

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELETRÔNICA**

AMANDA CHINI NIEDERMAEYER

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO CONTROLADO:
Uma aplicação da pastilha de Peltier**

**TOLEDO
2022**

AMANDA CHINI NIEDERMAEYER

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO CONTROLADO:
Uma aplicação da pastilha de Peltier**

Development of a controlled heating system: an application of the Peltier tablet

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Alberto Vinicius de Oliveira.
Coorientador(a): Prof. Luis Carlos Mathias.

**TOLEDO
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

AMANDA CHINI NIEDERMAEYER

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO CONTROLADO:
Uma aplicação da pastilha de Peltier**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 09 de dezembro de 2022

Felipe Walter Dafico Pfrimer
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcus Paulo Costa Carvalho
Especialização
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alberto Vinicius de Oliveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TOLEDO

2022

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho ao meu querido tio e padrinho
Afonso Schmidt (*in memoriam*), que acreditou em
mim antes mesmo de mim mesma.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me guiou em todos os momentos da minha vida e da graduação e me permitiu alcançar com muita força e determinação tudo aquilo ao qual eu tenho e sou hoje. Sem Ele eu nada seria.

Aos meus pais tão amados, Ademar e Cleri, por todo apoio, carinho e muita paciência. Foram vocês que por muitas vezes me reergueram e não mediram esforços para que eu pudesse alcançar tudo aquilo que eu desejei, estando comigo em todas as etapas da minha vida.

A minha irmã Andressa e aos meus sobrinhos Melissa e Maurício por estarem sempre ao meu lado, mesmo distante, pois são a minha fonte de alegria e felicidade.

Ao meu amado namorado e melhor amigo de anos, Alef. Muito obrigada por todo amor, carinho e apoio ao longo da graduação e da vida. Você veio para me trazer paz a essa minha vida turbulenta, fazendo com que todas as coisas tivessem sentido.

A minha pessoa, Amanda Martinatti, por todos os momentos inesquecíveis de companheirismo, amizade e muito estudo. Obrigada por dividir o nome 'Amanda' comigo, você sempre será a minha irmã do coração.

Ao meu orientador Alberto Vinicius de Oliveira, pela paciência em todo esse tempo de orientação e por me incentivar a não ceder as dificuldades durante a conclusão deste trabalho, mas aprender a lição que ela nos traz e ser uma profissional melhor.

A todos professores e servidores que, durante o desenvolvimento desse trabalho, me ajudaram e incentivaram, para que eu me sentisse confiante para trilhar essa jornada.

O que vale na vida não é o ponto de partida
e sim a caminhada.
Caminhando e semeando, no fim,
terás o que colher.
(CORALINA, 1997).

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de aquecimento, utilizando a pastilha termoelétrica de Peltier como fonte de calor. O sistema consiste é composto por três etapas principais, a do circuito eletrônico de potência, do circuito eletrônico de controle e a interface de comunicação com o usuário. O circuito eletrônico de potência é responsável por acionar eletricamente uma pastilha de Peltier, ao qual é composto por um conversor CC-CC *buck* ou abaixador, que varia a sua tensão de saída de 2,7 V a 11,4 V conforme a razão cíclica de chaveamento de um MOSFET na faixa de 20% a 80%, também é composto por um circuito *bootstrap*, que fornece a este MOSFET um sinal PWM de 25 kHz, vindo do circuito eletrônico de controle, e a tensão necessária para que este funcione no modo chave. O circuito eletrônico de controle é composto por um microcontrolador, responsável por realizar a leitura de um sensor de temperatura LM35, e de três botões para entrada do usuário, e tem como saída um leitor de LCD, que mostra ao usuário a razão cíclica do sinal de PWM e a última leitura feita do sensor de temperatura, também é responsável por gerar um o sinal PWM de 25kHz. A interface de comunicação é composta por um leitor de LCD e os três botões de escolha da razão cíclica. O sistema projetado completo passou pelo mesmo ensaio feito com o conversor CC-CC *buck* ou abaixador quando estava utilizando o gerador de funções de bancada como provedor do sinal PWM, os dados coletados foram comparados a fim de verificar se o sistema projetado conseguiria entregar os parâmetros desejados de funcionamento. Os parâmetros de tensão e corrente elétrica foram próximos do desejado, porém o rendimento do converso CC-CC *buck* ou abaixador ficou acima do desejado quando estava acima de 40% da razão cíclica do sinal PWM. A temperatura da pastilha de Peltier também se mostrou próxima aquela medida utilizando o gerador de funções de bancada.

Palavras-chave: circuito *bootstrap*. converso CC-CC *buck*. eletrônica de potência.

ABSTRACT

This work describes the development of a heating system, using the thermoelectric Peltier module as a heat source. The system consists of three main stages, the power electronic circuit, the control electronic circuit and the communication interface with the user. The power electronic circuit is responsible for electrically activating a Peltier module, which is composed of a DC-DC buck converter, which varies its output voltage from 2.7 V to 11.4 V according to the duty cycle that range from 20 % to 80 %. The converter is also composed of a bootstrap circuit, which supplies this MOSFET with a 25 kHz PWM signal from the unit control circuit. The communication interface has an LCD reader and the three cycle rate selection buttons. The complete designed system underwent the same test done with the DC-DC buck converter. The collected data were compared in order to verify if the designed system would be able to deliver the parameters operating targets. The voltage and current parameters were close to the desired ones, but the efficiency of the DC-DC buck converter reached the desired values only above 40% of the duty cycle of the PWM signal. The temperature of the Peltier tablet was also close to that measured using the bench function generator.

Keywords: bootstrap circuit; DC-DC buck converter; power electronics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Circuito elétrico genérico para a lei de Ohm.	18
Figura 2: Circuito elétrico equivalente para a condução térmica.	18
Figura 3: Esquema elétrico para o efeito Peltier.	19
Figura 4: Funcionamento de uma pastilha termoelétrica de Peltier.	20
Figura 5: Esquema elétrica de um circuito conversor CC-CC abaixador de tensão (<i>buck</i> ou <i>step-down</i>).	20
Figura 6: Forma de onda para a corrente <i>i_c</i> do capacitor.	22
Figura 7: Modulação por largura de pulso, exemplo de onda portadora "dente-de-serra".	23
Figura 8: Etapas gerais do sistema de aquecimento controlado pela pastilha de Peltier.	24
Figura 9: Visão geral do sistema de aquecimento controlado pela pastilha de Peltier, mostrando a composição de cada estágio do sistema.	25
Figura 10: Vista superior da plataforma metálica feita de alumínio.	26
Figura 11: vista lateral da plataforma metálica feita de alumínio.	26
Figura 12: Pastilha de Peltier, modelo TEC1-12706.	27
Figura 13: Identificação dos pinos do microcontrolador Arduino Uno R3.	29
Figura 14: Esquema elétrico para o circuito de controle.	30
Figura 15: Esquema elétrico básico da conexão simples da fonte de alimentação com o módulo termoelétrico de Peltier.	31
Figura 16: Conexão do módulo termoelétrico de Peltier no modo de conexão simples sem utilizar dissipador de calor.	32
Figura 17: Vista superior da conexão do módulo termoelétrico Peltier no modo de ligação simples, utilizando dissipador de calor.	32
Figura 18: Esquema elétrico básico referente a dois módulos termoelétricos de Peltier associados em paralelo com a fonte de alimentação.	32
Figura 19: Vista superior da conexão de dois módulos termoelétricos Peltier no modo de associação em paralelo com a fonte de alimentação, utilizando dissipador de calor.	33
Figura 20: Vista superior da ligação de dois módulos termoelétricos Peltier empilhados e no modo de conexão simples com a fonte de alimentação, utilizando dissipador de calor.	33
Figura 21: Vista lateral da ligação de dois módulos termoelétricos Peltier empilhados e no modo de conexão simples com a fonte de alimentação, utilizando dissipador de calor.	33
Figura 22: Temperatura da pastilha de Peltier em função de tensão elétrica, para diferentes configurações.	34
Figura 23: Temperatura da pastilha de Peltier em função de corrente elétrica, para diferentes configurações.	34
Figura 24: Diferença de temperatura entre as faces da pastilha de Peltier (ΔT) em função da tensão elétrica da tensão elétrica, para diferentes configurações.	34
Figura 25: Resistência elétrica da pastilha de Peltier em função da tensão elétrica, para diferentes configurações.	35
Figura 26: Esquema elétrico do circuito de potência pré-ajustes.	36
Figura 27: Rendimento do conversor CC-CC abaixador pré-ajuste em função da razão cíclica, simulação e experimental.	37

Figura 28: Esquema elétrico do circuito de potência pós-ajustes.....	38
Figura 29: Rendimento do conversor CC-CC abaixador pós-ajustes em função da razão cíclica, simulação e experimental.	38
Figura 30: Temperatura da pastilha de Peltier em função da razão cíclica, nas condições de pré e pós-ajustes do conversor CC-CC abaixador.	39
Figura 31: Formas de onda durante o processo de contagem do <i>timer</i> 1, TCNT1.....	40
Figura 32: Função para configuração dos registradores do <i>timer</i> 1 para gerar o sinal PWM de 25 kHz.....	41
Figura 33: Função para configuração do registrador OCRIx.	41
Figura 34: Fluxograma demonstrando as etapas do código-fonte.....	42
Figura 35: Sinal de PWM medido no gerador de função, A) 20% da razão cíclica.	43
Figura 36: Sinal de PWM medido na saída do optoacoplador do microcontrolador, A) 20% da razão cíclica.	43
Figura 37: B) 40% da razão cíclica.....	43
Figura 38: B) 40% da razão cíclica.....	43
Figura 39: C) 60% da razão cíclica.....	43
Figura 40: C) 60% da razão cíclica.....	43
Figura 41: D) 80% da razão cíclica.....	44
Figura 42: D) 80% da razão cíclica.....	44
Figura 43: Sinal de PWM do gerador de função medido no circuito bootstrap, A) 20% da razão cíclica.....	44
Figura 44: Sinal de PWM do microcontrolador medido no circuito bootstrap, A) 20% da razão cíclica.....	44
Figura 45: B) 40% da razão cíclica.....	45
Figura 46: B) 40% da razão cíclica.....	45
Figura 47: C) 60% da razão cíclica.....	45
Figura 48: C) 60% da razão cíclica.....	45
Figura 49: D) 80% da razão cíclica.....	45
Figura 50: D) 80% da razão cíclica.....	45
Figura 51: Gráfico da tensão elétrica medida nos terminais do conversor CC-CC abaixador.	48
Figura 52: Gráfico da corrente elétrica medida nos terminais do conversor CC-CC abaixador.	48
Figura 53: Gráfico do rendimento do conversor CC-CC abaixador.....	49
Figura 54: Gráfico da temperatura da pastilha de Peltier.	49
Figura 55: Vista superior da disposição da plataforma metálica sobre a pastilha de Peltier.	50
Figura 56: Vista lateral da disposição da plataforma metálica sobre a pastilha de Peltier.	50
Figura 57: Demonstração do aquecimento das bordas laterais da plataforma metálica.....	52
Figura 58: Demonstração da temperatura da borda lateral da plataforma metálica.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre as variáveis elétricas e as variáveis térmicas.....	18
Tabela 2: Medição de parâmetros na saída do circuito <i>bootstrap</i> com o sinal PWM oriundo do gerador de funções.....	46
Tabela 3: Medição de parâmetros na saída do circuito <i>bootstrap</i> com o sinal PWM oriundo do microcontrolador ATmega328P.....	46
Tabela 4: Valores medidos com o sensor de temperatura LM35.....	47
Tabela 5: Valores medidos através do teste com a plataforma metálica	50
Tabela 6: Valores medidos e calculados para eficiência calorífica do sistema projetado.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BTU	<i>British Thermal Unit</i> (Unidade Térmica Britânica)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Visor de cristal líquido)
MCC	Modo de Condução Contínua
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação de largura de pulso)

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Quantidade de transferência de calor
Q_{cond}	Taxa de condução de calor
k	Condutividade térmica
A	Área da seção transversal de uma camada plana
T	Temperatura
ΔT	Diferença de temperatura
Δx	Espessura de uma camada plana
P_D	Potência dissipada
T_J	Temperatura de junção
T_A	Temperatura ambiente
θ_{JA}	Resistência térmica entre a junção e o ambiente
$T_{Jm\acute{a}x}$	Temperatura de junção máxima
I	Corrente elétrica
R	Resistência elétrica
V	Tensão elétrica
v_s	Sinal de tensão alternada
D	Diodo
Q	Transistor
V_i	Tensão de entrada de uma fonte de alimentação
v_0	Tensão sobre uma carga resistiva
i_0	Corrente sobre uma carga resistiva
L	Indutor
Δi	Varição de corrente
$I_{m\acute{i}n}$	Corrente mínima
I_L	Corrente do indutor
d	Razão cíclica
T	Período
f	Frequência de chaveamento
Δi_L	Varição de corrente no indutor
C	Capacitor
ΔQ	Varição da carga do transistor
t_{swON}	Intervalo de condução da chave
v_c	Sinal de controle modulante
v_p	Sinal de onda portadora

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos	15
2.1	Transferência de Calor e Condução Térmica.....	17
2.1.1	Lei de Fourier da Condução Térmica	17
2.2	Cálculo Térmico em Dispositivos Eletrônicos.....	18
2.3	Efeito Peltier.....	19
2.3.1	Módulo Peltier.....	19
2.4	Conversor CC-CC Abaixador de Tensão (<i>buck</i> ou <i>step-down</i>)	20
2.5	Modulação por Largura de Pulso	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Pastilha de Peltier.....	27
3.2	Sensor de Temperatura	28
3.3	Microcontrolador	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Ensaio experimental com a pastilha de Peltier	31
4.2	Ensaio experimental do circuito de potência.....	36
4.3	Código-fonte do microcontrolador	39
4.4	Sinal PWM	42
4.5	Testes de Validação	46
4.5.1	Teste do Sensor de Temperatura LM35	46
4.5.2	Ensaio do sistema completo.....	47
4.5.3	Ensaio experimental do sistema completo com uma plataforma metálica	50
5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS.....	55
	ANEXO A – CÓDIGOS DO MICROCONTROLADOR.....	58

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, fazer fogo e saber como torná-lo útil foi um passo fundamental para o desenvolvimento da civilização, possibilitando ao homem primitivo se manter aquecido em áreas de clima frio e no cozimento de alimentos (SUPERINTERESSANTE, 2016). Atualmente, esse controle sobre o calor é de extrema importância para várias esferas da indústria, especialmente quando se trata de setores que desenvolvem produtos sensíveis a alterações ambientais, como nos setores farmacêuticos, alimentícios, de tecnologia e entre outros. Para garantir a integridade e o funcionamento pleno de equipamentos utilizados dentro de indústrias, é necessário que estes operem dentro da faixa de temperatura indicados pelos fabricantes (MP AUTOMAÇÃO, 2020).

Existem vários equipamentos no mercado que realizam o controle da temperatura, tanto para a refrigeração como para o aquecimento. O ar-condicionado, por exemplo, utiliza um sistema interno à base de gás refrigerador que transfere calor de um ambiente para outro, resultando em um ajuste de temperatura, conforme a necessidade do usuário (CONSUL, 2022). Já um fogão de cozinha é um equipamento dos mais conhecidos para o preparo e aquecimento de alimentos, o qual utiliza tradicionalmente o gás liquefeito de petróleo (GPL) como combustível para manter a chama acesa (PETROBRAS, 2022).

Um módulo termoeletrônico de Peltier, ou pastilha termoeletrônica de Peltier, é um dispositivo eletrônico que opera como uma bomba de calor. Essas pastilhas produzem uma diferença de temperatura sobre as suas faces quando aplicado sobre si uma corrente, dependendo diretamente da temperatura ambiente ao qual está submetida. Ao contrário do ar-condicionado ou fogão, a pastilha de Peltier não depende de compressores ou gases para realizar o controle de temperatura, não emite ruídos ou vibrações durante o seu funcionamento e não possui partes móveis (BUENO; DALOSKI; ALMEIDA, 2018).

