



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Ítalo Souza da Silva

**UTILIZAÇÃO DE UM CONTROLE PID DE TEMPERATURA PARA  
ESTUDO DE RESFRIAMENTO TERMOELÉTRICO**

Recife  
2022

Ítalo Souza da Silva

**UTILIZAÇÃO DE UM CONTROLE PID DE TEMPERATURA PARA ESTUDO DE  
RESFRIAMENTO TERMOELÉTRICO**

Monografia submetida ao Departamento de Engenharia  
Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco  
- UFPE, para conclusão do curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica

Orientador: José Carlos Charamba Dutra

Coorientador: Yuri Rufino Fischer

Recife  
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Ítalo Souza da.

Utilização de um controle PID de temperatura para estudo de resfriamento  
termoelétrico / Ítalo Souza da Silva. - Recife, 2022.

80 p. : il., tab.

Orientador(a): José Carlos Charamba Dutra

Coorientador(a): Yuri Rufino Fischer

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -  
Bacharelado, 2022.

1. Célula Peltier. 2. Termoeletricidade. 3. Semicondutores. 4. Refrigeração.  
5. Bombeamento de Calor. I. Dutra, José Carlos Charamba. (Orientação). II.  
Fischer, Yuri Rufino. (Coorientação). III. Título.

620 CDD (22.ed.)



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 03.º dia do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e dois, às 11:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Utilização de um controle PID de temperatura para estudo de resfriamento termoeletrônico**, elaborado pelo aluno **Ítalo Souza da Silva**, matrícula 054.277.254/07, composta pelos avaliadores Prof. **José Carlos Charamba Dutra** (orientador), MSc. **Yuri Rufino Fischer** (Coorientador), Prof. **Marcus Costa de Araújo** (membro titular) e Prof. **José Claudino de Lira Junior** (membro titular). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua Aprovação, atribuindo-lhe a média 9,5 (nove e meio), julgando-o apto(x) / inapto( ) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador:	Prof. José Carlos Charamba Dutra Documento assinado digitalmente	Nota: 9,5
Assinatura	 JOSE CARLOS CHARAMBA DUTRA Data: 09/11/2022 23:29:42-0300 Verifique em <a href="https://verificador.iti.br">https://verificador.iti.br</a>	_____
Coorientador:	MSc. Yuri Rufino Fischer Documento assinado digitalmente	Nota: 9,5
Assinatura	 YURI RUFINO FISCHER Data: 10/11/2022 06:53:00-0300 Verifique em <a href="https://verificador.iti.br">https://verificador.iti.br</a>	_____
Avaliador Interno:	Prof. Marcus Costa de Araújo	Nota: 9,5
Assinatura	_____	
Avaliador Interno:	Prof. José Claudino de Lira Junior	Nota: 9,5
Assinatura	_____	

Recife, 03 de novembro de 2022.

Prof. Marcus Costa de Araújo  
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE



---

Emitido em 10/11/2022

**ATA DE APROVACAO Nº 598/2022 - DEMEC (11.65.55)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 10/11/2022 15:51 )*

JOSE CLAUDINO DE LIRA JUNIOR  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEMEC (11.65.55)  
Matrícula: 2067330

*(Assinado digitalmente em 10/11/2022 11:01 )*

MARCUS COSTA DE ARAUJO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEMEC (11.65.55)  
Matrícula: 2929080

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <http://sipac.ufpe.br/documentos/> informando seu número: **598**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE APROVACAO**, data de emissão: **10/11/2022** e o código de verificação: **d09e10773d**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, que me guiou desde a entrada na universidade até o dia de hoje, me concedendo saúde física e mental para concluir esse curso que sempre foi um sonho para mim. Sou grato pelas obras de suas mãos e sei que Ele continuará guiando todos os meus passos. A Ele seja toda glória para sempre.

A minha mãe Sandra, que sempre me apoiou a seguir meus sonhos e me incentivou a persistir mesmo em meio a adversidades.

Aos meus avós Maria Izabel e José Francisco (*in memoriam*), que desde criança financiaram minha vida acadêmica e foram cruciais para chegar até aqui.

A minha irmã Maria Izabela, meu cunhado Felipe e meu sobrinho Miguel, que sempre me traziam alegria e apoio em todos os momentos. E a toda minha família, por orarem e torcerem por mim em todos os momentos.

Aos meus amigos, que sempre sonharam junto comigo os meus sonhos e me auxiliaram durante todo o curso. Em especial ao técnico de laboratório Victor e ao meu amigo Rodrigo Luiz, por me auxiliarem na construção da placa protótipo do referido trabalho.

A minha querida igreja, a Igreja Batista em Bairro Novo, em especial ao meu pastor Wagner Manoel e a Rede Jovem, e aos Intervalos Bíblicos da UFPE por serem o corpo de Cristo nessa Terra junto comigo, por estarem sempre em suas orações e serem auxílio em todos os momentos.

Ao meu orientador, o professor Charamba, por acreditar no meu potencial desde quando me candidatei a ser seu bolsista PIBIC e por todo apoio na construção desse trabalho. Sou grato por todo incentivo tanto acadêmico quanto na minha vida pessoal.

Ao meu coorientador Yuri, que esteve me auxiliando nesse trabalho desde o seu início e enfrentando todos os momentos complicados da pesquisa junto comigo, sempre me abrindo os olhos para boas soluções. E a equipe do Cogencasa UFPE, em especial o técnico Adilson, pelo auxílio na parte prática dessa pesquisa.

A equipe da Castro Industrial, por me fazerem evoluir profissionalmente e mostrar a engenharia na sua aplicação prática.

*“Estou convencido de que aquele que começou boa obra em vocês, vai completá-la até o dia de Cristo Jesus.”  
(Filipenses 1:6)*

## RESUMO

A pesquisa por novos materiais, sobretudo os semicondutores, possibilitou o surgimento dos módulos termoelétricos ou células Peltier. Atualmente, é observada sua aplicação em adegas comerciais, bebedouros, mini geladeiras etc. Em virtude disso e sabendo que tais aplicações estão sendo muito difundidas na atualidade, os consumidores de tais produtos comerciais têm ansiado por um controle de temperatura fidedigno. Portanto, esta pesquisa se objetiva a desenvolver um controle de temperatura PID (Proporcional-Integrativo-Derivativo) aplicado ao resfriamento de um protótipo de uma mini geladeira, visando possibilitar melhor entendimento dos efeitos termodinâmicos e garantir confiabilidade do equipamento ao usuário final. Além disso, tal pesquisa busca fornecer ao usuário final garantia de temperaturas estáveis, visto que o uso de controles ON-OFF tem se mostrado inadequados nesse quesito. Logo, para cumprir tais observações, é feito um protótipo de uma caixa de resfriamento termoelétrico, que usa célula peltier e conjuntos dissipadores-coolers para ambos os lados da célula. Também é feito o uso de um circuito eletrônico com elementos como MOSFET, ligado a uma placa microcontroladora Arduino. Essa placa é responsável por receber e executar uma programação de simples compreensão que fez executar o controle da temperatura interna da caixa, utilizando o MOSFET e sinal PWM. Nessa programação, é possível alterar o setpoint da temperatura que o usuário deseja e verificar para o caso os parâmetros do controle PID. Vale ressaltar que esse tipo de controle é responsável por não executar bruscas inserções de tensão à célula peltier, fornecendo o necessário para manter a temperatura. Espera-se, portanto, que a temperatura do ambiente refrigerado esteja sempre controlada e monitorada graficamente, analisando a dinâmica de bombeamento de calor e comportamento das características termoelétricas. Sendo assim, espera-se também que esse protótipo seja uma boa comparação a um equipamento, gerando grande impacto no mundo da termoeletricidade, possibilitando também ao usuário o uso da portabilidade.

**Palavras-chaves:** Célula Peltier, Termoeletricidade, Semicondutores, Refrigeração, Bombeamento de Calor.

## ABSTRACT

The search for new materials, especially semiconductors, has enabled the emergence of thermoelectric modules or thermoelectric cooler. Currently, its application is observed in commercial wine cellars, drinking fountains, mini refrigerators, etc. Because of this, and knowing that such applications are being widespread nowadays, the consumers of such commercial products have been longing for a reliable temperature control. Therefore, this research aims to develop a PID (Proportional-Integrative-Derivative) temperature control applied to the cooling of a mini refrigerator prototype, aiming to provide a better understanding of the thermodynamic effects and to ensure equipment reliability to the end user. Furthermore, this research seeks to provide the end user with a guarantee of stable temperatures, since the use of ON-OFF controls has proven inadequate in this regard. Therefore, to fulfill such observations, a prototype of a thermoelectric cooling box is made, which uses a thermoelectric cooler. Also an electronic circuit with elements like MOSFET, connected to an Arduino microcontroller board, is used. This board is responsible for receiving and executing a simple-to-understand programming that made the control of the internal temperature of the box, using the MOSFET and PWM signal. In this programming, it is possible to change the setpoint of the temperature that the user wants and check for the case the PID control parameters. It is worth pointing out that this type of control is responsible for not performing abrupt voltage insertions to the thermoelectric cooler, providing what is necessary to maintain the temperature. It is expected, therefore, that the temperature of the refrigerated environment is always graphically controlled and monitored, analyzing the dynamics of heat pumping and the behavior of the thermoelectric characteristics. Therefore, it is also expected that this prototype is a good comparison to an equipment, generating great impact in the world of thermoelectricity, also allowing the user to use portability.

**Key-words:** Thermoelectric Cooler, Thermoelectricity, Semiconductors, Refrigeration, Heat Pumping.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito Seebeck . . . . .	15
Figura 2 – Célula Peltier . . . . .	16
Figura 3 – $Bi_2Te_3$ na célula peltier . . . . .	17
Figura 4 – Dinâmica da junção P-N . . . . .	17
Figura 5 – Volume de Controle 1 – Seção da Célula Peltier – Lado Quente . . .	19
Figura 6 – Volume de Controle 2 – Seção da Célula Peltier – Lado Frio . . . . .	20
Figura 7 – Aplicações da célula peltier . . . . .	21
Figura 8 – Controle ON-OFF . . . . .	22
Figura 9 – Diagrama de Bloco para Controle PID . . . . .	24
Figura 10 – Protótipo de Ar Condicionado Termoelétrico . . . . .	27
Figura 11 – Isolamento Térmico . . . . .	30
Figura 12 – Conjunto Termoelétrico . . . . .	31
Figura 13 – Fonte de Corrente Contínua Yaxun PS-305D . . . . .	31
Figura 14 – Célula Peltier TEC1-12708 . . . . .	32
Figura 15 – Dissipadores com junta de isopor . . . . .	32
Figura 16 – Ventilador - Lado Externo . . . . .	33
Figura 17 – Fonte Externa . . . . .	33
Figura 18 – Caixa Protótipo . . . . .	34
Figura 19 – Sensor de Temperatura DS18B20 . . . . .	35
Figura 20 – Placa Arduino . . . . .	35
Figura 21 – Forno Calibrador de Termopar . . . . .	37
Figura 22 – Área de Inserção de Objetos no ISIS e VSM PROTEUS . . . . .	38
Figura 23 – Área de Inserção de Objetos no ISIS e VSM PROTEUS . . . . .	39
Figura 24 – Componentes do Proteus utilizados para confecção da placa protótipo	40
Figura 25 – MOSFET (construção) . . . . .	40
Figura 26 – Optacoplador (Simbologia) . . . . .	41
Figura 27 – Optoacoplador PC817 . . . . .	41
Figura 28 – Circuito no Protoboard . . . . .	42
Figura 29 – Volume de Controle – Caixa Protótipo . . . . .	43
Figura 30 – Circuito Representativo . . . . .	44
Figura 31 – Curva de Resfriamento 1 sem controle de temperatura . . . . .	46
Figura 32 – Representação da Caixa Protótipo com Dimensões . . . . .	47
Figura 33 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{extmin}$ e $h_{intmin}$ . . . . .	51
Figura 34 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{extmax}$ e $h_{intmin}$ . . . . .	51
Figura 35 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{extmin}$ e $h_{intmax}$ . . . . .	51
Figura 36 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{extmax}$ e $h_{intmax}$ . . . . .	52
Figura 37 – Gráfico de $Q_{entra}$ com combinação de coeficientes convectivos . . .	52

Figura 38 – Gráfico de $Q_{rem}$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	53
Figura 39 – Gráfico de $COP$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	53
Figura 40 – Curva de Resfriamento 2 sem controle de temperatura . . . . .	54
Figura 41 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	55
Figura 42 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	55
Figura 43 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	55
Figura 44 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	56
Figura 45 – Gráfico de $Q_C$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	56
Figura 46 – Gráfico de $Q_H$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	57
Figura 47 – Gráfico de $COP$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	57
Figura 48 – Curva de Resfriamento 1 com controle de temperatura . . . . .	59
Figura 49 – Dinâmica da tensão no controle de temperatura do estudo de caso 1 . . . . .	60
Figura 50 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	61
Figura 51 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	61
Figura 52 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	62
Figura 53 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	62
Figura 54 – Gráfico de $Q_{entra}$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	63
Figura 55 – Gráfico de $Q_{rem}$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	63
Figura 56 – Curva de Resfriamento 2 com controle de temperatura . . . . .	64
Figura 57 – Dinâmica da tensão no controle de temperatura do estudo de caso 2 . . . . .	65
Figura 58 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	66
Figura 59 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	66
Figura 60 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	67
Figura 61 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	67
Figura 62 – Gráfico de $Q_C$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	68
Figura 63 – Gráfico de $Q_H$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	68
Figura 64 – Curva de Resfriamento 3 com controle de temperatura . . . . .	69
Figura 65 – Dinâmica da tensão no controle de temperatura do estudo de caso 3 . . . . .	70
Figura 66 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	71
Figura 67 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{min}}$ . . . . .	72
Figura 68 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{min}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	72
Figura 69 – Gráfico de $Q_{entra}$ x $Q_{rem}$ usando $h_{ext_{max}}$ e $h_{int_{max}}$ . . . . .	72
Figura 70 – Gráfico de $Q_{entra}$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	73
Figura 71 – Gráfico de $Q_{rem}$ com combinação de coeficientes convectivos . . . . .	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Termoelétricas do Telureto de Bismuto ( $Bi_2Te_3$ ) . . .	18
Tabela 2 – Calibração do Sensor DS18B20 . . . . .	37
Tabela 3 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 1 Sem Controle . . . . .	46
Tabela 4 – Dados Numéricos acerca da Caixa Protótipo . . . . .	48
Tabela 5 – Coeficientes de Convecção . . . . .	48
Tabela 6 – Coeficientes de Convecção . . . . .	49
Tabela 7 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 2 Sem Controle . . . . .	54
Tabela 8 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 1 Com Controle . . . . .	59
Tabela 9 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 2 Com Controle . . . . .	65
Tabela 10 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 3 Com Controle . . . . .	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARES	Advanced Routing and Editing Software
COP	Coeficiente de Performance
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
EVA	Etileno Acetato de Vinila
GND	Ground
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFAC	International Federation of Automatic Control
IHM	Interface Homem-Máquina
ISIS	Intelligent Schematic Input System
LED	Light-emitting Diode
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
NTC	Negative Temperature Coefficient
PCI	Placas de Circuito Impresso
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis
TEC	Thermoelectric Cooler
UnB	Universidade de Brasília
Unicamp	Universidade de Campinas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
VSM	Virtual System Modeling

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Coeficiente de Seebeck	$V/K$
$\pi$	Coeficiente de Peltier	
$\Delta t$	Diferença de tempo	$s$
$\Delta T$	Diferença de Temperatura	$K$
$\Delta V$	Potencial Elétrico	$V$
$\rho$	Densidade Genérica	$kg/m^3$
$\rho_{Ar}$	Densidade do Ar	$kg/m^3$
$A$	Área de Troca Térmica Genérica	$m^2$
$A_1$	Área de Troca Térmica da Face 1 da Caixa	$m^2$
$A_2$	Área de Troca Térmica da Face 2 da Caixa	$m^2$
$A_3$	Área de Troca Térmica da Face 3 da Caixa Contemplando o Rasgo do Conjunto Dissipadores	$m^2$
$A_4$	Área de Troca Térmica da Face 4 da Caixa	$m^2$
$A_{ParedesTeto}$	Área de Troca Térmica Resultante do Somatório das Superfícies de Parede e Teto da Caixa	$m^2$
$A_{Piso}$	Área de Troca Térmica do Piso da Caixa	$m^2$
$Bi_2Te_3$	Telureto de Bismuto	
$cp_{ar}$	Calor Especifico do Ar	$J/kgK$
$dA$	Diferencial de Área	
$dt$	Diferencial de Tempo	
$dVol$	Diferencial de Volume	
$e$	Energia Específica	
$e(s)$	Função - Entrada do Sistema	
$E_{acum}$	Energia Acumulada	$J$
$E_{entra}$	Energia que Entra	$W$

$E_g$	Energia Gerada	$W$
$E_{sai}$	Energia que Sai	$W$
$G(s)$	Função Transferência	
$h_{ext}$	Coeficiente Convectivo Externo a Caixa	$W/m^2K$
$h_{ext_{max}}$	Coeficiente Convectivo Externo a Caixa Máximo	$W/m^2K$
$h_{ext_{min}}$	Coeficiente Convectivo Externo a Caixa Mínimo	$W/m^2K$
$h_{int}$	Coeficiente Convectivo Interno a Caixa	$W/m^2K$
$h_{int_{max}}$	Coeficiente Convectivo InExterno a Caixa Máximo	$W/m^2K$
$h_{int_{min}}$	Coeficiente Convectivo Interno a Caixa Mínimo	$W/m^2K$
$I$	Corrente Elétrica	$A$
$k$	Condutividade Térmica Genérica	$W/mK$
$k_{Al}$	Condutividade Térmica do Alumínio	$W/mK$
$k_{EVA}$	Condutividade Térmica do EVA	$W/mK$
$k_{Isopor}$	Condutividade Térmica do Isopor	$W/mK$
$k_{Mad}$	Condutividade Térmica da Madeira	$W/mK$
$K_D$	Ganho Derivativo	
$K_I$	Ganho Integral	
$K_P$	Ganho Proporcional	
$L$	Espessura Genérica	$m$
$L_{Al}$	Espessura do Alumínio	$m$
$L_{EVA}$	Espessura do EVA	$m$
$L_{Isopor}$	Espessura do Isopor	$m$
$L_{Mad}$	Espessura da Madeira	$m$
$m_{Ar}$	Massa de Ar	$kg$
$P_{EL}$	Potência Elétrica	$W$
$Q_C$	Calor Absorvido pela célula peltier	$W$

$Q_{Cond}$	Calor de Condução	W
$Q_{entra}$	Calor que entra na caixa protótipo	W
$Q_H$	Calor Rejeitado pela célula peltier	W
$Q_J$	Calor devido ao Efeito Joule	W
$Q_{ParedesTeto}$	Calor que Entra pelas Paredes e Teto da Caixa	W
$Q_{PC}$	Calor da Face Fria da Célula Peltier	W
$Q_{PH}$	Calor da Face Quente da Célula Peltier	W
$Q_{Piso}$	Calor que Entra pelo Piso da Caixa	W
$Q_{rem}$	Calor removido da caixa protótipo	W
$r$	Resistência Elétrica Genérica	$\Omega$
$R_{Al}$	Resistência Térmica de Condução do Alumínio	K/W
$R_{AlParedesTeto}$	Resistência Térmica de Condução do Alumínio contemplando apenas $A_{ParedesTeto}$	K/W
$R_{AlPiso}$	Resistência Térmica de Condução do Alumínio contemplando apenas $A_{Piso}$	K/W
$R_{ConvExt}$	Resistência Térmica de Convecção Externa	K/W
$R_{convextmax}$	Resistência Térmica de Convecção Externa Máxima	K/W
$R_{convextmin}$	Resistência Térmica de Convecção Externa Mínima	K/W
$R_{ConvInt}$	Resistência Térmica de Convecção Interna	K/W
$R_{convintmax}$	Resistência Térmica de Convecção Interna Máxima	K/W
$R_{convintmin}$	Resistência Térmica de Convecção Interna Mínima	K/W
$R_{EVA}$	Resistência Térmica de Condução do EVA	K/W
$R_{EVA_{ParedesTeto}}$	Resistência Térmica de Condução do EVA contemplando apenas $A_{ParedesTeto}$	K/W
$R_{EVA_{Piso}}$	Resistência Térmica de Condução do EVA contemplando apenas $A_{Piso}$	K/W
$R_{Isopor}$	Resistência Térmica de Condução do Isopor	K/W

