

**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Curso de Engenharia de Controle e Automação**

Camila Carvalho de Moura

Câmara Térmica Microcontrolada

Trabalho de Conclusão de Curso

**Curitiba
2017**

Camila Carvalho de Moura

Câmara Térmica Microcontrolada

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro, em Engenharia de Controle e Automação, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Ismael Chiamenti

**Curitiba
2017**

Camila Carvalho de Moura

Câmara Térmica Microcontrolada

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 13 de fevereiro de 2017.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
De Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Valmir de Oliveira, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Ismael Chiamenti, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Alceu André Badin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

MOURA, Camila Carvalho de. **Câmara Térmica Microcontrolada**. 2016. 44 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba. 2016.

Neste trabalho de conclusão de curso foi desenvolvida uma câmara térmica microcontrolada para aplicação laboratorial. A referida câmara térmica apresenta temperatura de operação ajustável entre 20 e 80 °C. Diferentemente das estufas convencionais, a câmara desenvolvida conta com recurso de resfriamento por pastilhas termoelétricas Peltier e aquecimento por resistência elétrica. A câmara apresenta pequeno volume físico, permitindo tratar térmicamente dispositivos com pequenas dimensões. A faixa de variação da temperatura em diferentes patamares é de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, adequada para muitas aplicações. O ajuste na temperatura é feito de forma manual e há *display* indicando o valor ajustado e o valor medido no interior da câmara.

Palavras Chaves: Controle de Temperatura, Peltier, Câmara térmica.

ABSTRACT

MOURA, Camila Carvalho de. **Câmara Térmica Microcontrolada**. 2016. 44 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba. 2016.

In this work was developed a small microcontrolled thermal chamber for laboratorial use. The one can adjust temperature operation between 20 to 80 °C. Differently from conventional heaters, the developed chamber has Peltier thermoelectric cooler to help chill and electric resistors to heat. The one shows a small physical volume, which can heat small devices within. The temperature variation in different ranges was $\pm 1^{\circ}\text{C}$, proper to many applications. The temperature adjust is made in manual mode and has a display to show the setpoint and inside chamber measured temperature.

Keywords: Temperature Control, Peltier, Thermal Chamber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transferência de calor em pastilhas termoelétricas Peltier quando	10
Figura 2. Disposição dos semicondutores tipo-p e tipo-n em uma pastilha ..	14
Figura 3. Recorte da vista frontal da câmara térmica.	19
Figura 4. Equivalente de resistência térmica para direção x e y.	20
Figura 5. Principais componentes do ARDUINO UNO.	24
Figura 6. Opções de encapsulamento para o sensor térmico 18B20.	25
Figura 7. O efeito <i>bouncing</i>	26
Figura 8. Esquema do circuito de <i>anti-bouncing</i> com SN74LS14N.	27
Figura 9. Diagrama modular das ligações eletroeletrônicas da câmara	29
Figura 10. Diagrama eletrônico	29
Figura 11. Fluxograma da execução e rotina do programa implementado no	30
Figura 12. Vista superior da câmara térmica mostando um miniventilador e o SSR acopladas a ela.	33
Figura 13. Vista do interior da câmara térmica.	34
Figura 14. Sistema de leitura para validação da estabilidade térmica da	35
Figura 15. Curva da estabilidade térmica da câmara térmica utilizando FBG.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FBG	Redes de Bragg em fibra ótica (<i>fiber Bragg grating</i>)
FOTON	Laboratório de Fotônica
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (<i>Integrated Development Environment</i>)
LCD	Tela de cristal líquido (<i>liquid cristal display</i>)
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor (<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
PI	Controlador proporcional-integrativo
PID	Proporcional-integrativo-derivativo
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>pulse width modulation</i>)
SSR	Relé de estado sólido (<i>solid state relay</i>)
USB	Barramento serial universal (<i>universal serial bus</i>)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Corrente elétrica [A].
q	Fluxo de calor [W].
α_A	Coefficiente Seebeck associado ao condutor A.
α_B	Coefficiente Seebeck associado ao condutor B.
ΔT	Variação de temperatura.
L	Espessura [m].
A	Área [m ²].
K	Condutibilidade térmica [W.m/m ² .°C].
R_t	Resistência térmica [(°C/W)].
q''	Fluxo de calor convectivo [W/m ²].
T_s	Temperatura na superfície.
T_∞	Temperatura do fluido.
h	Coefficiente convectivo [W/(m ² K)].
S	Chave mecânica.
R	Resistor [Ω].
C	Capacitor [F].

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 TEMA.....	11
1.1.1 Delimitação do Tema	13
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	13
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 JUSTIFICATIVA	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 DESENVOLVIMENTO	18
2.1 MODELAGEM TERMODINÂMICA	18
2.3 PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR	29
2.4 INTEGRAÇÃO	33
3 RESULTADOS	35
4 CONCLUSÃO	38
Código-Fonte (Arduino).....	39
6 REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia de compressores e evaporadores de gás, foi possível produzir sistemas refrigeradores com elevada eficiência térmica e razoavelmente baixo consumo de energia. Temperaturas baixas, da ordem de poucos graus Celsius possuem ampla aplicação industrial, comercial e residencial. A tecnologia do compressor dificulta ou impossibilita a construção de minicâmaras térmicas, deste modo o uso da pastilha termoelétrica Peltier (NOLAS *et al*, 2006) é uma opção vantajosa em refrigeradores menores.

As pastilhas termoelétricas Peltier são pequenas e leves, utilizando potências relativamente baixas produzem um diferencial de temperatura dependente diretamente da temperatura do ambiente. O efeito Peltier é o inverso do efeito *Seebeck*, que ocorre nos termopares. Este efeito foi inicialmente observado por Peltier em 1834. Como mostrado na Figura 1, ao circular corrente elétrica contínua - CC através dos semicondutores que compõe o Peltier, cria-se uma diferença de temperatura entre as faces (lados) do sistema (STRAZZA; RIBERI, 2004).

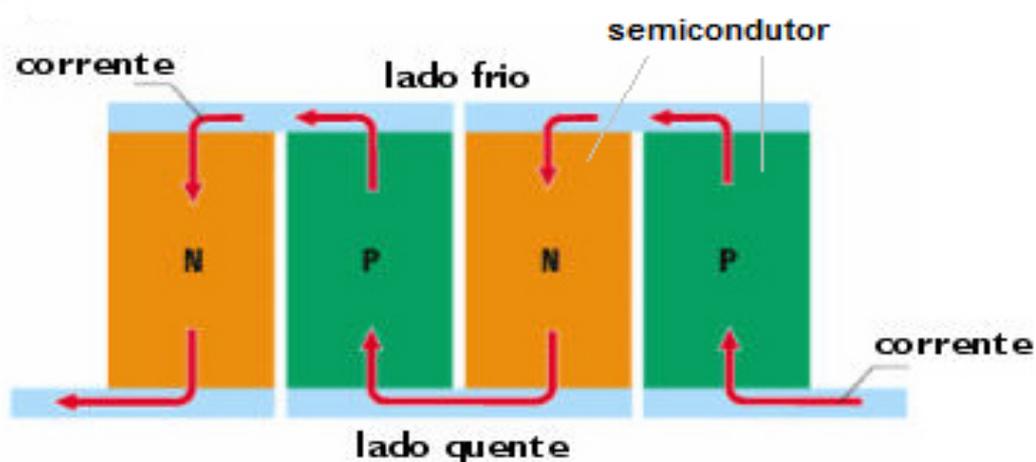


Figura 1. Transferência de calor em pastilhas termoelétricas Peltier quando submetidas corrente elétrica contínua.

Fonte: PORTAL DA REFRIGERAÇÃO (acesso: 18/05/2015).

Câmaras térmicas de pequeno volume tem aplicações importantes tais como: automotiva e laboratorial. Em automóveis, mini-refrigeradores substituem o tradicional *cooler* (ou caixa térmica), porém necessitam manterem se continuamente conectados à tomada de 12 V do automóvel.

As aplicações laboratoriais requerem normalmente um controle térmico com maior exatidão, para dispositivos de refrigeração e aquecimento. Um exemplo de aplicação laboratorial é a caracterização através da variação de temperatura de sensores óticos baseados em redes de Bragg (HILL *et al*, 1978), o qual foi o propósito para elaboração deste trabalho.

1.1 TEMA

O uso da refrigeração trouxe importantes avanços para a humanidade nas questões de conservação de alimentos, medicamentos e conforto térmico das habitações.

Em 1918 surgiu o primeiro refrigerador automático a eletricidade, com um pequeno motor. Fabricado pela Kelvinator Company, nos Estados Unidos. A indústria da refrigeração desenvolveu-se “a todo vapor” a partir de 1928, com o surgimento dos gases fluorados desenvolvidos por Thomas Midgely (DEMEC, acesso em 19/05/2015).

As pastilhas termoelétricas Pelties utilizam tecnologia semicondutora para operarem como bombas de calor. Dessa forma, apresentam algumas vantagens em relação aos sistemas com compressor, tais como a pequena dimensão e ausência de partes móveis. Para o trabalho proposto, a vibração é indesejável, pois os sensores óticos são suscetíveis a tais vibrações, de modo que poderiam interferir nas medidas.