Este trabalho tem por sua vez o objeto de estudo a aplicação de um sistema de aquecimento com a pastilha de Peltier (módulo termoeletrônico) como fonte energética de calor. Para tal, faz-se necessário o controle da tensão sobre a pastilha de Peltier. Isso foi feito por intermédio de um microcontrolador, ajustando a tensão de saída de um conversor CC-CC abaixador através da variação da razão cíclica de chaveamento do MOSFET.

1.1 Justificativa

Atualmente a maioria dos equipamentos de aquecimento utilizam gases para realizar essa troca de calor, como por exemplo ar-condicionado, que utiliza um sistema em que o gás refrigerador é bombeado para um compressor, expelindo o ar quente para fora. Aparelhos como este, emitem gases hidrofluorcarbonos (HFC), que são milhares de vezes mais poluente se comparados com o dióxido de carbono (CO₂), aumentando assim o chamado efeito estufa (PRESSE, 2015).

Em contrapartida a estes equipamentos de aquecimento e controle de temperatura, existem os dispositivos termoelétricos, que convertem a energia elétrica em energia térmica, e não necessitam de gases para fazer este tipo de conversão de energia (ECYCLE, 2021). Um exemplo de dispositivo termoelétrico é a pastilha de Peltier, que dependendo a tensão ao qual é aplicada em seus terminais, uma face aquece, enquanto a outra resfria. Outra vantagem deste dispositivo é que, por a pastilha ter dimensões pequenas, cerca de 40mm de comprimento e largura, possibilita a construção de um sistema relativamente pequeno e portátil.

Por este sistema aquecimento apresentar um controle de calor, fica evidente a importância tanto para o mercado quanto para o meio acadêmico, pois pode ser utilizado em laboratórios de química por exemplo, para aquecimento de soluções, controle de temperatura de determinados dispositivos eletrônicos e muitas outras aplicações que demandem de um controle preciso de temperatura.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema eletrônico de acionamento e controle de uma pastilha de Peltier, a fim de possibilitar o aquecimento de uma plataforma metálica e proporcionar o controle de temperatura da pastilha de Peltier. Para isso, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) desenvolver circuito eletrônico de potência capaz de fornecer a potência necessária para que a pastilha de Peltier forneça calor a fim do sistema atingir a temperatura desejada de até 120 °C com variação de $\pm 3^\circ \text{C}$;
- b) desenvolver um circuito eletrônico de controle capaz de variar a razão cíclica de um conversor CC-CC abaixador, cuja tensão de saída opere na faixa de 2 V a 12 V, com rendimento mínimo de 80 %; e

- c) implementar uma interface para escolha da razão cíclica desejada e para a visualização da temperatura atual da pastilha de Peltier, na faixa de operação de 30 °C a 120 °C com variação de ± 3 °C.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão abordados os conceitos de transferência de calor, de condução térmica, de cálculo térmico, efeito Peltier, conversor CC-CC abaixador e modulação por largura de pulso.

2.1 Transferência de Calor e Condução Térmica

O calor é definido como uma forma energia que pode ser transferida de um corpo para outro por consequência da diferença de temperatura que há entre eles. A termodinâmica é a ciência que estuda as taxas de energia térmica transferida, ou seja, a transferência de calor (Q), e uma das três formas deste fenômeno acontecer é a condução térmica (ÇENGEL; GHAJAR, 2011).

A condução térmica é definida pela transferência de energia de partículas com mais energia para outras partículas vizinhas com menos energia. Esta pode acontecer nos estados sólidos, líquidos e gasosos. A taxa de condução de calor através de um meio depende da sua geometria, espessura, tipo do material e da diferença de temperatura ao qual o meio está sujeito (ÇENGEL; GHAJAR, 2011).

2.1.1 Lei de Fourier da Condução Térmica

A lei de Fourier da condução térmica diz que a taxa de condução de calor por meio de uma camada plana é diretamente proporcional à diferença de temperatura de cada face da camada plana e à área da seção transversal, porém é inversamente proporcional à espessura da camada Δx (ÇENGEL; GHAJAR, 2011), ou seja,

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

sendo k uma constante denominada como a condutividade térmica do material, ou seja, é a capacidade de um material conduzir calor e T_1 e T_2 a temperatura de cada face da camada plana.

Ao fazer com que Δx tenda a zero, tem-se a forma diferencial da lei de Fourier da condução térmica.

$$Q_{cond} = kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

2.2 Cálculo Térmico em Dispositivos Eletrônicos

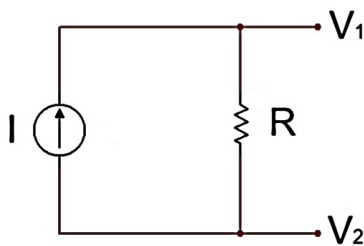
Os dispositivos eletrônicos em geral dissipam potência na forma de calor em suas junções, aumentando ainda mais a temperatura da junção. Este calor dissipado na junção é conduzido para fora do encapsulamento e vai para o meio ambiente quando a temperatura externa for menor que a temperatura de junção. A potência dissipada (P_D), em W pode ser descrita:

$$P_D = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JA}} \quad (3)$$

sendo T_J a temperatura da junção do dispositivo eletrônico, T_A a temperatura ambiente e θ_{JA} é a resistência térmica entre a junção e o meio ambiente. Para que a temperatura de junção não ultrapasse o valor máximo ($T_{Jmáx}$), o valor de (θ_{JA}) deve ser o mais baixo possível (SEDRA; SMITH, 2007).

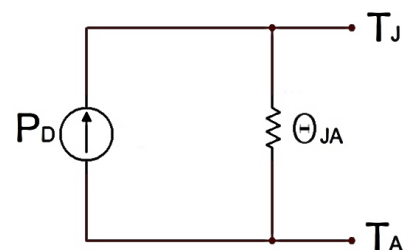
O processo de condução térmica na dissipação de potência pode ser descrito de forma análoga a lei de Ohm para circuitos elétricos (SEDRA; SMITH, 2007). Ao observar a Tabela 1 pode-se ver os elementos análogos entre um sistema elétrico e com o térmico. Sendo a corrente elétrica (I) análoga a potência de dissipação (P_D), a resistência elétrica (R) com a resistência térmica (θ_{JA}), e a tensão elétrica (V) com a temperatura (T). As relações entre as variáveis elétricas da lei de Ohm e as variáveis térmicas da condução de calor da dissipação de potência podem ser vistas nas Figuras 1 e 2 juntamente com as suas respectivas unidades de medidas.

Figura 1: Circuito elétrico genérico para a lei de Ohm.



Fonte: autoria própria.

Figura 2: Circuito elétrico equivalente para a condução térmica.



Fonte: autoria própria.

Tabela 1: Relação entre as variáveis elétricas e as variáveis térmicas.

Grandeza Elétrica	Grandeza Térmica
Tensão [V]	Temperatura [°C]
Corrente [A]	Fluxo de calor (Potência) [J/s] = [W]
Resistência elétrica [Ω] = [V/A]	Resistência térmica [°C/W]

Fonte: Autoria própria.

2.3 Efeito Peltier

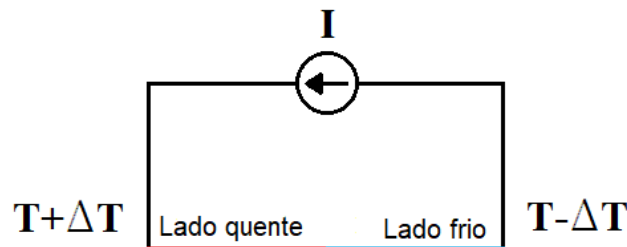
São denominados efeitos termoelétricos aqueles que a energia elétrica pode ser convertida em energia térmica, ou a energia térmica convertida em elétrica. Com isso tem-se em destaque os efeitos Seebeck e o efeito Peltier (MOURA, 2010).

Em 1821, Thomas Johann Seebeck descobriu que existe uma diferença de potencial elétrico no momento da junção de dois metais distintos que possuem temperaturas diferentes, denominando tal fenômeno como o princípio do efeito termoelétrico Seebeck (MOURA, 2010).

Em 1834, Jean Charles Athanase Peltier descobriu que ao passar uma corrente elétrica por uma interface formada por dois condutores distintos gera-se uma diferença de temperatura na junção. Ou seja, dependendo do sentido ao qual a corrente está passando pela junção, esta aquecerá ou resfriará (MOURA, 2010).

A Figura 3 ilustra o efeito Peltier, a partir da circulação de corrente elétrica em dois materiais metálicos distintos. Desta forma, um lado aquecerá e o outro resfriará em relação a temperatura inicial do dispositivo.

Figura 3: Esquema elétrico para o efeito Peltier.

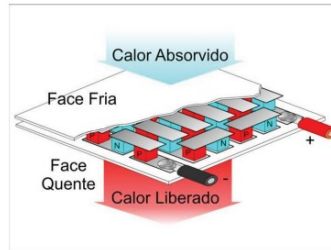


Fonte: adaptado de Moura (2010).

2.3.1 Módulo Peltier

O módulo Peltier ou pastilha Termoelétrica de Peltier é um dispositivo eletrônico construído a base de semicondutores. Como a Figura 4 mostra, ao aplicar uma corrente aos terminais do módulo, o calor de um dos lados é continuamente transferido, enquanto houver corrente elétrica, para o outro. Deste modo, uma superfície da pastilha aquece, enquanto a outra resfria. Por meio dessa corrente aplicada ao módulo é possível controlar a intensidade do fluxo de calor produzido pelo módulo, e por sua vez a temperatura de cada superfície do dispositivo eletrônico é controlada (BERNARDO, 2015).

Figura 4: Funcionamento de uma pastilha termoelétrica de Peltier.



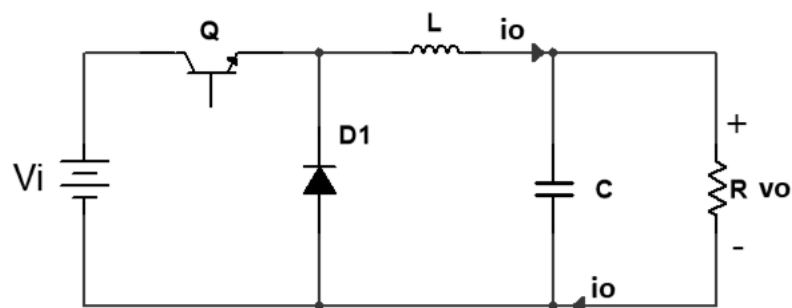
Fonte: Adaptado de Moura (2010).

2.4 Conversor CC-CC Abaixador de Tensão (*buck* ou *step-down*)

A Figura 5 mostra um circuito conversor CC-CC abaixador de tensão, *buck* ou *step-down*. No qual a tensão de entrada V_i é recortada através do transistor Q de chaveamento. Quando a chave Q está conduzindo o diodo D_1 está polarizado reversamente, ou seja, desligado. Neste intervalo a energia da fonte é transferida para o indutor L e para o capacitor C . Quando a chave desliga, a tensão sobre o indutor inverte a sua polaridade, levando assim o diodo D_1 a conduzir e, por consequência, dará continuidade à corrente (i_o). Assim, a energia armazenada pelo indutor L é então transferida para o capacitor e à carga R (POMILIO, 2021).

Quando a corrente do indutor L for maior que a corrente da carga R , o capacitor irá carregar. E quando a corrente do indutor foi menor que o da carga R , o capacitor irá descarregar para manter a corrente i_o da carga constante, e por consequência manter v_o constante. Caso a corrente que flui através do indutor L não vá a zero, enquanto o diodo D_1 está em plena condução, então pode-se dizer que o circuito está operando no modo de condução contínua (MCC) (POMILIO, 2021).

Figura 5: Esquema elétrica de um circuito conversor CC-CC abaixador de tensão (*buck* ou *step-down*).



Fonte: adaptado de POMILIO (2021).

No dimensionamento do valor nominal mínimo do indutor, considera-se que ele sempre irá operar no MCC. Para isso deve-se partir do limite mínimo da variação de corrente Δi :

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2}, \quad (4)$$

$$I_L = \frac{v_0}{R}, \quad (5)$$

$$\Delta i_L = \frac{-v_0(1-d)T}{L}, \quad (6)$$

sendo que a corrente do indutor I_L , a variação de corrente Δi_L para quando a chave está aberta, d é a razão cíclica do transistor de chaveamento, T o período da chave que é igual ao inverso a sua frequência de operação f .

Então, para determinar o valor mínimo para o indutor (L_{\min}), basta aplicar as equações (5) e (6) na equação (4) considerando I_{\min} igual a zero:

$$0 = v_0 \left[\frac{1}{R} + \frac{(1-d)T}{2L} \right] \quad (7)$$

isolando-se L , da equação (7), tem-se:

$$L_{\min} = \frac{(1-d)R}{2f} \quad (8)$$

Para questão de projeto, é uma boa prática adotar um valor nominal para um indutor de 25% a 30% maior que o indutor calculado teoricamente, a fim de evitar que o circuito não funcione como o projetado, caso ocorra alguma sobrecarga esporádica.

Para o dimensionamento do capacitor, deve-se ter um valor nominal relativamente alto para garantir que o sinal v_0 seja aproximadamente contínuo. Partindo da definição de tensão para um capacitor, é:

$$v_0 = \frac{Q}{C} \quad (9)$$

que relaciona a carga armazenada Q sobre a capacitância C , então caso haja uma variação de Q , conseqüentemente haverá uma variação na tensão, que é dada por:

$$\Delta Q = C \Delta v_0 \quad (10)$$

Para calcular a variação de ΔQ basta calcular a área do triângulo hachurado na Figura 6. Então, tem-se:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{\Delta i_L T}{2} = \frac{\Delta i_L T}{8} \quad (11)$$

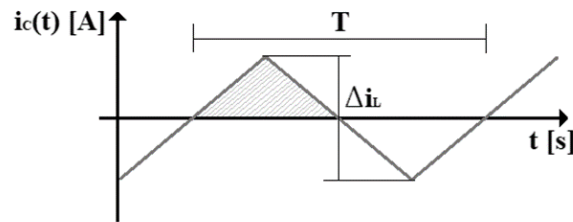
Então, substituindo a equação (11) na equação (10), tem-se que a variação de tensão v_0 é:

$$\Delta v_0 = \frac{\Delta i_L T}{8C} \quad (12)$$

Isolando C na equação (12) e usando a corrente Δi_L da equação (6), a equação para o capacitor é:

$$C = \frac{1 - d}{8L \frac{\Delta v_0}{v_0} f^2} \quad (13)$$

Figura 6: Forma de onda para a corrente i_c do capacitor.



Fonte: adaptado de POMILIO (2021).

2.5 Modulação por Largura de Pulso

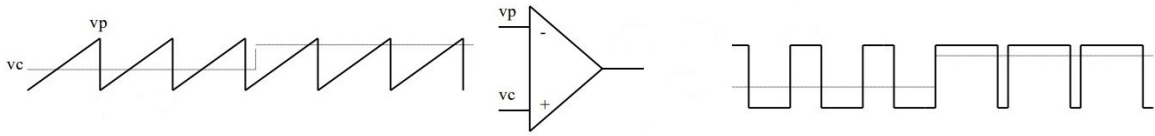
Existem muitas formas para fazer o controle de tensão na saída de fontes chaveadas, mas geralmente utiliza-se a modulação por largura de pulso (PWM). Esta modulação permite manter a frequência constante e variar a largura dos pulsos através da razão cíclica do sistema (*duty cycle*). O sinal modulado pode ser utilizado então no chaveamento do transistor no conversor CC-CC abaixador de tensão (LEÃO, 2016), como abordado na seção 2.4.

