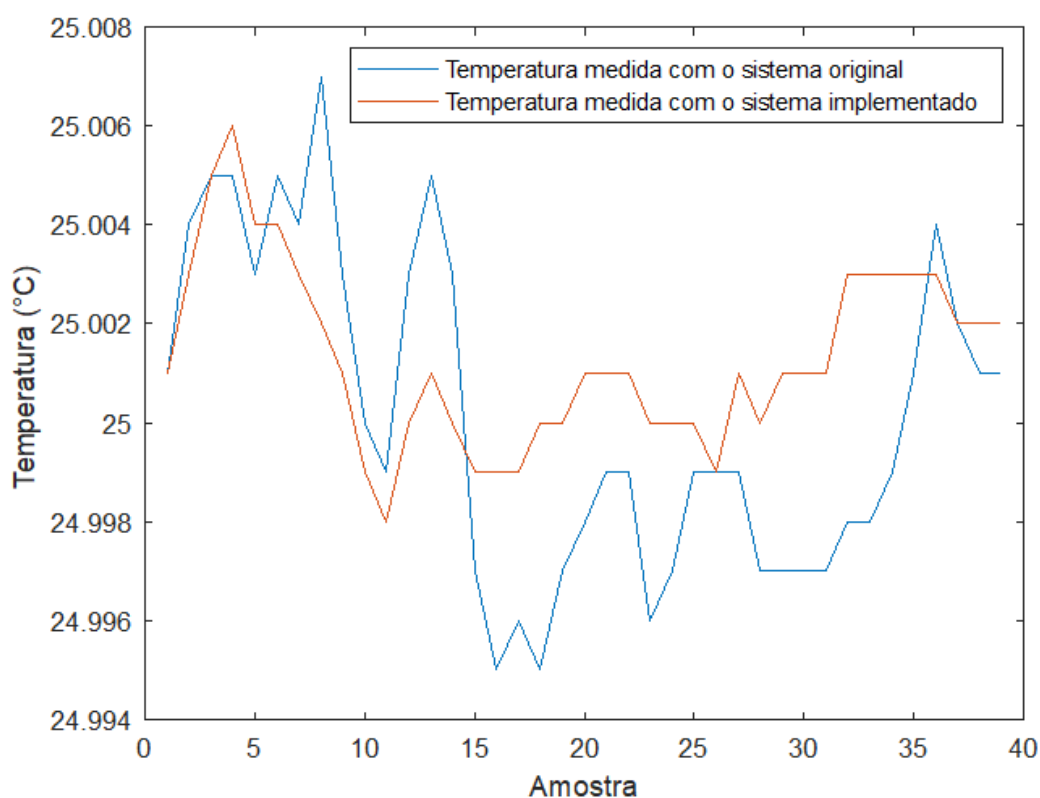
Nessa etapa de testes das medições, foi notado um problema de repetibilidade do sensor. Apesar do sinal medido estar com pouco ruído, a variação de resistência para uma mesma temperatura, em momentos diferentes, causou uma variação de temperatura medida maior do que o esperado pela classe de tolerância do sensor. Por exemplo, quando a calibração foi feita, para uma temperatura de 25°C, a resistência medida foi em torno de 109,792 Ω. Em outro momento, para essa mesma temperatura, a resistência medida foi de 109,86 Ω. Esse problema de repetibilidade pode ter introduzido um erro na calibração, impactando no cálculo da temperatura medida.



Dessa maneira, alguns ajustes foram feitos na equação de calibração para que a medição seja boa na temperatura.