$R_{IsoporParedesTeto}$	Resistência Térmica de Condução do Isopor contemplando apenas $A_{ParedesTeto}$	$K/W$
$R_{IsoporPiso}$	Resistência Térmica de Condução do Isopor contemplando apenas $A_{Piso}$	$K/W$
$R_{MadPiso}$	Resistência Térmica de Condução da Madeira	$K/W$
$SC$	Superfície de Controle	
$t_{anterior}$	Tempo da Medição Anterior	$s$
$t_{atual}$	Tempo da Medição Atual	$s$
$t_D$	Tempo Derivativo	$s$
$t_I$	Tempo Integral	$s$
$t_{setpoint_1}$	Tempo de duração do experimento do estudo de caso 3 com controle para o primeiro setpoint	$s$
$t_{setpoint_2}$	Tempo de duração do experimento do estudo de caso 3 com controle para o segundo setpoint	$s$
$t_{total}$	Tempo de duração dos experimentos dos estudos de caso	$s$
$T_{amb}$	Temperatura Ambiente Externo a Caixa	$K$
$T_{anterior}$	Temperatura da Medição Anterior	$K$
$T_{atual}$	Temperatura da Medição Atual	$K$
$T_C$	Temperatura Face Fria da Célula Peltier	$K$
$T_{estab}$	Temperatura Interna de Estabilização da Caixa	$K$
$T_{estab_{min}}$	Temperatura Interna de Estabilização Mínima da Caixa	$K$
$T_{estab1_{min}}$	Temperatura Interna de Estabilização Mínima da Caixa em relação ao $T_{setpoint_1}$	$K$
$T_{estab2_{min}}$	Temperatura Interna de Estabilização Mínima da Caixa em relação ao $T_{setpoint_2}$	$K$
$T_{estab_{max}}$	Temperatura Interna de Estabilização Máxima da Caixa	$K$
$T_{estab1_{max}}$	Temperatura Interna de Estabilização Máxima da Caixa em relação ao $T_{setpoint_1}$	$K$

$T_{estab2max}$	Temperatura Interna de Estabilização Máxima da Caixa em relação ao $T_{setpoint2}$	$K$
$T_H$	Temperatura Face Quente da Célula Peltier	$K$
$T_{int}$	Temperatura Interna da Caixa	$K$
$T_{inicial}$	Temperatura Interna Inicial da Caixa	$K$
$T_{setpoint}$	Temperatura de setpoint	$K$
$T_{setpoint1}$	Temperatura do primeiro setpoint do experimento do estudo de caso 3 com controle	$K$
$T_{setpoint2}$	Temperatura do segundo setpoint do experimento do estudo de caso 3 com controle	$K$
$u(s)$	Função - Entrada do Sistema	
$v$	Velocidade	$m/s$
$V$	Tensão Genérica	$V$
$V_{fonte}$	Tensão da Fonte	$V$
$V_{Peltier}$	Tensão Peltier	$V$
$Vol_{Ar}$	Volume de Ar	$m^3$
$VolC$	Volume de Controle	$m^3$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos	13
1.2	Organização do presente trabalho	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1	Refrigeração Termoelétrica	15
2.2	Controle de Temperatura para Refrigeração Termoelétrica	21
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>30</b>
4.1	Construção do Protótipo	30
4.2	Estudos de Caso Experimentais sem Controle de Temperatura	34
4.3	Estudos de Caso Experimentais com Controle de Temperatura	36
4.3.1	<i>Programação</i>	36
4.3.2	<i>Desenvolvimento de Placa Protótipo</i>	38
4.4	Análise Numérica do Sistema Termoelétrico do Protótipo	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>45</b>
5.1	Estudos de Caso sem uso de mecanismos de controle	45
5.1.1	<i>Estudo de Caso 1 – Sem Controle</i>	45
5.1.2	<i>Estudo de Caso 2 – Sem Controle</i>	53
5.2	Estudos de Caso utilizando o mecanismo de controle PID	58
5.2.1	<i>Estudo de Caso 1 – Com Controle</i>	58
5.2.2	<i>Estudo de Caso 2 – Com Controle</i>	63
5.2.3	<i>Estudo de Caso 3 – Com Controle</i>	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a pré-história, o homem busca formas de conservar seus alimentos e produtos perecíveis, com objetivo de mantê-los disponíveis por um maior tempo. Para isso, uma das principais técnicas utilizadas é a refrigeração, que procura realizar o condicionamento de tais produtos a temperaturas menores que a ambiente. (MATOS, 2010)

Com o passar dos anos, a refrigeração sofreu mudanças em todo o mundo, trazendo à realidade diferentes métodos adequados às mais variadas aplicações. Dentre esses métodos, é possível destacar a refrigeração por compressão e a refrigeração termoelétrica. Portanto, mediante essas possibilidades, Matos (2010) descreve que a refrigeração se tornou um dos maiores e mais importantes avanços tecnológicos descobertos pelo homem, sendo possível afirmar que o ser humano possui enorme dependência desse processo. Segundo dados do IBGE, em 2015, cerca de 97,83% das residências brasileiras possuem pelo menos um refrigerador. Sendo assim, é possível compreender que esse processo tem sido amplamente utilizado.

Em virtude desse dado, é possível destacar a popular utilização da refrigeração por compressão, presente na maioria dos refrigeradores domésticos do mercado. Esse tipo de refrigeração, apesar de possuir alto coeficiente de performance (COP), apresentam robustez e elevado peso por conter alguns equipamentos, grandes volumes e um alto consumo de energia elétrica. (MIRMAMANTO et al, 2018)

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos e sua larga utilização, os sistemas de refrigeração por compressão ainda são desvantajosos quando se quer refrigerar pequenas quantidades de produtos e componentes eletrônicos. Para suprir essa necessidade, uma alternativa é a utilização da refrigeração termoelétrica. Essa refrigeração tem por base o efeito peltier. Tal efeito data do século XIX, porém sua utilização para refrigeração começou a ser amplamente difundida a partir dos anos 1940, quando novos materiais semicondutores foram desenvolvidos. Isso possibilitou a criação das pastilhas ou células peltier, que são dispositivos sólidos que funcionam por meio de baixas tensões e correntes, compactos e que não possuem vibrações durante seu funcionamento. Apesar desse fato, elas apresentam valores baixos para o COP por dissipar pouco calor por unidade de tempo. Atualmente, é possível encontrar essa célula atrelada a diversos equipamentos como adegas comerciais, mini geladeiras, bebedouros, calibradores de temperatura e resfriadores de laser. (DANVIC, 2022)

Com os avanços tecnológicos na área, sua ampla utilização e a exigência cada vez maior do ser humano por equipamentos mais tecnológicos e sofisticados, se fez necessário realizar mecanismos de controle de temperatura. Apesar de sua importância e vasta aplicação, ainda são ferramentas em constante estudo. Isto posto, é sabido que as indústrias sempre ansiaram pela modernização e aperfeiçoamento de seus sistemas de controle. E os equipamentos com refrigeração termoelétrica não tem ficado para trás, cada dia mais o controle de temperatura está sendo sofisticado a fim de proporcionar maior confiabilidade na refrigeração, conforto e aumento na durabilidade do equipamento.

Entretanto, o controle apresentado na maioria desses equipamentos é o controle ON-OFF, que, apesar de barato, é bastante impreciso por apresentar muitas variações, o que não o torna desejável (CAMARGO, 2012). Portanto, neste trabalho é proposto modernizar o controle da refrigeração termoelétrica e verificar seus impactos termodinâmicos. Para tanto será realizado um controle proporcional-integral-derivativo (PID) que, segundo Camargo (2012), apresenta oscilações mais ajustadas e maior precisão de resultados.

Portanto, espera-se que o controle PID possa fornecer ao usuário informações mais precisas e de forma instantânea acerca da temperatura do ambiente refrigerado e que a refrigeração se torne mais eficiente com maior durabilidade da célula.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é analisar o desempenho termodinâmico de um protótipo de refrigeração termoelétrica com um sistema de controle PID.

### *Objetivos específicos*

Como objetivos específicos, pode-se citar:

- Construir um protótipo de uma mini geladeira termoelétrica para acompanhar a temperatura no ambiente refrigerado com e sem a presença de mecanismos de controle;
- Gerar dados experimentais através do uso de uma célula peltier no protótipo sem a presença de mecanismos de controle e levantar curvas de resfriamento;
- Modelar experimentalmente um controle PID de temperatura por meio da placa microcontroladora Arduino e aplicá-lo ao protótipo utilizando sinal PWM (*Pulse Width Modulation*);

- Gerar dados experimentais através de uma célula peltier no protótipo com a presença do controle PID e levantar curvas de resfriamento;
- Avaliar a influência termodinâmica do controle PID de temperatura com cálculos dos calores envolvidos, utilizando as curvas de resfriamento obtidas.

## 1.2 Organização do presente trabalho

Além deste capítulo introdutório, esta monografia é composta por mais 5 (cinco) capítulos, descritos a seguir.

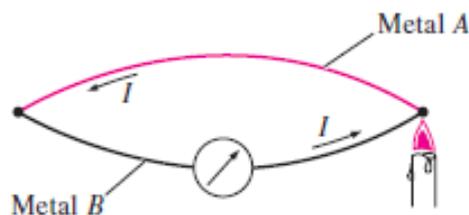
- No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica a respeito do surgimento da termoeletricidade e seus efeitos Peltier e Seebeck, a relação desses efeitos na refrigeração, além dos mecanismos de controle de temperatura, sobretudo o PID, e a placa microcontroladora Arduino;
- No Capítulo 3 é apresentada uma revisão da literatura com relação ao controle PID de temperatura aplicado à refrigeração termoelétrica, sua forma de análise (qualitativa e quantitativa) e sobre as aplicações mais estudadas;
- O Capítulo 4 exhibe a metodologia adotada para a execução deste trabalho;
- No Capítulo 5 são exibidos os resultados obtidos com a abordagem tratadas no Capítulo 4;
- No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões extraídas do presente trabalho e apontadas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Refrigeração Termoelétrica

Nos últimos anos, a tecnologia tem dados largos passos, atingindo uma grande massa da população mundial. Nesse contexto, as questões relacionadas aos impactos energéticos e ambientais só tem crescido. Nessas circunstâncias, uma das ferramentas tecnológicas que se apresenta nesse âmbito e que tem sido bastante difundida é a termoeletricidade. Seu surgimento data do século XIX, quando o físico Thomas Johann Seebeck observou em um dos seus experimentos que, ao utilizar uma junção de dois materiais condutores diferentes havendo uma diferença de temperatura entre eles, conseguia produzir um potencial elétrico. Tal efeito leva seu nome e está ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Efeito Seebeck



Fonte: CARDIM, 2018

Esse potencial é gerado através de um movimento de elétrons para a região que possui menor nível energético, concentrando íons na região contrária. (IZIDORO, 2015). Sendo assim, o Efeito Seebeck relaciona esse potencial elétrico gerado ( $\Delta V$ ) de forma diretamente proporcional à diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) conforme mostrado na equação 2.1 abaixo, evidenciando o chamado coeficiente de Seebeck ( $\alpha$ ), dado em V/K.

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Alguns anos depois, Jean Charles Athanase Peltier descobriu o efeito que é objeto de estudo dessa pesquisa: o Efeito Peltier. Tal efeito demonstra que ao fazer passar uma corrente sobre uma junção de dois materiais condutores diferentes, existe um calor que é bombeado fazendo com que haja uma diferença de temperatura. Porém, os estudos de Peltier não conseguiram se relacionar com os estudos de Seebeck de forma imediata. Somente quatro anos depois, Lenz conseguiu relacionar os dois efeitos, concluindo que o bombeamento de calor depende do sentido da corrente. Assim, quanto maior o fluxo de corrente ( $I$ ) fornecido, maior o calor bombeado ( $Q$ ) e,

consequentemente, maior será essa diferença de temperatura ( $\Delta T$ ), evidenciando o coeficiente de peltier ( $\pi$ ), conforme mostrado na equação 2.2. (IZIDORO, 2015)

$$Q = \pi \times I \quad (2.2)$$

Contudo, apesar dessas descobertas proporcionarem um enorme avanço científico, sua aplicabilidade ainda era bastante deficitária. Foi só no século XX, com o advento das novas tecnologias aliadas ao desenvolvimento dos materiais semicondutores, que foi proporcionada a utilização do Telureto de Bismuto ( $Bi_2Te_3$ ) aliado ao substrato de cerâmica para a criação da chamada pastilha ou célula peltier ou ainda módulo termoelétrico (TEC), mostrada na figura 2.

Figura 2 – Célula Peltier

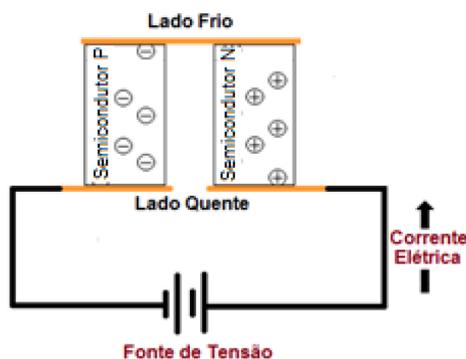


Fonte: MAESTRELLI, 2007

Segundo Alves (2007), essa célula é dotada do telureto de bismuto dos tipos N e P intercalados e posicionados entre duas finas placas cerâmicas, que fornece rigidez e isolamento elétrico. Com a inserção de uma corrente elétrica, o  $Bi_2Te_3$  do tipo N fica com excesso de elétrons, ao passo que o do tipo P fica com carência de elétrons, conforme figura 3.

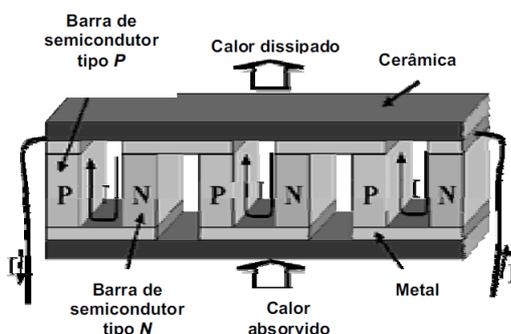
Sendo assim, a denominada junção P-N dinamizam a movimentação eletrônica, fazendo o efeito peltier funcionar. Portanto, os elétrons se movem eletricamente do telureto de bismuto tipo N para o tipo P, absorvendo calor do ambiente pelo lado frio. Em seguida, os elétrons continuam fluindo, indo do  $Bi_2Te_3$  tipo P para o tipo N, rejeitando calor para o ambiente através do lado quente. (ALVES, 2007)

Logo, essas interações acontecem de forma constante, possibilitando a validade do efeito peltier por meio de um bombeamento de calor, conforme visto na figura 4.

Figura 3 –  $Bi_2Te_3$  na célula peltier

Fonte: IZIDORO, 2015

Figura 4 – Dinâmica da junção P-N



Fonte: ALVES, 2007

Então, sabendo como atua o semicondutor supracitado, apresenta-se a tabela 1 abaixo que demonstra as suas propriedades termoelétricas a fim de auxiliar na compreensão da célula peltier – objeto de estudo dessa pesquisa. Dessa forma, propriedades como densidade, calor específico, condutividade térmica e elétrica, entre outras são essenciais para a ampliar o entendimento acerca da referida célula.

Com isso, para seleção da célula peltier mais adequada à aplicação requerida, se faz necessário o levantamento de alguns questionamentos termoelétricos em relação a utilização das células peltier: qual a quantidade de calor que é preciso bombear a fim de refrigerar um sistema térmico? Quais temperaturas conseguem atingir? Quanto tempo leva para atingir uma temperatura de estabilização? A temperatura ambiente exerce influência sobre nosso sistema térmico? Qual a tensão máxima e corrente máxima suportada pela célula? Sem essas informações torna-se praticamente impossível a modelagem proposta a determinada necessidade.

Portanto, um dos primeiros passos para encontrar tais respostas é compreender os

Tabela 1 – Propriedades Termoelétricas do Telureto de Bismuto ( $Bi_2Te_3$ )

Propriedades	Valor
Densidade ( $\frac{kg}{m^3}$ )	7530
Calor Específico ( $J/KgK$ )	544
Coefficiente de Expansão Térmica ( $^{\circ}C^{-1}$ )	$13 \times 10^4$
Condutividade Térmica $k$ ( $\frac{W}{mK}$ )	1,8
Condutividade Elétrica $\Sigma$ ( $\frac{1}{\Omega m}$ )	$2,11 \times 10^4$
Coefficiente de Seebeck $\alpha$ ( $\frac{V}{K}$ )	$190 \times 10^{-6}$

Fonte: ALVES, 2007 (Modificado)

calores associados ao módulo termoelétrico. O primeiro calor a ser conhecido é àquele devido à condução ( $Q_{Cond}$ ). Este é observado devido ao gradiente de temperatura entre as duas faces da célula, conforme a equação 2.3, onde  $k$  é o coeficiente de condutividade térmica ( $W/mK$ ),  $A$  é a área de troca térmica, da espessura  $L$  da superfície de troca térmica e  $T_H$  e  $T_C$  são, respectivamente, as temperaturas das faces quente e fria da célula.

$$Q_{Cond} = \frac{k \times A \times (T_H - T_C)}{L} \quad (2.3)$$

Também, devido às variáveis elétricas participantes, um calor aparece devido ao efeito Joule ( $Q_J$ ) correspondente a cada face da célula. Este depende diretamente da resistência elétrica ( $r$ ) e da corrente elétrica inserida à célula ( $I$ ), conforme equação 2.4.

$$Q_J = \frac{r \times I^2}{2} \quad (2.4)$$

Sendo assim, de igual modo, se faz importante o conhecimento do calor em relação às faces quente e fria da célula ( $Q_{PH}$  e  $Q_{PC}$ , respectivamente), que dependem do coeficiente de Seebeck ( $\alpha$ ), da corrente elétrica inserida à célula ( $I$ ) e das temperaturas da face quente e fria ( $T_H$  e  $T_C$ , respectivamente), como mostrado nas equações 2.5 e 2.6 abaixo. Tais calores são originados a partir do efeito peltier gerado através da tensão  $V$  aplicada à célula.

$$Q_{PH} = \alpha \times I \times T_H \quad (2.5)$$

$$Q_{PC} = \alpha \times I \times T_C \quad (2.6)$$

Por conseguinte, é importante enfatizar a existência de uma potência elétrica ( $P_{EL}$ ) vinculada à pastilha peltier, que nada mais é do que o produto da tensão ( $V$ ) com a corrente ( $I$ ) aplicadas, de acordo com a equação 2.7.

$$P_{EL} = V \times I \quad (2.7)$$

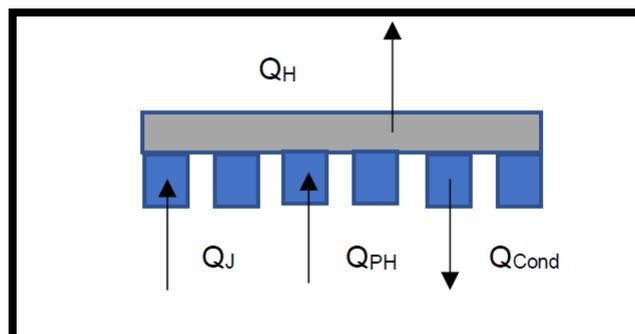
Além disso, é importante o entendimento dos calores absorvido ( $Q_C$ ) e rejeitado ( $Q_H$ ) pela célula, pois são eles que nos mostram o quanto é retirado do ambiente do lado frio para o ambiente do lado quente, no caso da refrigeração, e vice-versa para o caso da bomba de calor. Sendo assim, segundo Moran et al. (2013), é necessário realizar um balanço de energia seguindo os princípios do volume de controle para regime permanente, conforme equação 2.9, a partir do Teorema do Transporte de Reynolds para energia, visualizado na equação 2.8, onde  $dE/dt$  é a variação de energia o sistema,  $\rho$  é densidade,  $v$  é a velocidade,  $dA$  o diferencial de área,  $dVol$  o diferencial de volume,  $e$  equivale a energia específica,  $VolC$  o volume de controle e  $SC$  a superfície de controle.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\delta}{\delta t} \int_{VolC} e \cdot \rho \cdot dVol + \int_{SC} e \cdot \rho \cdot v \cdot dA \quad (2.8)$$

$$\Sigma E_{entra} = \Sigma E_{sai} \quad (2.9)$$

Logo, esse balanço de energia pode ser realizado através de uma seção feita no módulo termoeletrico no regime permanente, de acordo com as figuras 5 e 6, a fim de avaliar a influências das equações termoeletricas. Vejamos:

Figura 5 – Volume de Controle 1 – Seção da Célula Peltier – Lado Quente

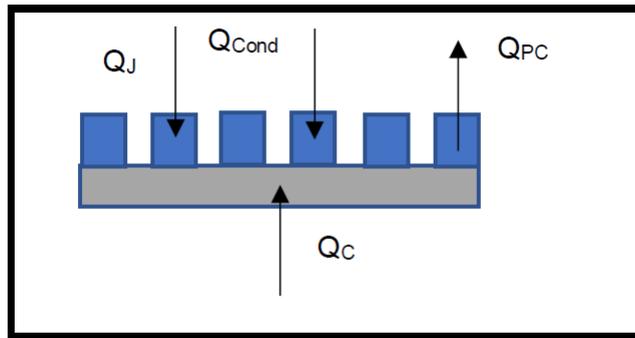


Fonte: própria, 2022

Aplicando o balanço de energia da equação 2.9 para o volume de controle 1, é possível demonstrar na equação 2.10 o calor rejeitado ( $Q_H$ ) pela célula.

$$Q_H = Q_J + Q_{PH} - Q_{Cond} \quad (2.10)$$

Figura 6 – Volume de Controle 2 – Seção da Célula Peltier – Lado Frio



Fonte: própria, 2022

Para o volume de controle 2, tratando de forma análoga ao volume de controle 1, é possível apresentar o calor absorvido ( $Q_C$ ) pela célula, conforme mostrado na equação 2.11.

$$Q_C = Q_{PC} - Q_{Cond} - Q_J \quad (2.11)$$

Sendo assim, é possível realizar um projeto de refrigeração termoelétrica adequado, podendo selecionar dissipadores e ventiladores adequados, além de selecionar a tensão adequada a ser aplicada à célula. Para esta última é preciso calculá-la para que haja a realização de um bombeamento de calor eficiente conforme projetado pelas equações acima e para que se prolongue a vida útil desse equipamento. Portanto, tomando o volume de controle para a célula como um todo, conforme equação 2.12, chega-se a fórmula adequada para a tensão da célula peltier, mostrada na equação 2.13.

$$P_{EL} - Q_H + Q_C = 0 \quad (2.12)$$

$$V = r \times I + \alpha \times (T_H - T_C) \quad (2.13)$$

Portanto, ao visualizar a equação da tensão é possível confirmar sua característica termoelétrica, visto que esta depende de parâmetros térmicos e elétricos. Além disso, é possível encontrar o coeficiente de performance da célula, como mostrado na equação 2.14.

$$COP = \frac{Q_C}{P_{EL}} \quad (2.14)$$

Todavia, algumas aplicações puderam surgir no mercado e expandir o conceito da termoelectricidade, sobretudo do efeito peltier. Hoje, é possível observar a aplicação desse efeito através dos módulos termoelétricos em diversos seguimentos dos setores industriais e comerciais, em que se destacam desumidificadores, mini refrigeradores, bebedouros, adegas, assentos refrigerados, calibradores de termopares e resfriadores de máquinas a laser. Alguns desses equipamentos podem ser visualizados na figura 7 abaixo.

Figura 7 – Aplicações da célula peltier



Fonte: DANVIC, 2022

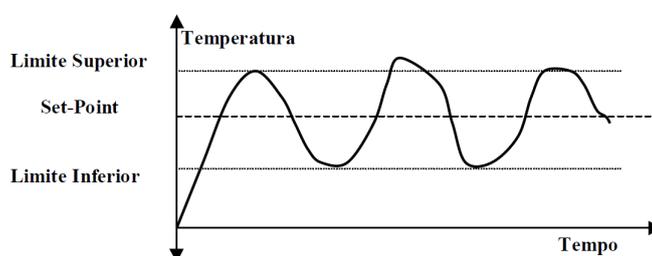
## 2.2 Controle de Temperatura para Refrigeração Termoelétrica

Segundo Cardim (2018), a refrigeração é definida como a ação de diminuir a temperatura de um ambiente de forma controlada. Logo, é possível notar que nos mais variados equipamentos de refrigeração esse controle precisa existir. Ou seja, há formas de monitorar e manter a temperatura do ambiente refrigerado de forma estável, conforme indicação do usuário, através dos sistemas de controle. Com a refrigeração termoelétrica não é diferente. Todos os equipamentos termoelétricos citados no item anterior necessitam desses sistemas para proporcionar maior confiabilidade e conforto aos usuários finais, além de maior precisão e detalhamento do comportamento para os projetistas.

Conceitualmente, um determinado sistema de controle consiste em subsistemas e processos desenvolvidos para obtenção de uma saída com comportamento desejado através de um dado de entrada (NISE, 2013). Portanto, a temperatura do ambiente refrigerado configura-se como um dado de entrada e a tensão da célula como um dado saída do sistema. Logo, um controle de temperatura termoelétrico consiste em controlar a tensão fornecida à célula a fim de obter temperaturas específicas. Nesse contexto, um dos principais e mais utilizados métodos para controlar temperatura é através do sistema de controle ON-OFF, ou também conhecido como controle de histerese. Este é considerado um dos sistemas mais simples de ser executado. Baseia-se num circuito

de comparação, onde o sinal de entrada é comparado com os limites inferior e superior estabelecidos, considerados valores de referência, conforme figura 8.

Figura 8 – Controle ON-OFF



Fonte: CAMARGO, 2012

Assim, para o caso dos sistemas de refrigeração, quando o valor de saída for menor que o limite mínimo especificado no controle, o mecanismo de controle interromperá o fornecimento de tensão. Em contraponto, quando o dado de saída for maior que o valor máximo especificado, o controle fará com que o sistema ative a tensão da célula. Assim, o controle em questão buscará oscilação do valor de saída na faixa pré-determinada. Porém, quando isso não ocorre, é possível variar a diferença entre os limites especificados, fazendo com que o setpoint (dado especificado para saída) fique dentro dos limites. Entretanto, tal ação pode não atender às características de projeto. (CAMARGO, 2012)

Sendo assim, esse tipo de controle não é muito recomendado quando se deseja precisão de resultados, sobretudo de temperatura. Pois, o valor de temperatura determinado não estabiliza, mas apresenta grande oscilação sobre tal valor, auxiliado pela ação da inércia térmica. Logo, é um sistema mais indicado para controle de nível, por exemplo, que não é o objetivo dessa pesquisa. Portanto, apesar de ser um controle barato e de fácil aplicação, não é interessante adotá-lo para um sistema térmico com célula peltier. Desse modo, se faz necessário o uso de outro tipo de sistema de controle. (OGATA, 2010)

Sendo assim, pelo fato de apresentar maior precisão que o ON-OFF e atingir o valor de saída determinado com a possibilidade de pequenos erros, o controle PID se torna o mais adequado para aplicações com módulos termoeletrônicos. Apesar de sua adequação aos sistemas térmicos, segundo NISE (2013), o controle PID se apresenta como uma opção economicamente cara e com difícil ajuste de seus parâmetros, os chamados ganhos ( $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ ), quando comparados ao controle ON-OFF. Ainda assim é considerado um controle convencional, desenvolvendo-se no domínio do tempo e da frequência, satisfazendo grande parte dos sistemas e processos industriais.

Todavia, o controle PID funcional realiza uma combinação dos ganhos em um único bloco de compensação, somando as ações proporcional, integral e derivativa. Com isso, é necessário compreender cada uma dessas ações e qual sua influência no sistema de controle projetado.

Portanto, o controle proporcional é compreendido como uma ação amplificadora, ou seja, a saída desse sistema trabalha com a multiplicação do sinal de erro, aumentando  $K_P$  vezes o valor de entrada. Isto posto, sabemos que o sinal de saída precisa estar entre os limites inferior e superior pré-determinados, da mesma forma que o ON-OFF. Isso acontece para impedir o sistema de crescer indefinidamente. Assim, se a saída atingir os limites, dizemos que o sistema saturou. Logo, na região entre os limites, o sinal de entrada atua proporcionalmente, onde chamamos de banda proporcional. Porém, sua atuação possui limitações. Esse controle produz erros em regime permanente. Portanto, se faz necessário um ajuste do parâmetro  $K_P$  a ponto de diminuir ao máximo esse erro. Haverá um ponto em que o erro será tão pequeno que não conseguirá acionar o atuador do sistema e este ainda pode causar instabilidade ao sistema de controle. Logo, o ajuste do ganho  $K_P$  é um fator fundamental para a realização do controle proporcional. (CAMARGO, 2012)

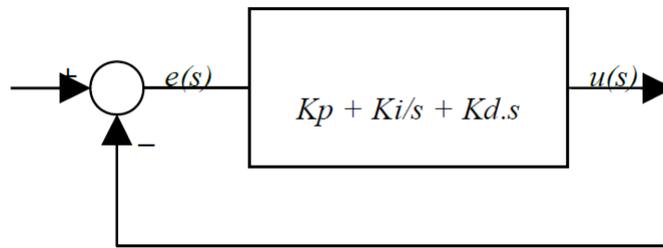
Já o controle integral, segundo Pinheiro (2009), age para eliminar ao máximo o erro em regime permanente, pois o controle proporcional não consegue minimizá-lo tanto. Ou seja, a ação integral tende a aproximar o erro de zero. Sua desvantagem está no aumento excessivo do seu ganho  $K_I$ , pois ao buscar a máxima convergência com o setpoint estabelecido, o sistema torna-se lento às transições e traz mais instabilidade.

No controle derivativo, a sensibilidade a variação de erro é grande. Logo, a ação derivativa age através do seu ganho  $K_D$  para eliminar ou reduzir as oscilações apresentadas no sistema de controle estudado. Porém, essa característica faz com que essa ação seja bastante sensível a ruídos, fazendo este atuar quando não é necessário. (PINHEIRO, 2009)

Logo, quanto mais ajustado, o controle de temperatura possuirá menor erro em regime estacionário, pouco ruído e, conseqüentemente, maior precisão do valor de setpoint pedido pelo usuário do equipamento final. Portanto, a função que associa os parâmetros supracitados através de resposta em frequência é apresentada, segundo Ogata (2010), pela equação 2.15 e figura 9.

$$G(s) = K_P \times \left( 1 + \frac{1}{t_I \times s} + t_D \times s \right) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \times s \quad (2.15)$$

Figura 9 – Diagrama de Bloco para Controle PID



Fonte: PINHEIRO, 2009

Onde  $t_I$  é o tempo integral,  $t_D$  é o tempo derivativo,  $e(s)$  é a entrada e  $u(s)$  a saída do sistema.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 2007, Alves publicou sua dissertação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) com o título “Propriedades físicas do semicondutor  $Bi_2Te_3$ ”. Ele utilizou conceitos físicos do semicondutor estudado aplicados a um módulo termoelétrico, mostrando como acontecem os efeitos termoelétricos do telureto de bismuto no módulo. Para isso, foi realizado um experimento para identificar qual tipo do telureto de bismuto estava sendo analisado, tipo N ou P. Esse experimento consistiu em colocar em contato um terminal do semicondutor com uma sonda quente e outro terminal com uma sonda fria, estas ligadas a um amperímetro. Foi posto o terminal positivo do medidor de corrente na sonda quente e o outro terminal na sonda fria. Assim, se a corrente medida for positiva, o  $Bi_2Te_3$  é tipo N. Caso contrário, será tipo P. Com isso, foi possível realizar os cálculos como o do efeito hall e magnetorresistência da célula, além de compreender quais forma os comportamentos das ligações químicas dos semicondutores. Por fim, realizou experimentos por meio de difração de raio X para amostras do telureto de bismuto de uma célula peltier comercial, verificando a presença de antimônio e selênio na composição do semicondutor e construindo um pequeno refrigerador termoelétrico. Assim, Alves concluiu que foi possível extrair valores de condutividade elétrica para as amostras estudadas, obtendo valores diferentes dos tabelados, permitindo concluir a anisotropia do material. Foram destacadas a presença de antimônio e selênio nos cristais do semicondutor e, também, que sua estrutura cristalina é romboédrica.

Seguindo para o ano de 2012, surgiu uma tese desenvolvida na Universidade de Campinas (Unicamp) por Silva intitulada “Sistema termoelétrico aplicado ao estudo de efeitos e propriedades térmicas”. Neste trabalho foi inicialmente desenvolvido um protótipo de um sistema de congelamento com apenas um módulo termoelétrico para suprir uma carga térmica de 76W. Nesse sistema foi instalado um dissipador de alumínio à célula no seu lado inferior (frio) e no seu lado quente foi realizada convecção forçada por um líquido (gel) com temperatura controlada. Também foi usada uma fonte de potência controlada e termopares tipo T em diferentes pontos da célula e do gel. O objetivo foi estudar as propriedades de congelamento do gel à diferentes temperaturas. Foi concluído que a célula peltier e os termopares funcionaram bem para a aplicação. Junto com o gel, foi conseguido congelar até a temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$ . Assim, foi possível inferir que o gel utilizado é uma ótima alternativa para congelamento com células peltier.

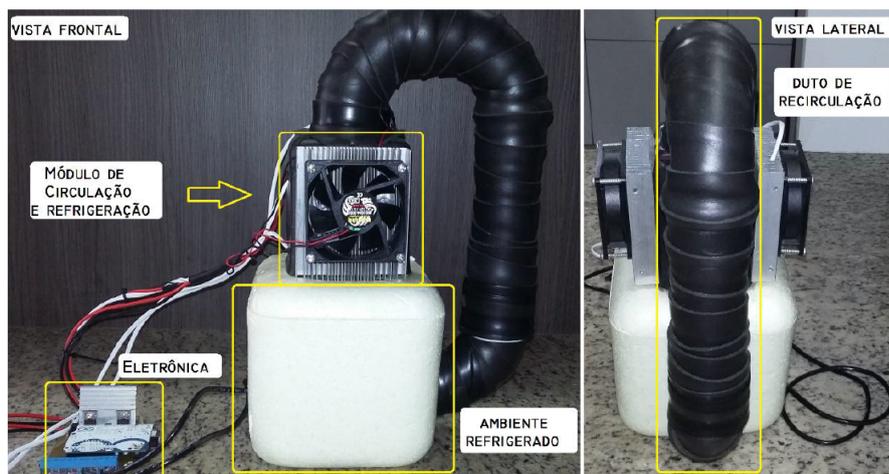
Em 2014, Oliveira defendeu sua dissertação com o título “Avaliação numérica do desempenho termodinâmico de células termoelétricas” pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Foi desenvolvido um modelo matemático através de células peltier

comerciais abordando o efeito peltier, a transmissão de calor nas cavidades por meio de convecção forçada e natural e as condições de contorno vigentes. Com isso, Oliveira abordou o método de solução do modelo elaborado através do método de volumes finitos, simulando para diferentes malhas. Assim, a validação do código computacional de simulação foi realizada diretamente comparando os resultados numéricos com os dados pelo fabricante da célula. Com isso, foram notadas algumas diferenças entre esses dados. Isso se deu porque a simulação computacional considera uma junção entre fluxos de calor e corrente, enquanto o fabricante considera as propriedades termofísicas do telureto de bismuto como funções de segunda ordem (não linear). Assim, ao final de dezoito simulações, a corrente elétrica diferenciou-se com cerca de 8,8%, a capacidade de refrigeração com desvio máximo de 10% e COP de 7,3%. Portanto, fazendo análise de sensibilidade, verificou-se que o modelo computacional se adequa a um modelo experimental.

No ano seguinte ao da dissertação do item anterior, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Maestrelli defendeu sua dissertação intitulada “Desenvolvimento de um sistema de condicionamento de ar em escala reduzida utilizando módulos termoelétricos”. O seu objetivo foi desenvolver um protótipo que permitisse verificar a possibilidade de refrigeração de ambientes por meio de células peltier, conforme figura 10. O primeiro passo foi realizar o levantamento da carga térmica do ambiente refrigerado. Posteriormente, foi instalado coolers e dissipadores de alumínio junto à célula peltier para o lado quente e frio, além do uso de um duto de recirculação de ar para aumentar eficiência. Um sistema de controle PID foi utilizado com auxílio da placa microcontroladora Arduino e um Mosfet (transistor de efeito de campo) tipo N, além do auxílio de um sensor de temperatura modelo LM35 para arduino. Com isso, concluiu-se que a refrigeração termoelétrica como condicionadores de ar para ambientes não é uma alternativa interessante visto que o rendimento da célula é muito menor que o rendimento de sistemas a compressão, já utilizados para essa aplicação. Assim, foi possível entender que para sistemas com pequenos volumes, ainda esse modelo torna-se viável, mas com a expansão do volume do ambiente, torna-se impraticável.

Também no ano de 2015, na mesma universidade, Izidoro apresentou uma dissertação sobre o título “Desenvolvimento de uma bancada didática para estudos dos efeitos termoelétricos aplicados na engenharia”. O projeto objetivou promover a facilitação na obtenção de dados e levantamento gráfico para resfriamento termoelétrico para aplicações educacionais. Foi desenvolvido um software de aquisição de dados de uma bancada que continha um mini refrigerador termoelétrico. Foi usado um microcontrolador aliado a sensores de temperatura, tensão e corrente para avaliação dos dados da bancada, desenvolvidos pelo autor da dissertação por meio de placa de circuito

Figura 10 – Protótipo de Ar Condicionado Termoelétrico



Fonte: MAESTRELLI, 2015

impresso e com uso de programação em linguagem C. O protótipo foi usado em sala de aula e foi observado melhorias no entendimento dos estudantes, além de trazer contribuição científica pela facilitação no levantamento de curvas de dados da célula, podendo entender melhor como esta se comporta e onde é possível aplicá-la.

No ano de 2016, Santos defendeu seu trabalho de conclusão de curso na Universidade de Brasília (UnB) com o título “Desenvolvimento de recipiente fechado para condicionamento de produtos termolábeis”. Santos objetivou desenvolver um protótipo para armazenamento e transporte de produtos termolábeis, através de refrigeração termoelétrica com células peltier. Para construção do protótipo foram usados uma caixa de isopor de 5,2 L para ser o ambiente refrigerado, duas células peltier, 4 ventiladores, 2 dissipadores de alumínio, pasta térmica, fios e conectores. Assim, o sistema de refrigeração foi montado com três ventiladores e um dissipador para a face quente da célula e um ventilador e um dissipador para a face fria. Logo, esse sistema foi acoplado a caixa de isopor e os estudos de caso experimentais começaram a ser realizados com auxílio de um termistor NTC para medição de temperatura interna da caixa. Posteriormente, houve vários experimentos com as placas dispostas em diferentes posições no sistema de refrigeração. Nesse caso, o termistor foi substituído por cinco sensores de temperatura LM35 ligados a uma placa Arduino genérica (1 para temperatura externa, 2 para temperatura interna e 1 para cada dissipador). Ao final dos processos, concluiu-se que o sistema conseguiu gerar gradiente de temperatura de  $9,25^{\circ}\text{C}$  entre a ambiente interno e externo e uma eficiência energética de  $1,8^{\circ}\text{C}$  por W de potência elétrica fornecida. Portanto, constatou-se que o sistema de refrigeração ensaiado tem limitações termodinâmicas. Assim, para aplicação de medicamentos termolábeis seria necessário realizar mecanismos de controle de temperatura.