A razão cíclica (d) pode ser definida como a relação entre o intervalo em que a chave está conduzindo (t_{SWON}) e o período de chaveamento T (FONSECA, 2019). Pode ser representada como:

$$d = \frac{t_{SWON}}{T} \quad (14)$$

O sinal de comando obtido através da comparação do sinal de controle modulante (v_c), em relação a um sinal da portadora (v_p). Para filtrar o valor médio do sinal modulado, é necessário que a frequência da portadora seja no mínimo 14 vezes maior que a da modulante. Também se faz necessário uma onda portadora com uma variação linear no tempo, uma onda triangular (POMILIO, 2021). Na Figura 7 é dado um exemplo utilizando uma onda “dente-de-serra” como uma portadora.

Figura 7: Modulação por largura de pulso, exemplo de onda portadora "dente-de-serra".



Fonte: Adaptado de Pomilio (2021).

3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta os procedimentos utilizados para o desenvolvimento do sistema de aquecimento, além de descrever os principais dispositivos e suas características pertinentes ao projeto.

O diagrama de blocos da Figura 8 ilustra as etapas a serem seguidas ao longo do projeto. Assim, o presente trabalho é dividido em três etapas: a primeira contém o circuito de potência, enquanto a segunda: o circuito de controle e, por fim, a interface de comunicação com o usuário é representada na terceira etapa.

Na interface de comunicação, o usuário entra com o valor da razão cíclica desejada para o chaveamento do conversor CC-CC abaixador, enquanto o *display* mostra as informações da temperatura atual da pastilha de Peltier e a razão cíclica. O circuito elétrico de potência é responsável pelo acionamento do módulo termoeletrico (pastilha de Peltier) e, por fim, o circuito elétrico de controle lê o valor de temperatura do sensor da pastilha para, então, acionar o circuito elétrico de potência conforme a informação de entrada do usuário.

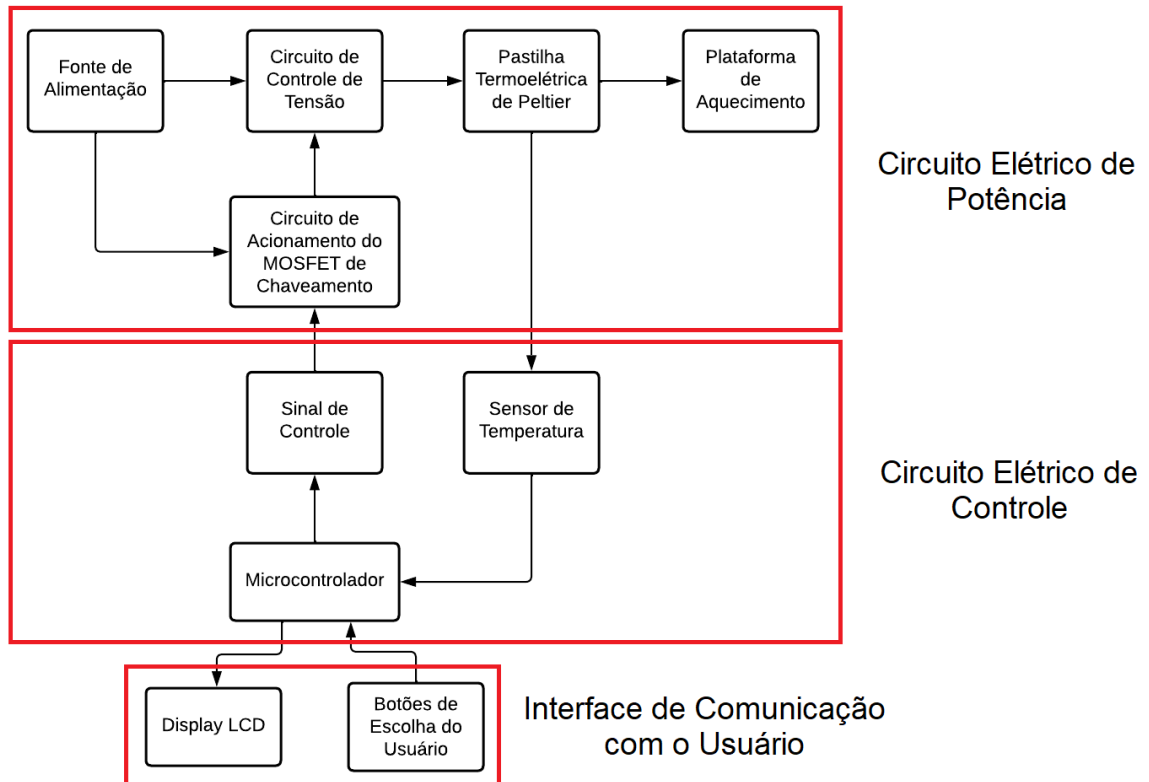
Figura 8: Etapas gerais do sistema de aquecimento controlado pela pastilha de Peltier.



Fonte: autoria própria.

A Figura 9 representa uma visão geral do sistema desenvolvido, elucidando a composição de cada etapa do projeto. Ambos os circuitos elétricos – de potência, de controle e de interface de comunicação com o usuário – e seus respectivos dispositivos eletrônicos são alimentados por uma fonte de alimentação de bancada do modelo ICEL PS-5000, que fornece nas suas duas saídas de tensões variáveis independentes de 0 V a 30 V com 3 A.

Figura 9: Visão geral do sistema de aquecimento controlado pela pastilha de Peltier, mostrando a composição de cada estágio do sistema.

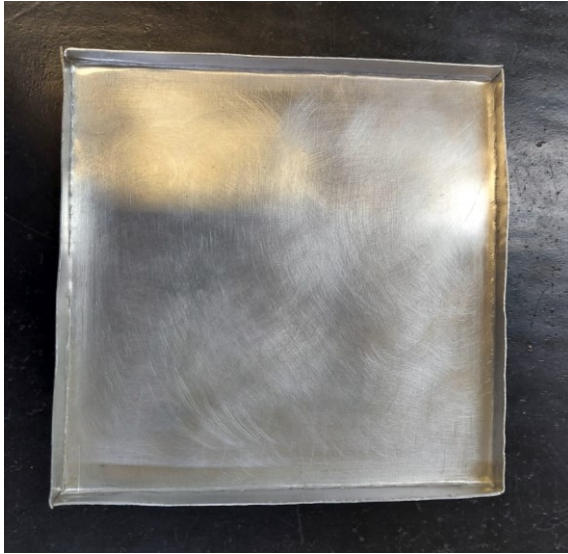


Fonte: autoria própria.

O circuito elétrico de potência, é composto por um conversor CC-CC abaixador (*buck*), capaz de fornecer a potência necessária para que a pastilha de Peltier opere na faixa de temperatura de 32 °C a 122 °C, trabalhando na faixa de tensão de 2,7 V a 11,2 V.

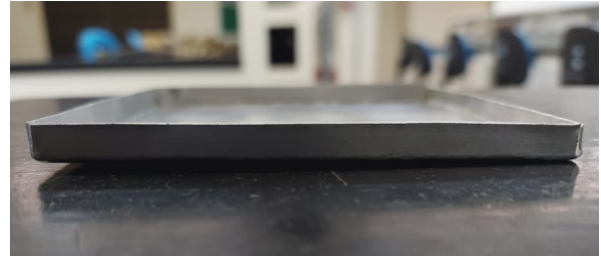
O conversor foi projetado com base nas Equações (8) e (13), para os quais foram calculados os valores mínimos para o indutor e o capacitor, a fim de garantir que o conversor operasse no modo de condução contínua, MCC (Bonfleuher, 2022). A pastilha de Peltier é acoplada a uma plataforma feita de alumínio, com 0,5mm de espessura da chapa, 10cm de largura e comprimento, e 0,5cm de altura, como mostra as Figuras 11 e 12.

Figura 10: Vista superior da plataforma metálica feita de alumínio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11: vista lateral da plataforma metálica feita de alumínio.



Fonte: Autoria própria.

O circuito de acionamento do MOSFET de chaveamento é o circuito *bootstrap*, este fornece ao MOSFET uma diferença de potencial entre os terminais de porta e de fonte, garantindo a operação da eletrônica. O circuito proposto para a etapa de potência foi baseado na iniciação científica do Lucas Boufleuher (Bonfleuher, 2022).

Para o circuito elétrico de controle, um envia o comando para a variação razão cíclica de chaveamento do conversor CC-CC abaixador, por meio do bloco de sinal de controle, PWM, acoplado ao circuito *bootstrap*. O microcontrolador também realiza a leitura do sensor de temperatura, junto à pastilha de Peltier.

No circuito de interface de comunicação com o usuário, é informado o parâmetro da razão cíclica desejada, através de três botões, um para incremento, outro para o decremento e um terceiro inicializar o controle, enquanto o *display Liquid Crystal Display* (LCD) mostra os valores de temperatura atual da pastilha de Peltier e de razão cíclica do chaveamento do conversor.

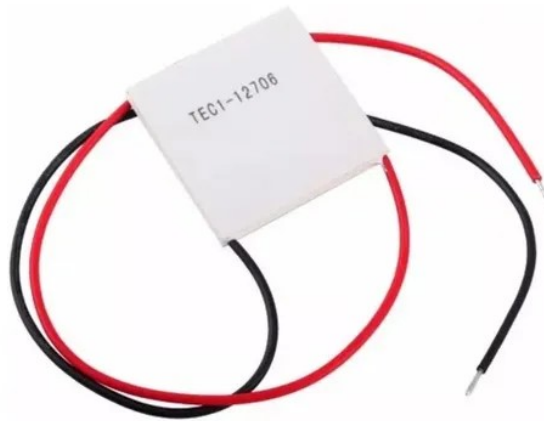
Para a validação do sistema de aquecimento, realizou-se uma análise de funcionamento do conversor CC-CC abaixador controlado diretamente pelo sinal PWM do microcontrolador, ao invés de gerador de função, como em fase preliminar do estudo. Nesta etapa é verificado o quanto a pastilha de Peltier fornece de calor com o sistema projetado, além de avaliar a qualidade de calor transferida para uma plataforma metálica de alumínio, como mostra a Figura 10. Para isso foi utilizado a

câmera térmica modelo FLIR Ex Series da marca FLIR, demonstrando através de imagens a distribuição de calor em cada situação.

3.1 Pastilha de Peltier

A pastilha de Peltier é o dispositivo responsável pelo fornecimento de calor para a plataforma de aquecimento. A Figura 12 mostra o módulo termoelétrico escolhido: modelo o TEC1-12706. Este dispositivo está acoplado a uma chapa metálica, a fim de fornecer calor. Sendo assim, a tensão em seus terminais é ajustada no conversor CC-CC *buck*, até que o dispositivo termoelétrico atinja a temperatura final desejada.

Figura 12: Pastilha de Peltier, modelo TEC1-12706.



Fonte: MercadoLivre.

Para obter os parâmetros de tensão e corrente máxima suportada pelo dispositivo, a resistência ôhmica do módulo e o valor de temperatura máxima, foram realizados testes em laboratório. Estes testes consistiram em conectar uma pastilha de Peltier diretamente a uma fonte de alimentação de bancada CC e, após 2 min, foi verificado a temperatura do módulo termoelétrico, por meio de termômetro digital infravermelho MT-360, que possui uma faixa de medição de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. A faixa de tensão aplicada foi de 0 V a 12 V , com intervalo de 1 V .

Os três ensaios elétricos realizado com a pastilha de Peltier são:

- a) operando sem carga térmica e com carga térmica (dissipador de calor);
- b) associação em paralelo de módulos;
- c) modo independente com empilhamento dos módulos.

Os dados de tensão e de corrente foram medidos com um multímetro digital, para diferentes valores de razão cíclica. Estes resultados foram utilizados como parâmetros de processo no desenvolvimento do código-fonte executado pelo microcontrolador. Já a resistência ôhmica, foi utilizada como parâmetro nas simulações como a carga acoplada ao conversor CC-CC abaixador.

3.2 Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura escolhido para este trabalho é o LM35, que é um sensor de precisão, no qual a tensão de saída é linearmente proporcional à temperatura, em °C. Ele opera na faixa de temperatura de -55 °C até +150 °C, com uma precisão em temperatura ambiente de $\pm 0,25$ °C. O LM35 tem uma vantagem sobre os sensores lineares de temperatura calibrados na escala Kelvin, visto que o usuário não precisa subtrair um valor de tensão grande e constante na saída para conseguir obter o seu valor na escala Celsius (TEXAS INSTRUMENTS, 2000).

3.3 Microcontrolador

O microcontrolador é o responsável por ler os níveis de tensão de suas entradas: do sensor de temperatura e dos três botões para entrada dos parâmetros iniciais, além de comandar a variação da razão cíclica do sinal de controle, e de realizar a comunicação visual com o usuário por meio do *display* LCD.

De posse dos objetivos a serem atingidos no presente trabalho, o microcontrolador escolhido deveria atender aos seguintes requisitos:

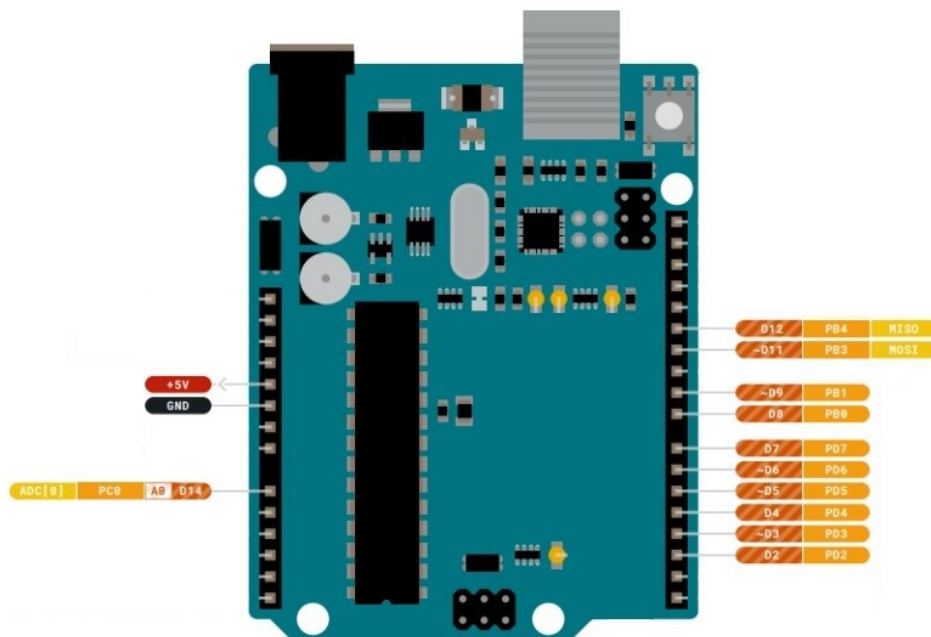
- a) no mínimo 10 entradas e saídas digitais (Portas I/O);
- b) no mínimo 1 entrada e saída analógicas (Portas I/O);
- c) uma saída PWM que possibilite utilizar a frequência de 25kHz;
- d) facilidade para encontrar dispositivos compatíveis, como o visor LCD; e
- e) suporte para linguagem de programação em C.

Com esta lista de requisitos, foi escolhido para o presente projeto o microcontrolador ATmega328P, presente na placa do Arduino UNO R3. Os fatores que tiveram mais peso para esta escolha foram a quantidade de entradas e saídas digitais e analógicas, totalizando 13 portas I/O digitais e mais 6 portas analógicas, também o suporte a linguagem de programação em C. Outro fator bem importante foi que este microcontrolador possui duas saídas para sinal PWM com 16 bits, que

possibilitam o uso de sinais PWM com frequências mais altas, como a necessária para o presente projeto que é de 25kHz.

A princípio, o microcontrolador a ser escolhido seria o da família PIC, porém com a dificuldade para conseguir o oscilador de cristal de 16 MHz, necessário para o sinal de *clock* com maior precisão a fim de fornecer o sinal PWM de 25 kHz, foi optado por dar seguimento ao projeto com o microcontrolador ATmega328P. Uma vez que o circuito para fazer o microcontrolador ATmega328P funcionar da forma desejada já estava pronto na placa do Arduino Uno R3.