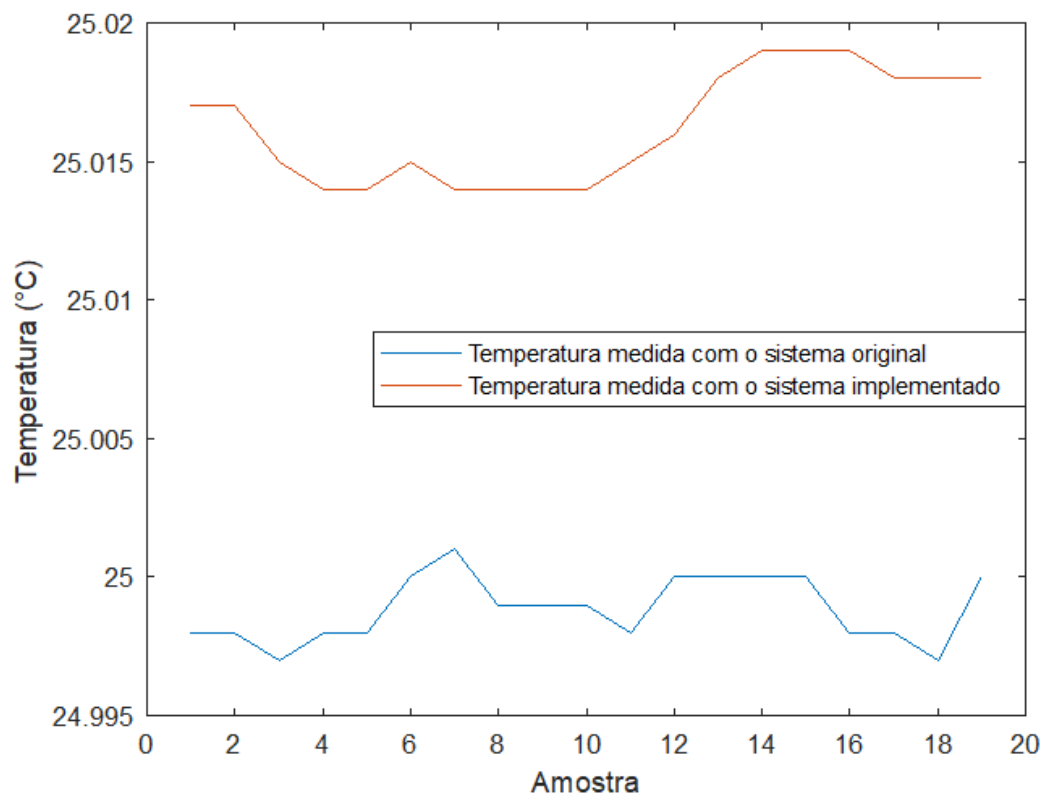
A medição de temperatura pode ser avaliada comparando com as medições do termômetro de precisão. Utilizando o controle original em um *set-point* de 25°C, mediu-se a temperatura do ar da caixa. O resultado está ilustrado na Figura 18. Após isso, provocou-se uma variação intencional na temperatura da caixa até 28°C, para que novas medições sejam feitas no *set-point* de 25°C. Os resultados das medições após a variação de temperatura estão ilustrados na Figura 19. Ao comparar ambas as medições feitas para a mesma temperatura, nota-se que após a variação de temperatura, o erro de exatidão aumentou, mas ainda ficou dentro da tolerância do sensor.

Figura 18: Medições em regime permanente utilizando o controlador original e a equação de calibração



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19: Medições em regime permanente utilizando o controlador original e a equação de calibração (2)



Fonte:

Elaborada pelo autor.

Observa-se que as medições utilizando o coeficiente padrão e utilizando a equação de calibração ficaram dentro dentro da tolerância do sensor. No entanto, não é possível inferir que a equação de calibração apresenta resultados melhores em geral porque esse teste não foi feito para diferentes temperaturas.