Seguindo para o ano de 2018, Sladeczek realizou a publicação de um paper de título “*Cooling Device with Peltier Element for Medical Applications*” na periódico online da *International Federation of Automatic Control (IFAC)* edição 51-6. Seu principal objetivo foi realizar a implantação de um dispositivo de resfriamento termoelétrico para aplicações médicas, especialmente para terapia de tecidos de cavalos. Dessa forma, foram desenvolvidos conectores cabeçotes de alumínio para serem acoplados no animal. Tais conectores foram unidos ao sistema de refrigeração com célula peltier com intuito de diminuir a temperatura nos tecidos do cavalo. Assim, tal célula é posicionada com seu lado frio em contato termicamente ao cabeçote e o lado quente conectado termicamente a um bloco refrigerador de água. O referido bloco teve o intuito trocar o calor da face quente da célula com a água, possibilitando maior bombeamento de calor. Um sensor de temperatura foi utilizado para medições entre a interface da superfície de resfriamento e o tecido do animal anexado ao cabeçote para garantir o menor erro de medição. Com o uso de tal sensor, objetivou-se realizar um controle de temperatura para garantir que o bombeamento de calor adequado ao animal. Assim, esse sistema de controle não objetivou realizar o completo desligamento da célula, mas apenas reduzir o desempenho do resfriamento. Logo, para isso, foi utilizado o sinal PWM. Entretanto, o autor resolveu utilizar um controle ON-OFF visto que avaliou que um controle PID seria de maior custo e gasto computacional, apesar de afirmar que seria a forma ideal de controle. Portanto, foi escolhido fazer o uso de um microcontrolador da Microchip, modelo PIC16F1518. Além disso, para regulação da tensão, utilizou-se o MOSFET de canal N do tipo FDP7030. Com isso, o usuário insere uma temperatura para controle e o mecanismo elaborado realiza comparação entre os valores medido e solicitado para que o controle seja realizado. No primeiro experimento, com o tipo 1 de cabeçote, sua superfície de resfriamento não era muito grande, então a saída resultante foi baixa. Já para o tipo 2 de cabeçote o bombeamento de calor do tecido era muito maior em virtude de melhor área de contato com o tecido do animal. Foi constatado também a flutuação de temperatura na faixa de 1 a 2°C. Dessa forma, o autor sugere realizar controle PID para trabalhos futuros.

Por fim, no ano de 2022, Kherkhar et al publicou na revista *Studies in Thermal Engineering*, em sua 36ª edição, um artigo intitulado “*Thermal investigation of a thermoelectric cooler based on Arduino and PID control approach*”. Tal artigo objetivou realizar uma abordagem experimental e numérica do desempenho de células peltier utilizando um mecanismo de controle. Para isso, os autores utilizaram um sistema de refrigeração com a célula peltier e a placa Arduino para controle. Assim, numericamente falando, para a parte termodinâmica, Kherkhar et al utilizou um balanço de energia no módulo TEC, identificando os calores envolvidos e a potência elétrica fornecida à célula. Já acerca do desenvolvimento do controle de temperatura, os autores utilizaram

o mecanismo de controle conhecido como PID devido a sua capacidade de fornecer um excelente desempenho. Entretanto, para a análise experimental, foi escolhida a pastilha peltier de referência TEC1-12706, comumente encontrada no mercado, para realizar o resfriamento do ambiente interno de um protótipo. Tal protótipo foi desenvolvido utilizando uma caixa de  $0,05 \text{ m}^3$  de volume. Internamente a essa caixa foi posicionado um conjunto termoelétrico composto por um bloco trocador de calor, que é alimentado por um sistema de bomba e reservatório de água a temperatura mais baixa que a temperatura do ambiente interno da caixa. Tal bloco possui formato de um prisma quadrangular e uma célula peltier foi posicionada em cada uma de suas faces quadradas, com a face quente voltada para o referido bloco. Assim, a parte fria das células ficaram em contato com dissipadores e coolers que realizaram a refrigeração do ambiente interno da caixa. Esse método trouxe resultados eficazes e alcance de maior desempenho de refrigeração devido ao uso de mais de uma célula e do sistema do bloco trocador realizado. Em sequência, o controle de temperatura foi realizado usando a placa Arduino Mega 2560 e as medições de temperatura pelo sensor LM35. Além disso, utilizou-se sensores DHT22 para medição das temperaturas das faces das células peltier utilizadas no protótipo. Com as temperaturas lidas por meio dos referidos sensores, os autores utilizaram o software MATLAB/Simulink para a criação de um sistema de aquisição dos dados coletados pelo Arduino. Dessa forma, o controle PID realizado foi responsável por receber os valores de  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ , bem como a temperatura desejada para controle e o valor de temperatura do ambiente interno da caixa de forma instantânea. A temperatura ambiente escolhida foi de  $30^\circ\text{C}$ . Com isso, a temperatura de controle escolhida no algoritmo foi de  $5^\circ\text{C}$ , na face fria da célula. Assim, foi demonstrado através dos diferentes resultados e utilizando o método Ziegler-Nichols que os valores de ganho  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  são, respectivamente, 0,9, 0,15 e 0. controlador proposto é capaz de alcançar um erro de  $0,1^\circ\text{C}$  com um mínimo de sobreposição inferior a 20s. Atuando, portanto, com o sistema descrito, foi possível observar que a temperatura do ambiente refrigerado atingiu a faixa de  $-10,5^\circ\text{C}$ . Já em relação às faces quente e fria das células, conseguiu-se obter uma diferença de temperatura no valor de  $51,01^\circ\text{C}$  e a temperatura da face fria conseguiu obedecer ao controle a ela estipulado. Além disso, calculou-se o COP, utilizando as temperaturas das faces quente e fria. Logo, verificou-se que o seu valor máximo foi de 0,73, sendo avaliado como um COP de valor baixo.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Construção do Protótipo

A metodologia do presente trabalho de conclusão de curso se baseia na montagem de um protótipo de um mini refrigerador termoelétrico com objetivo de controlar sua temperatura interna. Para isso, foi utilizada uma caixa de isopor de capacidade volumétrica com aproximadamente 5 L. Sua escolha foi devido ao fácil manuseio do material, seu baixo custo e por atuar como um bom isolante térmico, já que, segundo Incropera et al. (2008), sua condutividade térmica vale 0,027 W/mK. Entretanto, foi avaliado que seria conveniente inserir mais camadas de isolamento com outros materiais, com objetivo de minimizar as trocas de calor com o ambiente. Dessa forma, utilizou-se um revestimento de alumínio de 2 mm, com intuito de diminuir trocas de calor por radiação, e um revestimento de material estilo emborrachado (EVA) de 10 mm, em razão da baixa condutividade do material, como mostrado abaixo na figura 11.

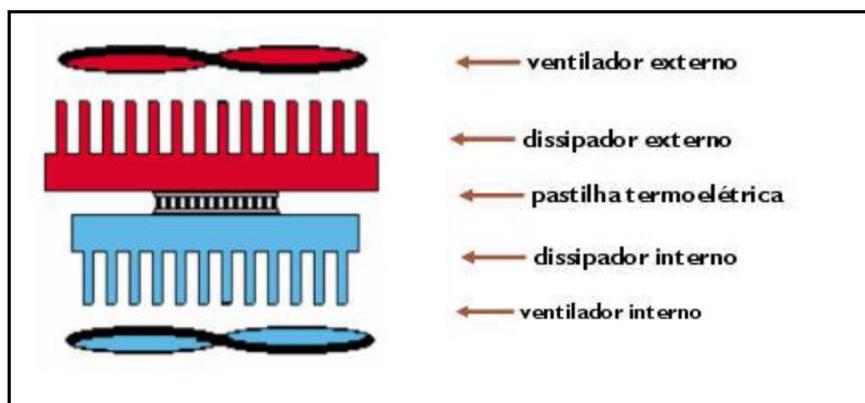
Figura 11 – Isolamento Térmico



Fonte: própria, 2022

Com isso, além das paredes da caixa, sua tampa também recebeu os isolamentos supracitados. Assim, um conjunto termoelétrico, com propósito de melhorar a dissipação dos calores absorvido ( $Q_C$ ) e rejeitado ( $Q_H$ ) da célula, foi instalado. Este conjunto foi composto por uma célula peltier, dois dissipadores de alumínio e dois ventiladores para as faces quente e fria da célula, respectivamente, conforme mostra a figura 12. Além disso, utilizou-se uma fonte de alimentação de corrente contínua (DC) para a célula, da marca Yaxun modelo PS-305D, disponível no Laboratório Congecasa da UFPE, conforme mostrado na figura 13. Esta fonte pode variar seu fornecimento de tensão (até 30V) e corrente (até 5A) e possui fundamental importância para acompanhar as variações de tensão à célula peltier e verificar seu comportamento termoelétrico.

Figura 12 – Conjunto Termoelétrico



Fonte: DANVIC, 2022

Figura 13 – Fonte de Corrente Contínua Yaxun PS-305D



Fonte: própria, 2022

Sobre a célula peltier, foi aplicada a do tipo TEC1-12708, conforme figura 14. Esta possui 127 pares (blocos) do semicondutor telureto de bismuto (tipos P e N) e suportam, no máximo, 15,4V de tensão e 8A de corrente. Portanto, todas as medições do presente trabalho tomaram por base a referida célula.

Ao iniciar a construção do protótipo, se fez necessário a realização de um teste rápido para identificação das faces quente e fria da célula. Portanto, bastou aplicar tensão de baixa intensidade aos seus terminais – para que não haja superaquecimento e posterior queima da célula – e as faces apresentaram suas propriedades. No caso da TEC1-12708, a face com a inscrição do tipo da célula é a face quente e, conseqüentemente, o lado oposto é a face fria.

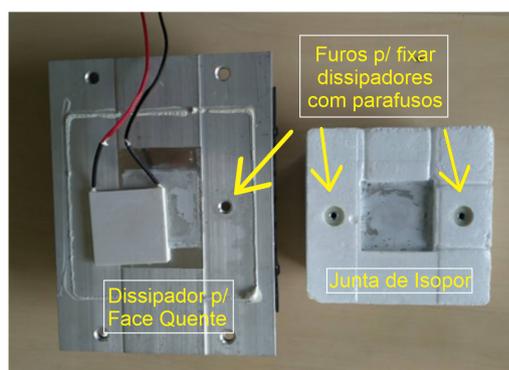
Figura 14 – Célula Peltier TEC1-12708



Fonte: Refriton, 2021

Já acerca dos dissipadores de calor, foram utilizados modelos oriundos de equipamentos comerciais, mais especificamente de uma adega de vinhos. Tal escolha deveu-se ao fato de tornar o experimento o mais próximo de uma aplicação real. Para tanto, tais dissipadores foram posicionados de modo a “prender” a célula peltier. Assim, para auxiliar na fixação e maior contato das faces do peltier com as faces dos dissipadores, fez-se o uso de parafusos com porca e de pasta térmica, auxiliando na redução de uma resistência de contato entre tais faces. Além disso, fez-se o uso de uma junta de isopor para minimizar as perdas de calor na união de tais dissipadores e deixar a célula imóvel, conforme figura 15.

Figura 15 – Dissipadores com junta de isopor



Fonte: própria, 2022

Após a união dos dissipadores, fez-se o posicionamento dos ventiladores (coolers). Tal instalação teve por objetivo auxiliar a dissipação de calor no conjunto termoelétrico, evitar condução de calor da parte quente para a fria do peltier e eventual queima da pastilha. Dessa forma, objetivou-se uma maior dissipação de calor para o ambiente externo pelo lado quente, fazendo com que o ambiente interno do protótipo registrasse

menores temperaturas. Assim, posicionou-se um cooler de maior dimensão na parte externa. Portanto, foram escolhidos ventiladores quadrados de 12 cm de lado para a parte externa da caixa e 9 cm para a interna, abrangendo ao máximo toda a área dos dissipadores. Assim, foi escolhido instalar o ventilador da parte externa da marca Aerocool, que possui 3,6W de potência, suportando tensão de 12 V DC, corrente de 0,3 A e rotação de 1000 rpm, como mostrado na figura 16 abaixo.

Figura 16 – Ventilador - Lado Externo



Fonte: própria, 2022

Já para a parte interna escolheu-se o ventilador da marca 5+, que possui rotação de 2900 rpm, e suportam 12 V de tensão e 0,2 A de corrente. Ambos estão conectados em paralelo e ligados a uma fonte de 12 V DC / 2 A, mostrada na figura abaixo, cuja instalação se realizou separadamente da fonte da marca Yaxun, citada anteriormente. O intuito de tal decisão deve-se ao fato da limitação de corrente da fonte Yaxun, que está abaixo da máxima corrente que a célula suporta. Dessa forma, deixando apenas o peltier exclusivo para essa fonte, o mesmo pôde consumir praticamente toda corrente disponível. Por isso, os testes realizados não utilizaram a máxima potência da célula.

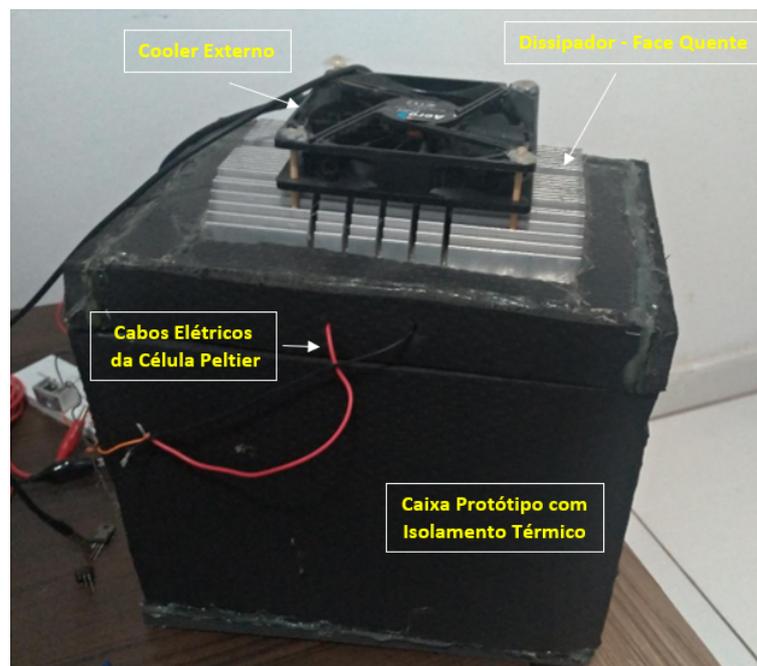
Figura 17 – Fonte Externa



Fonte: própria, 2022

Portanto, de acordo com as informações supracitadas, o protótipo em questão foi validado para ser instrumentado e passar por testes que avaliem as curvas de temperatura com ou sem uso de mecanismos de controle. Logo, segue abaixo a figura 18, que apresenta o protótipo finalizado.

Figura 18 – Caixa Protótipo



Fonte: própria, 2022

#### 4.2 Estudos de Caso Experimentais sem Controle de Temperatura

Com o protótipo pronto, foram realizadas diversos estudos de caso experimentais a fim de obter as curvas de temperatura do ambiente resfriado pela célula peltier com condições externas variadas. Na realização de tal experimento, obteve-se diversos registros instantâneos de temperatura por um determinado tempo. Dessa forma, é possível fornecer maior confiabilidade ao sistema de medição e, conseqüentemente, um fornecimento de curvas de resfriamento mais próximas do real. Para tanto, foi utilizado o sensor de temperatura DS18B20, conforme figura 19. Esse sensor foi escolhido por sua simples montagem em circuitos eletrônicos e por ser encapsulado em sua ponta, podendo suportar condições adversas e até mesmo líquidos. Assim, o sensor não queimará caso gotas de condensado caia sobre ele. Esse sensor atua de 3 a 5,5V, ideal para uso em placa microcontroladora Arduino que suporta até 5V, além de medir temperaturas de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$ , com precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  quando está na faixa entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $+85^{\circ}\text{C}$ . Além disso, o sensor em questão foi adquirido com calibração em dia. Entretanto, visando melhorar ainda mais a confiabilidade dos resultados, escolheu-se realizar a leitura de dez temperaturas de forma instantânea e imprimir em tela o valor da média de tais leituras para cada iteração realizada.

Sabendo disso, foi utilizada um placa Arduino tipo UNO, demonstrada na figura 20. Esta placa, segundo o site Arduino.cc (2019), é composta por silício onde é possível encontrar um microcontrolador da família ATmega da ATMEL. Ela é composta por

Figura 19 – Sensor de Temperatura DS18B20



Fonte: THOMSEN, 2022

14 pinos digitais, sendo 6 deles configurados para modulação PWM (Pulse Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso). Possui 6 pinos configurados como entradas analógicas. Também apresenta um cristal oscilador de 16 Mhz para garantir a frequência correta do ATmega. Sua conexão foi realizada por meio de uma porta USB com o computador, onde foi criada uma programação no software Arduino, destinando uma porta digital para captação das leituras do referido sensor. Assim, para captação de dados com mais precisão, cada ponto plotado foi o resultado da média da leitura de 10 (dez) pontos de temperatura obtidos.

Figura 20 – Placa Arduino



Fonte: arduino.cc, 2019 (modificado)

Em seguida a obtenção dos pontos supracitados, os mesmos foram transferidos para o software Excel, com objetivo de planilhar os dados a cada tempo decorrido e, conseqüentemente, plotar as curvas de resfriamento desejadas. Além disso, dados como tensão e corrente aplicadas à célula peltier foram registradas. O intuito foi de realizar comparações entre tempo, temperatura, tensão e corrente a cada ponto plotado em determinada temperatura ambiente.

### 4.3 Estudos de Caso Experimentais com Controle de Temperatura

#### 4.3.1 Programação

Após os estudos de caso realizados sem controle de temperatura, partiu-se para o desenvolvimento de mecanismos capazes de deixar controlada a temperatura desejada pelo usuário do equipamento simulado pelo protótipo do item 4.1.

O ponto de partida para tal foi o desenvolvimento de uma programação que realizasse um controle PID da temperatura, utilizando a própria temperatura como sinal de entrada e a tensão fornecida a célula como um dado de saída, como explicitado no item 2.2 do presente trabalho. Assim, iniciou-se a programação com a declaração das medições de tensão e temperatura.

Para a leitura de tensão, realizou-se a lógica de um divisor de tensão. Tal metodologia consiste no uso de duas resistências em série para determinar a tensão de saída que, nesse caso, trata-se da tensão da pastilha peltier. Dessa forma, na programação em questão, foram coletados, por meio de uma porta analógica da placa Arduino, todos os pontos de tensão lidos a cada iteração, sendo estes impressos em tela.

Já para a leitura de temperatura, como explicitado anteriormente, foi utilizada uma porta digital da placa Arduino, onde dez leituras eram efetuadas e retiradas uma média de tais valores, imprimindo-os em tela. Entretanto, após as medições sem controle de temperatura, escolheu-se checar a calibração do instrumento para apresentar valor fidedignos. Tal ação foi realizada utilizando o forno calibrador de termopar Ecil existente no laboratório, conforme figura 21. O procedimento da calibração em questão foi feito posicionando o sensor no compartimento do forno citado, onde escolheu-se arbitrariamente algumas temperaturas para realizar a comparação entre a temperatura medida no forno e a temperatura medida pelo arduino. Sabendo que o erro de medição considerado para o calibrador foi de  $\pm 0,01\%$ , apresenta-se tabela abaixo, com os dados obtidos, concluindo que o sensor se enquadrou no referido erro e verificou-se, portanto, que o sensor estava calibrado e poderia ser utilizado para os experimentos.

Figura 21 – Forno Calibrador de Termopar



Fonte: Ecil, 2022

Tabela 2 – Calibração do Sensor DS18B20

Temperatura do Forno Calibrador (°C)	Temperatura do DS18B20 (°C)
27	26,99
24	24,01
20	20,01
18	18
15	14,99
12	12
10	10,01

Fonte: própria, 2022

Com isso, a lógica de controle pôde ser aplicada. Ela foi baseada no fornecimento de um determinado valor de potência entregue pela placa Arduino. Sendo assim, tal valor foi responsável pela realização do controle da tensão peltier ( $V_{Peltier}$ ) e, consequentemente, da temperatura.

Dessa forma, a referida potência é determinada por meio de uma comparação entre o valor do set point de temperatura ( $T_{setpoint}$ ) com o valor da leitura de temperatura medida a cada iteração ( $T_{atual}$ ). Assim, quanto mais próximo  $T_{atual}$  estiver de  $T_{setpoint}$ , menos potência é fornecida à célula, e vice-versa.

Em sequência, um erro em regime permanente surgiu durante o processo de controle. Tal erro fez com que a  $T_{atual}$  oscilasse em relação a  $T_{setpoint}$ . Com isso, foi constatado que o referido erro surgiu em detrimento a variação do valor da potência enviado pela placa Arduino. Entretanto, sabe-se que o erro em regime permanente é um fator inerente ao processo de controle e o autor buscou minimizar seus impactos, através de uma melhor combinação entre os ganhos, para culminar em temperaturas mais próximas do setpoint solicitado. Ou seja, minimizar as variações citadas de potência.