Figura 13: Identificação dos pinos do microcontrolador Arduino Uno R3.



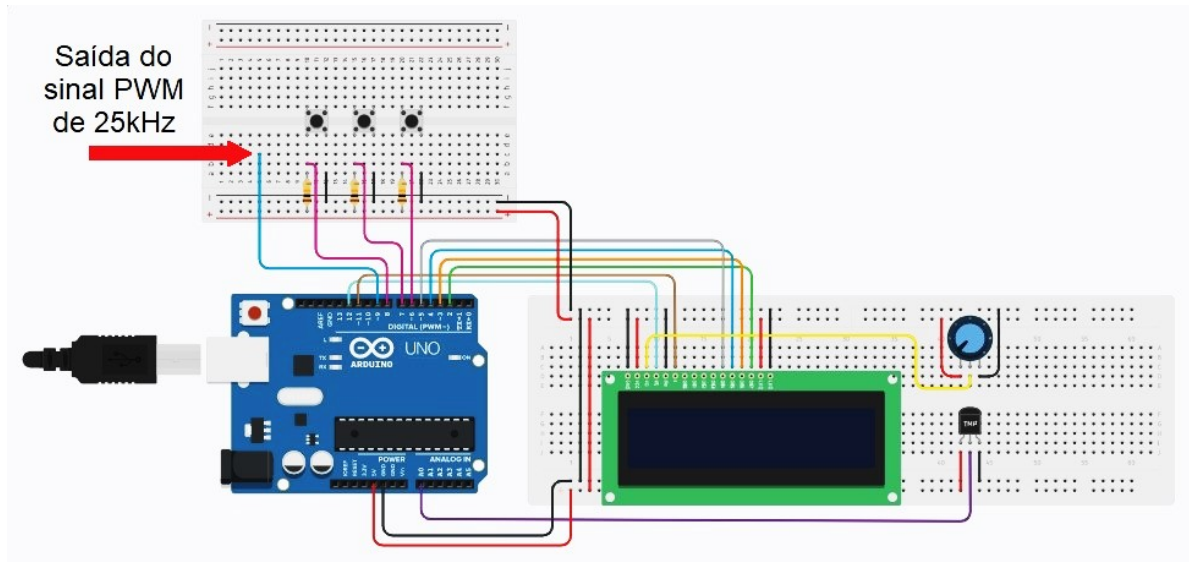
Fonte: Adaptado de Arduino UNO R3, 2022.

Na Figura 13 pode ser visto a disposição e a distribuição dos pinos disponíveis pelo microcontrolador ATmega328P, escolhido para o presente projeto. A lista com a disposição pinos que foram utilizados para o circuito de controle:

- pino PC0/A0 para o sensor de temperatura, LM35;
- pinos RD6/D6, RD7/D7 e RB0/D8 para os botões de escolha da razão cíclica e de *play*;
- pinos RD2/D2, RD3/D3, RD4/D4, RD5/D5, RB3/D11 e RB5/D12 para o visor LCD;
- pino RB1/D9 para a saída do sinal de controle PWM.

Na Figura 14 apresenta o esquema elétrico do circuito de controle realizado por meio de simulação no aplicativo Tinkercad. Nele pode ser visto com detalhes a pinagem utilizada na etapa de controle. A simulação se fez necessário para testar os códigos do sinal de controle, também as conexões elétricas e demais componentes que compõem a etapa de controle.

Figura 14: Esquema elétrico para o circuito de controle.



Fonte: Autoria própria.

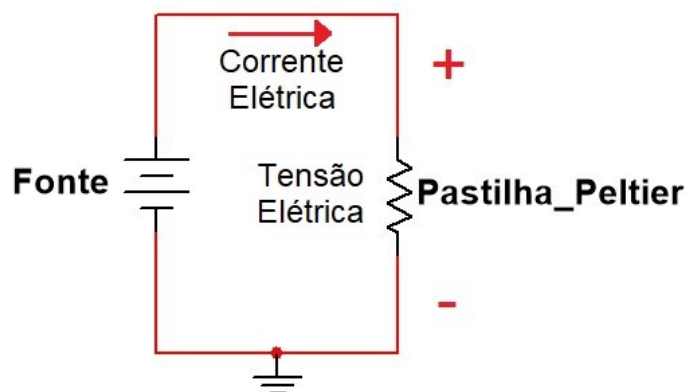
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta as análises e as discussões dos resultados do projeto, com base na metodologia abordada na seção 3. Para facilitar o entendimento de cada resultado coletado ao longo do trabalho, este será detalhado por tópicos: ensaios experimentais com a Pastilha de Peltier e o circuito de potência, além da placa de circuito impresso, do código-fonte do microcontrolador, do sinal PWM e da validação de funcionamento do sistema.

4.1 Ensaio experimental com a pastilha de Peltier

Para os testes com a pastilha de Peltier, medidas experimentais de tensão e de corrente máxima, a resistência ôhmica e de temperatura máxima do dispositivo foram realizadas em laboratório. A metodologia utilizada para estes testes está descrita na seção 3.1. Há 4 diferentes configurações para coleta dos dados de tensão e corrente sobre a pastilha de Peltier. A primeira é uma conexão simples com uma fonte de bancada CC sem o uso de dissipador de calor, como mostram as Figuras 15 e 16. A segunda configuração é baseada na primeira, porém com o acréscimo de um dissipador, vide Figura 17. Na terceira, duas pastilhas de Peltier são associadas em paralelo com a fonte de alimentação, como mostra as Figuras 18 e 19. A quarta configuração é composta por duas pastilhas de Peltier de forma independente com a fonte de alimentação, ou seja, ambos os dispositivos estavam ligados de forma simples como nas duas primeiras configurações, evidenciada pelas Figuras 20 e 21.

Figura 15: Esquema elétrico básico da conexão simples da fonte de alimentação com o módulo termoelétrico de Peltier.



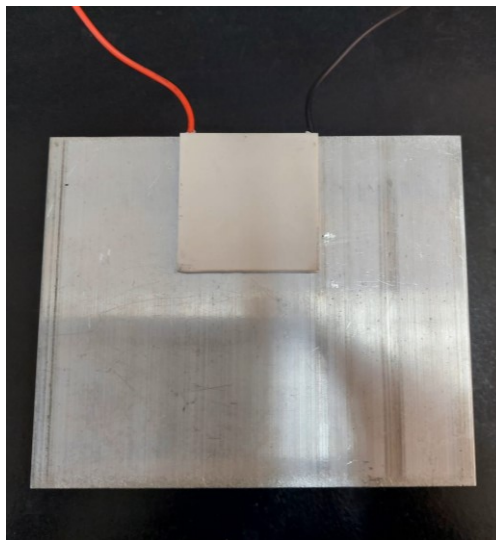
Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Conexão do módulo termoeétrico de Peltier no modo de conexão simples sem utilizar dissipador de calor.



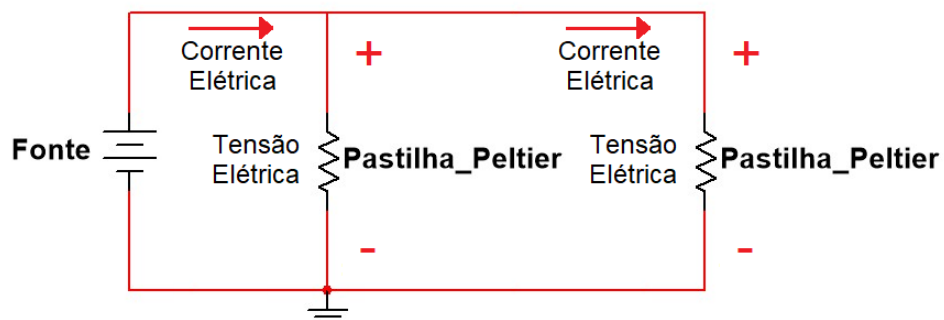
Fonte: Autoria própria.

Figura 17: Vista superior da conexão do módulo termoeétrico Peltier no modo de ligação simples, utilizando dissipador de calor.



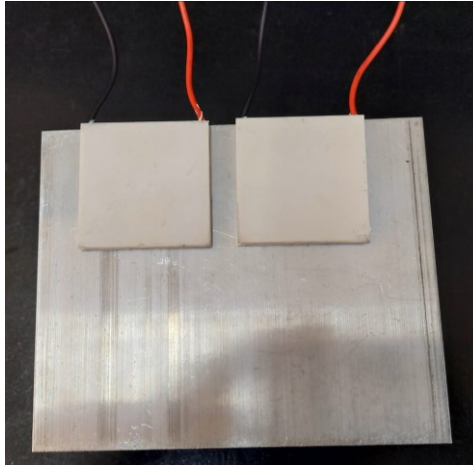
Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Esquema elétrico básico referente a dois módulos termoeétricos de Peltier associados em paralelo com a fonte de alimentação.



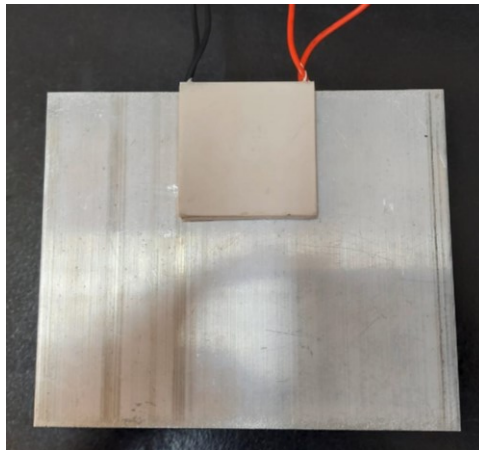
Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Vista superior da conexão de dois módulos termoelétricos Peltier no modo de associação em paralelo com a fonte de alimentação, utilizando dissipador de calor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Vista superior da ligação de dois módulos termoelétricos Peltier empilhados e no modo de conexão simples com a fonte de alimentação, utilizando dissipador de calor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Vista lateral da ligação de dois módulos termoelétricos Peltier empilhados e no modo de conexão simples com a fonte de alimentação, utilizando dissipador de calor.

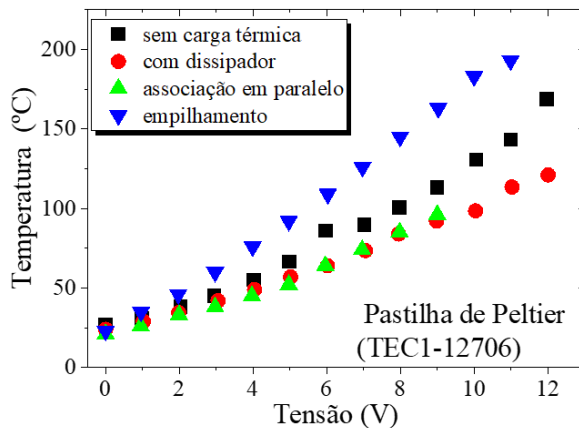


Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 22 e 23 são apresentadas as respectivas curvas de tensão de corrente elétrica em função de temperatura. Ao analisar estas figuras, pode-se observar que a resposta do dispositivo foi quase linear. No ensaio sem o dissipador de calor, ambas as faces da pastilha de Peltier aqueceram juntamente com o aumento

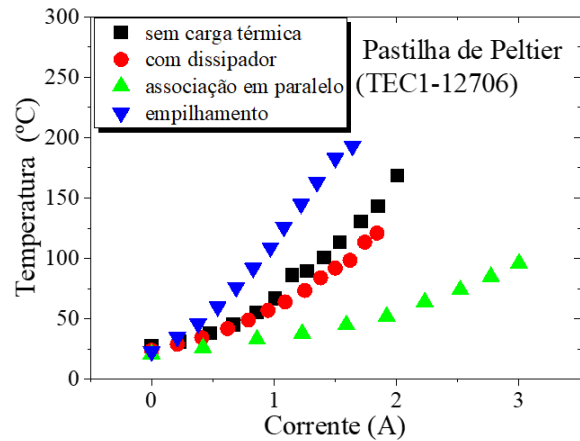
da tensão. A tensão máxima suportada pelo módulo termoelétrico em laboratório foi de 12 V, ao submeter a pastilha em 13 V, ela parou de funcionar, pois o valor máximo de tensão foi excedido.

Figura 22: Temperatura da pastilha de Peltier em função de tensão elétrica, para diferentes configurações.



Fonte: Autoria própria.

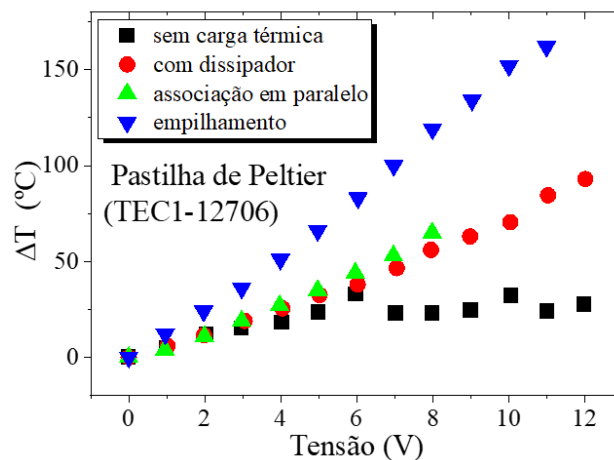
Figura 23: Temperatura da pastilha de Peltier em função de corrente elétrica, para diferentes configurações.



Fonte: Autoria própria.

O fenômeno do aquecimento em ambas as faces no ensaio sem o uso do dissipador de calor pode ser visto na Figura 24, ao constatar que a variação de temperatura, ΔT , não seguiu o mesmo comportamento dos demais ensaios que dispunham de um dissipador de calor, se mantendo de forma aleatória e com uma variação do ΔT de temperatura na faixa aproximada de 20 °C a 40 °C.

Figura 24: Diferença de temperatura entre as faces da pastilha de Peltier (ΔT) em função da tensão elétrica da tensão elétrica, para diferentes configurações.



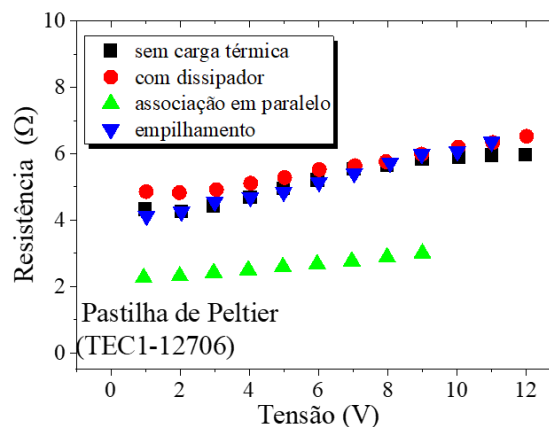
Fonte: Autoria própria.

Os ensaios com um módulo termoeétrico utilizando um dissipador de calor e com dois módulos termoeétricos conectados em paralelo a uma fonte de alimentação tiveram comportamentos semelhantes da Figura 22, que utiliza a tensão como parâmetro de observação. Ao analisar estes mesmos ensaios na Figura 23, que utiliza a corrente elétrica como parâmetro de observação, pode ser visto que a ligação em paralelo consumiu mais corrente elétrica se comparado com a ligação simples com a fonte de alimentação. Este fenômeno acontece, pois a tensão sobre cada pastilha se mantém, porém a corrente se dividirá em duas. Como as pastilhas são praticamente idênticas, a corrente elétrica total consumida por ela é o dobro do que no ensaio com a conexão simples. Por outro lado, no ensaio com a associação da em paralelo das pastilhas, houve uma limitação da fonte de bancada com relação a corrente que ela fornece, fazendo com que o teste fosse parado ao atingir a corrente elétrica de 3 A.