Em 1821, o físico alemão Thomas Johann Seebeck descobriu, por acidente, que juntar dois condutores de bismuto e antimônio, em diferentes temperaturas, gera uma diferença de potencial elétrico entre estes elementos. Posteriormente, Jean Charles Athanase Peltier descobriu em 1834, que ao passar uma corrente elétrica através de uma junção formada por dois condutores diferentes se estabelece um gradiente de temperatura

entre a junção. Entretanto, Peltier não explicou a razão para esse fenômeno físico e nem os motivos do mesmo não obedecer a Lei de Ohm, além de não associar o mesmo ao efeito Seebeck.

O físico inglês John Willian Strutt, conhecido como 3º barão Rayleigh, em 1885, esboçou a possibilidade de usar dispositivos termoelétricos como geradores da eletricidade, mas seu desenvolvimento foi parado por causa da baixa eficiência encontrada. No entanto, somente em 1911 o alemão Edmund Altenkirch desenvolveu a teoria básica da termoeletricidade e dos termoelementos. Em seu trabalho, evidenciou-se que os materiais usados no refrigerador termoelétrico necessitam ter um coeficiente de Seebeck elevado e boa condutividade elétrica, a fim de minimizar o efeito Joule, assim como uma baixa condutividade térmica, para que seja maximizada a transferência do calor entre as junções.

O avanço principal, nessa tecnologia, ocorreu quando os semicondutores foram incorporados na termoeletricidade. Foi em 1920, que o desenvolvimento de semicondutores com altos coeficientes de Seebeck aumentou o interesse na termoeletricidade. Esses materiais possuem um elevado coeficiente de Seebeck, elevada condutividade elétrica e baixa condutividade térmica. Porém, naquela época não era aparente que os semicondutores eram materiais termoelétricos superiores aos metais. Depois da evolução dos semicondutores, que começou nos anos 50 e gerou uma variada aplicabilidade do efeito termoelétrico, na sua grande maioria no campo militar, o telureto de bismuto começou a ser usado como o material principal na refrigeração termoelétrica (SOUZA, 2007).

Pastilhas termoelétricas são utilizadas hoje em inúmeros setores, principalmente os de bens de consumo, automotivo, industrial e militar. As pastilhas termoelétricas são utilizadas em aplicações pequenas de resfriamento como *chips* microcontroladores ou até médias, como refrigeradores portáteis. Atualmente, os módulos mais potentes podem transferir um máximo de 250 W, tornando a tecnologia inviável para o uso em um aparelho de ar condicionado (DANVIC, acesso 19/05/2015). A grande vantagem dessas pastilhas é a ausência de peças móveis, gás

refrigerante, barulho e vibração; além do tamanho reduzido, alta durabilidade e precisão.

Este trabalho visa abranger as áreas de conhecimento de sistemas microcontrolados, eletrônica de potência, sistema de controle, transferência de calor e termodinâmica através da construção de uma câmara térmica microcontrolada, com resfriamento por pastilhas Peltier, e aquecimento por resistência.

1.1.1 Delimitação do Tema

A proposta deste trabalho é a construção de uma câmara térmica ajustável na faixa entre 20 e 80 °C, pois as pastilhas termoelétricas não suportam uma diferença de temperatura maior que 80 °C entre suas faces sem que ocorra um dano à mesma. O controle será realizado pelo microcontrolador ATMEGA328P-PU acoplado a um *kit* ARDUINO UNO¹. São mostradas através de um *display* LCD a temperatura selecionada pelo usuário e a temperatura medida no interior da câmara. A câmara foi construída utilizando gabinete em alumínio e o isolamento térmico foi obtido com o uso de manta de lã cerâmica.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

As pastilhas termoelétricas Peltier são utilizadas em situações em que o ciclo de refrigeração por compressão de gás não pode atuar, como em locais com limitações de espaço, tais como refrigerar um microcontrolador ou ainda em locais onde as vibrações mecânicas são indesejáveis.

As pastilhas termoelétricas Peltier são formadas por vários pares de semicondutores do tipo-P e do tipo-N ligados em série e colados entre duas placas cerâmicas como ilustra a Figura 2.

¹ ARDUINO. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

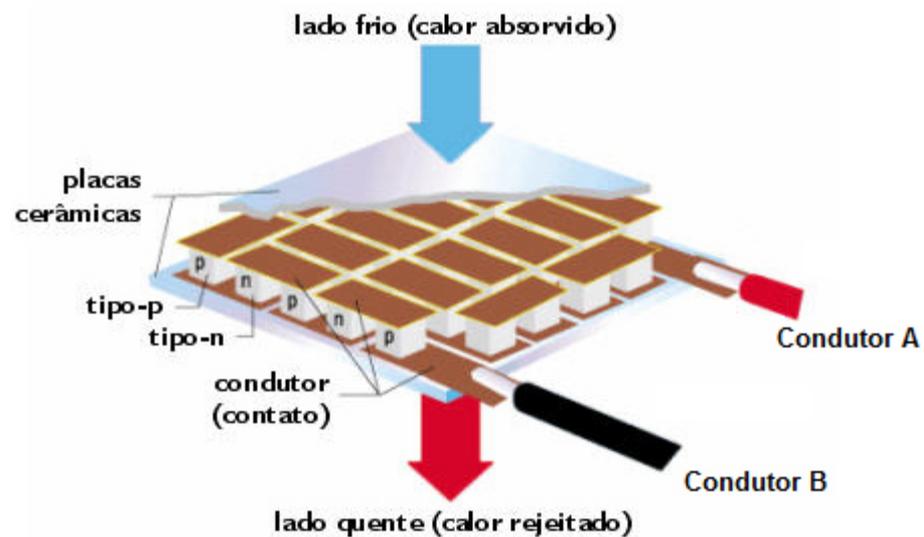


Figura 2. Disposição dos semicondutores tipo-p e tipo-n em uma pastilha termoelétrica.

Fonte: PORTAL DA REFRIGERAÇÃO (acesso: 18/05/2015).

O efeito Peltier ocorre por causa dos portadores associados a corrente elétrica I carregando diferentes valores de energia através dos dois tipos de semicondutores. Ela se manifesta como uma absorção ou dissipação de calor (q) em uma das faces da pastilha termoelétrica de acordo com a equação 1:

$$q = L (\alpha_B - \alpha_A) \Delta T \quad (1)$$

onde a corrente é positiva se flui do condutor A para o condutor B (Figura 2), sendo α_A e α_B os coeficientes de Seebeck associados aos semicondutores da pastilha. A pastilha termoelétrica possui a espessura L , em [m], e ΔT é a diferença de temperatura em Kelvin dos semicondutores (HODES, 2012).

Verifica-se que as pastilhas termoelétricas possuem um limite para transferência de calor, que é dependente da temperatura em que se encontram cada uma de suas faces para que não haja dano à mesma. O fluxo de calor q em [W], quantificado pela equação 1. Isso inibe o uso destas pastilhas para aplicações que necessitem de grande refrigeração, como refrigeradores domésticos e ar-condicionado.

1.3 OBJETIVOS

Nesta seção apresentam-se os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve por objetivo a construção de uma minicâmara térmica microcontrolada com núcleo quadrado, com dimensões internas de 170 mm x 125 mm x 240 mm, temperatura de operar na faixa de 20 °C até 80 °C, utilizando pastilhas termoelétricas Peltier para refrigeração e resistência elétrica no aquecimento.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Fazer revisão da literatura sobre termodinâmica, transferência de calor e microcontroladores,
- Projetar e fabricar a mini câmara térmica,
- Desenvolver a eletrônica de potência e de controle,
- Programar o microcontrolador,
- Integrar o sistema,
- Ensaiar a câmara em diferentes temperaturas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Existe a demanda por uma câmara térmica com controle de temperatura com exatidão e precisão, para caracterização de sensores óticos baseados em redes de Bragg no Laboratório de Fotônica - FOTON da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho desenvolvido de maneira modular, iniciou-se esquematizando as ligações eletroeletrônicas necessárias para operar o *kit* Arduino UNO, módulo para desenvolvimento em eletrônica utilizando o microcontrolador ATMEL ATMEGA328P-PU. Depois foram utilizadas técnicas de controle de sistemas para a programação do microcontrolador. O qual permite controlar a temperatura independente da massa térmica da câmara utilizada. Este passo foi importante pois os primeiros testes foram realizados em caixas de diferentes materiais e não na câmara térmica em sua versão final, e o sistema deveria adaptar-se a qualquer uma das condições.

A câmara térmica foi fabricada com chapa de alumínio 1mm de espessura, nas dimensões de 174 x 240 x 125 mm. Na parte interna foi feito revestimento com lã cerâmica de 25 mm de espessura. Foram acopladas quatro pastilhas Peltier TEC1-12706 com 40 x 40 mm ($I_{\max} = 6,4 \text{ A}$, $V_{\max} = 14,4 \text{ V}$ @ 25 °C, $R = 1,98 \Omega$) no interior da câmara, parte superior, para melhor distribuição do gradiente de temperatura, e na parte inferior foram montadas duas resistências elétricas encapsuladas em cerâmica, potência de 60 W cada. Essa distribuição dos componentes controladores de temperatura, visou melhorar a convecção no interior da câmara. Por último, foi instalado um mini-ventilador na parte posterior da câmara, responsável por forçar a circulação do ar no interior, homogeneizando a temperatura.