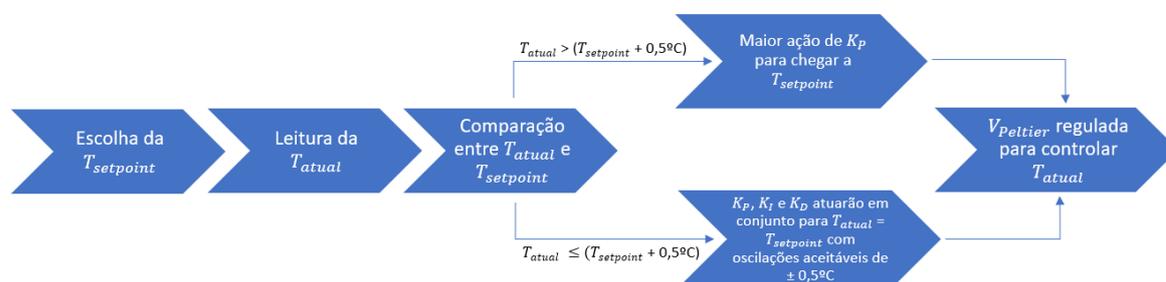
Dessa forma, com o fim do cálculo da lógica de programação, novas iterações foram realizadas, onde todas os cálculos e leituras de tensão e temperatura foram obtidos novamente. Assim, a cada iteração, buscou-se a comparação entre os valores de temperatura explicitados acima em detrimento de envio de potência para controle de  $V_{peltier}$ .

Análogo a isso, com intuito de acompanhar a curva de resfriamento ao longo do tempo, buscou-se coletar da placa arduino o valor de tempo a cada iteração. Logo, a diferença de tempo entre as iterações ( $dt$ ) se deu pelo resultado da diferença entre o tempo da medida atual ( $t_{atual}$ ) e o tempo da medida anterior ( $t_{anterior}$ ), exposto pela equação 4.1 abaixo.

$$dt = t_{atual} - t_{anterior} \quad (4.1)$$

Conclui-se o referido item, portanto, demonstrando o fluxograma da figura abaixo que retrata de forma visual e resumida a programação realizada e descrita acima.

Figura 22 – Área de Inserção de Objetos no ISIS e VSM PROTEUS



Fonte: própria, 2022

#### 4.3.2 Desenvolvimento de Placa Protótipo

Após o procedimento realizado no item anterior, o projeto pôde seguir para o desenvolvimento de uma placa protótipo. O objetivo foi selecionar componentes eletrônicos de baixo custo e aquisição rápida, alinhados a programação elaborada. Sabendo disso, buscou-se montar circuitos simples e de fácil entendimento, simulando-os previamente

com auxílio do software Proteus Design Suite na sua versão gratuita estudantil. Tal software é especificado para criação de projetos de natureza eletrônica, que possui uma biblioteca com grande quantidade de componentes de mesma procedência. Sua simulação apresenta componentes animados, com interfaces específicas para cada componente com cores diferentes, fazendo com que o profissional observe com detalhes a simulação do projeto.

O referido software se apresenta em quatro módulos. O primeiro a ser destacado é o módulo ISIS – *Intelligent Schematic Input System* (Sistema de entrada de esquemático inteligente), que se destina ao desenvolvimento de esquemáticos com possibilidade de gerar relatórios. O módulo seguinte é o VSM – *Virtual System Modeling* (Modulação de Sistema Virtual), que se destina a simulações e animações de componentes, além de ter possibilidade de utilizar microcontroladores. Atua juntamente com o ISIS e permite uso dos componentes (motores, leds, resistores etc.) diretamente no esquemático. Já o terceiro módulo é o PRO-SPICE – SPICE3F5 para Simulação Matemática, que utiliza modelos matemáticos SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis* - Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados) e permite o uso de gráficos, por exemplo, na simulação. Por fim, o último módulo apresentado é o ARES – *Advanced Routing and Editing Software* (Roteamento Avançado e Edição de Software), responsável pela concepção de Placas de Circuito Impresso (PCI) com interface própria, com possibilidade de importar o esquemático do ISIS, definir as melhores trilhas etc.

Sendo assim, para a pesquisa em questão, foi utilizado apenas os módulos ISIS e VSM em conjunto, devido ao interesse do projeto em apenas realizar simulação de circuitos eletrônicos. Todavia, tratando dos módulos utilizados, o projeto seguiu alguns passos até a simulação final. Assim, foi realizada com a criação de um novo design e template em papel A3, permitindo iniciar o esquemático inserindo os objetos através dos itens específicos na área de edição, mostrada na figura 23 abaixo.

Figura 23 – Área de Inserção de Objetos no ISIS e VSM PROTEUS



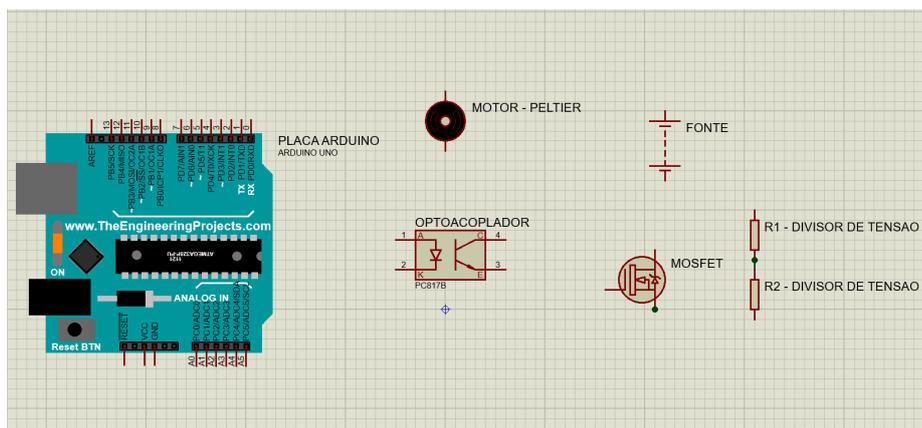
Fonte: Proteus 8 - Versão Gratuita Estudantil (modificado), 2022

Após a inserção dos objetos desejados, pode-se inserir os dados de entrada de cada componente como resistência, potência, tensão, corrente etc. e realizar a interligação adequada dos componentes inseridos. Após isso, partiu-se para o módulo VSM, posicionando os instrumentos de medição como Voltímetros DC e Amperímetros

DC, além da placa Arduino UNO e iniciar a simulação clicando no botão start da tela principal do Proteus.

Com essa ferramenta, realizou-se o estudo de diversos componentes, apresentados na figura 24 abaixo, onde o motor em questão é posicionado como alternativa de substituição da célula peltier, não presente na biblioteca do software.

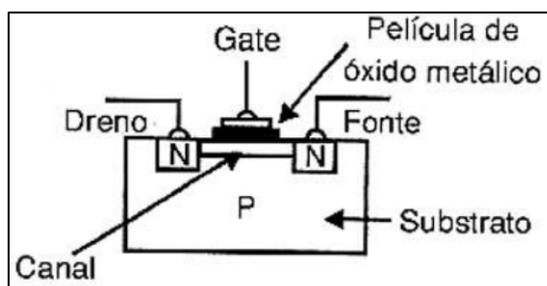
Figura 24 – Componentes do Proteus utilizados para confecção da placa protótipo



Fonte: Proteus 8 - Versão Gratuita Estudantil, 2022

Além dos componentes apresentados, é sabido que o monitoramento da temperatura, dado pelo sensor DS18B20, já especificado, foi implementado no controle simulado. A respeito do controle de tensão requerido, foi utilizado um transistor de efeito de campo de óxido-metal semiconductor de canal N, o MOSFET de canal N. Segundo Sedra e Smith (2007), este componente eletrônico é fabricado sobre um substrato tipo P e apresentam duas fortes regiões do tipo N denominadas fonte (*Source* - S) e dreno (*Drain* - D). Existe uma camada isolante de dióxido de silício ( $SiO_2$ ) que cobre essas regiões. Por cima dessa camada é depositado um metal para formar o eletrodo de porta (*Gate* - G), como mostra a figura 25.

Figura 25 – MOSFET (construção)



Fonte: INCB, 2019

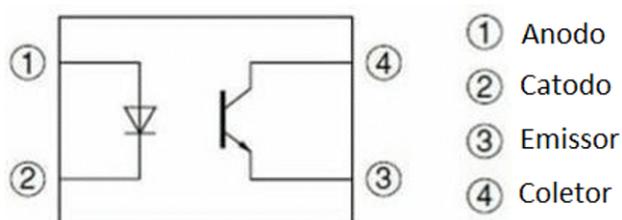
Sendo assim, seu funcionamento é dado em relação a tensão de fonte fornecida à célula. A porta precisará ficar negativa com intuito de barrar a corrente de dreno.

Quanto mais negativa a comporta, essa tensão da fonte diminui. Logo, só passa uma determinada tensão (menor que a fornecida) para a célula Peltier mediante modulação PWM vinda de uma porta digital do Arduino e inserida nos dados de entrada da programação.

A modulação PWM citada, segundo Canuto e Biasotto (2018), consiste em gerar um trem de pulsos de onda na forma quadrada com variadas larguras de pulso. Esses são comparados com dois sinais: uma onda portadora e uma onda moduladora (de referência). Com isso, o próprio Arduino mantém fixo o período do sinal e varia a largura do pulso. Logo, foi possível controlar a tensão de entrada na porta do MOSFET por meio dessa variação, transmitindo à célula a tensão necessária para manter a temperatura constante.

No circuito em questão, também foi utilizado um optacoplador, que é um componente acionado eletricamente e que tem intuito de separar e isolar circuitos, evitando assim interferência entre eles e proteção contra danos eletrônicos. Tal componente é composto por um led infravermelho de um lado e um foto transistor no outro, como mostrado na figura 26. Assim, quando o LED é acionado, a luz que incide no foto transistor garante a passagem de corrente de um circuito para o outro. Sabendo disso, foi escolhido o optacoplador PC817, como mostrado na imagem 27 abaixo, por sua alta recorrência de utilização em circuitos que usam placa Arduino.

Figura 26 – Optacoplador (Simbologia)



Fonte: Blog FilipeFlop, 2022

Figura 27 – Optoacoplador PC817



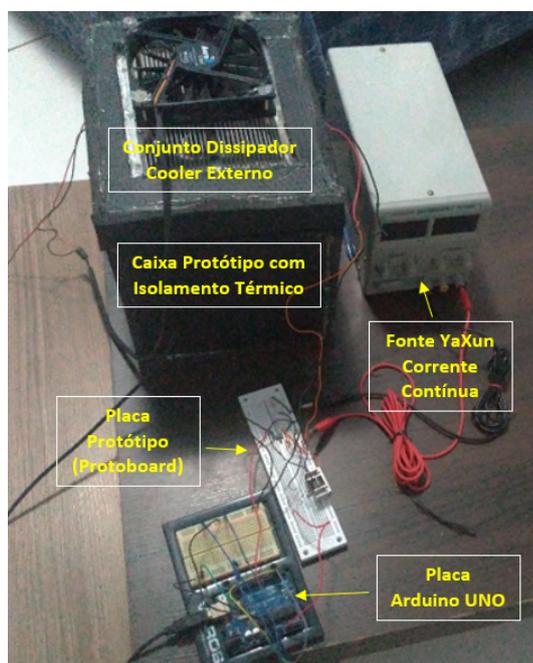
Fonte: Blog FilipeFlop, 2022

Acerca dos componentes referidos no parágrafo anterior, destaca-se o MOSFET anteriormente qualificado e a célula peltier ligada à fonte externa de tensão e corrente variável, apresentada na figura 13. Além desses componentes, vale a pena reforçar o

uso do divisor de tensão para leitura da tensão do peltier. Tal divisor está inserido nos terminais dreno e fonte, medindo a tensão nesses terminais.

Portanto, todo o circuito apresentado foi montado em uma placa protoboard, utilizando fios que suportem correntes até 5 A (máxima corrente fornecida pela fonte utilizada), conforme mostrado na figura 28. Com isso, testes puderam ser realizados e obtidas curvas de resfriamento com controle de temperatura, além de possibilitar avaliação numérica acerca da termoeletricidade envolvida.

Figura 28 – Circuito no Protoboard



Fonte: própria, 2022

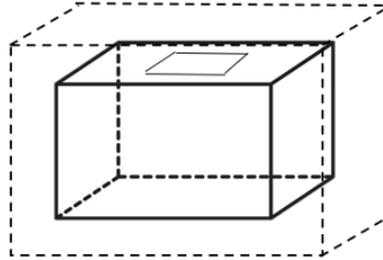
#### 4.4 Análise Numérica do Sistema Termoelétrico do Protótipo

Após a montagem do protótipo, instrumentação do mesmo e montagem do circuito de controle de temperatura, foi possível gerar dados para realização de cálculos matemáticos que permitem uma análise numérica do sistema termoelétrico proposto.

Em primeiro lugar, buscou-se compreender os calores envolvidos no processo de resfriamento do protótipo. Assim, entende-se que há um calor que entra na caixa através de todas as paredes, teto e piso, fluindo do ambiente externo para dentro da caixa ( $Q_C$ ). Também, compreende-se que, ao mesmo tempo, há um calor sendo removido do interior da caixa para o ambiente externo com auxílio de todo conjunto termoelétrico ( $Q_H$ ) citado no item 4.1 do referido trabalho, com objetivo de realizar refrigeração. Portanto, tais calores podem ser calculados utilizando a conservação de energia (1ª lei da termodinâmica), como explicitado na fundamentação teórica dessa

pesquisa. Entretanto, devido à medição de temperatura ter sido realizada apenas do ambiente refrigerado, partiu-se, então, do pressuposto que o volume de controle engloba toda a caixa protótipo e o ambiente externo imediatamente próximo a essa caixa, como mostrado na figura 29 abaixo, ao invés de analisar apenas a célula peltier.

Figura 29 – Volume de Controle – Caixa Protótipo



Fonte: própria, 2022

Dessa forma, segundo Incropera et. al (2014), a variação da quantidade de energia acumulada ( $E_{acum}$ ) no volume de controle em relação ao tempo ( $dt$ ) deve ser igual à quantidade de energia que entra nesse volume ( $E_{entra}$ ), adicionada da energia gerada internamente ( $E_g$ ) menos a quantidade de energia que sai do mesmo volume de controle ( $E_{sai}$ ), conforme mostrado na equação 4.2 abaixo.

$$\frac{E_{acum}}{dt} = E_{entra} - E_{sai} + E_g \quad (4.2)$$

Com a informação supracitada, em um primeiro momento, foi analisado que não existia energia sendo gerada dentro do volume de controle estudado, visto que nos testes realizados não foi posicionado nenhum conteúdo dentro da caixa. Com isso, constatou-se que a energia que entra corresponde ao calor que entra na caixa ( $Q_C$ ) e a energia que sai equivale ao calor que está sendo removido da caixa ( $Q_H$ ). Em consequente, de acordo com Incropera et. al. (2014), a energia acumulada para a situação em questão corresponde ao produto entre a massa de ar ( $m_{ar}$ ), o calor específico do ar ( $cp_{ar}$ ) e a diferença entre a temperatura interna medida no instante de tempo atual ( $T_{atual}$ ) e a temperatura interna medida imediatamente antes da atual ( $T_{anterior}$ ). Logo, a equação de calor removido pode ser obtida da forma abaixo, seguindo as equações 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

$$\frac{E_{acum}}{dt} = Q_{entra} - Q_{rem} \quad (4.3)$$

$$\frac{m_{ar} \times cp_{ar} \times (T_{atual} - T_{anterior})}{dt} = Q_{entra} - Q_{rem} \quad (4.4)$$

$$\frac{\rho_{ar} \times Vol_{ar} \times cp_{ar} \times (T_{atual} - T_{anterior})}{dt} = Q_{entra} - Q_{rem} \quad (4.5)$$

$$Q_{rem} = Q_{entra} - \frac{\rho_{ar} \times Vol_{ar} \times cp_{ar} \times (T_{atual} - T_{anterior})}{dt} \quad (4.6)$$

Assim, para descobrir o calor que entra na caixa, foi seguida a metodologia explicitada por Incropera et. al. (2014), onde o fluxo de calor é resultado da razão entre a diferença das temperaturas interna e ambiente ( $T_{int}$  e  $T_{amb}$ ) e a resistência térmica associada a esse fluxo, conforme equação 4.7. Tal metodologia faz analogia a um circuito com resistências elétricas, onde as resistências de convecção interna e externa ( $R_{ConvInt}$  e  $R_{ConvExt}$ ) e de condução do isopor, do alumínio e do EVA ( $R_{Isopor}$ ,  $R_{Al}$  e  $R_{EVA}$ , respectivamente) são consideradas para o cálculo. Dessa forma, ilustrou-se na figura 30 abaixo, o circuito representativo para descobrir o calor que entra na caixa.

Figura 30 – Circuito Representativo



Fonte: própria, 2022

$$Q_{entra} = \frac{T_{amb} - T_{int}}{R_{ConvInt} + R_{Isopor} + R_{Al} + R_{EVA} + R_{ConvExt}} \quad (4.7)$$

Após a descoberta do calor que entra na caixa, utilizou-se a equação 4.6 para descobrir o calor removido. Dessa forma, plotou-se gráficos demonstrativos desses calores em relação ao tempo de experimentação, demonstrados no item a seguir.

Em conseqüente, buscou-se gerar gráficos do Coeficiente de Performance (COP) para cada ponto medido, conforme equação 4.8 abaixo, utilizando os valores de tensão ( $V_{peltier}$ ) e corrente ( $I$ ) medidos, além do calor removido já calculado anteriormente, gerando gráficos demonstrativos para cada experimento realizado.

$$COP = \frac{Q_{rem}}{V_{peltier} \times I} \quad (4.8)$$

Por fim, para os experimentos realizados com controle de temperatura, buscou-se variar as temperaturas de set point por meio do uso da programação para que fosse possível avaliar os calores da mesma forma que relatado no presente tópico do trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o desenvolvimento da metodologia proposta, garantiu-se que a construção do protótipo fosse bem realizada (incluindo os isolamentos térmicos) para auxiliar na obtenção das curvas de resfriamento com exponenciais decrescentes tendendo a temperaturas de estabilização, sejam elas atingidas com ou sem controle de temperatura. Para obtenção de tais curvas, avaliou-se as condições estabelecidas no ambiente externo à caixa, evitando ao máximo as trocas térmicas com ele e se apropriando da baixa condutividade do isopor e dos isolamentos.

### 5.1 Estudos de Caso sem uso de mecanismos de controle

Realizou-se o uso do sensor DS18B20, cuja instalação eletrônica e programação adequadas a leitura desse sensor foi realizada conforme descrito no item 4.2 do referido trabalho, onde o mesmo foi adquirido com calibração em dia. Entretanto, para melhorar ainda mais a confiabilidade das medições, foi realizada a leitura de 10 temperaturas instantâneas e imprimia-se em tela o valor da média dessas leituras para cada iteração realizada. Dessa forma, em um primeiro momento, foram obtidas curvas de resfriamento com estabilização da temperatura interna da caixa, sem uso de mecanismos de controle de temperatura. Ou seja, a estabilização da temperatura se dá naturalmente pelas características da célula peltier e do protótipo montado. Além disso, realizou-se análises numéricas que avaliam a transferência de calor com os dados obtidos nos estudos de caso experimentais obedecendo o procedimento relatado item 4.4 acima.

Dessa forma, seguem abaixo 2 (dois) estudos de caso distintos realizados bem como suas curvas de resfriamento e análises termodinâmicas.

#### 5.1.1 Estudo de Caso 1 – Sem Controle

O referido estudo de caso foi realizado a uma temperatura ambiente de 26<sup>0</sup>C, onde a caixa esteve apoiada sobre uma mesa de madeira cujo tampo possui 15mm de espessura. Dessa forma, o experimento iniciou com a temperatura do interior da caixa ( $T_{inicial}$ ) saindo de 26,56<sup>0</sup>C para a temperatura da estabilização ( $T_{estab}$ ) no valor de 6,53<sup>0</sup>C. O experimento em questão teve duração de 220 minutos, que representa 3 horas e 40 minutos.