Para o ensaio com o empilhamento das pastilhas de Peltier, cada pastilha de forma independente, ou seja, cada pastilha teve uma ligação simples com a fonte de alimentação, porém foram dispostas uma sobre a outra. Neste ensaio também não foi possível completar até o marco de 12 V, uma vez que a pastilha que estava disposta superior atingiu a temperatura de 193 °C, e o limite máximo de temperatura segundo o fabricante é de 200 °C. Isto aconteceu, pois a pastilha inferior estava bombardeando calor para o módulo acima, levando a pastilha superior a aquecer em ambas as faces, como o que aconteceu com o teste sem o dissipador de potência.

Na Figura 25, observa-se que quase todos os ensaios apresentaram resultados semelhantes, ficando na faixa de variação da resistência ôhmica entre 4,12 Ω e 6,7 Ω .

Figura 25: Resistência elétrica da pastilha de Peltier em função da tensão elétrica, para diferentes configurações.



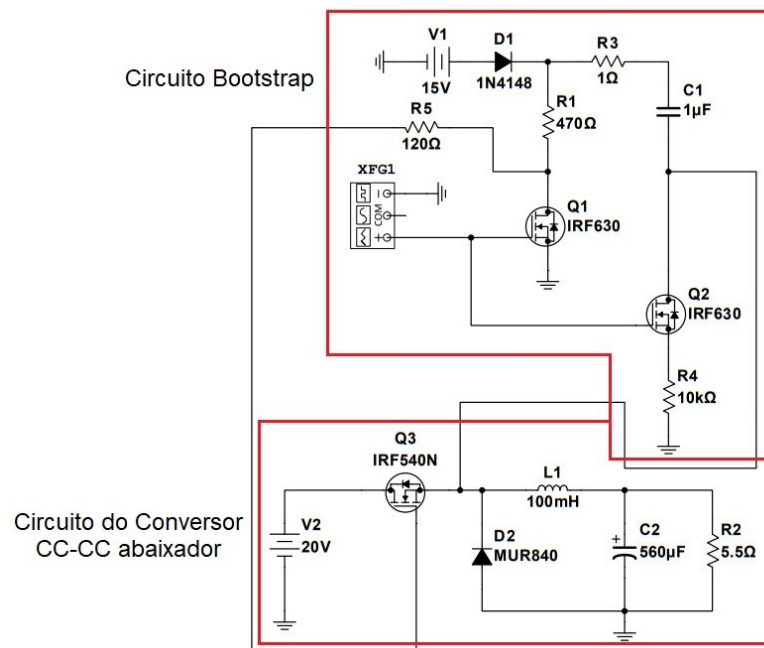
Fonte: Autoria própria.

O único ensaio que obteve resposta diferente aos demais foi com a ligação dos módulos em paralelo, e isso é consequência da divisão de corrente neste tipo de associação, reduzindo pela metade a resistência ôhmica. Este ensaio foi importante para poder simular a pastilha como uma resistência.

4.2 Ensaio experimental do circuito de potência

O primeiro ensaio experimental com o circuito de potência, visto na Figura 26, composto pelo circuito *bootstrap* e o conversor CC-CC abaixador, consistiu em variar a razão cíclica na faixa de 20% a 80% do sinal de PWM injetado no circuito *bootstrap*, e, então, foram medidos os valores de tensão e de corrente nos terminais de saída conversor CC-CC abaixador, o qual está conectado a uma pastilha de Peltier. Ademais, mediu-se a temperatura desde módulo termoeétrico de forma análoga ao que foi feito nos teste do item 4.1. O circuito de potência original utilizado neste projeto foi baseado no trabalho de Boufleuher (2022). Porém alguns ajustes em valores de componentes foram necessários de forma a se adequar à aplicação da pastilha de Peltier, tal como: adição de resistores no circuito *bootstrap*, pois com circuito original proposto os MOSFETS do circuito *bootstrap* não tinham uma diferença de potencial suficiente para poder chavear e operar de forma satisfatória.

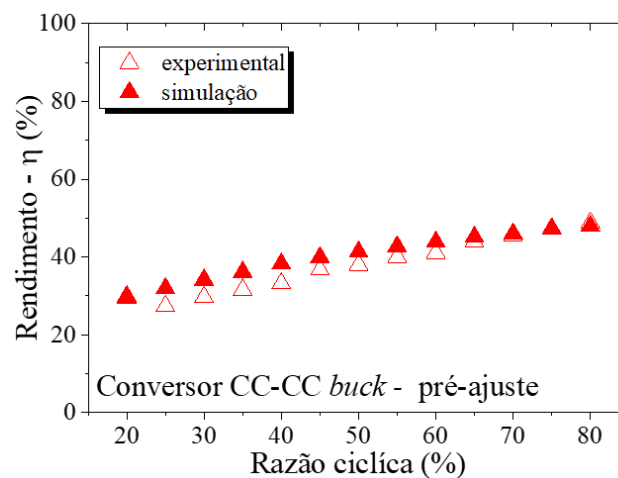
Figura 26: Esquema elétrico do circuito de potência pré-ajustes.



Fonte: Autoria própria.

Uma das consequências do não chaveamento dos MOSFETs foi o estouro do capacitor C_1 . Outro efeito observado foi no rendimento do conversor CC-CC abaixador, como pode ser visto na Figura 27, no qual o melhor caso é para razão cíclica de 80 %, atingindo 48 % de rendimento no ensaio experimental em laboratório. No entanto, um dos objetivos do projeto é justamente ter o rendimento acima de 80 %. Desta forma, ajustes nos valores de alguns componentes foram cruciais para que os MOSFETs do circuito *bootstrap* pudessem, então, operar como chaves.

Figura 27: Rendimento do conversor CC-CC abaixador pré-ajuste em função da razão cíclica, simulação e experimental



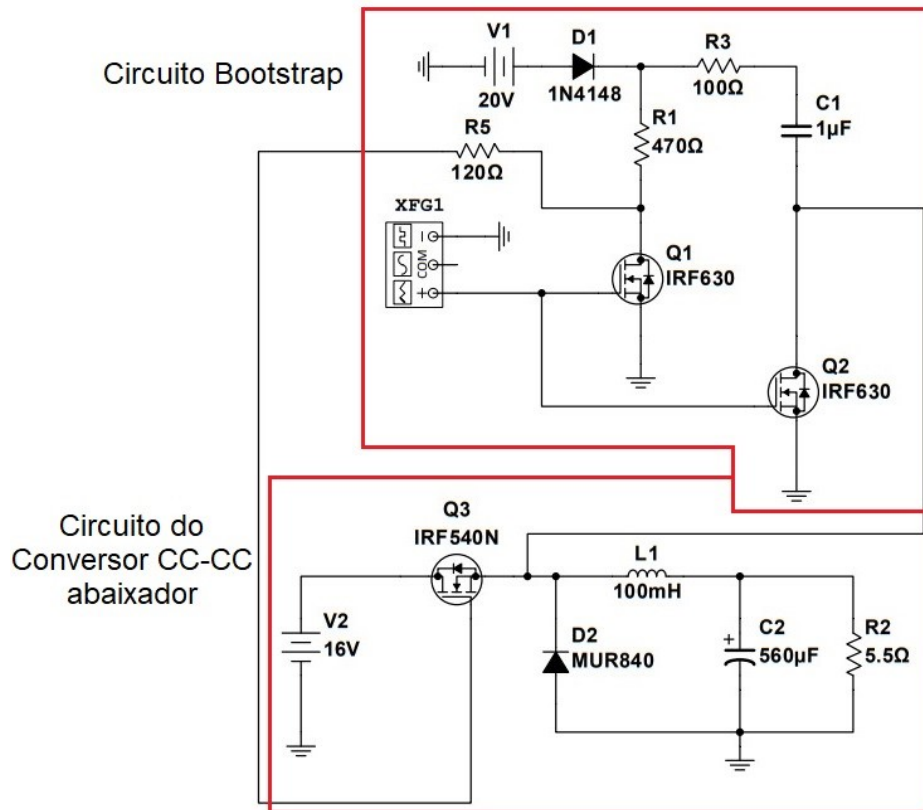
Fonte: Autoria própria.

As mudanças no circuito de potência podem ser vistas na Figura 28, como a alteração dos valores das fontes de alimentação de ambos os circuitos, isto é, de potência, de *bootstrap* e do conversor CC-CC abaixador, além da remoção de R_4 (10 k Ω) e o aumento da resistência R_3 de 1 Ω para 100 Ω . Assim, os MOSFETs passaram a chavear de forma adequada. Tais ajustes nas tensões de alimentação foram necessários para saturar os MOSFETs do circuito *bootstrap*, e garantir que estes dispositivos operassem no modo chave. A adição do resistor R_3 teve como objetivo drenar a energia armazenada no capacitor, dado a este dispositivo o tempo necessário para a sua descarga.

Na Figura 29, pode-se ver que essas mudanças tiveram impacto significativo no rendimento do conversor CC-CC abaixador, atingindo de rendimento entre 80 % e 90 %. Outro efeito observado, foi que ao longo dos ensaios com o circuito eletrônico de potência a resistência ôhmica da pastilha de Peltier varia conforme o aumento da tensão sobre ela, fazendo com que a curva do rendimento do conversor CC-CC

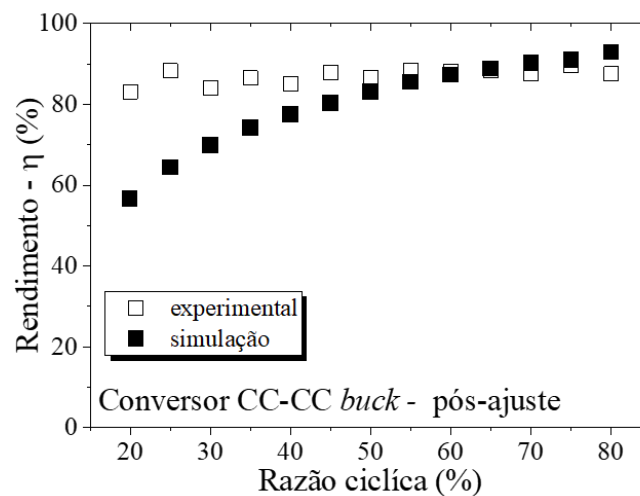
abaixador não seja linear. Na etapa de simulação, foi utilizado um valor médio fixo para a resistência ôhmica da pastilha de Peltier, portanto, a curva de resposta do rendimento ficou próximo do linear.

Figura 28: Esquema elétrico do circuito de potência pós-ajustes.



Fonte: Autoria própria.

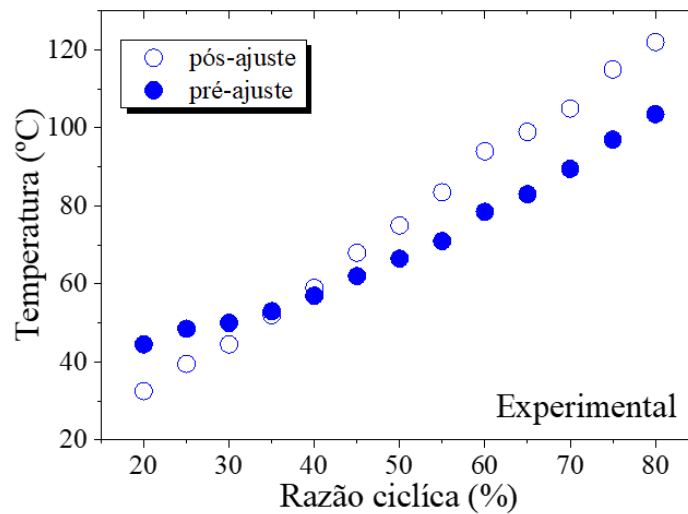
Figura 29: Rendimento do conversor CC-CC abaixador pós-ajustes em função da razão cíclica, simulação e experimental.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 apresenta medida de temperatura medida na pastilha de Peltier pré e pós-ajustes do circuito de potência. Observa-se que no circuito pós-ajuste, a temperatura mínima de 32,5 °C e máxima de 122 °C, aproximadamente a faixa de temperatura desejada no objetivo específico. Já com o circuito pré-ajustes, as temperaturas mínima e máxima são 44,5 °C e 103,5 °C, respectivamente.

Figura 30: Temperatura da pastilha de Peltier em função da razão cíclica, nas condições de pré e pós-ajustes do conversor CC-CC abaixador.



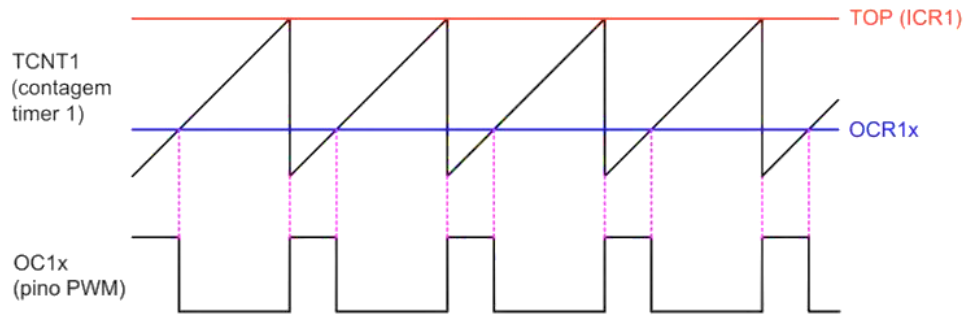
Fonte: Autoria própria.

4.3 Código-fonte do microcontrolador

Para fazer com que o ATmega328P forneça um sinal de PWM na frequência de 25 kHz, é necessário que ele trabalhe com o registrador de contagem TCNT1 de 16 bits, possibilitando o uso de frequências distintas com uma maior resolução se comparados com outros pinos que oferecem o PWM em 8 bits (ATMEL, 2008). Para isso, é necessário trabalhar com os pinos D9 ou D10, neste caso foi utilizado o pino D9.

Primeiramente, foi desenvolvido uma função para configurar o contador TCNT1 para trabalhar na frequência desejada de 25 kHz, como pode ser vista na Figura 32.

Figura 31: Formas de onda durante o processo de contagem do *timer 1*, TCNT1.



Fonte: Adaptado de Raniere, 2021.

Na Figura 31 é mostrado a contagem de tempo para o *timer 1*, TCNT1. Nesta figura tem duas linhas horizontais, a primeira é referente ao máximo que o registrador ICR1 pode chegar, na linha abaixo tem-se o registrador OCR1x, visto que o Arduino Uno R3 possui dois canais PWM para o *timer 1*, que varia de acordo com o pino a ser utilizado. A onda do tipo “dente-de-serra” refere-se ao sinal do registrador TCNT1, e a onda abaixo é do sinal PWM que está disponível nos pinos OSC1A/D9 ou OSC1B/D10.

Quando o sinal do TCNT1 chega no valor do registrador ICR1, o microcontrolador automaticamente joga o valor do pino OC1x para nível lógico alto, ao mesmo tempo que o TCNT1 é zerado e reinicia a sua contagem, a medida que o contador incrementa e atinge o valor do registrador OCR1x, o valor do pino OC1x vai para o nível lógico baixo. Com isso, pode-se ver que quando maior o valor do registrador ICR1, chamado de TOP, maior é o período de contagem e, por consequência, uma frequência menor, já para o OCR1, quando maior o seu valor, maior será o seu ciclo de trabalho, e quanto menor o seu valor, menor o ciclo de trabalho.

Para ativar o modo não inversor do microcontrolador, alguns registradores devem ser configurados. Deste modo, os bits dos registradores COM1A1 e COM1B1 igual a 1, enquanto COM1A0 e COM1B0 são definidos como 0. Na sequência, com intuito de ativar o modo *fast PWM*, que é modo 14 do microcontrolador, e passar ao TOP, o valor do registrador ICR1, os bits WGM13, WGM12 e WGM11 são ajustados para o nível lógico 1, e WGM10, igual a 0. Para alterar a frequência do *clock* do microcontrolador, é necessário que não tenha o *prescaler*, ou seja, que não haja

nenhum divisor de frequência, pois a frequência a ser utilizado pelo contador é a própria fornecida pelo cristal, que é de 16 MHz.