O controle é de tipo malha fechada ou seja, conta com sistema para realimentação. Foi utilizado um sensor de temperatura (DALLAS 18B20) no interior da câmara. Tudo controlado por um *kit* Arduino UNO com o microcontrolador ATMEL ATMEGA328P-PU. O sistema controla a corrente média na pastilha termoelétrica Peltier e na resistência de aquecimento através de sinal PWM (*pulse width modulation*). Os acionamentos para aquecimento/resfriamento nunca ocorrem simultaneamente e são ativados em função da temperatura selecionada e da leitura do sensor térmico.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 1 são apresentados o funcionamento das pastilhas termoelétricas baseadas em efeito Peltier e seu uso em automóveis e laboratorial. A Seção 1.1 traz uma abordagem histórica do ciclo de refrigeração por compressor e termoelétrica. A Seção 1.1.1 delimita o tema ao que é possível realizar dentro do cronograma e seus pontos específicos, como também descreve de maneira simplificada a proposta deste trabalho.

Na Seção 1.2 são apresentados os problemas provenientes dos usos da refrigeração por compressor e das pastilhas termoelétricas e onde cada tecnologia se aplica. A Seção 1.3 foca nos objetivos e nas etapas a serem realizadas para construção da câmara térmica.

A Seção 1.4 justifica o uso de pastilhas termoelétricas no lugar de compressores convencionais para casos específicos. A Seção 1.5 descreve uma prévia de como foi feita a construção da câmara térmica e os processos de trabalho cumpridos.

A Seção 2.1 apresenta a modelagem termodinâmica para a câmara térmica dentro da faixa de operação estabelecida. Na Seção 2.2 é mostrada a configuração do modelo eletroeletrônico que foi utilizado. A Seção 2.3 descreve parte do funcionamento do código implementado no microcontrolador. Na Seção 2.4 é mostrada a integração de todas as etapas anteriores da construção da câmara térmica e finalmente na Seção 3 é feita a validação do funcionamento.

2 DESENVOLVIMENTO

Nesse capítulo serão descritos os procedimentos para a modelagem termodinâmica da câmara térmica na Seção 2.1; Como foi montado o sistema elétrico – Seção 2.2 e na Seção 2.3, a programação implementada no microcontrolador.

2.1 MODELAGEM TERMODINÂMICA

Esta seção irá mostrar o modelo térmico da câmara de modo generalista, e também será verificado se a câmara possui isolamento térmico adequado para operar até seu limite superior (80 °C) sem grandes perdas de calor.

Devido ao fato da câmara térmica operar em dois modos distintos, o de aquecimento (resistência elétrica) e o de resfriamento (pastilha Peltier), na modelagem se faz necessário o uso da equação de conservação de energia de regime não estacionário, ou seja, o fluxo de calor varia conforme o passar do tempo.

O processo de transferência de calor através da câmara é causado pela condução e pela convecção. A condução é o processo de transferência de calor em que a energia se propaga de molécula a molécula sem que haja o transporte de matéria. Esta ocorre do sentido da região de maior temperatura para a região de menor temperatura (BORGNAKKE, 2013).

A perda de calor de um corpo por condução pode ser descrita através da lei de Fourier , mostrada na equação 2(BORGNAKKE, 2013):

$$q = \frac{K\Delta T}{L} \quad (2)$$

A equação 2 fornece o fluxo de calor q em [W] através da diferença de temperatura entre dois pontos específicos $\Delta T = T_1 - T_2$, a espessura L o qual o fluxo q atravessará, em [m], a área A em que o fluxo q atravessará,

em $[m^2]$ e o coeficiente K da condutibilidade térmica do material, em $[W.m/m^2.°C]$.

Para a câmara térmica, o regime de aquecimento ocorrerá no interior da mesma, e será considerado que as perdas por condução para o ambiente serão mínimas devido ao isolamento térmico utilizado. Deste modo, o fluxo q possui uma direção de dentro para fora da câmara térmica. Uma resistência será responsável pelo aquecimento, que está na parte inferior da câmara conforme mostrado na Figura 3.

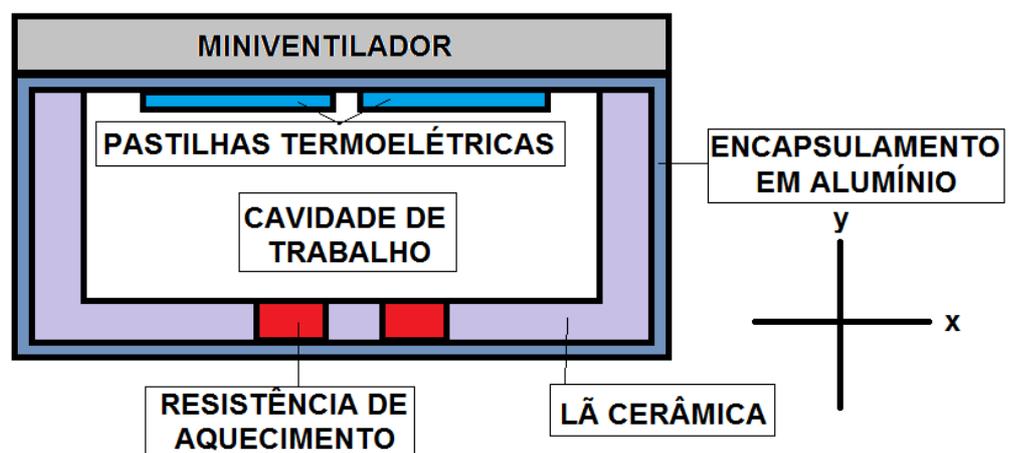


Figura 3. Recorte da vista frontal da câmara térmica.
Fonte: autoria própria.

Parte da energia térmica fornecida pela resistência aquecer outros componentes do sistema indevidamente, por efeitos inerentes a região da instalação das mesmas. Durante o resfriamento, a transferência de calor é realizada pelas pastilhas termoelétricas, e também é auxiliada pelo miniventilador instalado aos fundos da câmara.

A modelagem do sistema pode ser feita através do esquema de resistências térmicas. As resistências térmicas quantificam a perda de calor por contato entre duas paredes de diferentes materiais, e o fluxo q que fluirá pelas paredes.

A resistência térmica para sistemas lineares é dada pela equação 3(BORGNAKKE, 2013):

$$R_{tot} = \frac{L}{KA} \quad (3)$$

Também pode-se expressar q por um coeficiente global de transferência de calor conforme mostra a equação 4 (BORGNAKKE, 2013):

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{tot}} \quad (4)$$

onde R_{tot} é o equivalente das resistências térmicas das camadas da câmara, e $T_{\infty,1} - T_{\infty,4}$ é a diferença de temperatura entre dois lados de uma mesma parede.

Existe analogia entre as resistências elétricas e as resistências térmicas, assim os métodos de solução para determinação da resistência equivalente em elétrica, também valem para as resistências da termodinâmica.

Na câmara térmica, as resistências térmicas estão dispostas em forma de paredes planas, como mostrado na Figura 4.

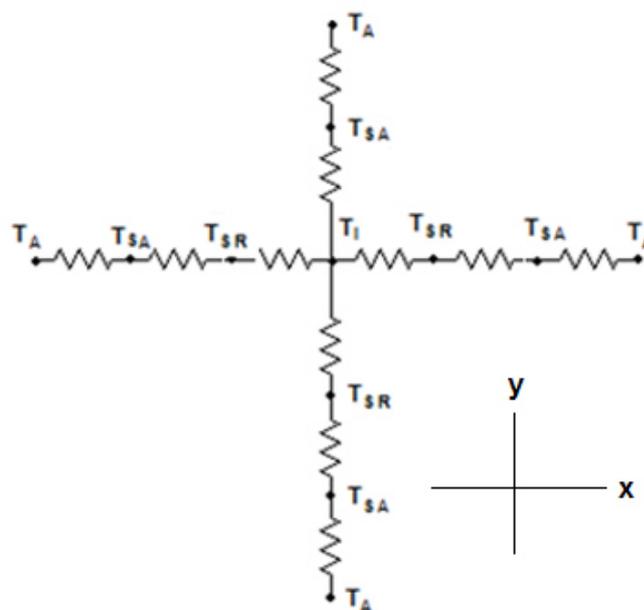


Figura 4. Equivalente de resistência térmica para direção x e y.
Fonte: autoria própria.

Na Figura 4, T_a é a temperatura ambiente, T_{SA} temperatura na superfície do encapsulamento de alumínio, T_{SR} temperatura na lã de rocha e T_i é a temperatura interna. Há uma pequena cavidade de acomodação em aço encontra-se dentro da própria câmara, a qual foi desprezada nas equação assim como as pastilhas termoelétricas devido ao sua espessura desprezível.

Logo o q equivalente total para a câmara térmica pode ser equacionado como a soma do fluxo térmico na direção x (equação 6) (BORGNAKKE, 2013) com a soma do fluxo térmico em y no plano cartesiano (equação 8) (BORGNAKKE, 2013):

$$R_{tot,x} = \frac{L_{lr}}{K_{lr}A_{lr}} + \frac{L_a}{K_a A_a} \quad (5)$$

$$q_x = 2 \left(\frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{tot,x}} \right) \quad (6)$$

$$R_{tot,y} = \frac{L_{lr}}{K_{lr}A_{lr}} + 2 \frac{L_a}{K_a A_a} \quad (7)$$

$$q_y = \left(\frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{tot,y}} \right) \quad (8)$$

Na direção z as perdas são dadas principalmente por convecção.