Para tanto, foi utilizada uma tensão média de 9,12V e uma corrente média de 4,52A fornecidas através da fonte de corrente contínua apresentada no item 4.1 do referido

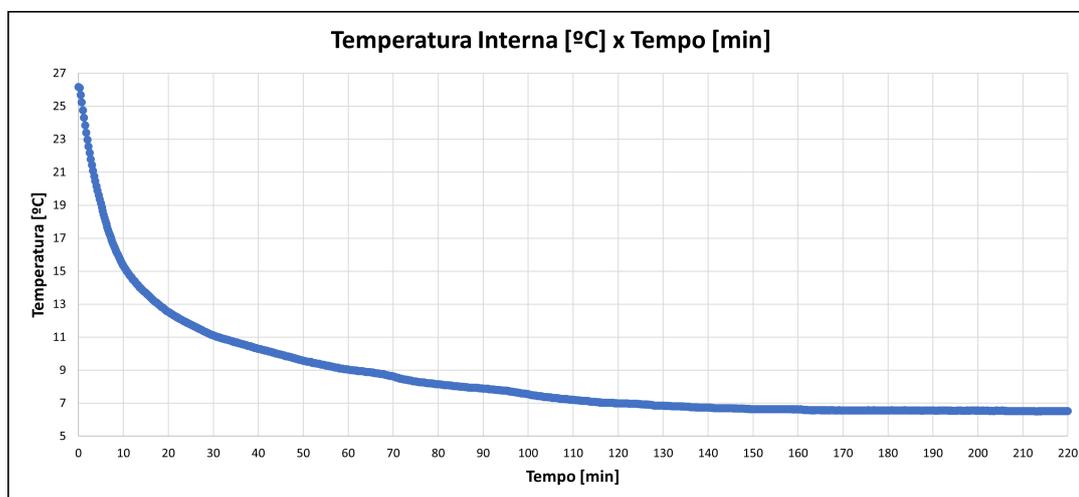
trabalho. Assim, segue abaixo a tabela resumo dos dados supracitados bem como o gráfico que apresenta a curva de resfriamento obtida.

Tabela 3 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 1 Sem Controle

Dado	Valor
$T_{amb}$	$26^{\circ}C$
$T_{inicial}$	$26,56^{\circ}C$
$T_{estab}$	$6,53^{\circ}C$
$V_{Peltier}$	$9,12V$
$I$	$4,52A$
$t_{total}$	$220min$

Fonte: própria, 2022

Figura 31 – Curva de Resfriamento 1 sem controle de temperatura

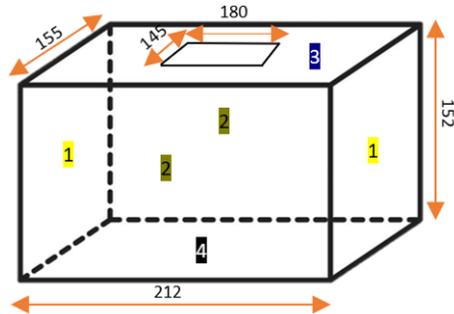


Fonte: própria, 2022

Assim, após a obtenção do referido gráfico, iniciou-se os cálculos de transferência de calor com uso dos pontos de temperatura obtidos para análise numérica. Dessa forma, foi necessário realizar o levantamento de dados para compor os referidos cálculos. Os primeiros dados obtidos foram das dimensões da caixa, apresentadas na figura abaixo, com intuito de calcular a área superficial de suas paredes, teto e piso. Logo, a caixa tem dimensões internas de 212 mm x 155 mm x 152 mm e rasgo no seu teto de 180 mm x 145 mm para encaixar conjunto termoeletrônico. Sabe-se também que a espessura do

isopor da caixa é de 13mm, do alumínio é de 2mm, do EVA é de 10mm e da madeira da mesa de apoio da caixa é de 15mm.

Figura 32 – Representação da Caixa Protótipo com Dimensões



Fonte: própria, 2022

Com os referidos dados foi possível calcular as áreas superficiais de acordo com as faces apresentadas na figura acima. Dessa forma, tem-se o cálculo das áreas das superfícies 1 ( $A_1$ ), 2 ( $A_2$ ), 3 ( $A_3$ ) e 4 ( $A_4$ ) através das equações abaixo:

$$A_1 = 155 \times 152 = 23560 \text{mm}^2 = 0,02356 \text{m}^2 \quad (5.1)$$

$$A_2 = 212 \times 152 = 32224 \text{mm}^2 = 0,032224 \text{m}^2 \quad (5.2)$$

$$A_3 = 212 \times 155 - 145 \times 180 = 6760 \text{mm}^2 = 0,00676 \text{m}^2 \quad (5.3)$$

$$A_4 = 212 \times 152 = 32224 \text{mm}^2 = 0,032224 \text{m}^2 \quad (5.4)$$

Após isso, para facilitar os cálculos do calor que entra na caixa, foi escolhido realizar o somatório da área superficial total que engloba apenas paredes laterais e teto, pois tais áreas obedecem a uma dinâmica de cálculo diferente da área do piso, conforme será apresentado posteriormente nesse capítulo. Assim, tem-se:

$$A_{\text{ParedesTeto}} = 2 \times A_1 + 2 \times A_2 + A_3 = 118328 \text{mm}^2 = 0,1183 \text{m}^2 \quad (5.5)$$

Dessa forma, deu-se prosseguimento ao trabalho consultando tabelas termodinâmicas para obter dados numéricos como coeficiente de condutividade térmica, calor específico e densidade acerca do isopor, alumínio, EVA e do ar. Logo, segue abaixo a tabela 3 com os referidos dados bem como sua fonte.

Sabe-se também que, o volume de ar ( $V_{ol_{ar}}$ ) no interior da caixa é de, aproximadamente, 5 L e que o tempo entre as iterações ( $dt$ ) foi de 15 segundos.

Tabela 4 – Dados Numéricos acerca da Caixa Protótipo

Material	Dado	Valor
Isopor	$k_{Isopor}$	$0,027 \frac{W}{mK}$
Alumínio	$k_{Al}$	$237 \frac{W}{mK}$
EVA	$k_{EVA}$	$0,13 \frac{W}{mK}$
Madeira	$k_{Mad}$	$0,087 \frac{W}{mK}$
Ar	$\rho_{Ar}$	$1,1614 \frac{kg}{m^3}$
Ar	$cp_{Ar}$	$1007 \frac{J}{kgK}$

Fonte: Incropera et al, 2014 (modificado)

Então, após o conhecimento dos dados referenciados acima, partiu-se para obtenção dos coeficientes de convecção interna ( $h_{int}$ ), que representa uma convecção forçada, e externa ( $h_{ext}$ ), que representa uma convecção natural. Após muita pesquisa e cálculos baseados nas metodologias de Incropera et al (2014), chegou-se à conclusão de que há falta de dados de temperatura em determinadas faces do protótipo para encontrar tais valores. Essa deficiência se deve ao fato das limitações físico-financeiras do projeto. Logo, escolheu-se utilizar a tabela 4 abaixo com coeficientes de convecção máximos ( $h_{int_{max}}$  e  $h_{ext_{max}}$ ) e mínimos ( $h_{int_{min}}$  e  $h_{ext_{min}}$ ) disponíveis na literatura. Dessa forma, é possível calcular valores de calor máximos e mínimos para representar a dinâmica de transferência de calor do referido projeto.

Tabela 5 – Coeficientes de Convecção

Tipo de Convecção	Fase	Coeficiente de Convecção ( $\frac{W}{m^2K}$ )
Natural	Gases	2 – 25
Natural	Líquidos	50 – 1000
Forçada	Gases	25 – 250
Forçada	Líquidos	100 – 20000

Fonte: Incropera et al, 2014 (modificado)

Logo, considerando que o ar interno e externo à caixa protótipo é um gás ideal, pode-se extrair da tabela acima os seguintes valores de coeficiente de convecção, listados na tabela 5 abaixo.

Tabela 6 – Coeficientes de Convecção

Tipo de Convecção	Dado	Coeficiente de Convecção ( $\frac{W}{m^2K}$ )
Natural	$h_{ext_{min}}$	2
Natural	$h_{ext_{max}}$	25
Forçada	$h_{int_{min}}$	25
Forçada	$h_{int_{max}}$	250

Fonte: Incropera et al, 2014 (modificado)

Assim, após o conhecimento de todos os dados apresentados até o momento, foi possível encontrar as resistências térmicas de condução e convecção apresentadas no circuito representativo da figura 30 do item 4.4 do referido trabalho, considerando que cada camada de isolamento se comporta como uma parede plana, e obter, então, os valores de calor que entra e de calor removido da caixa protótipo.

Então, calculou-se as resistências térmicas de convecção interna e externa máximas e mínimas, considerando a área superficial das paredes e teto. Logo, tem-se:

$$R_{conv_{ext_{min}}} = \frac{1}{h_{ext_{min}} \times A_{ParedesTeto}} = 4,225 \frac{K}{W} \quad (5.6)$$

$$R_{conv_{ext_{max}}} = \frac{1}{h_{ext_{max}} \times A_{ParedesTeto}} = 0,338 \frac{K}{W} \quad (5.7)$$

$$R_{conv_{int_{min}}} = \frac{1}{h_{int_{min}} \times A_{ParedesTeto}} = 0,338 \frac{K}{W} \quad (5.8)$$

$$R_{conv_{int_{max}}} = \frac{1}{h_{int_{max}} \times A_{ParedesTeto}} = 0,034 \frac{K}{W} \quad (5.9)$$

Posteriormente, deu-se sequência ao cálculo das resistências de condução do circuito, também considerando a área superficial das paredes e teto.

$$R_{Isopor_{ParedesTeto}} = \frac{L_{Isopor}}{k_{Isopor} \times A_{ParedesTeto}} = 4,07 \frac{K}{W} \quad (5.10)$$

$$R_{AlParedesTeto} = \frac{L_{Al}}{k_{Al} \times A_{ParedesTeto}} = 7,13 \times 10^{-5} \frac{K}{W} \quad (5.11)$$

$$R_{EVA_{ParedesTeto}} = \frac{L_{EVA}}{k_{EVA} \times A_{ParedesTeto}} = 0,65 \frac{K}{W} \quad (5.12)$$

Por fim, calculou-se as mesmas resistências de condução sendo agora para o piso da caixa apoiado sobre uma mesa de madeira e considerando que a temperatura da superfície da madeira é igual a temperatura do ar ambiente. Logo, tem-se:

$$R_{Isopor_{Piso}} = \frac{L_{Isopor}}{k_{Isopor} \times A_{Piso}} = 14,652 \frac{K}{W} \quad (5.13)$$

$$R_{Al_{Piso}} = \frac{L_{Al}}{k_{Al} \times A_{Piso}} = 2,568 \times 10^{-4} \frac{K}{W} \quad (5.14)$$

$$R_{EVA_{Piso}} = \frac{L_{EVA}}{k_{EVA} \times A_{Piso}} = 2,341 \frac{K}{W} \quad (5.15)$$

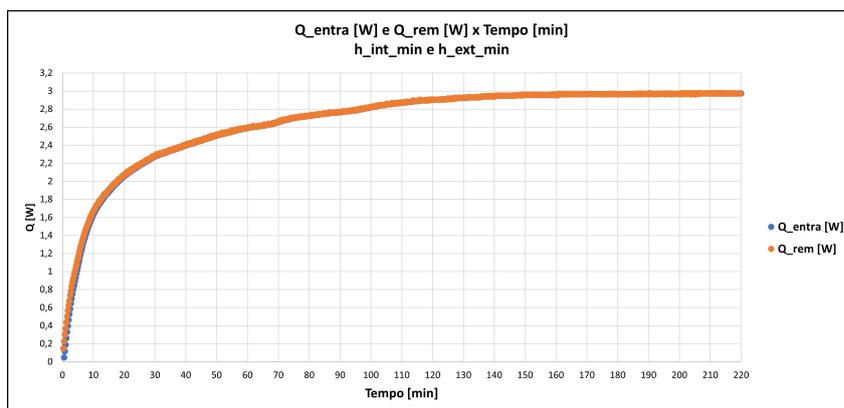
$$R_{Mad_{Piso}} = \frac{L_{Mad}}{k_{Mad} \times A_{Piso}} = 5,247 \frac{K}{W} \quad (5.16)$$

Dessa forma, calculou-se para cada ponto o calor que entra na caixa como uma composição do calor que entra pelo piso ( $Q_{Piso}$ ) e do calor que entra pelas paredes e teto ( $Q_{ParedesTeto}$ ), conforme equação 5.17 abaixo. Entretanto, para calcular isoladamente tais calores, utilizou-se a equação 4.7 demonstrada no item 4.4 desse trabalho e foi obedecida a dinâmica do circuito térmico da figura 30.

$$Q_{entra} = Q_{Piso} + Q_{ParedesTeto} \quad (5.17)$$

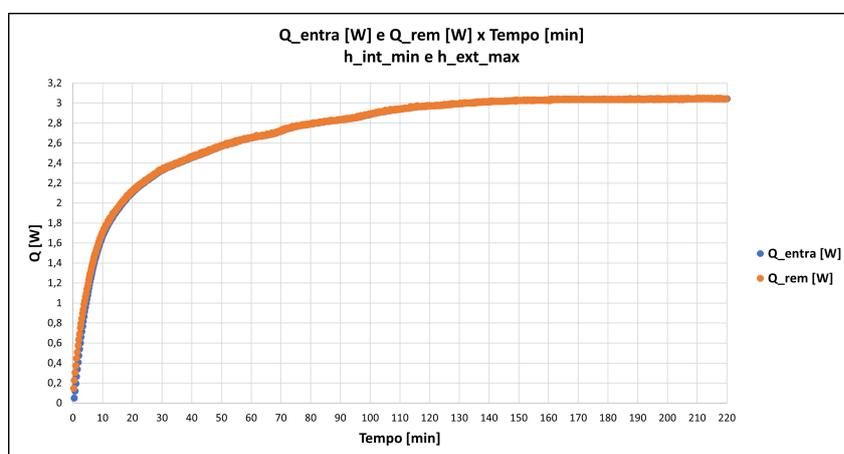
Por fim, foi possível calcular o calor removido pela caixa, conforme equação 4.6 apresentada no item 4.4 do presente trabalho. Assim, apresentam-se abaixo os gráficos das figuras 33, 34, 35 e 36 que demonstram o bombeamento de calor na caixa através do sistema termoelétrico instalado, utilizando as situações de combinação de coeficiente convectivos máximos e mínimos, responsáveis pela variação de calor por convecção.

Figura 33 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{min}}$



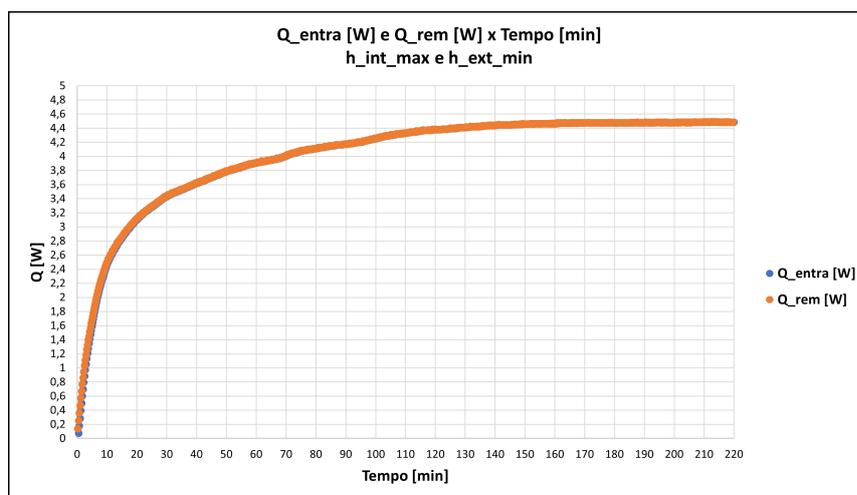
Fonte: própria, 2022

Figura 34 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{min}}$



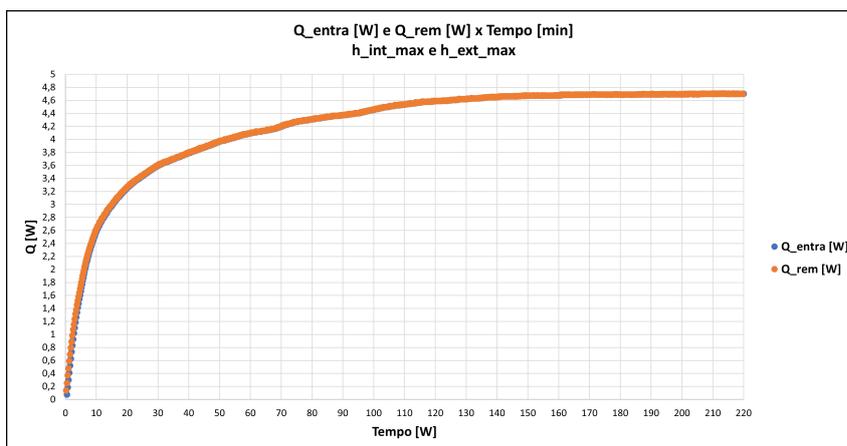
Fonte: própria, 2022

Figura 35 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{max}}$



Fonte: própria, 2022

Figura 36 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{max}}$

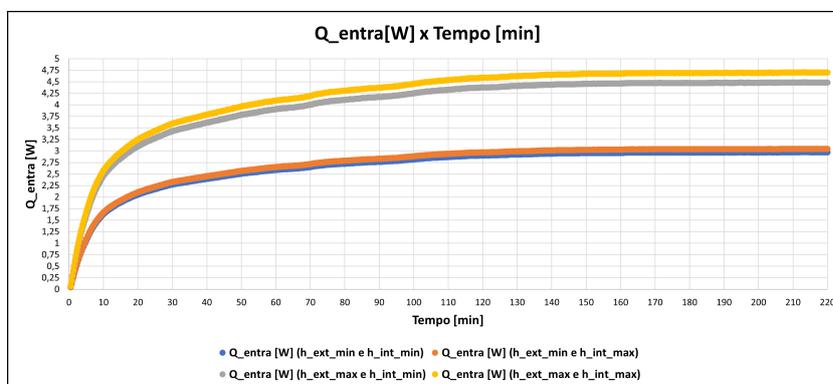


Fonte: própria, 2022

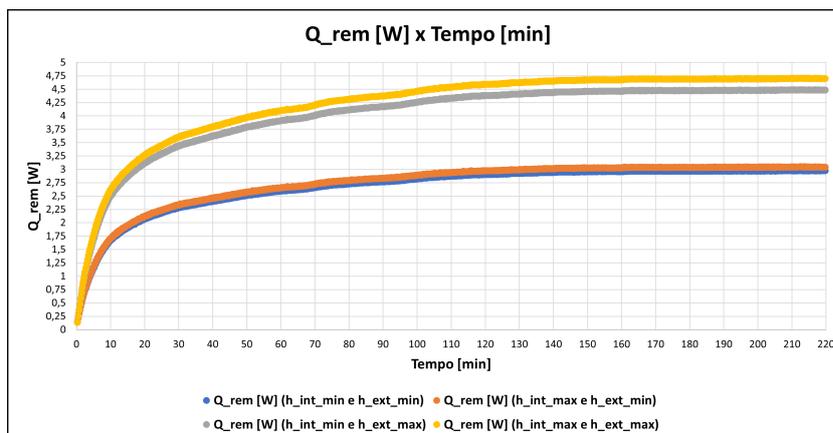
Observando os gráficos acima, é possível inferir que a dinâmica de bombeamento de calor se dá com o calor removido a uma taxa um pouco maior que o calor que entra até atingir a temperatura de estabilização ou um pouco antes desta, onde tais calores são equalizados (o calor que entra fica aproximadamente igual ao calor que sai). Dessa forma, confirma-se que o sistema termoelétrico cumpre seu papel de atuar perfeitamente removendo calor e baixando a temperatura interna até a temperatura de estabilização, onde o calor permanece constante.

Também é possível observar, através dos gráficos das figuras 37 e 38 abaixo que, com o aumento do coeficiente convectivo externo, o calor que entra aumenta, resultando no aumento de carga térmica que precisa ser vencida pelo sistema de refrigeração instalado. Logo, exige-se uma maior potência da célula peltier para cumprir tal objetivo, inferindo que a célula instalada tem condições de realizar com êxito.