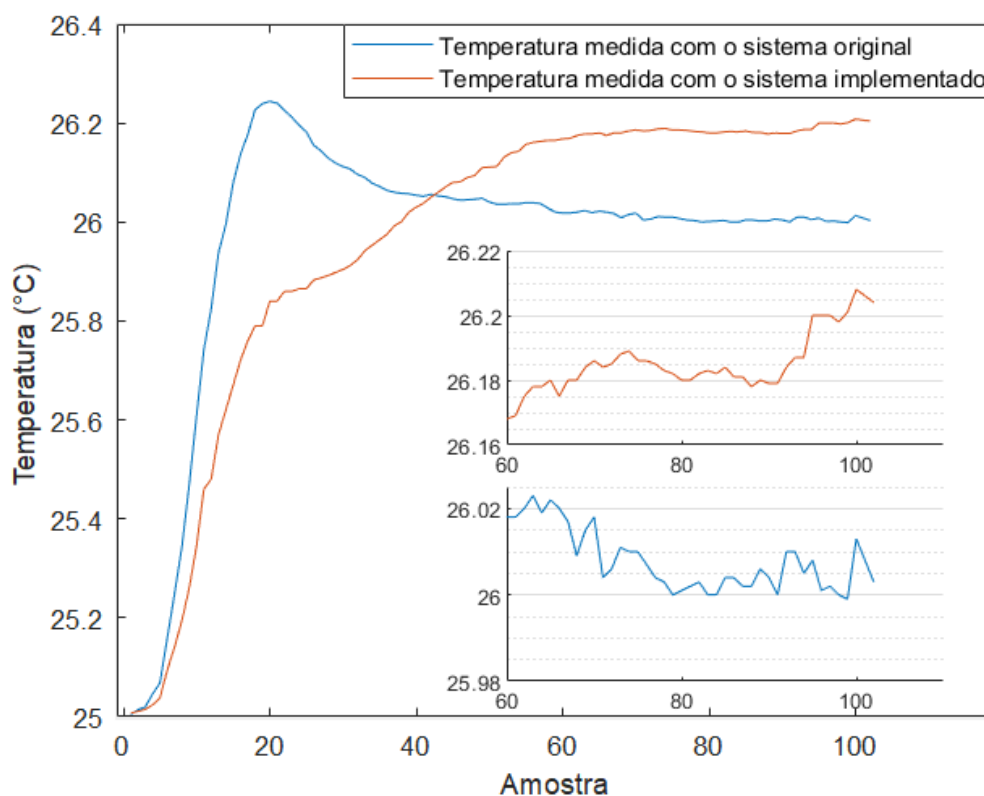
### 3.2 Controle de temperatura

O controlador utiliza a medição de temperatura como entrada, e tem como saída o sinal PWM com o *duty cycle* calculado. Como a resposta dinâmica do sensor aparenta ter um atraso de aproximadamente um a dois segundos, o controle foi ajustado para que calcule um novo *duty cycle* a cada um segundo, por meio de uma interrupção gerada por um timer. Adicionalmente, a subida do *duty cycle* foi limitada a 10% a cada um segundo, para que não cause um aumento súbito de corrente.

Adotando essas considerações práticas, fez-se o ajuste manual dos parâmetros do controlador PID, fazendo medições com o sensor a ser implementado e com o sensor de precisão. Os parâmetros ajustados  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  foram de 1,3, 0,4 e 10, respectivamente, sendo o período de amostragem  $T = 1$  s e  $\tau = 0,02$  s.

Para avaliar o controle de temperatura do sistema implementado, foram feitas medições de temperatura ao efetuar uma mudança no *set-point*, de 25 °C para 26 °C, utilizando o controle do sistema original (Figura 20) e utilizando o controle do sistema implementado (Figura 21)