As constantes L_a , K_a , A_a devem-se ao encapsulamento da câmara térmica que é feita de alumínio e as constantes L_{lr} , K_{lr} , A_{lr} devem-se ao isolante utilizado (lã cerâmica). Os valores tabelados de K_{lr} são tipicamente de 0,038 [W.m/m².°C], uma baixa capacidade de transferência de calor, para K_a o valor é de 177 [W.m/m².°C], alta capacidade de transferir calor. A espessura da lã cerâmica é de 25 mm e do gabinete de alumínio de 1 mm.

Determinadas as resistências térmicas nas direções x e y ($R_{tot,x} = 49,51$ [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$] e $R_{tot,y} = 34,14$ [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]) da câmara, uma boa aproximação do fluxo térmico total pode ser dado por (equação 9) (BORGNAKKE, 2013):

$$q_{tot} = q_x + q_y \quad (9)$$

Além do fluxo térmico natural causado pela condução, existe a convecção natural dentro da câmara térmica, que seguem a lei de Newton para refrigeração.

A convecção é composta por dois mecanismos, a transferência de calor devido ao movimento aleatório molecular (difusão) e pelo movimento global (ou macroscópico) do fluido. A convecção pode ser dividida em convecção natural e convecção forçada. A lei de resfriamento de Newton segue a seguinte forma (equação 10) (BORGNAKKE, 2013):

$$q'' = h(T_s - T_{\infty}) \quad (10)$$

Onde q'' é o fluxo de calor convectivo, em [W/m^2], h o coeficiente de transferência por convecção [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], T_s a temperatura na câmara, T_{∞} a temperatura do fluido refrigerante (neste caso, o ar).

A temperatura do fluido (T_{∞}) é constante (22°C), pois a câmara ficará em ambiente controlado, o valor de h é dado para convecção natural do ar, possui um valor típico de 5 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]. Apenas o miniventilador que encontra-se na parte superior da câmara térmica fica ativado durante o regime de aquecimento, e causa convecção forçada fora da câmara, de modo que pode-se desprezar a perda de calor causada por ele.

Ao multiplicarmos a (equação 10) pela área interna [$14,5 \text{ mm}^2$] na direção z do forno temos a perda de calor q em [W] podendo ser somada a calculada em (equação 9) de modo a obter-se a transferência total de calor da câmara.

Os valores de fluxo convectivo calculados dão q'' aproximadamente -315 [W/m²] que multiplicado pela área interna do forno resulta em -4,56 [W], como a convecção ocorre na parte posterior e inferior da câmara, a perda de calor na direção z deve ser multiplicada por dois resultando em -9,12 [W], . Somados ao valor q_{tot} calculado temos -13,50 [W], que representa a perda de calor que o forno possui quando está operando no máximo (80 °C), sabendo-se que este é alimentado por duas resistências de 60 W totalizando 120 W de potência interna. Subtraindo os valores (120 – 13,5 = 106,5) [W] temos o valor aproximado da perda total de calor para o ambiente, conclui-se que a câmara é capaz de operar a temperatura de 80 °C.

2.2 SISTEMA ELÉTRICO

Os controles de aquecimento e resfriamento da câmara, são obtidos respectivamente através do acionamento da resistência elétrica e da pastilha termoelétrica Peltier. O circuito eletrônico é dividido em duas partes: circuito do microcontrolador e circuito de potência. O isolamento entre aqueles dois circuitos é feito por opto-isoladores (TIL111), de modo que não compartilham o aterramento nem as fontes de alimentação, protegendo eficientemente o controlador digital.

No circuito do microcontrolador ATMEGA328P-PU, tem-se o *kit* ARDUINO UNO alimentado por tensão de + 5V. Ligado a ele tem-se um módulo para realização de *anti-bouncing* de teclas tipo *push-button* normalmente abertas, o sensor de temperatura DALLAS 18B20, um *display* LCD e dois circuitos integrados opto-isoladores TIL111.

A Figura 5 mostra o microcontrolador ATMEL ATMEGA328P-PU. O microcontrolador opera com um cristal externo de 16 MHz, e pode ser alimentado via USB ou por um conector *Jack* com tensão de +5 V. A sua programação ocorre através da comunicação serial, possui ainda 14 saídas/entradas digitais. Estes pinos operam em tensão de +5 V, e com uma corrente máxima de 40 mA.

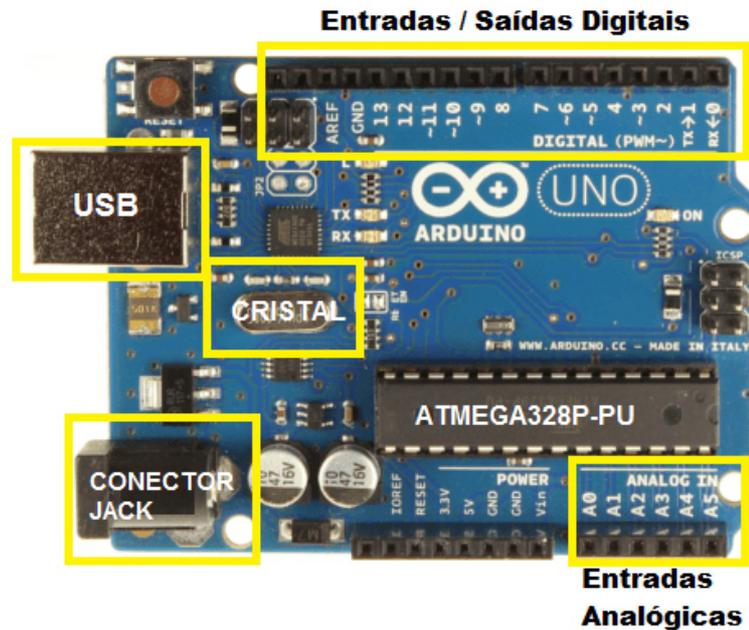


Figura 5. Principais componentes do ARDUINO UNO.
 Fonte: adaptado de EMBARCADOS (acesso: 18/11/2015).

O sensor de temperatura escolhido foi um DALLAS 18B20 (Figura 6). O sensor é um circuito integrado que com bibliotecas específicas para comunicação com o ARDUINO, já que cada sensor possui um número serial único e fornece os dados de saída já em *bits* (SOUZA, 2015). Sua faixa de medição de temperatura é de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ com precisão de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Possui resolução de 9 a 12 *bits*, programável.

O sensor de temperatura envia os dados captados para o microcontrolador, que por sua vez, processa e envia os dados para o *display* LCD. O *display* também utiliza as mesmas referências de terra e alimentação do ARDUINO, e possui uma regulagem do contraste feito por um potenciômetro. As ligações entre os pinos do ARDUINO e do *display* LCD são mostradas na tabela 2.

PIN ASSIGNMENT

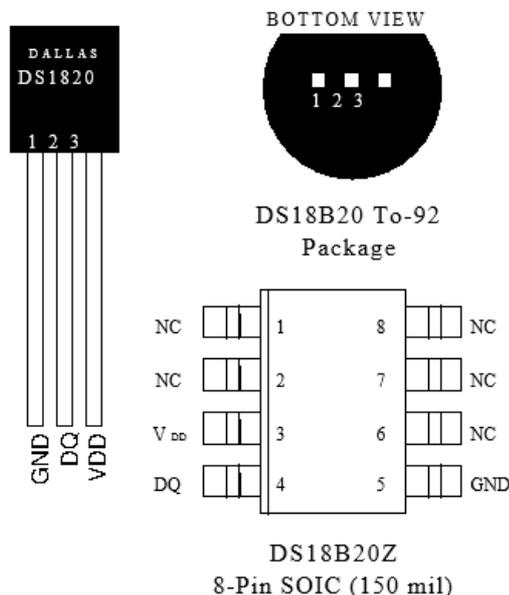


Figura 6. Opções de encapsulamento para o sensor térmico 18B20.
Fonte: ALLDATASHEET (acesso: 18/11/2015).

Para o incremento ou o decremento de temperatura foi utilizado duas chaves mecânicas (botões). O problema dessa solução foi que as chaves começaram a apresentar *bouncing*. O efeito *bouncing* (Figura 7) pode causar efeitos indesejáveis ao circuito elétrico, como indicar acionamentos elétricos que não ocorreram, enganando o microcontrolador e fazendo-o pensar que o botão foi pressionado mais de uma vez em seguida. Para solucionar este problema foi utilizado um método via *hardware* já que via *software* não surtiu efeito.

Tabela 1. Ligações entre as pinagens do ARDUINO e do *display* LCD.