Figura 37 – Gráfico de  $Q_{entra}$  com combinação de coeficientes convectivos

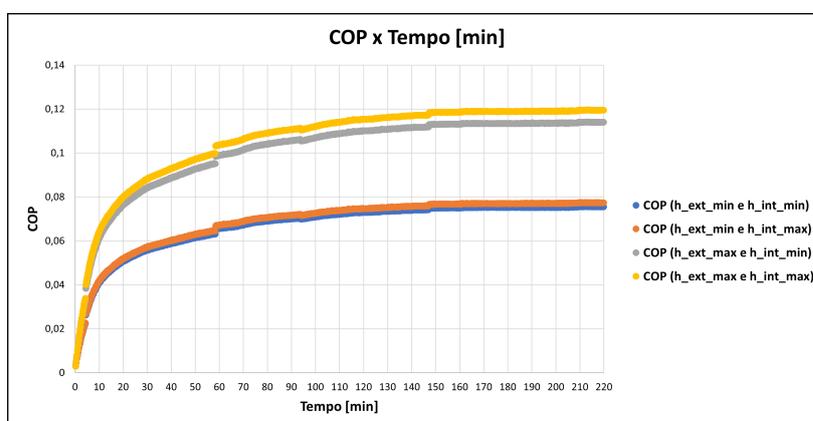


Fonte: própria, 2022

Figura 38 – Gráfico de  $Q_{rem}$  com combinação de coeficientes convectivos

Fonte: própria, 2022

Após os resultados acima, foi possível calcular o Coeficiente de Performance ( $COP$ ) do sistema de refrigeração termoelétrica estudado através da equação 4.8 do presente trabalho. Assim, apresenta-se o gráfico abaixo que demonstra o  $COP$  em relação a comparação dos coeficientes convectivos.

Figura 39 – Gráfico de  $COP$  com combinação de coeficientes convectivos

Fonte: própria, 2022

### 5.1.2 Estudo de Caso 2 – Sem Controle

Um segundo estudo de caso foi realizado com a mesma metodologia do primeiro. Entretanto, para tal caso, a temperatura do ambiente externo a caixa foi diminuída para 19°C. Dessa forma, o experimento iniciou com a temperatura do interior da caixa saindo de 19,69°C para a temperatura da estabilização no valor de 2,36°C. Esse experimento teve duração de 140 minutos, que representa 2 horas e 20 minutos. O tempo em questão foi menor que o do primeiro estudo de caso em virtude da escolha do usuário de desligar o sistema termoelétrico após a chegada na temperatura de estabilização.

Para tanto, foi utilizada uma tensão média de 8,8V e uma corrente média de 4,67 A

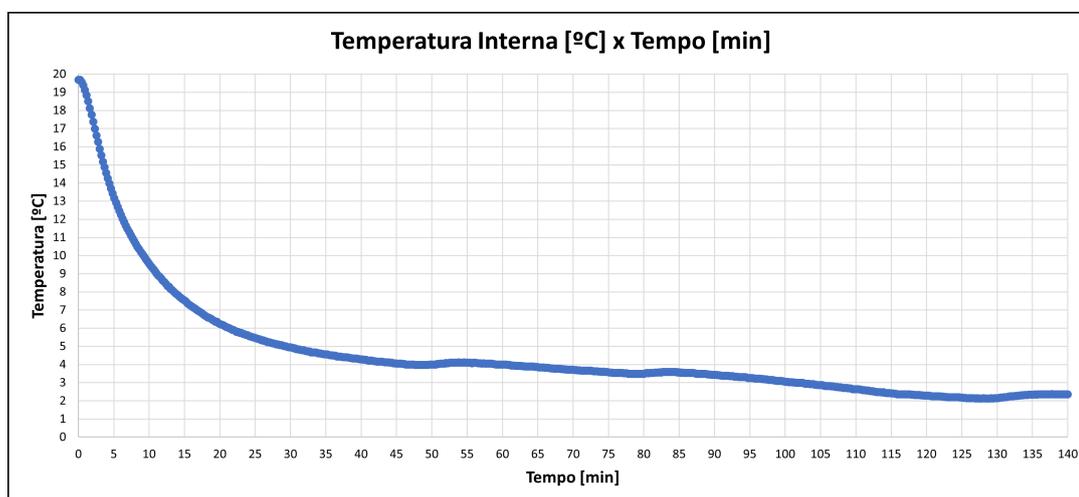
fornechas através da fonte de corrente contínua apresentada no item 4.1 do referido trabalho. Assim, segue abaixo a tabela resumo dos dados supracitados bem como o gráfico que apresenta a curva de resfriamento obtida.

Tabela 7 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 2 Sem Controle

Dado	Valor
$T_{amb}$	$19^{\circ}C$
$T_{inicial}$	$19,69^{\circ}C$
$T_{estab}$	$2,36^{\circ}C$
$V_{Peltier}$	$8,8V$
$I$	$4,67A$
$t_{total}$	$140min$

Fonte: própria, 2022

Figura 40 – Curva de Resfriamento 2 sem controle de temperatura

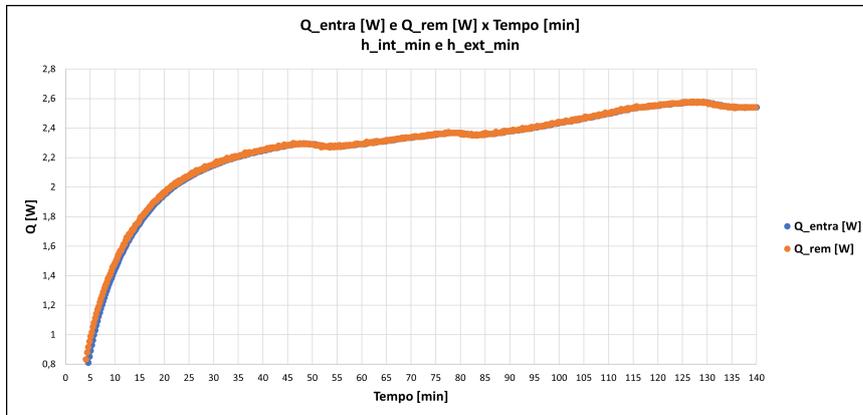


Fonte: própria, 2022

Após a obtenção do gráfico acima, foram realizados os cálculos de transferência de calor agora utilizando os pontos de temperatura obtidos nesse experimento para análise numérica. Sabe-se, portanto, que os valores de resistência térmica calculados no item anterior continuam inalterados. Logo, pode-se plotar novas curvas de comparação do calor que entra e do calor removido pelo sistema termoelétrico utilizando as variáveis alteradas, que são apenas as temperaturas. Tais curvas podem ser observadas nos

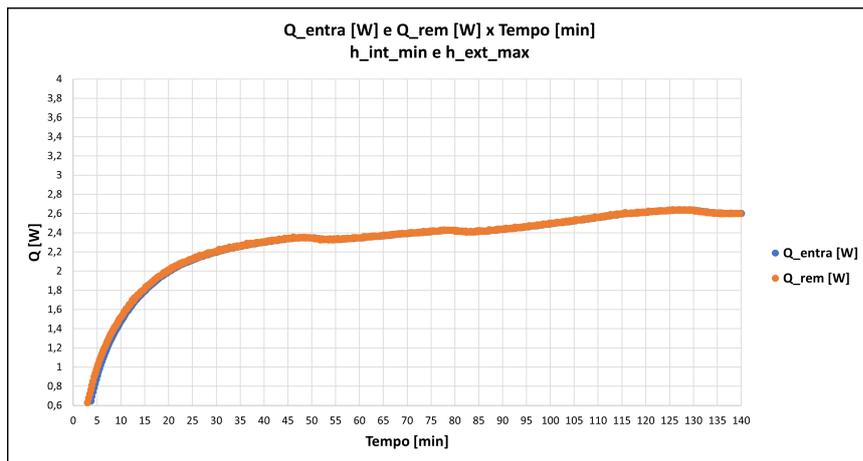
gráficos das figuras 41, 42, 43 e 44 abaixo que realizam combinação de coeficientes convectivos internos e externos.

Figura 41 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{min}}$



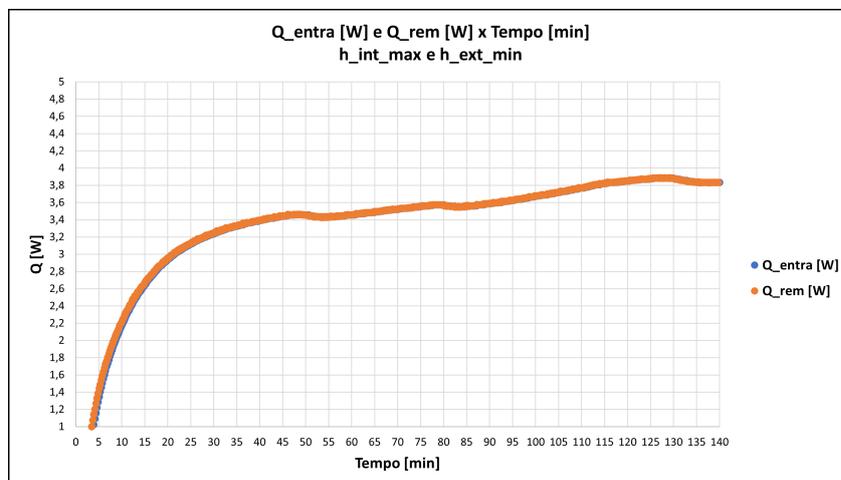
Fonte: própria, 2022

Figura 42 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{min}}$



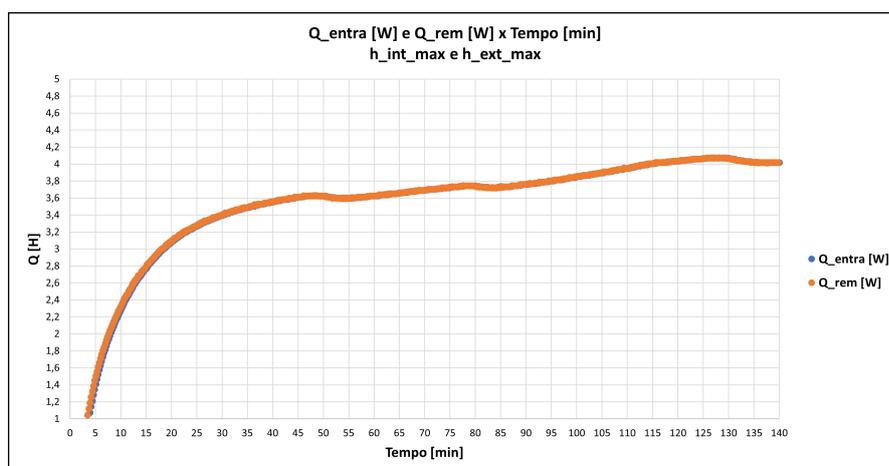
Fonte: própria, 2022

Figura 43 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{max}}$



Fonte: própria, 2022

Figura 44 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{max}}$

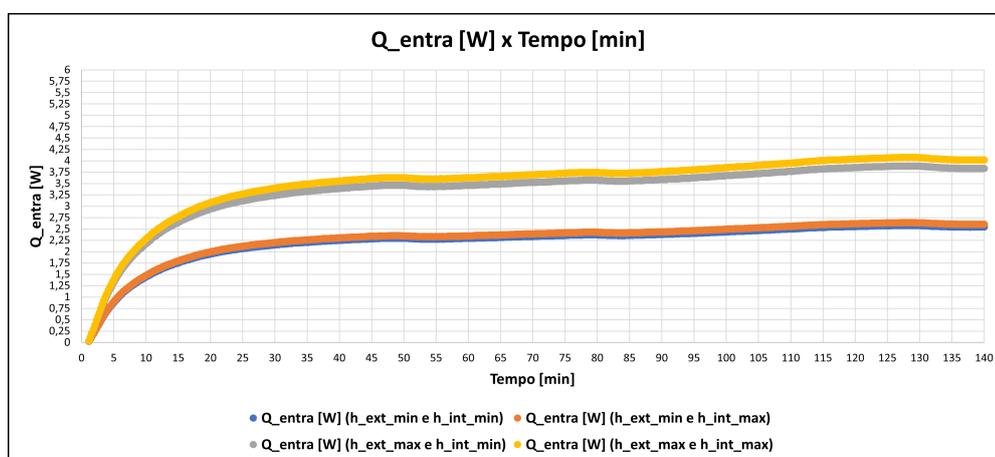


Fonte: própria, 2022

Com a análise dos gráficos acima, é possível inferir que a dinâmica de bombeamento de calor se comporta da mesma forma que do primeiro estudo de caso: o calor removido a uma taxa um pouco maior que o calor que entra até atingir a temperatura de estabilização, onde tais calores se equalizam. Dessa forma, também pode-se confirmar que o sistema termoeletrico cumpre seu papel de remover calor e baixar a temperatura interna até a temperatura de estabilização.

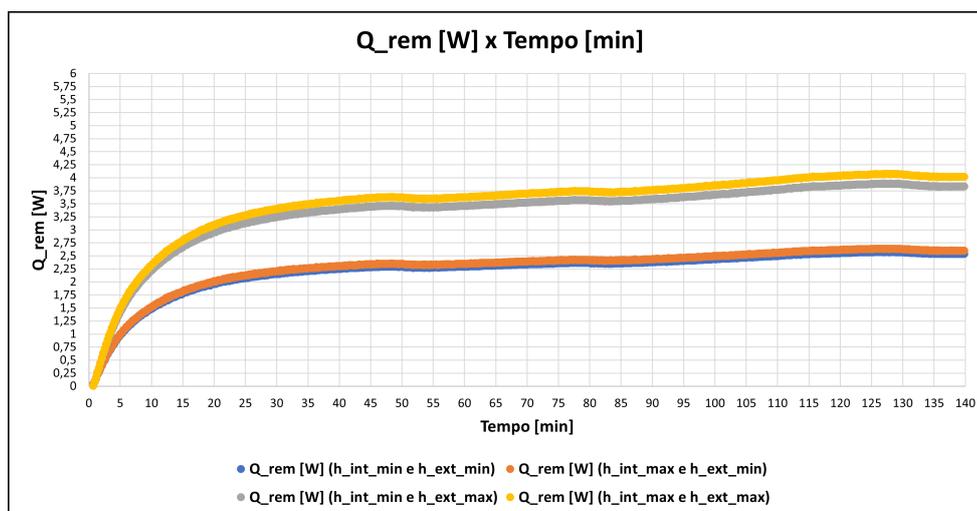
De igual forma, através dos gráficos das figuras 45 e 46 abaixo que, com o aumento do coeficiente convectivo externo, o calor que entra aumenta, resultando no aumento de carga térmica a ser vencida, exigindo-se uma maior potência da célula peltier para cumprir tal objetivo.

Figura 45 – Gráfico de  $Q_C$  com combinação de coeficientes convectivos



Fonte: própria, 2022

Figura 46 – Gráfico de  $Q_H$  com combinação de coeficientes convectivos

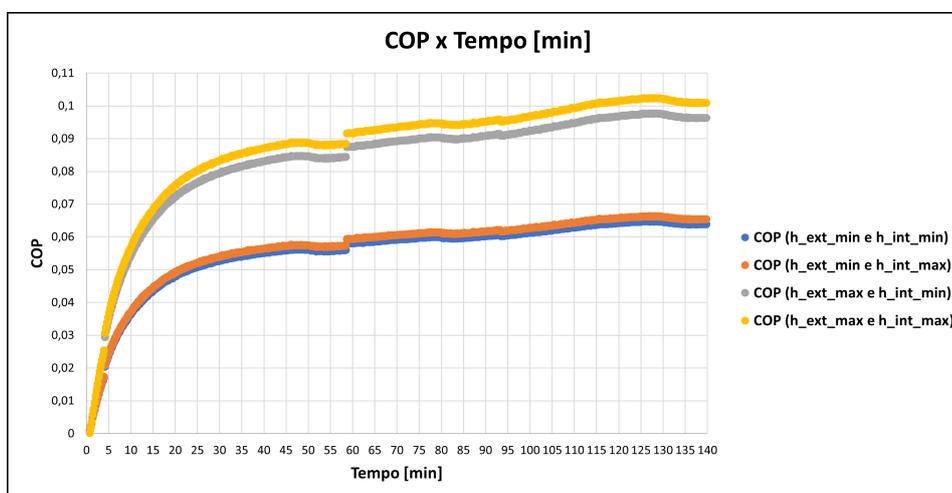


Fonte: própria, 2022

Após os resultados acima, é possível observar que o calor que está entrando na caixa e o que está sendo removido desta são menores em relação ao primeiro estudo de caso. Logo, compreende-se que, para temperaturas ambiente mais baixas as curvas de temperatura e de calor são mais suavizadas, gastando menos energia para vencer a carga térmica imposta.

Dessa forma, com a apresentação do gráfico da figura 47 abaixo ( $COP$  do sistema termoelétrico em relação a comparação dos coeficientes convectivos) é possível confirmar a informação supracitada pois os valores de  $COP$  são menores. Ou seja, para vencer a carga térmica, será preciso uma performance menor, economizando energia termoelétrica.

Figura 47 – Gráfico de  $COP$  com combinação de coeficientes convectivos



Fonte: própria, 2022

## 5.2 Estudos de Caso utilizando o mecanismo de controle PID

Para os estudos de caso com controle PID de temperatura, foi utilizada a placa protótipo unida a programação em Arduino descritas no item 4.3 do presente trabalho. Dessa forma, o sensor DS18B20 devidamente calibrado também foi responsável pela leitura das temperaturas e a programação trouxe outras variáveis ao problema que serviram de base para um controle de temperatura fidedigno. Dentre essas variáveis, destacam-se as ganhos  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ . Dessa forma, nesse segundo momento, a intenção foi realizar estudos de caso em que houvesse interação do usuário com o equipamento protótipo. Logo, foram obtidas curvas de resfriamento com estabilização da temperatura interna da caixa na temperatura de set point fornecida pelo usuário. Além disso, buscou-se compreender o comportamento da tensão fornecida à célula peltier bem como foram realizadas as análises numéricas que avaliam a transferência de calor com os dados obtidos nos experimentos dos estudos de caso, obedecendo o procedimento relatado item 4.4 acima.

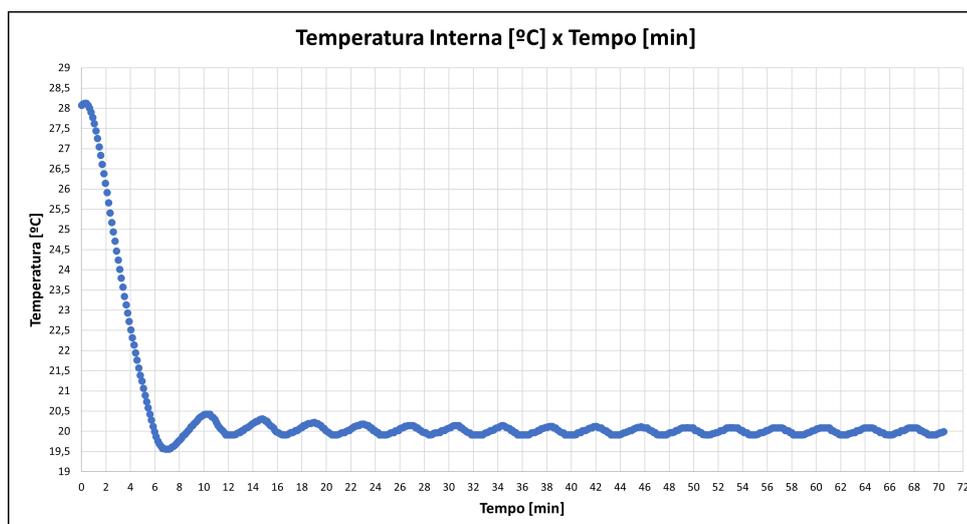
Dessa forma, seguem abaixo 3 (três) estudos de caso distintos realizados bem como suas curvas de resfriamento e análises termodinâmicas.

### 5.2.1 Estudo de Caso 1 – Com Controle

O estudo de caso em questão foi realizada a uma temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) de  $28^{\circ}\text{C}$ , onde a caixa esteve na mesma condição dos estudo de caso sem controle: apoiada sobre uma mesa de madeira cujo tampo possui 15mm de espessura. Dessa forma, o usuário iniciou o experimento inserindo na programação uma temperatura de set point no valor de  $20^{\circ}\text{C}$ . Com isso, referido estudo de caso foi iniciado com a temperatura do interior da caixa  $T_{inicial}$  saindo de  $28,07^{\circ}\text{C}$  para a temperatura da estabilização no valor do set point. Portanto, a duração total ( $t_{total}$ ) deste experimento foi de, aproximadamente, 71 minutos, que representa 1 hora e 11 minutos.

Ainda acerca deste estudo de caso, foi escolhido não permitir que a célula desligue por completo, mas opere em um valor de tensão suficiente para manter a temperatura do set point. Assim, segue abaixo o gráfico que apresenta a curva de resfriamento obtida.