Figura 20: Mudança de setpoint utilizando o controlador original

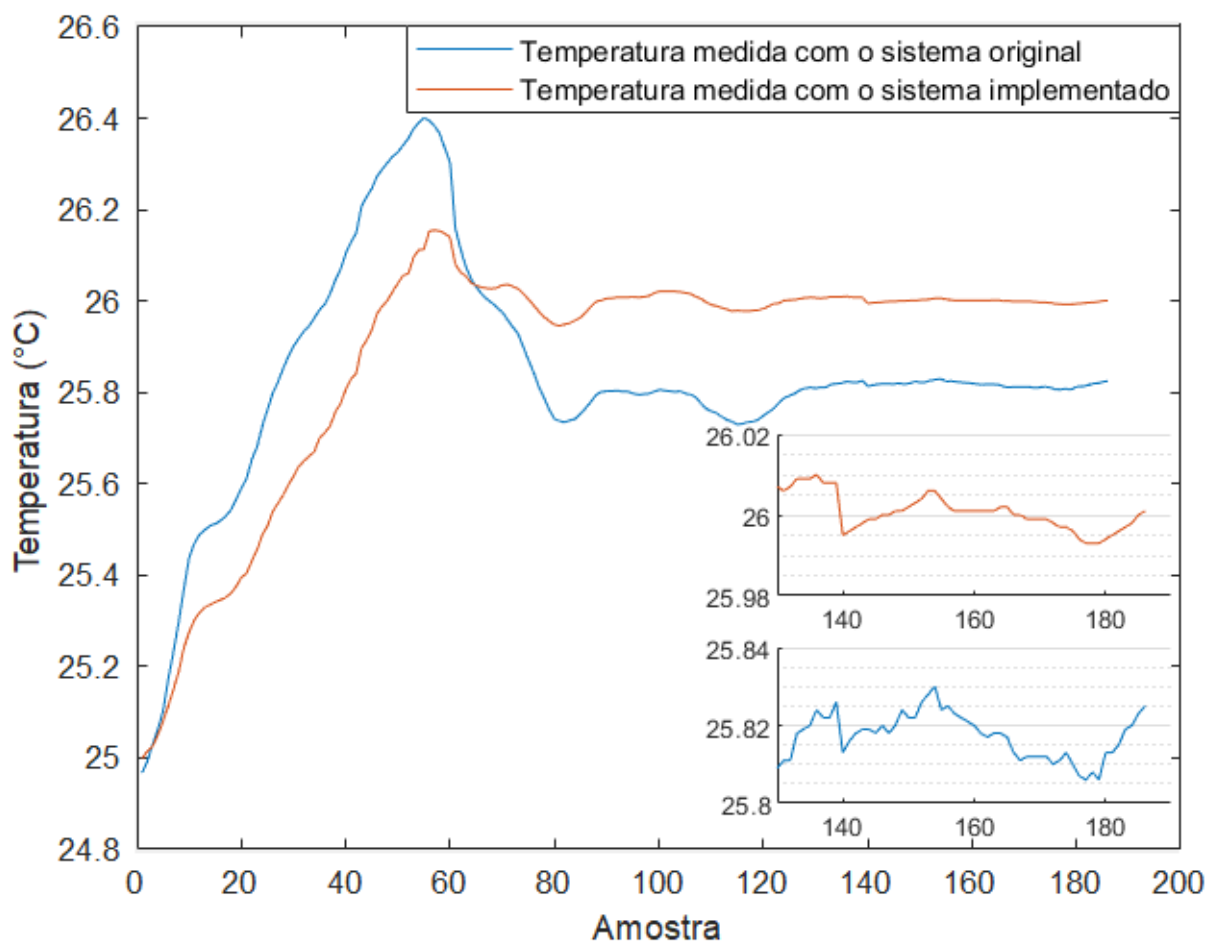


Fonte:

Elaborada pelo autor.

Observa-se na Figura 20 a diferença da resposta dinâmica entre a medida com o sensor implementado e a do termômetro MilliK. O termômetro MilliK aparenta responder melhor à variações de temperatura, além de demonstrar um tempo de regime permanente menor, visto que atingiu a estabilidade mais rápido do que o sensor implementado.

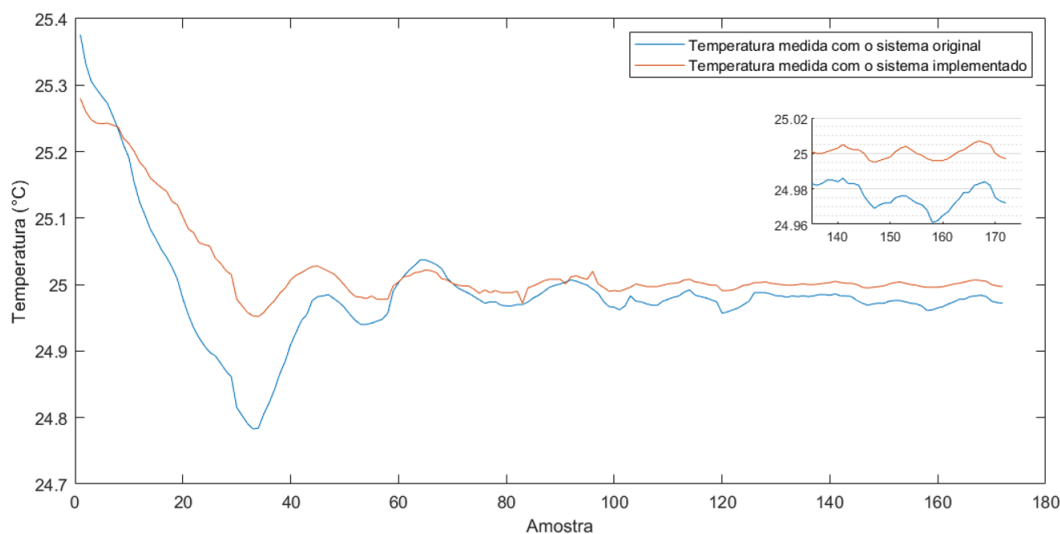
Figura 21: Mudança de setpoint utilizando o controlador implementado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar a atuação do sistema de controle implementado para um *set-point* de 25°C na Figura 22.

Figura 22: Atuação do sistema de controle implementado, *set-point* de 25°C



Fonte:

Elaborada pelo autor.