Display LCD - Pinos	Display LCD - Função	Display LCD - ligações
1	V_{ss}	GND
2	V_{dd}	$V_{CC} - 5V$
3	V_0	Pino central do potenciômetro
4	RS	Pino 12 ARDUINO
5	RW	GND
6	E	PINO 11 ARDUINO
7	D0	Não conectado
8	D1	Não conectado
9	D2	Não conectado

10	D3	Não conectado
11	D4	Pino 5 ARDUINO
12	D5	Pino 4 ARDUINO
13	D6	Pino 8 ARDUINO
14	D7	Pino 13 ARDUINO
15	A	$V_{CC} - 5\text{ V}$
16	K	GND

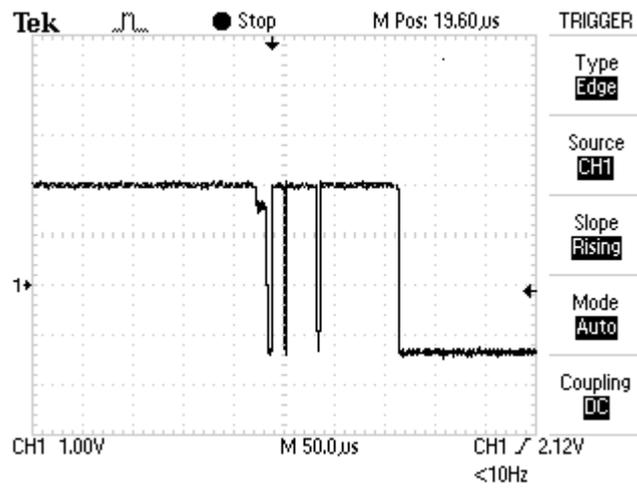


Figura 7. O efeito *bouncing*.
Fonte: LAB BOOK PAGES.

O circuito *anti-bouncing*, alimentado por uma tensão de +5 V, foi implementado utilizando um circuito integrado SN74LS14N, com a entrada da porta inversora em 1 e 3 e as saídas em 2 e 4, ligado juntamente com um capacitor ($C1 = 1\ \mu\text{F}$) e resistores ($R1 = 82\ \text{k}\Omega$ e $R2 = 22\ \text{k}\Omega$) em sua entrada de modo que o conjunto todo ao receber o sinal do botão pressionado *S* adiciona uma histerese (atraso) ao sinal antes de enviar ao ARDUINO (Figura 8).

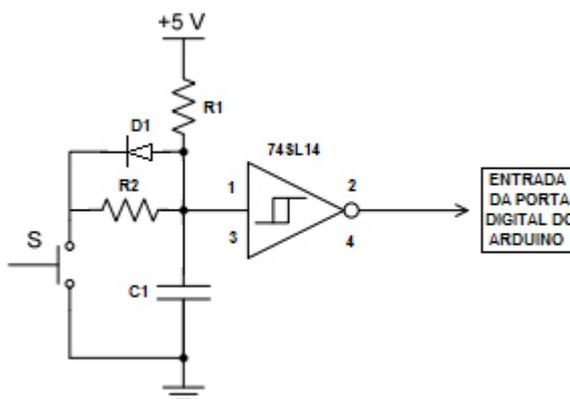


Figura 8. Esquema do circuito de *anti-bouncing* com SN74LS14N.
 Fonte: ALLDATASHEET (acesso: 18/11/2015).

Para mudar as tensões nas saídas digitais do ARDUINO é necessário o uso de bibliotecas específicas do microcontrolador, as quais controlam o *duty-cycle* do sinal PWM. Para que se alterne entre os modos aquecimento e resfriamento, é necessário que o Peltier e a resistência sejam acionados separadamente e nunca de forma simultânea. Algumas das saídas digitais do ARDUINO fornecem saídas PWM. Serão necessárias duas saídas, uma para acionamento da pastilha termoelétrica Peltier e outra para acionamento das resistências de aquecimento.

A modulação por largura de pulso (PWM), controla de forma eficiente a potência a ser entregue para uma carga, através de chaveamento eletrônico. Seu funcionamento se baseia em modulação de sua razão cíclica. Será utilizado na câmara térmica para efeito de aumento ou diminuição da temperatura conforme a variação da razão cíclica (*duty-cycle*) (AHMED). Utilizando essas bibliotecas do microcontrolador, foi possível a implementação de um controle PI (proporcional-integrativo) na câmara.

Foram utilizados dois opto-isoladores TIL111, um para controle do circuito de potência das pastilhas termoelétricas, e outro para o controle do circuito de potência das resistências de aquecimento.

O circuito de potência das pastilhas termoelétricas é alimentado por fonte de +12 V. O sinal do opto-isolador, controlado pela saída do microcontrolador efetua o chaveamento de um MOSFET IRF740 (10 A, 400

V, $R_{D_{Son}} = 0,55 \Omega$) responsável por chavear a corrente sobre as pastilhas termoelétricas.

Para as resistências de aquecimento, a alimentação é feita pela rede elétrica 127 V. O chaveamento do circuito se dá através de relé de estado sólido (SSR) com tensão de controle entre 3 e 32 Vcc e capacidade de carga 24 e 380 Vca 40 A. O acionamento do SSR é feito em +12 V, comandado por um transistor BC 547 ligado a um segundo opto-isolador chaveado por saída do microcontrolador. Os SSR, não possuem partes mecânicas, aumentando exponencialmente sua vida útil, a segurança e eliminando ruídos, operam por meio de opto-isoladores e tiristores que comutam quando uma tensão é aplicada no pinos de controle trocando o estado da condução destes. A presença de relé eletromagnético pode provocar interferência no kit arduino UNO. Tal fato justifica a utilização do SSR disponível no laboratório, com capacidade de 40A quando o circuito das resistências demandam corrente de somente 1A.

Todas as ligações podem ser esquematizadas através do diagrama em blocos da Figura 9 e o diagrama eletrônico da Figura 10 que mostra a pinagem correspondente entre o LCD e os saídas digitais do ARDUINO e está conectado diretamente as saídas digitais do ARDUINO dois opto-isoladores, o sensor de temperatura, o LCD, o circuito anti-*bouncing* com dois *push-buttons* para aumento e redução na temperatura, fechando o circuito ARDUINO UNO, alimentados por uma tensão de +5 V. No circuito de potência do aquecimento, o opto-isolador é conectado a um transistor fazendo o chaveamento da corrente do SSR, ambos alimentados por uma tensão de +12 V, sendo o SSR responsável por chavear a corrente da resistência ligada a rede elétrica. Para o circuito de potência do resfriamento, o MOSFET chavea a corrente das pastilhas Peltier e um miniventilador liga durante o seu funcionamento, todos alimentados por tensão de +12 V.

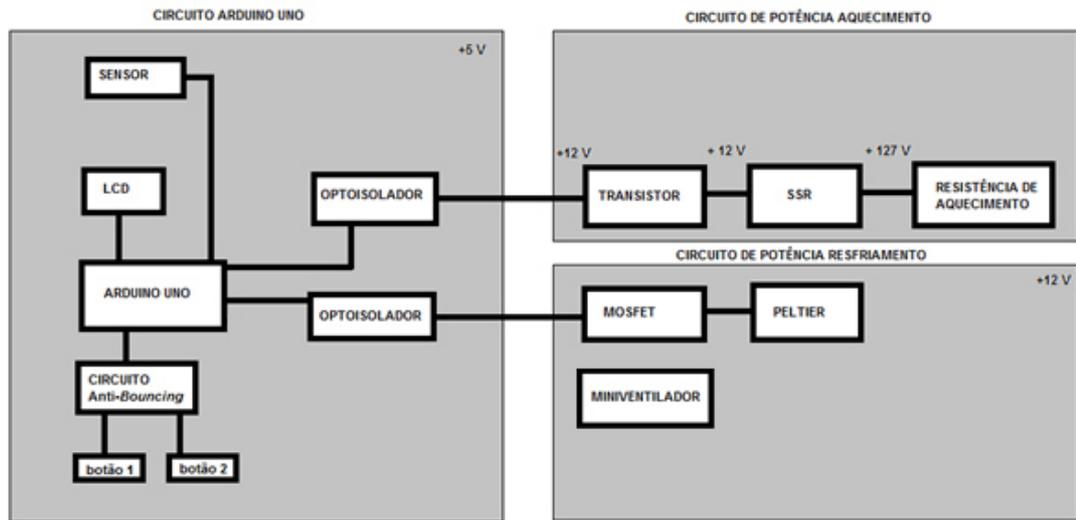


Figura 9. Diagrama modular das ligações eletroeletrônicas da câmara térmica.

Fonte: autoria própria.

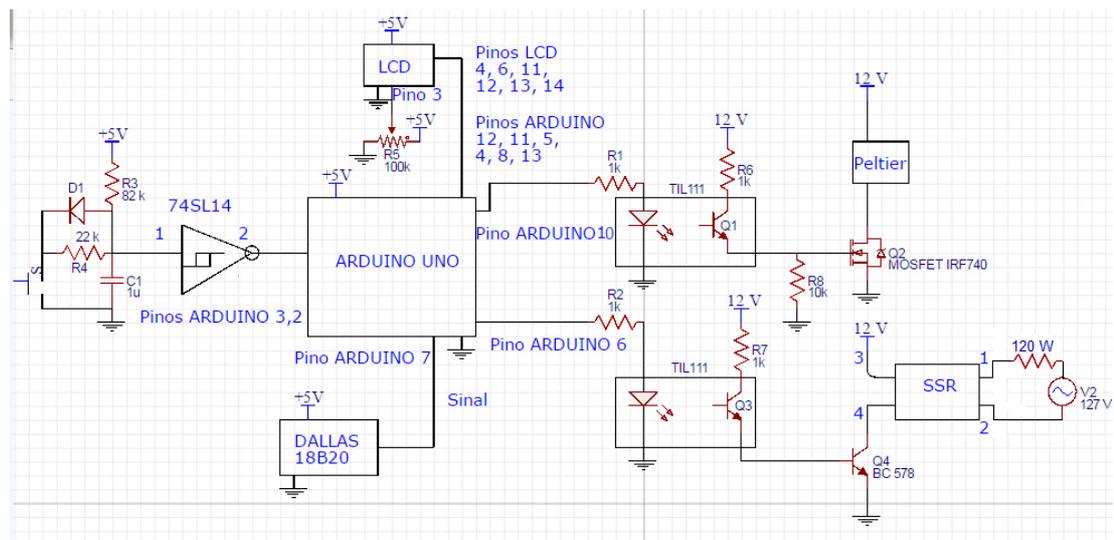


Figura 10. Diagrama eletrônico

Fonte: autoria própria.