Para calcular a frequência do PWM, é levado em consideração que o ICR1 tem um valor de 639, com isso tem-se que a frequência do PWM é de:

$$f_{PWM} = \frac{16000000}{ICR1+1} = \frac{16000000}{639+1} = 25000 \text{ Hz},$$

e com isso tem-se a frequência desejada para o PWM do presente projeto.

Na Figura 32 é ilustrada a função para a configurar o microcontrolador para trabalhar com o PWM na frequência de 25 kHz. Primeiro, são configurados os registradores do ATmega328P, conforme explicado acima, e então é atribuído ao registrador ICR1 o valor de 639. E, por fim, são configurados os pinos de saída, D9 e D10. Neste caso, foi utilizado apenas o pino D9 como saída do sinal PWM de 25 kHz.

Figura 32: Função para configuração dos registradores do *timer 1* para gerar o sinal PWM de 25 kHz.

```
void configuracao_Timer1(){
    TCCR1A = 0; //Limpa os registradores de configuração do timer 1, TCCR1A
    TCCR1B = 0; //Limpa os registradores de configuração do timer 1, TCCR1B
    TCNT1 = 0; //Reseta o timer 1
    TCCR1A = _BV(COM1A1) //Configura o canal A no modo não-inversor
    | _BV(COM1B1) //Configura o canal B no modo não-inversor
    | _BV(WGM11); //Configura o modo 14 para fast PWM, ou seja, TOP = ICR1
    TCCR1B = _BV(WGM12) //Configura o modo 14 para fast PWM, ou seja, TOP = ICR1
    | _BV(WGM13) //Configura o modo 14 para fast PWM, ou seja, TOP = ICR1
    | _BV(CS10); //Configura 0 prescaler para 1
    ICR1 = 639; //Configura o TOP para 639

    pinMode( 9, OUTPUT); //Configura o pino D9 como saída sinal PWM de 25 kHz
}
```

Fonte: Adaptado de Raniere, 2021.

Para configurar o pino 9 de saída do sinal PWM de 25 kHz, tem-se o código mostrado na Figura 33, onde o registrador OCR1x é definido com o valor da razão cíclica dado no escopo da função.

Figura 33: Função para configuração do registrador OCR1x.

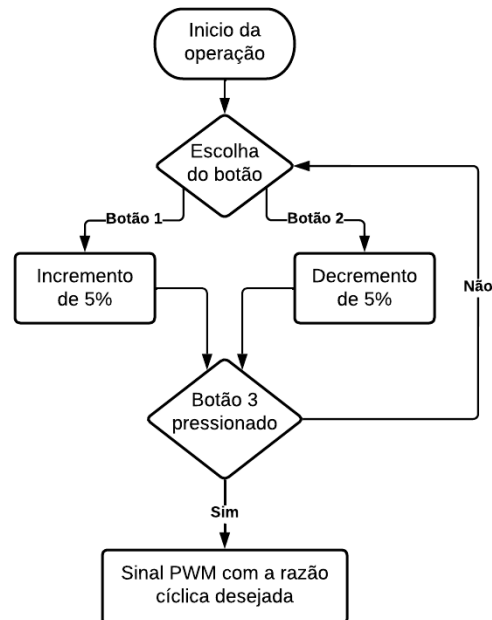
```
void inicializa_PWM25khz(int valor){
    OCR1A = valor;
}
```

Fonte: Autoria própria.

Para implementação do presente projeto foi criado um código-fonte, que segue a ideia do fluxograma da Figura 34, onde o usuário entra com o valor da razão cíclica desejada, incrementando ou decrementando 5 % através dos botões 1 e 2, então ao pressionar o botão 3 para dar *play*, o microcontrolador inicia com esta razão cíclica e começa o processo de leitura da temperatura do sensor LM35. Durante a

leitura dos botões de entrada, ao ser pressionado o pino correspondente vai para o nível lógico alto, fazendo com que o microcontrolador execute tal tarefa quando ocorre uma borda de subida. No apêndice A, contém este código-fonte comentado.

Figura 34: Fluxograma demonstrando as etapas do código-fonte.



Fonte: autoria própria.

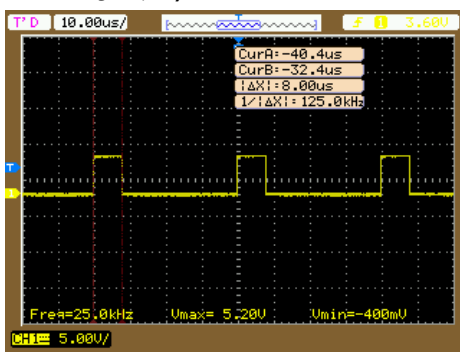
4.4 Sinal PWM

De forma a garantir o funcionamento do sinal de PWM fornecido pelo microcontrolador ATmega328P, ensaios experimentais foram realizados. O primeiro consistiu em medir o sinal de PWM logo após o optoacoplador conectado ao pino D9 do microcontrolador, que tem como objetivo desacoplar o circuito elétrico de potência do circuito elétrico de controle, a fim de comparar com o sinal do gerador de função de varredura de 20 MHz (modelo 4040DD2 da marca BK Precision). No segundo ensaio, mediu-se o sinal PWM que o circuito *bootstrap* fornece ao MOSFET do conversor CC-CC abaixador. Ambos os ensaios seguiram um incremento de 20 % na razão cíclica na faixa de 20 % a 80 % do sinal PWM.

Como resultado do primeiro ensaio, tem-se as Figuras 35 a 42. Nestas é possível observar que ambas as medidas, do gerador de funções e do microcontrolador, obtiveram uma tensão máxima de 5,2 V, atendendo a tensão requerida para fazer com que o circuito *bootstrap* funcione de forma satisfatória. O valor de tensão mínima, com o gerador de funções essa tensão foi de -400 mV, e para o microcontrolador foi de

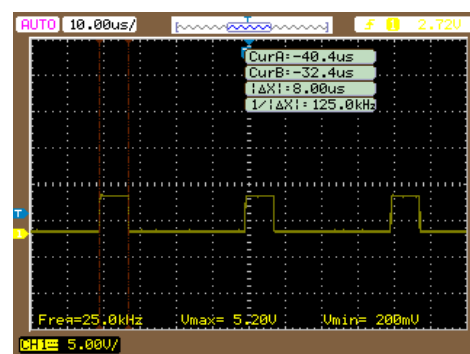
240 mV. Para a presente aplicação, esta variação da tensão mínima não é significativa em relação ao acionamento do conversor CC-CC. Para avaliar se o microcontrolador está fornecendo o ciclo de trabalho correto e a frequência desejada, pode-se observar o tempo ao qual o sinal PWM ficou em nível lógico alto, comparando então o sinal PWM fornecido pelo gerador de funções com o do microcontrolador. Além disso, nota-se que para ambas as amostras medidas, o tempo em nível lógico foi o mesmo, assim como o valor de frequência do sinal.

Figura 35: Sinal de PWM medido no gerador de função, A) 20% da razão cíclica.



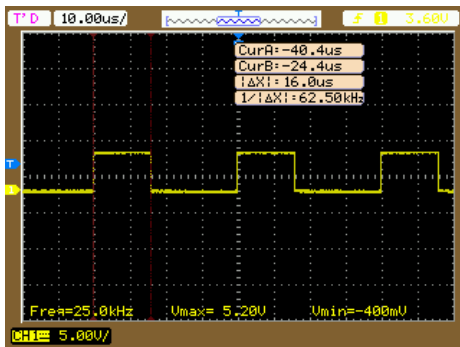
Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Sinal de PWM medido na saída do optoacoplador do microcontrolador, A) 20% da razão cíclica.



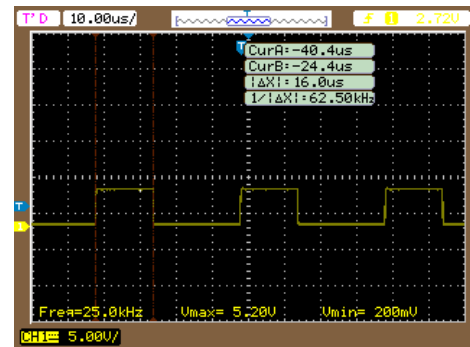
Fonte: Autoria própria.

Figura 37: B) 40% da razão cíclica.



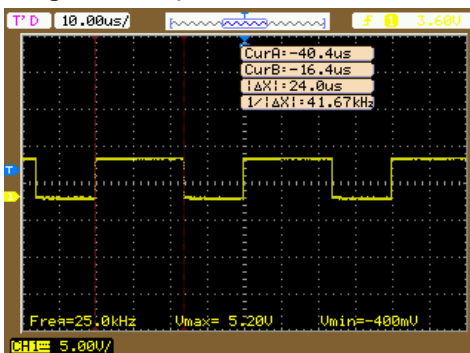
Fonte: Autoria própria.

Figura 38: B) 40% da razão cíclica.



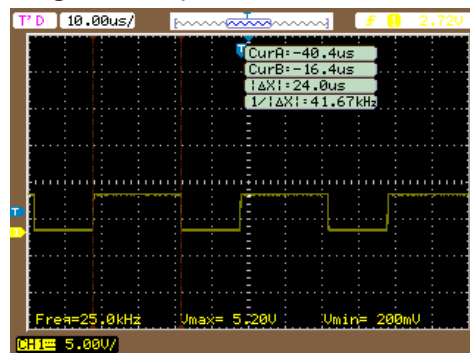
Fonte: Autoria própria

Figura 39: C) 60% da razão cíclica.



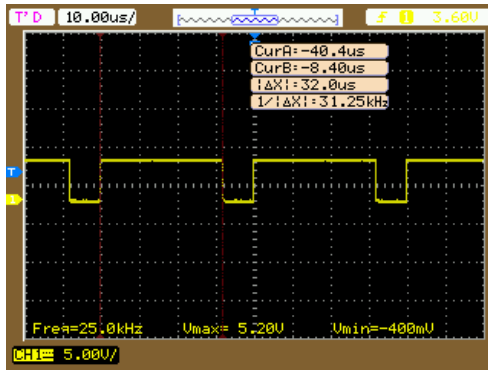
Fonte: Autoria própria.

Figura 40: C) 60% da razão cíclica.



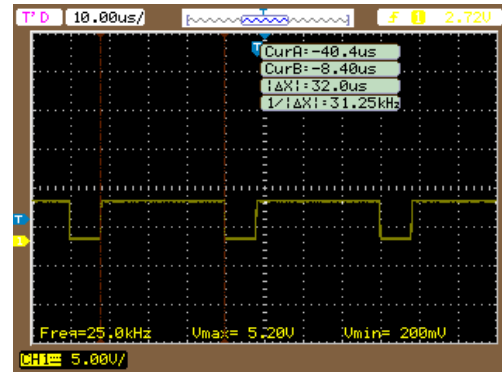
Fonte: Autoria própria.

Figura 41: D) 80% da razão cíclica.



Fonte: Autoria própria.

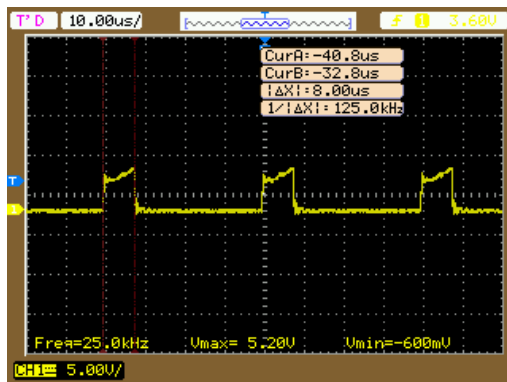
Figura 42: D) 80% da razão cíclica.



Fonte: Autoria própria.

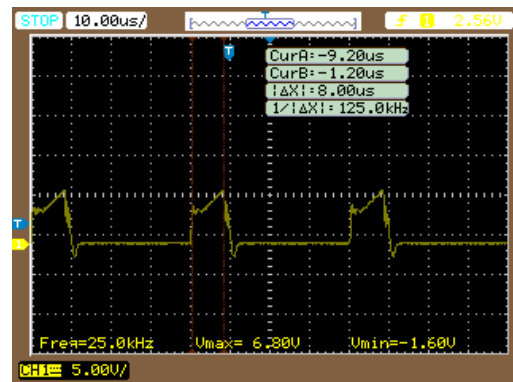
Para o segundo ensaio, as Figuras 43 a 50 compreendem as medidas na saída do *bootstrap* utilizando o gerador de funções e microcontrolador como provedores do sinal PWM. Nestas, pode-se observar que para ambos os métodos de entrada do sinal PWM, o sinal foi aumentando gradualmente quando em alta, isso aconteceu pois neste momento o capacitor, presente no circuito *bootstrap*, está descarregando, ou seja, está dissipando a sua energia elétrica sobre o resistor R_3 . Essa fenômeno teve mais relevância sobre a tensão máxima medido para o sinal oriundo do microcontrolador, visto que ao comparar com o mesmo sinal medido na saída do circuito *bootstrap*, porém com o gerador de funções como entrada, impactando assim nos resultados obtidos para a validação do sistema geral, aumentando a tensão final do conversor CC-CC ao comparar com as medidas obtidas no item 4.2, para os quais foram realizados os testes de funcionamento do conversor CC-CC utilizando-se o sinal PWM do gerador de funções.

Figura 43: Sinal de PWM do gerador de função medido no circuito bootstrap, A) 20% da razão cíclica.



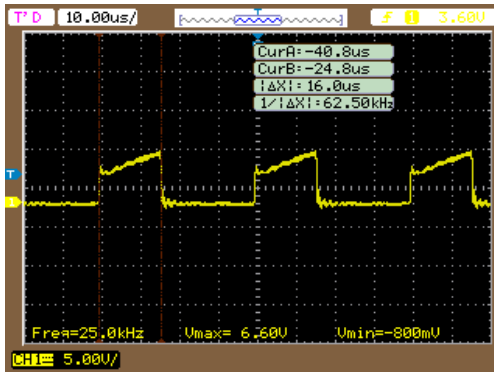
Fonte: Autoria própria.

Figura 44: Sinal de PWM do microcontrolador medido no circuito bootstrap, A) 20% da razão cíclica.



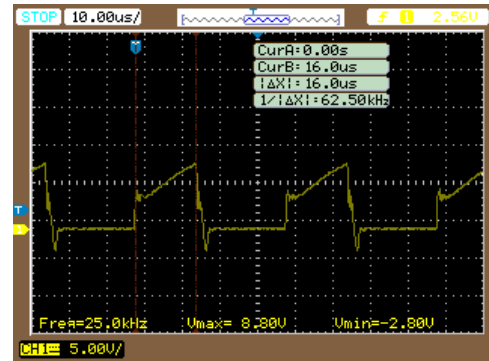
Fonte: Autoria própria.

Figura 45: B) 40% da razão cíclica.



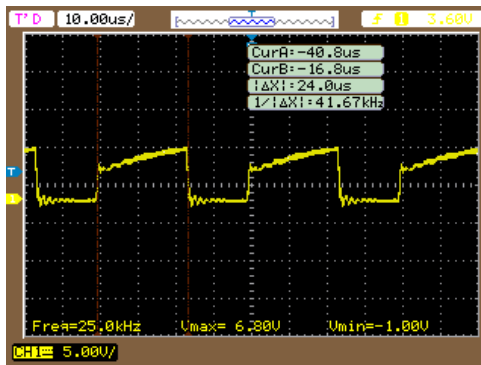
Fonte: Autoria própria.

Figura 46: B) 40% da razão cíclica.



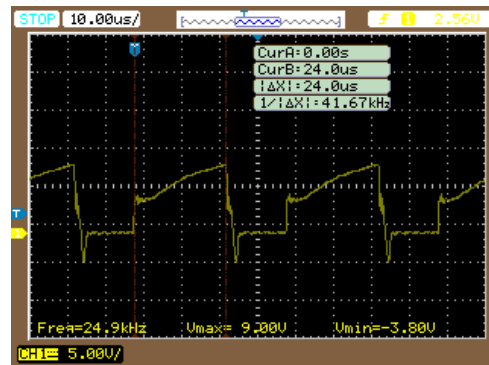
Fonte: Autoria própria.