Observa-se que a diferença entre as medições de temperatura do sistema original e do sistema implementado na Figura está dentro da tolerância do sensor na Figura 22, porém isso não aconteceu para 26°C, como pode ser observado nas Figuras 20 e 21. Isso pode ser causado devido ao erro de repetibilidade do sensor, que introduz um erro à calibração, ou devido a um defeito ou danificação no sensor, por ele ser bem sensível, ou um erro no procedimento de calibração, pela possível necessidade de ter que esperar um intervalo maior para realizar a medição após observar que o sensor de precisão demonstra regime permanente.

Observa-se que, com base nas Figuras 21 e 22, o controlador implementado faz com que não haja variação de temperatura maior que  $\pm 0,01$  °C em torno do *set-point* escolhido, considerando a medição feita pelo sistema implementado, e de  $\pm 0,02$  °C considerando a medição feita pelo termômetro de precisão Millik.

## 4 Comentários finais

O circuito de medição implementado é específico para RTDs de 4 fios e portanto o ruído no sinal medido é muito baixo. Uma limitação desse circuito é possibilitar a medição de temperatura apenas com um dos oito canais que o ADC suporta.

Pelo fato de que o sensor calibrado é próprio para a medição da temperatura do ar, este não pode ser empregado para realizar o controle de temperatura do líquido a ser analisado pelo sistema de ultrassom do laboratório. Além disso, o uso desse sistema é limitado a algumas aplicações devido aos erros de medição de temperatura serem inconstantes e, dependendo da temperatura, serem maiores que a exatidão proposta. O controlador atinge a estabilidade desejada no projeto (desvio não maior que  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), considerando a temperatura medida pelo sistema implementado, e, para a medição feita pelo sensor de precisão, o desvio é menor que  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$  em torno da temperatura em que o sistema estabiliza. Conquanto, em futuros trabalhos, outros sensores RTDs podem ser calibrados com esse mesmo circuito de medição, seja próprio para líquido ou para ar. Espera-se uma calibração mais exata para sensores próprios para líquidos, e, desta forma, atingir um erro de temperatura aceitável para que esse sistema seja útil para as medições de ultrassom feitas no laboratório.

Neste trabalho, foi possível aprender sobre como programar um microcontrolador da Texas Instruments. Por exemplo, aprendeu-se a programar interrupções internas/externas, timers, a estabelecer comunicação pelo protocolo SPI, a gerar um sinal PWM de alta resolução, a discretizar e implementar um controlador PID, como ajustar os parâmetros PID e como fazer a interface de um microcontrolador com um sensor, além de calibrá-lo.

Como sugestão e informação para próximos trabalhos, pode-se estudar sobre como fazer um sistema análogo utilizando outro tipo de sensor, os termistores. Para possibilitar a medição de temperatura em líquidos, ou para melhorar a exatidão da calibração, pode ser feita a calibração de outros sensores RTD, implementando facilmente a equação de calibração no código implementado neste trabalho; Para possibilitar a medição e controle em dois canais, é necessário ou adicionar outro circuito de medição e adaptar o código para isso, ou desenvolver outro circuito de medição.

## Referências

ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. **Advanced PID control**. Advanced PID control: ISA, 2006. Citado na página 20.

Handsontec. **BTS7960 High Current 43A H-Bridge Motor Driver**. Disponível em: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/BTS7960%20Motor%20Driver.pdf>. Acesso em: 27 de fev. de 2022. Citado na página 23.

HAUGEN, F. **Discrete-time signals and systems**. 2005. Citado na página 21.

Infineon. **BTS 7960B - High Current PN Half Bridge NovalithIC**. Disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/bts7960b-pb-final.pdf?folderId=db3a3043156fd5730116144c5d101c30&fileId=db3a30431ed1d7b2011efe782ebd6b60>. Acesso em: 27 de fev. de 2022. Citado na página 22.

ISOTECH. **milliK Precision Thermometer**. Disponível em: <https://www.isotechna.com/MilliK-Precision-Thermometer-p/millik.htm>. Acesso em: 1 de mar. de 2022. Citado na página 14.

ISOTECH. **Semi-Standard Platinum Resistance Thermometers**. Disponível em: <https://www.isotechna.com/Reference-PRTs-RTDs-p/prts.htm>. Acesso em: 1 de mar. de 2022. Citado na página 14.