2.3 PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR

O ARDUINO utiliza um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) próprio para sua programação. Essa IDE pode ser descarregada diretamente do site do desenvolvedor (ARDUINO) e chama-se “arduino.cc”. As linguagens de programação utilizadas são C++ e C estruturado.

O microcontrolador inicia a leitura do programa chamando as bibliotecas responsáveis pela leitura do sensor de temperatura e a leitura do

display LCD. Depois o programa localiza o sensor de temperatura através de seu endereço em hexadecimal. Uma vez identificado o sensor, o programa entra em um *loop* infinito no qual o sensor capta a temperatura e esta é mostrada no *display* LCD à velocidade de execução do programa dentro do microcontrolador. Neste *loop*, o controle PI fica atuando até a estabilização da temperatura no *setpoint*. Duas execuções de interrupção são chamadas em diferentes momentos, uma quando é desejado o incremento da temperatura, e o outro quando é desejado o decremento da temperatura, ambos causam a diferença de 1 °C da temperatura anterior. A lógica de execução do programa é mostrada no fluxograma da Figura 11.

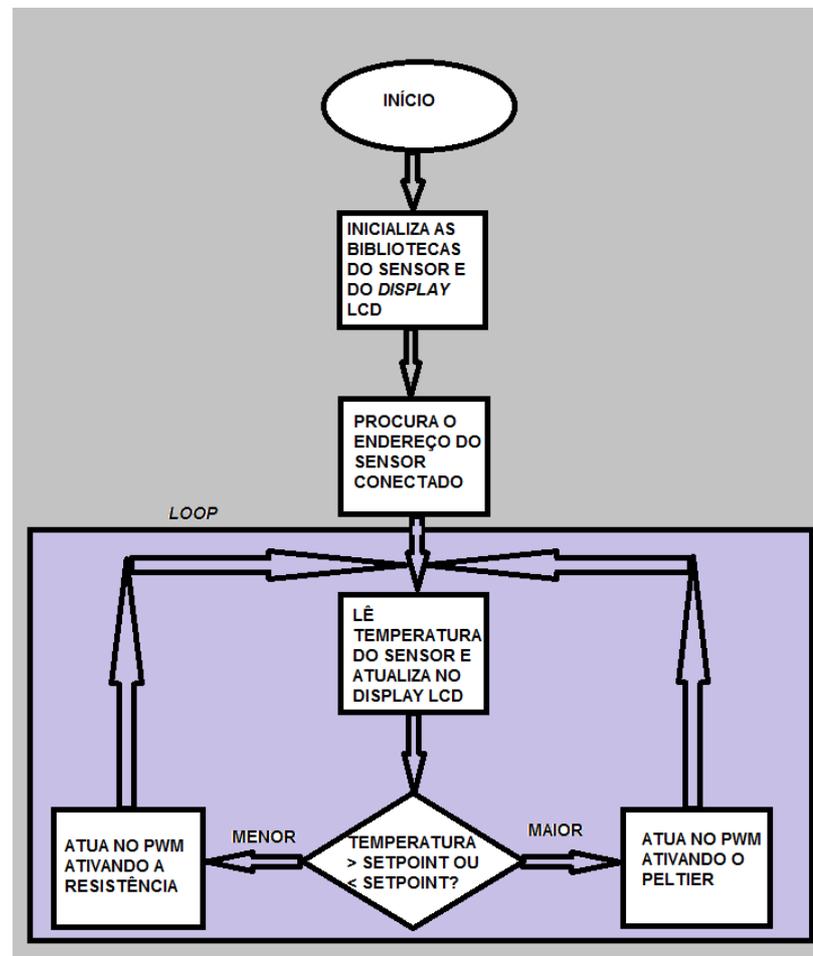


Figura 11. Fluxograma da execução e rotina do programa implementado no microcontrolador.

Fonte: autoria própria.

A programação do microcontrolador utilizou de controle PID para o controlar a temperatura. Por tratar-se de um sistema térmico, apenas um controlador do tipo PI é suficiente para obter um resultado satisfatório (OGATA, 2010).

A função a ser implementada no microcontrolador foi obtida a partir da equação do PID (equação 11) discretizada pelo o método bilinear (Tustin), resultando em (equação 12) quando retirado a sua parte derivativa. A razão do uso deste método é porque este não torna o sistema instável mesmo se a função de transferência contínua for instável, já que não se conhece a função transferência da câmara. Depois de ser discretizada, a função de transferência foi transformada numa equação a diferenças, para facilitar sua implementação no microcontrolador.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (11)$$

$$D_i(z) = K_p + K_i \frac{T z+1}{2 z-1} \quad (12)$$

Onde K_p é o coeficiente de proporcionalidade, atuando na velocidade da resposta, $e(t)$ é o erro de estado estacionário dado pela diferença entre a temperatura atual e a temperatura de *setpoint*, T_i é o tempo integral e T_d o tempo derivativo, $u(t)$ é a resposta do controlador. Na equação 14 discretizada K_i é o coeficiente integral, T é a taxa de amostragem do controlador, $D_i(z)$ a saída do controlador.

A transformada Z foi aplicada (equação 12) e separada na parte proporcional P e na parte integrativa I de maneira que fosse possível a sua implementação no microcontrolador.

A variável ek é a saída do erro de estado estacionário equação 13:

$$ek = (\textit{setpoint} - \textit{temp}) \quad (13)$$

onde o *setpoint* é a temperatura selecionada pelo usuário, e *temp* é a temperatura lida pelo sensor. A parte proporcional da equação de controle PI é diretamente dependente do erro de estado estacionário e do coeficiente de proporcionalidade K_p (equação 14):

$$P = K_p * e_k \quad (14)$$

Já para a parte integrativa da equação foi necessário o uso do erro de estado estacionário atual e_k e o erro de estado estacionário passado e_{k1} (equação 15). Também foi preciso o valor integrativo passado I_{k1} , o coeficiente de proporcionalidade K_i e o tempo de varredura do microcontrolador em milissegundos T_{ms} . A relação entre essas variáveis é dada em (equações 16 e 17):

$$I = I_{k1} + ((e_k * K_i * (T_{ms}))/2000) + ((e_{k1} * K_i * (T_{ms}))/2000) \quad (15)$$

$$I_{k1} = I \quad (16)$$

$$e_{k1} = e_k \quad (17)$$

O microcontrolador inicia a leitura do programa chamando as bibliotecas responsáveis pela leitura do sensor de temperatura e a leitura do *display* LCD. Depois o programa localiza o sensor de temperatura através de seu endereço em hexadecimal. Uma vez identificado o sensor, o programa entra em um *loop* infinito no qual o sensor capta a temperatura e esta é mostrada no *display* LCD à velocidade de execução do programa dentro do microcontrolador. Neste *loop*, o controle PI fica atuando até a estabilização da temperatura no *setpoint*.

2.4 INTEGRAÇÃO

A câmara térmica foi montada em um gabinete de alumínio (170 mm x 125 mm x 240 mm), com dimensões internas da cavidade de trabalho de 145 mm x 100 mm x 135 mm, revestida no interior com lã cerâmica ($K = 0,038 \text{ [W.m/m}^2.\text{°C]}$), e possui uma cavidade em aço – área de trabalho, para acomodar os sensores óticos a serem caracterizados. Na parte inferior da cavidade foram colocadas duas resistências de 60 W – 127 V e na parte superior quatro pastilhas térmicas Peltier. Na parte posterior existe um miniventilador que é ativado apenas quando a câmara térmica está com o circuito de potência de resfriamento ativado, ajudando a resfriar a câmara. Sobre a câmara na parte exterior existe outro miniventilador maior feito em alumínio responsável por dissipar calor das pastilhas termoelétricas através do próprio gabinete (Figura 12).