Figura 47: C) 60% da razão cíclica.



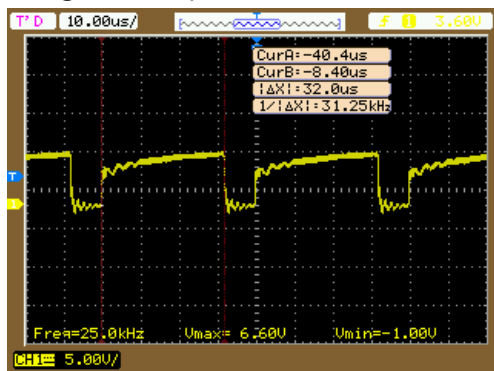
Fonte: Autoria própria.

Figura 48: C) 60% da razão cíclica.



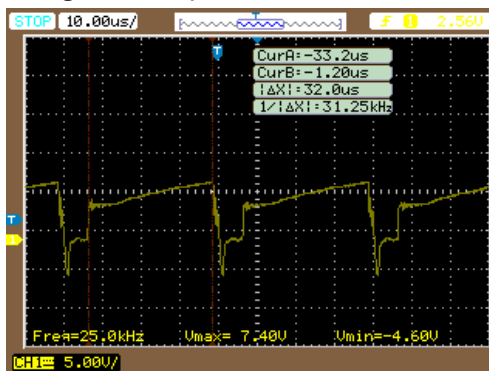
Fonte: Autoria própria.

Figura 49: D) 80% da razão cíclica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 50: D) 80% da razão cíclica.



Fonte: Autoria própria.

Nas Tabelas 2 e 3, tem-se os valores medidos na saída do conversor CC-CC abaixador utilizando o microcontrolador como gerador do sinal PWM, bem com o gerador de funções. Pode-se observar que os valores medidos de corrente e de temperatura resultaram em pequenos valores de erros, comparando os dois métodos

de geração do sinal PWM, assim, não impacta de forma significativa nos resultados de temperatura medidos sobre a pastilha de Peltier.

Tabela 2: Medição de parâmetros na saída do circuito *bootstrap* com o sinal PWM oriundo do gerador de funções.

Razão Cíclica (%)	Tensão de Entrada (V)	Corrente de Entrada (A)	Tensão de Saída (V)	Corrente de Saída (A)	Temperatura da Pastilha (°C)	Temperatura do Dissipador (°C)
20	16	0,09	2,7	0,49	40	24
40	16	0,42	5,4	1,06	63	24,5
60	16	0,9	8,3	1,51	95,5	28
80	16	1,5	11,2	1,89	122	26

Fonte Autoria própria.

Tabela 3: Medição de parâmetros na saída do circuito *bootstrap* com o sinal PWM oriundo do microcontrolador ATmega328P.

Razão Cíclica (%)	Tensão de Entrada (V)	Corrente de Entrada (A)	Tensão de Saída (V)	Corrente de Saída (A)	Temperatura da Pastilha (°C)	Temperatura do Dissipador (°C)
20	16	0,12	2,76	0,55	38	22,5
40	16	0,48	5,44	1,12	57	24
60	16	0,96	8,2	1,53	87	26,5
80	16	1,53	11,1	1,88	122,5	28

Fonte: Autoria própria.

4.5 Testes de Validação

Nesta seção, os resultados de validação do sensor de temperatura LM35 e do sistema geral são analisados. Para isso, uma câmara térmica foi utilizada para medir, com melhor precisão, o calor fornecido pela pastilha de Peltier, quando acionado pelo sistema projetado. Além disso, uma comparação entre os resultados quando o sistema é alimentado pelo sinal PWM oriundo do gerador de função e do microcontrolado ATmega328P. Por fim, apresenta-se os resultados do ensaio utilizando uma plataforma metálica de alumínio acoplada a pastilha de Peltier, bem como da taxa de condução da plataforma em relação a pastilha de Peltier.

4.5.1 Teste do Sensor de Temperatura LM35

Para verificar a confiabilidade das medidas de temperaturas lidas através do sensor de temperatura LM35 foi realizado consecutivas medidas de temperaturas com o sensor de temperatura sendo segurado por dois dedos, onde o sensor deveria marcar a temperatura corporal, em média 37 °C. Na Tabela 4, pode-se observar os

valores medidos com intervalo de 5 s utilizando o sensor de temperatura LM35. Observa-se que a temperatura é superior a temperatura corpórea de 37 °C, demonstrando assim que para utilizar este sensor demandaria ensaios para determinar o seu funcionamento na presente aplicação com a precisão especificada pelo fabricante.

Tabela 4: Valores medidos com o sensor de temperatura LM35.

Temperatura (°C)
50,29
48,82
50,78
49,8
49,31
46,87
51,26

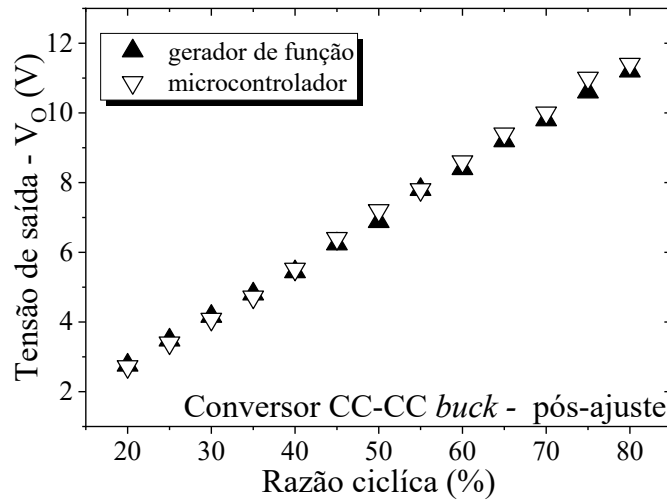
Fonte: Autoria própria.

4.5.2 Ensaio do sistema completo

Para este ensaio do sistema, os mesmos procedimentos utilizados no ensaio do conversor CC-CC abaixador foram realizados, a fim de analisar os mesmos parâmetros. Porém, nesta etapa, o provedor do sinal PWM é o microcontrolador e a medição de temperatura foi realizado com uma câmera térmica, com intuito de obter uma melhor precisão e visualização do calor emitido pela pastilha de Peltier quando acionada pelo sistema projetado.

A Figura 51 apresenta uma comparação entre os resultados com o sinal de PWM fornecido por um gerador de função e pelo microcontrolador. Ao analisar as duas curvas, pode-se ver que em ambos os ensaios a tensão elétrica medida nos terminais do conversor CC-CC abaixador os valores medidos são aproximadamente semelhantes.

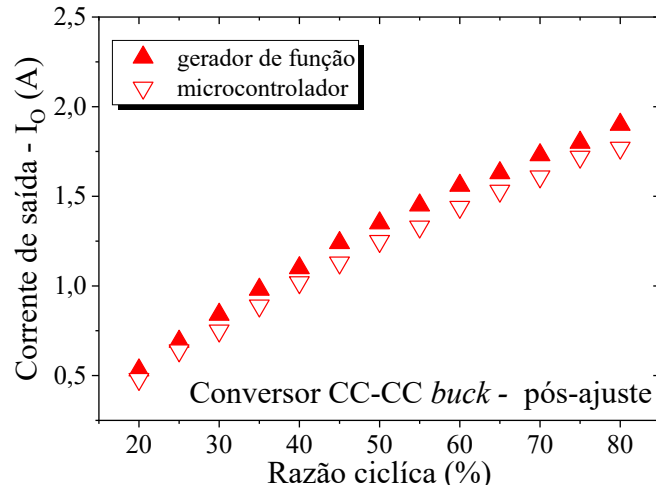
Figura 51: Gráfico da tensão elétrica medida nos terminais do conversor CC-CC abaixador.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a Figura 52, pode-se ver que a corrente elétrica fornecida nos terminais do conversor CC-CC abaixador pelo sistema projetado utilizando o microcontrolador é menor que os valores obtidos com o sistema utilizando o gerador de funções, chegando a uma diferença média de 0,1 A entre ambos os métodos.

Figura 52: Gráfico da corrente elétrica medida nos terminais do conversor CC-CC abaixador.

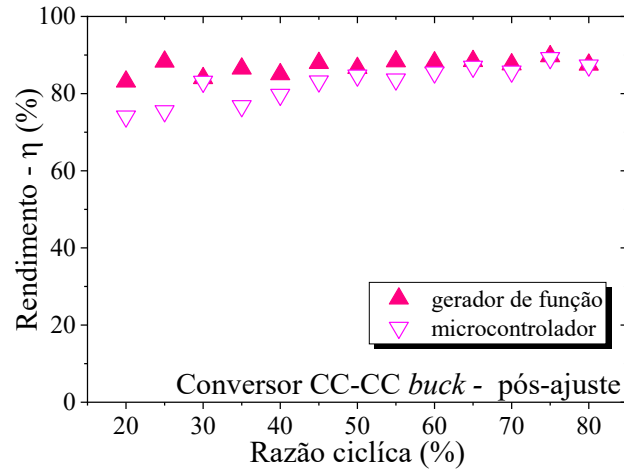


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 53, tem-se o rendimento do conversor CC-CC abaixador medido através dos dois ensaios com o sistema projetado. O gráfico evidencia que o rendimento do conversor CC-CC abaixador, quando controlado pelo microcontrolador, teve um resultado menor se comparado com os valores medidos pelo gerador de funções. Em algumas medidas o conversor CC-CC abaixador, quando controlado pelo microcontrolador, ficou abaixo do desejado, que é acima de 80 %, chegando a uma

baixa de 74 % quando a razão cíclica está em 20 % e, então, se mantendo na faixa desejada acima de 80 % a partir de 40 % da razão cíclica.

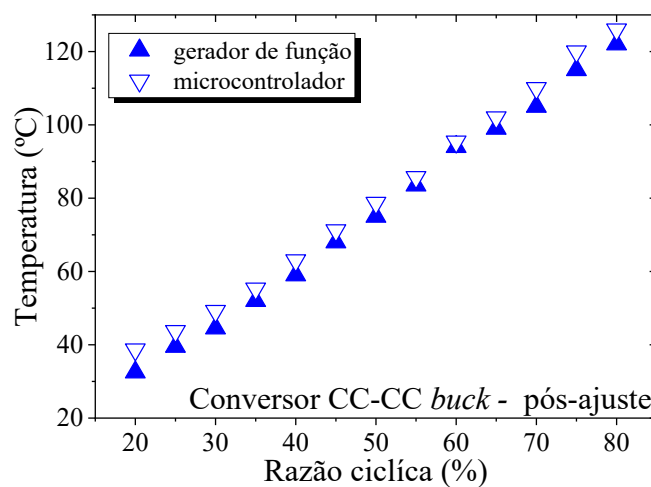
Figura 53: Gráfico do rendimento do conversor CC-CC abaixador.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 54 representa os valores de temperatura para ambos os ensaios realizados com o sistema projetado. Nota-se que para o caso em que o sistema é controlado pelo microcontrolador, a temperatura foi em média 3,83 °C maior que quando o sistema foi controlado via gerador de função. Deste modo, mesmo com um rendimento menor do conversor CC-CC abaixador quando o controlado pelo microcontrolador se comparado com o teste utilizando o gerador de função, a temperatura oferecida pela pastilha de Peltier no teste utilizando o microcontrolador não foi afetada significativamente.

Figura 54: Gráfico da temperatura da pastilha de Peltier.

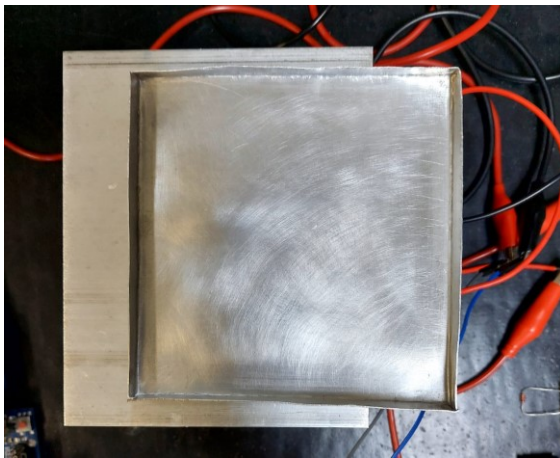


Fonte: Autoria própria.

4.5.3 Ensaio experimental do sistema completo com uma plataforma metálica

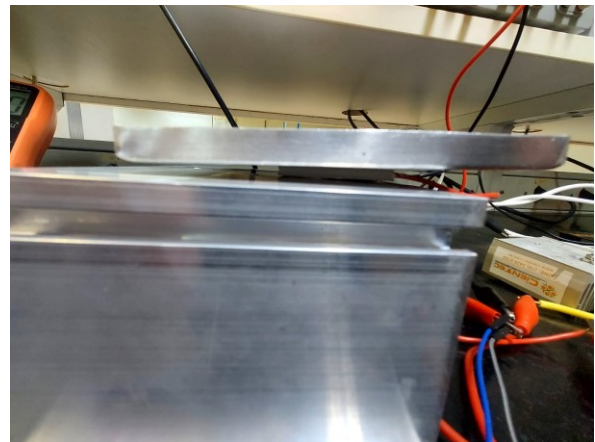
Nesta etapa o ensaio foi realizado com o sistema controlado pelo microcontrolador, utilizando a plataforma metálica de alumínio sobre a pastilha de Peltier, como pode ser visto nas Figuras 55 e 56. Os parâmetros de tensão elétrica e corrente elétrica de entrada e saída, bem como a temperatura da plataforma metálica foram medidos. Para melhorar a transferência de calor entre a pastilha de Peltier e a plataforma metálica, foi utilizado uma pasta térmica de silicone branca.

Figura 55: Vista superior da disposição da plataforma metálica sobre a pastilha de Peltier.



Fonte: Autoria própria.

Figura 56: Vista lateral da disposição da plataforma metálica sobre a pastilha de Peltier.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 informa os valores medidos no ensaio com a plataforma metálica, na qual observa-se que a temperatura medida sobre a plataforma metálica é significativamente menor se comparado com os valores de temperatura medidos diretamente na pastilha de Peltier visto na Figura 62.

Tabela 5: Valores medidos através do teste com a plataforma metálica

Razão Cíclica (%)	Tensão de Entrada (V)	Corrente de Entrada (A)	Tensão de Saída (V)	Corrente de Saída (A)	Temperatura da Plataforma Metálica (°C)
20	16,06	0,11	2,6	0,52	25,7
40	16,06	0,46	5,6	1,1	27,3
60	16,05	1,03	8,4	0,46	30,1
80	16,03	1,61	11,2	1,03	31,5

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 6 foi calculado a taxa de condução térmica por meio da lei de Fourier para a condução térmica, Equação 2, sendo a constante de condução térmica k para

o alumínio igual a 204 W/mK, a área da plataforma metálica de 0,0001 m², a espessura de 0,0005 m e a diferença entre a temperatura da pastilha de Peltier e da plataforma metálica de alumínio. Também foi calculado a potência dissipada em forma de calor com o ambiente, de 25 °C.

Tabela 6: Valores medidos e calculados para eficiência calorífica do sistema projetado.

Razão Cíclica (%)	Temperatura da Pastilha de Peltier(°C)	Temperatura da Plataforma Metálica (°C)	Taxa de Condução Térmica (kcal/s)	Potência Dissipada (W)
20	38,7	25,7	530,4	2,36
40	63	27,3	1456,56	6,54
60	95,4	30,1	2664,24	12,12
80	126	31,5	3855,6	17,38

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o resultado da Tabela 6, pode-se ver que a taxa de condução térmica da plataforma metálica aumentou conforme a razão cíclica foi variada, isso aconteceu por conta do aumento da temperatura da pastilha de Peltier, um fenômeno já esperado, visto que para se manter constante a temperatura da plataforma metálica deveria acompanhar a taxa de calor emitido pela pastilha, porém boa parte do calor foi dissipado com o ambiente. A potência dissipada só comprova ainda mais esse fenômeno, chegando a dissipar com o ambiente 17,38 W.