LUGÃO, J. R. L. **Controlador de Temperatura para Célula de Medição de Propriedades de Líquidos por Ultrassom**. Dissertação (de Mestrado) — UNESP, 2015. Citado na página 8.

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. Pearson Education, 2011. ISBN 9780133002256. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Ca4rAAAAQBAJ>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

OMEGA. **Sensores Pt-100 Ultraprecisos para Aplicações Industriais**. Disponível em: [https://br.omega.com/pptst/P-ULTRA\\_RTD.html](https://br.omega.com/pptst/P-ULTRA_RTD.html). Acesso em: 1 de mar. de 2022. Citado na página 11.

OMEGA. **Sensores RTD Ultraprecisos para Medição de Ar e Gás**. Disponível em: [https://br.omega.com/temperature/pdf/P-ULTRA\\_RTD.pdf](https://br.omega.com/temperature/pdf/P-ULTRA_RTD.pdf). Acesso em: 1 de mar. de 2022. Citado na página 12.

Omega. **Sondas de temperatura**. Disponível em: <https://br.omega.com/prodinfo/sonda-temperatura.html>. Acesso em: 02 de mar. de 2022. Citado na página 9.

POVEY, M. J. W. **Ultrasonic Techniques for Fluids Characterization**. San Diego: Academic Press, 1997. Citado na página 8.

SENMATIC. **IEC 60751:2008 Sensor Tolerance Classes**. Disponível em: <https://www.senmatic.com/sensors/knowledge/iec-60751-sensor-tolerance-classes>. Acesso em: 1 de mar. de 2022. Citado na página 13.

Texas Instruments. **Programming TMS320x28xx and 28xxx Peripherals in C/C++ (Rev. E)**. 2005. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/spraa85e/spraa85e.pdf>. Acesso em: 04 de fev. de 2022. Citado na página 19.

Texas Instruments. **TMS320F2837xD Dual-Core Microcontrollers datasheet (Rev. O)**. 2013. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/gpn/tms320f28379d>. Acesso em: 04 de fev. de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 25.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS124S0x Low-Power, Low-Noise, Highly Integrated, 6- and 12-Channel, 4-kSPS, 24-Bit, Delta-Sigma ADC with PGA and Voltage Reference**. [S.l.], 2016. Rev. C. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS1x4S08 Evaluation Module User's Guide**. [S.l.], 2016. Rev. A. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.

Texas Instruments. **ADS1x4S08 Firmware Example Code**. 2016. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/zip/sbac159>. Acesso em: 04 de fev. de 2022. Citado na página 19.

Texas Instruments. **ADS124S08 evaluation module**. 2017. Disponível em: <https://www.ti.com/tool/ADS124S08EVM>. Acesso em: 03 de fev. de 2022. Citado na página 15.

Texas Instruments. **C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad™ development kit**. 2017. Disponível em: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>. Acesso em: 04 de abr. de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

Texas Instruments. **A Basic Guide to RTD Measurements**. 2018. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa275/sbaa275.pdf?ts=1618693099275>. Acesso em: 12 de abr. de 2021. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 15 e 18.

Texas Instruments. **C2000Ware for C2000 MCUs**. 2019. Disponível em: <https://www.ti.com/tool/C2000WARE>. Acesso em: 04 de fev. de 2022. Citado na página 19.

TIAGO, M. M. **Desenvolvimento de uma célula para medição de propriedades de líquidos por ultrassom com manipulação de amostras através de cubetas**. Tese (Doutorado) — UNESP, 2018. Citado na página 8.

VISIOLI, I. S. A. **Desenvolvimento de um Sistema Embarcado de Medição e Controle de Temperatura para uma Célula de Medição de Propriedades de Líquidos por Ultrassom**. Dissertação (de Mestrado) — UNESP, 2018. Citado na página 8.

Wavelength Electronics. **Optimizing Thermoelectric Temperature Control Systems (Rev. D)**. 2020. Disponível em: <https://www.teamwavelength.com/download/applicationtechnotes/tn-tc01.pdf>. Acesso em: 02 de mar. de 2022. Citado na página 9.

WIKA. **Pt100 in class B or F 0.3 – what does IEC 60751 say?** 2020. Disponível em: <https://blog.wika.com/knowhow/pt100-in-class-b-oder-f-03-what-does-iec-60751-say/>. Acesso em: 02 de mar. de 2022. Citado na página 9.