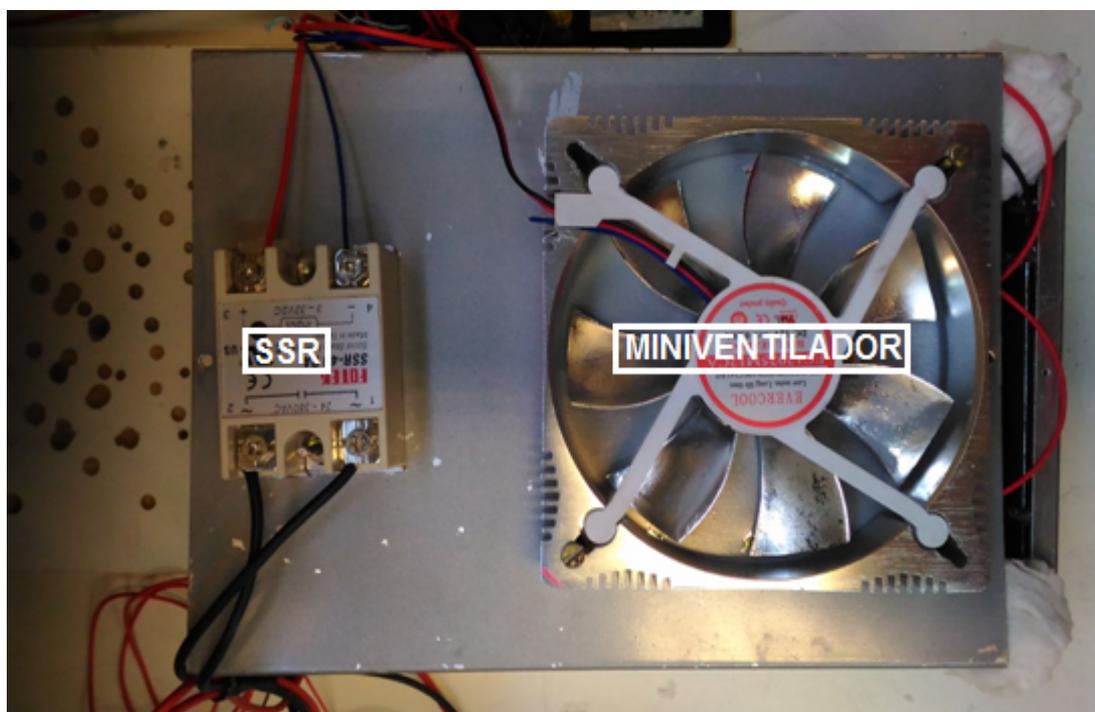


Figura 12. Vista superior da câmara térmica mostrando um miniventilador e o SSR acopladas a ela.

Fonte: autoria própria.

A câmara térmica pode ser aberta desparafusando as partes superior e lateral. No interior existe uma cavidade de trabalho aonde as amostras poderão ser caracterizadas, também abrigando o sensor de temperatura. Na área frontal existe a portinhola para permitir o acesso ao interior da câmara, com a função principal diminuir a perda de calor por convecção enquanto a câmara estiver no regime de aquecimento. Na parte posterior interior da câmara, há um miniventilador que auxilia na refrigeração da câmara e das pastilhas termoelétricas durante o regime de resfriamento.

Para ajudar a convecção natural interna da câmara, foi necessário a instalação das pastilhas termoelétricas na parte superior interna, fixadas por trilhas construídas com fenolite. A forração com lã cerâmica foi feita nas laterais e na parte inferior da câmara, sob a cavidade de trabalho, acomodando também as resistências de aquecimento (Figura 13).

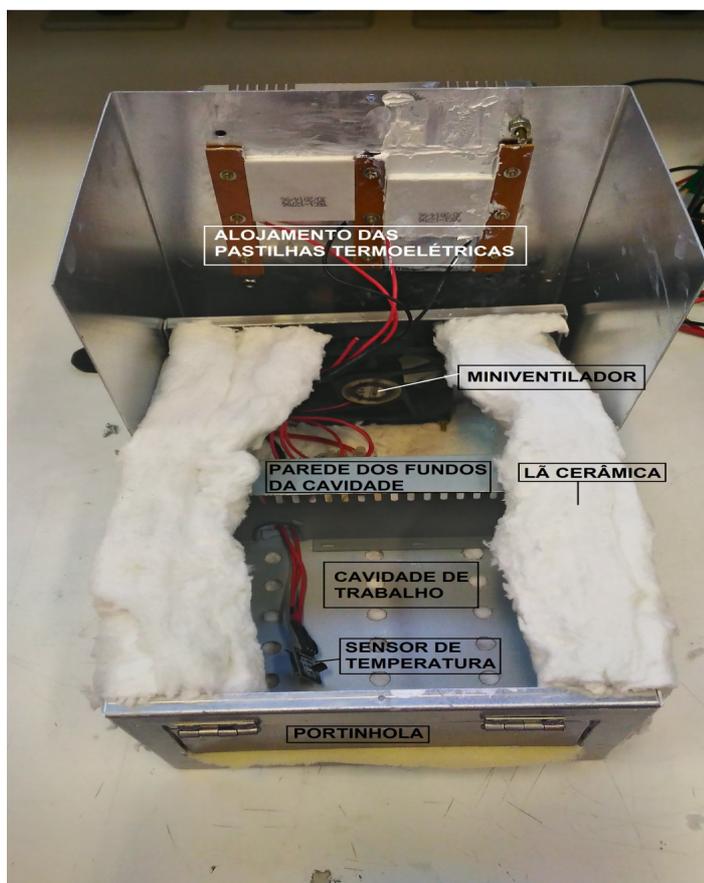


Figura 13. Vista do interior da câmara térmica.
Fonte: autoria própria.

3 RESULTADOS

Para validação do controle de temperatura e da estabilidade térmica da câmara, foi utilizada um sensor de temperatura com tecnologia ótica, baseado em redes de *Bragg* em fibra (FBG). A razão do uso da FBG como sensor de temperatura deve-se ao fato dela possuir um coeficiente de sensibilidade térmica de aproximadamente $12,5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, que é muito superior ao sensor DALLAS 18B20. A FBG foi emendada em um cordão de fibra ótica convencional monomodo (SMF) para que fosse possível analisar o espectro da rede durante a variação da temperatura. Para a análise do espectro foi utilizado um interrogador ótico *Micron Optics SM125*. A FBG foi conectada através do rabicho à porta do interrogador ótico, por onde recebe a luz para ser refletida e realizada a aquisição do espectro da rede de Bragg, conforme a figura 14.



Figura 14. Sistema de leitura para validação da estabilidade térmica da câmara.

Fonte: Autoria própria.

As FBG's são sensores intrínsecos para temperatura, deformação e pressão, já que essas perturbações podem alterar o índice de refração e/ou o período da rede (KERSEY, 1997). Pode-se medir a temperatura por meio

do deslocamento do pico do espectro de reflexão da rede de Bragg. O comprimento de onda da FBG desloca-se espectralmente para maiores valores quando a temperatura aumenta.

Uma FBG previamente gravada com *laser* excímero *Coherente* Xantus Xs 248 nm, através da técnica interferométrica por máscara de fase, foi colocada dentro da câmara térmica para caracterização da estabilidade térmica. A temperatura iniciou-se em 25 °C, subindo em rampas, e estabilizando a cada 10 °C, com limite superior de 80 °C.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 3:

Tabela 3. Resultados obtidos durante o ensaio da câmara térmica.

Patamar	Setpoint (°C)	Sobresinal (°C)	Tempo de estabilização do sobressinal (min)	Flutuação do erro do estado estacionário (°C)
1	30	6,8	14	± 1,5
2	40	7,3	8	± 1,7
3	50	6,2	6,4	± 2,8
4	60	5,8	5,9	± 2,4
5	70	4,8	3,9	± 2,8
6	80	4,5	4,6	± 2,4
7	70	3,2	3,9	± 2,3
8	60	2,8	4,5	± 1,2
9	50	2,4	5,2	± 1,5
10	40	1,8	4,5	± 0,9
11	30	1,4	8,5	± 1

A curva de caracterização da câmara térmica feita com o sensor ótico é apresentada na Figura 15:

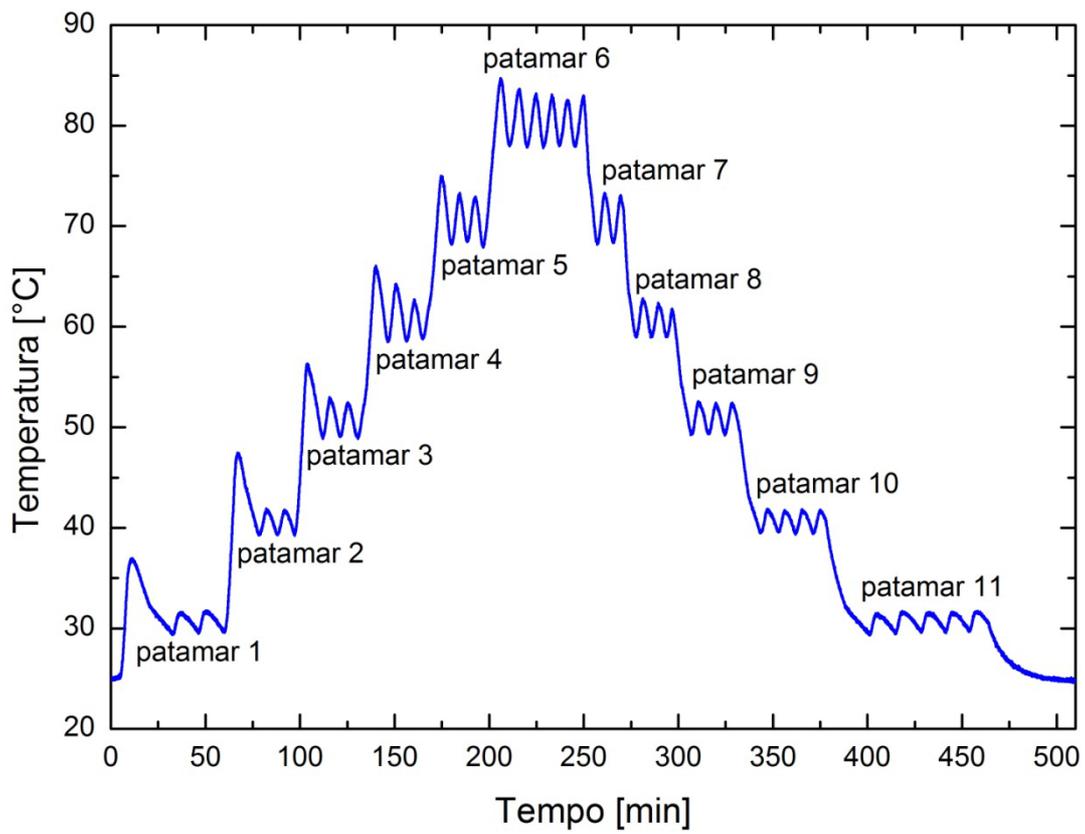


Figura 15. Curva da estabilidade térmica da câmara térmica utilizando FBG.
Fonte: Autoria própria.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho, além de integrar diversas áreas de conhecimento das engenharias tais como elétrica, eletrônica de potência, microcontroladores, termodinâmica, mecânica, física, controle, medidas elétricas e ótica, alcançou alguns dos objetivos estipulados.

A câmara térmica apresentou uma faixa de flutuação máxima de $\pm 2,8$ °C da temperatura de *setpoint* e um sobresinal de 6,2 °C para um tempo de estabilização de 6,4 minutos, não sendo adequada para caracterização de sensores óticos baseados em redes de Bragg a baixas temperaturas do laboratório FOTON e em aplicações similares. Através da modelagem térmica da câmara foi possível comprovar e experimentar que caso queira-se maior faixa de temperatura, é necessário aumentar a potência dos resistores. Porém há um limite dado pelas pastilhas termoelétricas.

Como trabalhos futuros poderiam ser implementado métodos de sintonia automática para a câmara e a construção das fonte de alimentação do sistema. Também pode-se melhorar a vedação para que o sistema de refrigeração possa atingir temperaturas abaixo da temperatura ambiente e melhora da variação de temperatura em estado estacionário.

5 APÊNDICE

O programa completo implementado no microcontrolador foi:

Código-Fonte (Arduino)

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal.h>

#define ONE_WIRE_BUS 7
OneWire oneWire (ONE_WIRE_BUS);

float tempMin = 999;
float tempMax = 0;
long int TempSP;
int Kp = 300;
int Ki = 70;
int Kp2 = 4;
int Ki2 = 1;
int T_ms = 0.25;
int cycle;

DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1;

LiquidCrystal lcd(12,11,5,4,8,13);

void setup(void) {

  Serial.begin(9600);
  pinMode(3,INPUT);
  pinMode(2,INPUT);
  sensors.begin();
  analogWrite(9, 126);

  Serial.println("Localizando os sensores");
  Serial.print("Foram encontrados ");
  Serial.print(sensors.getDeviceCount(),DEC);
  Serial.println(" sensores.");

  if(!sensors.getAddress(sensor1,0))
    Serial.println("Sensores nao encontrados!");

  Serial.print("Endereco sensor: ");
  mostra_endereco_sensor(sensor1);
  Serial.println();
  Serial.println();
  lcd.begin(16,2);

  sensors.requestTemperatures();
  TempSP = sensors.getTempC(sensor1);

  attachInterrupt(0,incremento,RISING);
  attachInterrupt(1,decremento,RISING);
}
```

```

void mostra_endereco_sensor(DeviceAddress deviceAddress)
{
    for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
    {
        if(deviceAddress[i] < 16)
            Serial.print("0");
            Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
        }
    }

void loop() {

    sensors.requestTemperatures();
    float tempC = sensors.getTempC(sensor1);

    if(tempC < tempMin)
    {
        tempMin = tempC;
    }

    if (tempC > tempMax)
    {
        tempMax = tempC;
    }

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Temp.: ");
    lcd.write(223);
    lcd.print("C");
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print(tempC);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("TempSP: ");
    lcd.setCursor(8,1);
    lcd.print(TempSP,1);

    cycle = PWM_control(tempC,TempSP);

    if(TempSP > tempC)
    {
        analogWrite(10, cycle);
    }
    else
    {
        cycle = 0;
        analogWrite(10, cycle);
    }

    if(TempSP < tempC)
    {
        cycle = PWM_control2(tempC,TempSP);
        analogWrite(6, cycle);
    }
}

```

```

    int sensorValue = digitalRead(3);
    int sensorValueDec = digitalRead(2);

    Serial.println(sensorValue, DEC);
}

void incremento()
{
    if (TempSP <= 99)
        TempSP = TempSP + 1;
}

void decremento()
{
    if (TempSP >= 1)
        TempSP = TempSP - 1;
}

char PWM_control(long int temp, long int setpoint)
{
    long int yk1, ek1, e, ek;
    long int I, Ik1, y, P;

    ek = (setpoint - temp);
    P = Kp*ek;
    I = Ik1 + ((ek*Ki*(T_ms))/2000) + ((ek1*Ki*(T_ms))/2000);

    Ik1 = I;
    ek1 = ek;

    y = P + I;
    y = (y*255)/1000;

    if(y <= 255)
    {
        return y;
    }

    if(y > 255)
    {
        return 255;
    }
}

char PWM_control2(long int temp, long int setpoint)
{
    long int yk2, ek12, e2;
    long int I2, Ik2, P2;

    e2 = (setpoint - temp);
    P2 = Kp2*e2;
    I2 = Ik2 + ((e2*Ki2*(T_ms))/2000) + ((ek12*Ki2*(T_ms))/2000);

    Ik2 = I2;
    ek12 = e2;

    y = P2 + I2;
    y = (y*255)/1000;
}

```

```
    if(y <= 255)
    {
        return y;
    }

    if(y > 255)
    {
        return 255;
    }
}
```

6 REFERÊNCIAS

ALLDATASHEET; **“ds18b20 datasheet (pdf) - dallas semiconductor”**.

Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/dallas/ds18b20.html>. (acesso em 18/11/2015).

ALLDATASHEET; **“schmitt triggers dual gate/hex inverter”**. Disponível

em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5653/MOTOROLA/SN74LS14N.html>. (acesso em 18/11/2015).

ARDUINO; **“atmega168/328-arduino pin mapping”**. disponível em:

<https://www.arduino.cc/en/hacking/pinmapping168>. (acesso em 18/11/2015).

AHMED, A.; **“Eletrônica de Potência”**. Editora Prentice Hall. 2000. 1ª edição.

BORGNACKE, C.; SONNTAG, R.E.; **“Fundamentos da termodinâmica”**.

São Paulo. Editora Blucher. 2013. 8º edição.

BRANDÃO, C.; **“Unidade de refrigeração aplicada à destilação álcoois em biodiesel”**. Disponível em:

<https://automacaoifrsrg.wordpress.com/2014/09/12/unidade-de-refrigeracao-aplicada-a-destilacao-de-alcoois-em-biodiesel/>, publicado em 12/09/2012. (acesso 18/05/2015).

DANVIC; **“Introdução ao efeito Peltier”**. Disponível em:

<http://www.peltier.com.br/intro.htm>, 2015. (acesso em 19/05/2015).

DEMEC; **“História da refrigeração universal”**. Disponível em:

ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM182/REFRIGERACAO/apostila/1_INTRODUCAO.pdf. (Acesso em 19/05/2015).

GREENSTED, A.; **"Switch Debouncing"**. Disponível em: <http://www.labbookpages.co.uk/electronics/debounce.html>. (acesso em 18/11/2015).

HILL K.O., FUJII Y., JOHNSON D. C., KAWASAKI B. S.; **"Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication,"** Applied Physics Letters, vol. 32, issue 10, 1978.

HODES, M.; **"Optimal Design of Thermoelectric Refrigerators Embedded in a Thermal Resistance Network,"** IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, vol. 2, no. 3, march 2012.

KERSEY A. D., DAVIS M. A., PATRICK H. J., LEBLACK M. and KOO K. P., **"Fiber grating sensors,"** Journal of Lightwave Technology, vol. 15, issue 8, p. 1442-1463, 1997.

NOLAS, G. S.; SHARP, J.; GOLDSMID, J.; **"Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments,"** 1st Ed, Springer, New York, 2006.

OGATA, Katsuhiko; **Engenharia de controle moderno.** São Paulo. Editora Prentice Hall. 2010. 5º edição.

PORTAL DA REFRIGERAÇÃO; **"Refrigeração eletrônica"**. Disponível em: http://www.refrigeracao.net/Topicos/refrigeracao_eletronica.htm. (Acesso em 18/05/15).

SOUZA, D. H. C.; **Otimização do Uso de Refrigeradores Termoelétricos em Processos de Refrigeração.** Brasília, 2007. 71p. Projeto de graduação (Engenharia Mecânica).

SOUZA, F.; **“Arduino UNO”**. Disponível em:
<http://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>. (Acesso em 18/11/2015).

STRAZZA, F.; RIBERI, R.M.; **“Projeto de uma Micro-adeega Climatizada de Baixo Custo,”** Tese de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.