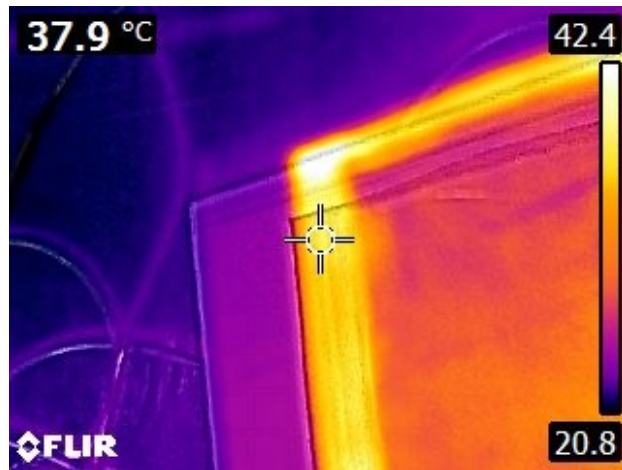
Outro fenômeno observado foi que as bordas laterais da plataforma metálica aqueceram mais que a sua base que estava em contato com a pastilha, como pode ser observado nas Figuras 57 e 58. Uma das hipóteses para esse aquecimento das bordas laterais da plataforma metálica é justamente a soma do calor emitido pela pastilha de Peltier através da plataforma metálica e do calor dissipado pelo módulo termoelétrico com o ambiente.

Figura 57: Demonstração do aquecimento das bordas laterais da plataforma metálica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 58: Demonstração da temperatura da borda lateral da plataforma metálica.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho tinha como objetivo desenvolver sistema de aquecimento utilizando a pastilha de Peltier, onde tivesse um circuito eletrônico de potência capaz de fornecer a potência necessária para que a pastilha atingisse a temperatura de 120 °C, também tivesse um circuito eletrônico de controle capaz de variar a razão cíclica de um conversor CC-CC abaixador, cuja tensão de saída estivesse na faixa de 2 V a 12 V e com um rendimento mínimo de 80 %, e por fim que tivesse uma interface de comunicação com o usuário para visualização da temperatura atual da pastilha, que deveria operar na faixa de 30 °C a 120 °C.

O circuito eletrônico de potência, quando acionado com o sistema projetado, teve um menor rendimento se comparado com o mesmo sistema sendo controlado então por meio de um gerador de funções. Com esta etapa de potência do sistema, foi possível entregar a tensão dentro da faixa desejada. O rendimento se mostrou inicialmente um pouco abaixo para desejado, mas conforme a razão cíclica foi aumentando o rendimento chegou a atingir e ultrapassar o limite mínimo desejado. O circuito eletrônico de controle se mostrou eficiente, uma vez que foi possível exibir ao usuário e variar a razão cíclica, mostrar também as temperaturas medidas com o sensor de temperatura.

Uma desvantagem sobre o sistema projetado foi que para o uso da plataforma metálica, demandaria um estudo térmico e estrutural do protótipo para melhor aproveitamento do calor emitido pela pastilha de Peltier, uma vez que nem toda potência calorífica estava sendo transmitida para a plataforma. Ainda em relação a plataforma metálica de alumínio, devido à sua facilidade de oxidação e à baixa condutividade térmica da superfície oxidada, não apresentou bons resultados para tal aplicação, podendo ser substituído por uma peça de cobre. Outro ponto é com relação ao sensor de temperatura, uma vez que a temperatura medida não condizia com o esperado, demandando mais estudos em relação a isto, ou então a troca por outro modelo de sensor mais eficiente. Como sugestão de melhoria, fica a questão da implantação de sistema de retificação de tensão para tornar o protótipo independente de fontes de alimentação de bancada.

A vantagem deste tipo de sistema é o controle da temperatura da pastilha de Peltier, pois uma vez que o sistema atingiu a tensão desejada, ela irá aquecer até o ponto desejado, não demandando de mais potência para chegar na temperatura

correta. Também pode ser usado para o aquecimento e controle da temperatura de pequenos objetos que possam ser dispostos sobre a plataforma de aquecimento. Seu uso pode ser empregado em laboratórios de química por exemplo, onde são necessários o aquecimento de soluções químicas com uma certa precisão de temperatura.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. [S. l.]: Pearson, 1998.

ARDUINO® , UNO R3. **Arduino® UNO R3**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ATMEL. **8-bit Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash ATmega48P/V ATmega88P/V ATmega168P/V ATmega328P**. [S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/241077/ATMEL/ATMEGA328P.html>. Acesso em: 12 nov. 2022.

BERNARDO, RAUL TORRES. **DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE TEMPERATURA POR EFEITO PELTIER**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1211/1/MONOGRRAFIA_DesenvolvimentoPlataformaAplica%c3%a7%c3%a3o.pdf. Acesso em: 6 maio 2022.

BUENO, ALISSON LUIZ; DALOSKI, LEANDRO CESAR; ALMEIDA, RAFAEL DALBELLO. **APLICAÇÃO DE PASTILHAS PELTIER PARA FABRICAÇÃO DE HIDROMEL**. 2018. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (Tecnólogo em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16952/1/PG_COELE_2018_2_03.pdf. Acesso em: 30 maio 2022.

BOUFLEUHER, Lucas Gabriel de Souza; OLIVEIRA, Alberto Vinicius de. Influência de potência de saída no desempenho de conversor CC-CC buck: estudo experimental e de simulação. **XII Seminário de Extensão e Inovação**, [S. l.], 7 nov. 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. Nova York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.

CONSUL (ed.). Saiba tudo sobre ar-condicionado. *In*: **Saiba tudo sobre ar-condicionado**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.consul.com.br/facilita-consul/bem-pensado-para-voce/tudo-sobre-ar-condicionado>. Acesso em: 4 jun. 2022.

ECycle. Novos dispositivos termoeletrônicos flexíveis permitem captar energia de pele humana. **Ciência e Tecnologia**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/novos-dispositivos-termoeletricos-flexiveis-permitem-captar-energia-de-pele-humana/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

FONSECA, Alexandre Bitencourt Araujo. **DESENVOLVIMENTO DE KIT INSTRUCIONAL DE CONVERSOR CC-CC COM TOPOLOGIA BOOST**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2019. Disponível em:

https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15805/1/TD_COELE_2019_1_087.pdf
f. Acesso em: 6 maio 2022.

HB CORPORATION. **TEC1-12705**. Disponível em:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/227423/ETC2/TEC1-12705.html>.
Acesso em: 30 maio 2022.

LEÃO, Aline Rocha. **DESENVOLVIMENTO DE KIT'S DIDÁTICOS PARA AULAS PRÁTICAS DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA::** Conversores Buck, Boost e Buck/Boost. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2016. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6073/3/CM_COELE_2016_1_01.pdf. Acesso em: 6 maio 2022.

MOURA, Jose Americo de Souza. APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DO EFEITO PELTIER. *In*: MOURA, Jose Americo de Souza. **Filmes Nanométricos de FeN e AlN Crescidos por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. 2010. Tese (Doutorado em Física Teórica e Experimental) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S. l.], 2010. Disponível em:
https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/16572/1/JoseASM_TESE.pdf. Acesso em: 6 maio 2022.

SUPERINTERESSANTE (ed.). Fogo: A descoberta que salvou e matou muita gente. *In*: **Fogo: A descoberta que salvou e matou muita gente**. [S. l.]: Grupo Abril, 31 out. 2016. Disponível em: <https://super.abril.com.br/comportamento/fogo-3/>. Acesso em: 4 jun. 2022.

PETROBRAS. Gás liquefeito de Petróleo (GLP). *In*: **Gás liquefeito de Petróleo (GLP)**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/produtos/domesticos/gas-liquefeito-de-petroleo-glp/>. Acesso em: 4 jun. 2022.

POMILIO, José Antenor. Topologias Básicas de Conversores CC-CC. *In*: POMILIO, José Antenor. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em:
<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap3.pdf>. Acesso em: 6 maio 2022.

PRADO, CRISTIANE BARBOSA. **AUTOMAÇÃO DO DISPOSITIVO CONCHA DE CASAGRANDE PARA O ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2019. Disponível em:
https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15809/1/TD_COELE_2019_1_093.pdf
f. Acesso em: 6 maio 2022.

PRESSE, France. Uso do ar-condicionado deve 'explodir' e elevar poluição, diz estudo. **G1**, [S. l.], 28 abr. 2015. Disponível em:
<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2015/04/uso-do-ar-condicionado-deve-explodir-e-elevar-poluicao-diz-estudo.html>. Acesso em: 20 nov. 2022.

PWM Arduino - alterando a frequência. Direção: Bruno Ranieri. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=M46uVDxuKsl>. Acesso em: 20 nov. 2022.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 5. ed. [S. l.]: Pearson, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35**: LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors Literature Number: SNIS159B. [S. l.: s. n.], 2000. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/517588/TI1/LM35.html>. Acesso em: 15 maio 2022.

ANEXO A – Códigos do microcontrolador

/* Trabalho de Conclusão de Curso

* Titulo: Desenvolvimento de um sistema de aquecimento: Uma aplicação da pastilha de Peltier

```

* Autora: Amanda Chini Niedermaeyer
*/

#include <LiquidCrystal.h>

int button1 = 6; //configura o pino D6 para o botão 1
int button2 = 7; //configura o pino D7 para o botão 2
int button3 = 8; //configura o pino D8 para o botão 3

float dutyCicle = 95.85; //Variavel para a razao ciclica, inicia com 15%
float aux = 0; //Variavel auxiliar para mostrar o ciclo de trabalho no visor LCD

const int sensorTemp = A0; //Variavel referente ao pino de entrada do sensor de
temperatura

void configuracao_Timer1(); //Função para configurar os registradores para gerar
o sinal PWM de 25 kHz
void inicializa_PWM25khz(int valor); //Função para configurar o registrador do
pino D9 de saída do sinal PWM de 25 kHz
void medirTemperatura(const int pino, float dutyC); //Função para medir a
temperatura e amostrar a razão cíclica e a temperatura no visor LCD

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); //Ajuste dos pinos de saída para o visor
LCD

void setup() {
Serial.begin(9600); //Inicialização do Arduino
lcd.begin(16, 2); //Inicialização do visor LCD
pinMode(button1, INPUT); //Definição do pino D6 como entrada de incremento da
razão ciclica
pinMode(button2, INPUT); //Definição do pino D7 como entrada de decremento da
razão cíclica
pinMode(button3, OUTPUT); //Definição do pino D8 como saída para inicialização do
sistema de aquecimento
configuracao_Timer1(); //Inicialização da configuração dos registradores para
gerar o sinal PWM de 25 kHz
}
/*****/
void loop() {

```

```

if(!digitalRead(button1)){ //Se o botão 1 no pino D6 for pressionado
dutyCicle = dutyCicle + 31.95; //A razão cíclica incrementa 5%
aux = ((dutyCicle*100)/639); //A variavel auxiliar converte para decimal a razão
ciclica
if(aux > 80){ //Se a razão ciclica ultrapassa o limite máximo de 80%
aux = 20; //A variuavel auxiliar retorna a 20%
dutyCicle = 127.8; //E a razão ciclica retorna a 20% -> 127.8
}
lcd.clear(); //O visor LCD e limpaado
lcd.setCursor(1, 0); //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 1, linha 0
lcd.print("PWM "); //O visor LCd ira imprimir a palavra PWM
lcd.setCursor(5, 0); //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 5, linha 0
lcd.print(aux,DEC); //O visor LCd ira imprimir o valor da variavel auxiliar
Serial.print(aux,DEC); //O monitor serial do Arduino exhibe o valor da variavel
auxiliar
delay(500);
}
if(!digitalRead(button2)){ //Se o botão 2 no pino D7 for pressionado
dutyCicle = dutyCicle - 31.95; //A razão cíclica decrementa 5%
aux = ((dutyCicle*100)/639); //A variavel auxiliar converte para decimal a
razão ciclica
if(aux < 20){ //Se a razão ciclica ultrapassa o limite mínimo de 20%
aux = 80; //A variuavel auxiliar retorna a 80%
dutyCicle = 511.2; //E a razão ciclica retorna a 80% -> 511.2
}
lcd.clear(); //O visor LCD e limpaado
lcd.setCursor(1, 0); //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 1, linha 0
lcd.print("PWM "); //O visor LCd ira imprimir a palavra PWM
lcd.setCursor(5, 0); //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 5, linha 0
lcd.print(aux,DEC); //O visor LCd ira imprimir o valor da variavel auxiliar
Serial.print(aux,DEC); //O monitor serial do Arduino exhibe o valor da variavel
auxiliar
delay(500);
}
if(!digitalRead(button3)){ //Se o botão 3 no pino D8 for pressionado
inicializa_PWM25khz(dutyCicle); //O sinal PWM de 25 kHz é inicializado no pino
D9 com a razão cíclica desejada
medirTemperatura(sensorTemp,aux); //E inicializado as medidas do sensor de
temperatura e mostrado no visor LCD a razão ciclica e as medidas do sensor
}
}

```

```

}
/*****/
//Função para configurar os registradores para gerar o sinal PWM de 25 kHz
void configuracao_Timer1(){
TCCR1A = 0;           //Limpa os registradores de configuração do timer 1, TCCR1A
TCCR1B = 0;           //Limpa os registradores de configuração do timer 1, TCCR1B
TCNT1 = 0;           //Reseta o timer 1
TCCR1A = _BV(COM1A1) //Configura o canal A no modo não-inversor
        | _BV(COM1B1) //Configura o canal B no modo não-inversor
        | _BV(WGM11); //Configura o modo 14 para fast PWM, ou seja, TOP = ICR1
TCCR1B = _BV(WGM12) //Configura o modo 14 para fast PWM, ou seja, TOP = ICR1
        | _BV(WGM13) //Configura o modo 14 para fast PWM, ou seja, TOP = ICR1
        | _BV(CS10); //Configura 0 prescaler para 1
ICR1 = 639;          //Configura o TOP para 639

pinMode( 9, OUTPUT); //Configura o pino D9 como saída sinal PWM de 25 kHz
}
/*****/
//Função para configurar o registrador do pino D9 de saída do sinal PWM de 25 kHz
void inicializa_PWM25khz(int valor){
OCR1A = valor;
}
/*****/
//Função para medir a temperatura e amostrar a razão cíclica e a temperatura no
visor LCD
void medirTemperatura(const int pino, float dutyC){
float temperatura; //Variavel auxiliar para armazenar os valores medidos do sensor
while(1){
temperatura = (analogRead(pino) * 0.0048828125 * 100); //Conversao dos valores
medidos do sensor de temperatura para decimal

lcd.clear();           //O visor LCD e limpado
lcd.setCursor(1, 0);   //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 1, linha 0
lcd.print("PWM ");    //O visor LCd ira imprimir a palavra PWM
lcd.setCursor(5, 0);   //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 5, linha 0
lcd.print(dutyC,DEC); //O visor LCd ira imprimir o valor da variavel da razão
ciclica
lcd.setCursor(1, 1);   //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 1, linha 1
lcd.print("TEMP ");    //O visor LCd ira imprimir a palavra TEMP
lcd.setCursor(6, 1);   //Ajusta o cursor do visor LCD para a coluna 6, linha 1

```

```
lcd.print(temperatura,DEC); //O visor LCd ira imprimir o valor da variavel da
medida de temperatura
Serial.print(dutyC,DEC); //O monitor serial do Arduino exibe o valor da razão
ciclica
Serial.print(temperatura,DEC); //O monitor serial do Arduino exibe o valor da
temperatura
delay(5000);
    }
}
```