Figura 48 – Curva de Resfriamento 1 com controle de temperatura



Fonte: própria, 2022

Após a obtenção da curva de resfriamento acima, percebe-se que a temperatura possui leve oscilação na região de seu set point. Essa oscilação é natural em virtude do erro em regime permanente associado ao controle PID. Logo, a faixa de tolerância admitida pelo autor para considerar um controle satisfatório foi de  $0,5^{\circ}\text{C}$  para mais e para menos, que é a tolerância do sensor DS18B20. Dessa forma, a temperatura aceitável seria entre  $19,5^{\circ}\text{C}$  e  $20,5^{\circ}\text{C}$  para o experimento em questão. Assim, foram atingidas na estabilização da temperatura o valor mínimo ( $T_{estab_{min}}$ ) de  $19,91^{\circ}\text{C}$  e máximo ( $T_{estab_{mx}}$ )  $20,08^{\circ}\text{C}$ , o que trouxe aceitação de ocorrência de um controle de temperatura. Dessa forma, apresenta-se abaixo a tabela resumo dos dados supracitados.

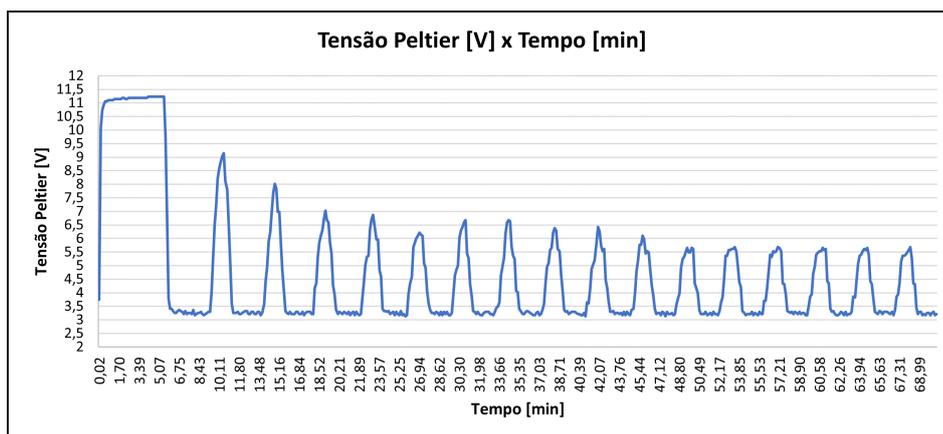
Tabela 8 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 1 Com Controle

Dado	Valor
$T_{amb}$	$28^{\circ}\text{C}$
$T_{inicial}$	$28,07^{\circ}\text{C}$
$T_{setpoint}$	$20^{\circ}\text{C}$
$T_{estab_{max}}$	$20,08^{\circ}\text{C}$
$T_{estab_{min}}$	$19,91^{\circ}\text{C}$
$t_{total}$	$71min$

Fonte: própria, 2022

Com isso, foi possível analisar graficamente a variação de tensão ocorrida em cada ponto do estudo de caso em questão onde o valor máximo de tensão e corrente obedeceram a limitação da fonte utilizada, como informado no item 4.1 do referido trabalho. Assim, segue abaixo o gráfico da figura 49 que mostra a dinâmica da tensão durante o experimento.

Figura 49 – Dinâmica da tensão no controle de temperatura do estudo de caso 1



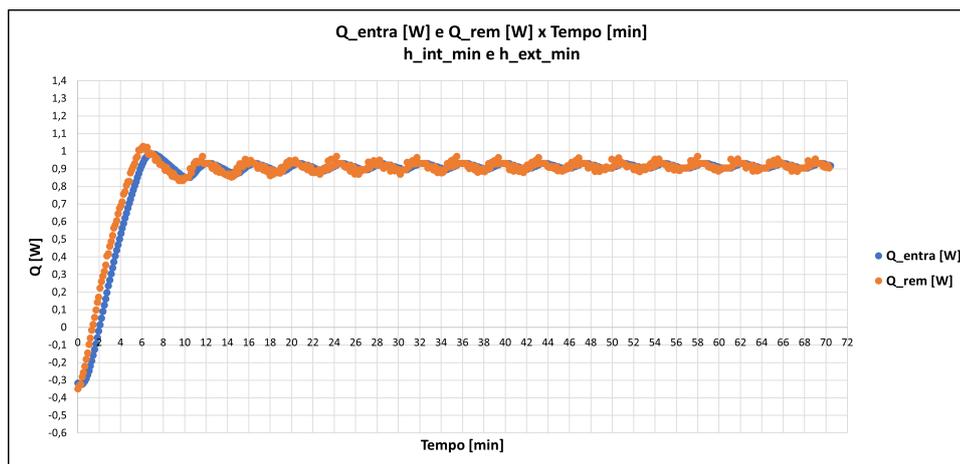
Fonte: própria, 2022

Analisando o gráfico apresentado acima, percebe-se que a tensão tem seu pico no início do experimento, quando a placa protótipo é energizada. Após isso, a tensão é mantida no seu valor máximo atingido: 11,23 V. Nesse momento, o objetivo é usar o máximo de potência para retirar calor do interior da caixa para atingir o set point de forma mais rápida. Nesse momento, a ação do controle proporcional atua praticamente sozinha, buscando se aproximar do set point. Quando a temperatura medida se aproxima da temperatura do set point de 20°C, a ação do controle integral começa a atuar com intuito de suavizar a ação do controle proporcional, tornando o controle mais preciso. Assim, na referida pesquisa, essa ação atua quando a temperatura interna da caixa fica na faixa de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  em relação ao set point. Por fim, a ação do controle derivativo atua para minimizar o erro integral e diminuir a oscilação em torno do set point. Assim, percebe-se que, nesse caso, a tensão cai progressivamente até seu valor de 3,17 V, permanecendo nesse valor até o momento em que a temperatura estiver abaixo do set point. Quando a temperatura volta a subir, a tensão aumenta um pouco de forma progressiva, elevando assim a potência da célula, até atingir um valor controlado de tensão, que está abaixo dos 100% fornecido. Isso faz com que a temperatura volte gradativamente ao set point. E assim, o controle vai sendo realizado, sem oscilações bruscas de tensão à célula.

Posteriormente a esta avaliação, buscou-se realizar a análise numérica dos calores envolvidos no processo de resfriamento da caixa protótipo. Assim, utilizou-se os mesmos valores de resistência térmica apresentados no item 5.1.1, visto que a

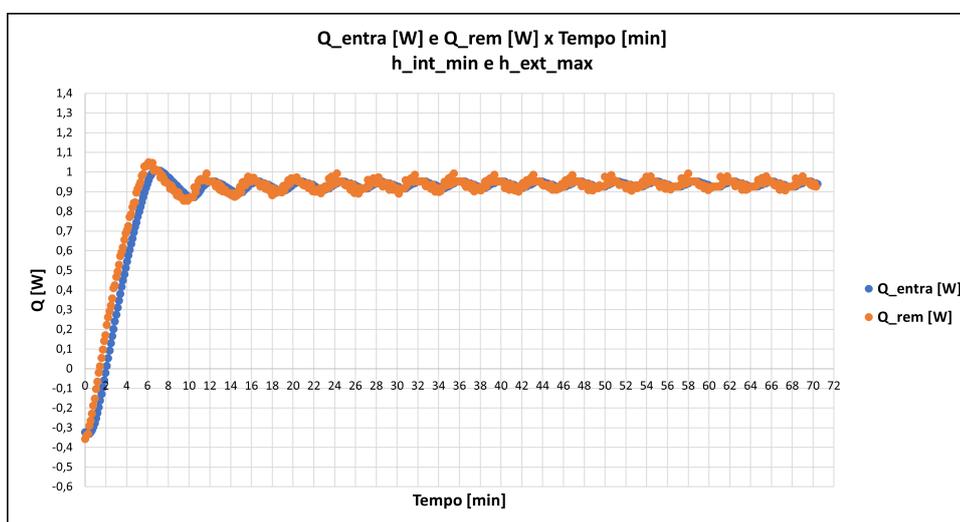
caixa permanece a mesma. A única diferença apontada foi a modificação do tempo de resposta entre as medições que baixou para o valor de 7 (sete) segundos. Logo, foi possível obter as curvas de comparação do calor que entra e do calor removido através do sistema termoeletrico, fazendo uso das temperaturas do experimento atual. Assim, as referidas curvas são demonstradas nos gráficos das figuras 50, 51, 52 e 53 abaixo e utilizam de combinação de coeficientes convectivos internos e externos.

Figura 50 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{min}}$

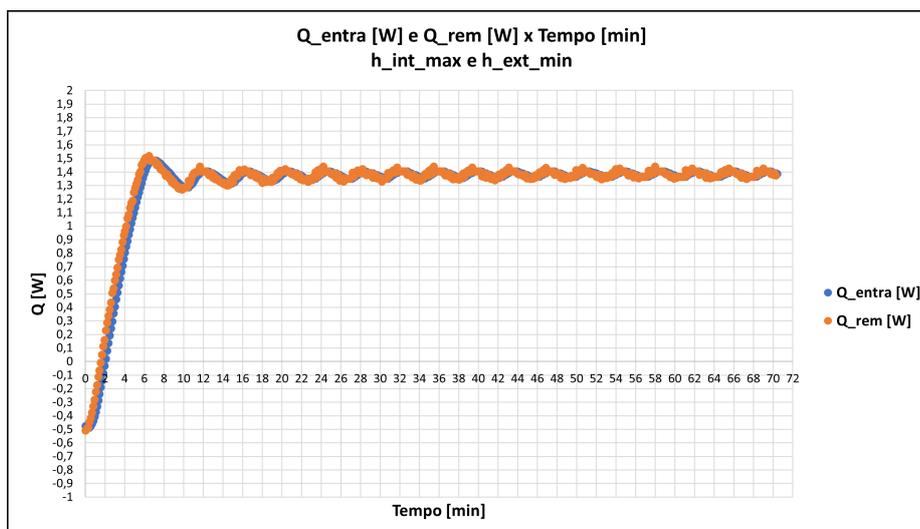


Fonte: própria, 2022

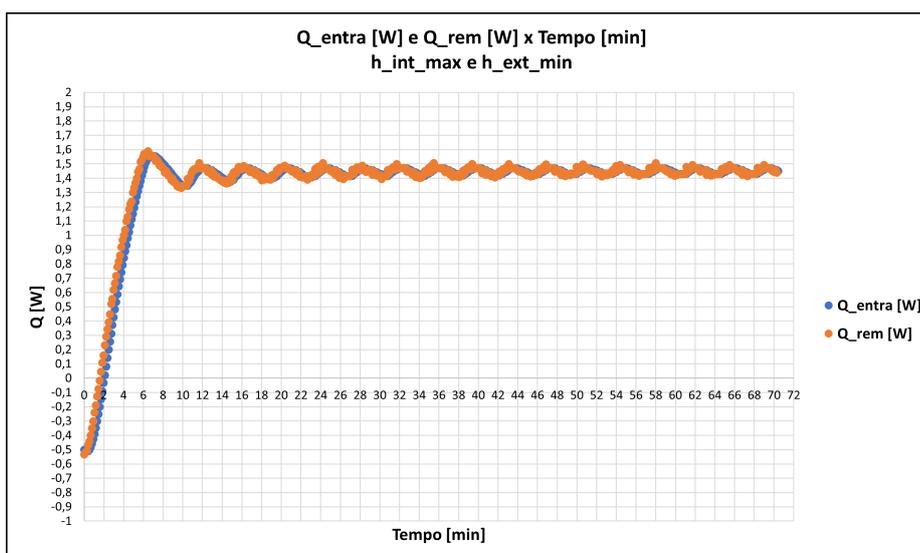
Figura 51 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{min}}$



Fonte: própria, 2022

Figura 52 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{max}}$ 

Fonte: própria, 2022

Figura 53 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{max}}$ 

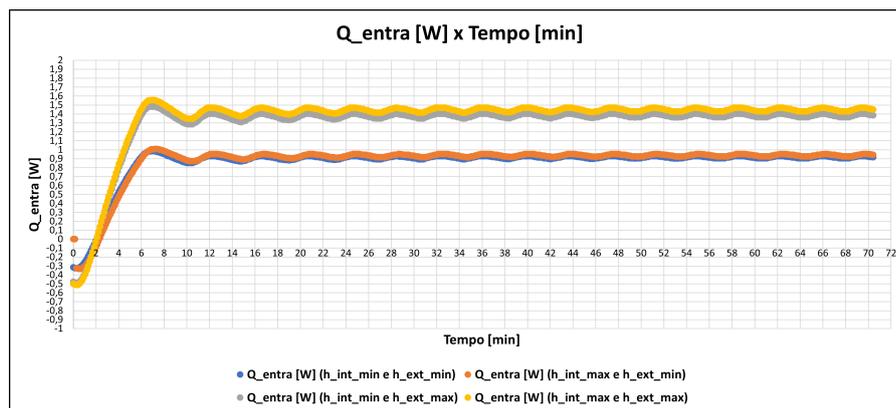
Fonte: própria, 2022

Analisando os gráficos apresentados acima, percebeu-se que o calor removido é um pouco maior que o calor que entra durante atuação da ação do controle proporcional, que representa atuação de 100% do ciclo de trabalho, como informado anteriormente nessa seção da monografia. Entretanto, quando o controle integral e derivativo começam a atuar em conjunto ao controle proporcional, foi perceptível que o calor removido praticamente equalizou-se com o calor que entra. Logo, houve a compreensão que a dinâmica de bombeamento de calor obedece a curva de resfriamento apresentada, controlada pelo mecanismo de controle aplicado.

Em seguida, apresentam-se os gráficos das figuras 54 e 55 abaixo, onde é notório

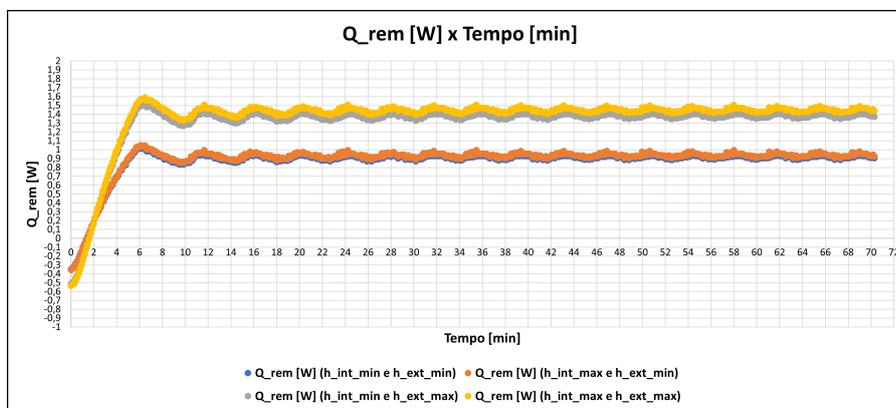
que, com o aumento do coeficiente convectivo externo, o calor que entra assume valores mais elevados. Dessa forma, foi compreendido que o sistema termoelétrico, bem como o mecanismo de controle, será mais exigido. Assim, a ação do controle proporcional atuará por mais tempo até a temperatura chegar em níveis de acionar as demais ações na programação. Em consequência disso, o consumo energético será mais elevado visto que o PWM atuará com 100% do ciclo de trabalho por mais tempo.

Figura 54 – Gráfico de  $Q_{entra}$  com combinação de coeficientes convectivos



Fonte: própria, 2022

Figura 55 – Gráfico de  $Q_{rem}$  com combinação de coeficientes convectivos



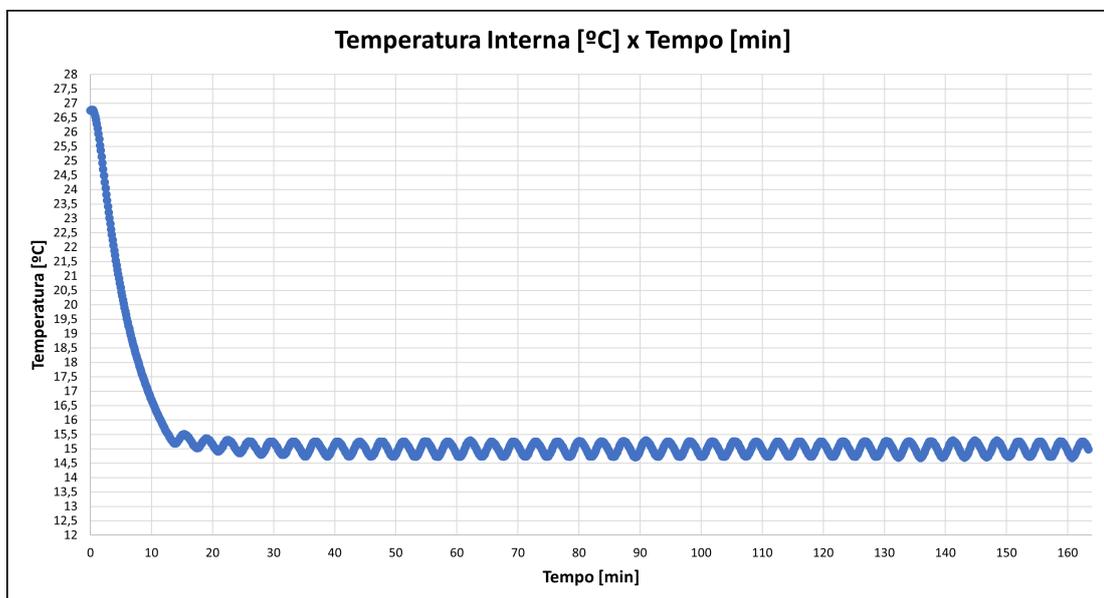
Fonte: própria, 2022

### 5.2.2 Estudo de Caso 2 – Com Controle

O referido estudo de caso foi realizado a uma temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) de 27°C nas mesmas condições do item anterior. Com isso, o valor de set point de temperatura ( $T_{setpoint}$ ) inserido na programação pelo usuário foi de 15°C. A partir dessa informação, o então estudo de caso foi iniciado onde a temperatura do interior da caixa ( $T_{inicial}$ ) saiu de 26,75°C para a temperatura da estabilização no valor do set point. Dessa forma, o experimento teve aproximadamente 164 minutos de duração, o que representa o tempo de 2 horas e 44 minutos.

Com as informações acima e utilizando a mesma faixa do ciclo de trabalho do pino PWM do item anterior, segue o gráfico abaixo que apresenta a curva de resfriamento obtida.

Figura 56 – Curva de Resfriamento 2 com controle de temperatura



Fonte: própria, 2022

Após a obtenção da curva de resfriamento demonstrada no gráfico acima, percebeu-se que a temperatura também apresentou leve oscilação na região do set point. Assim como no item anterior, a oscilação apresentada é intrínseca ao processo de controle PID. De igual forma, erro aceitável pelo autor foi de  $0,5^{\circ}\text{C}$  para mais e para menos. Assim, a temperatura aceitável no referido experimento ficou entre  $14,5^{\circ}\text{C}$  e  $15,5^{\circ}\text{C}$ . Assim, foram atingidas na estabilização da temperatura o valor mínimo ( $T_{estab_{min}}$ ) de  $14,73^{\circ}\text{C}$  e máximo ( $T_{estab_{max}}$ )  $15,25^{\circ}\text{C}$ .

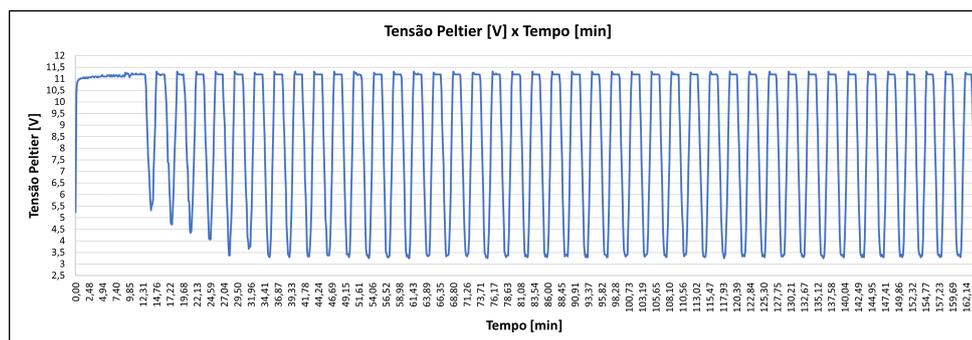
Com isso, a variação de tensão ocorrida em cada ponto do referido estudo de caso pôde ser analisada de forma gráfica da mesma forma que no item anterior. Assim, segue abaixo o gráfico da figura 57 que mostra a dinâmica da tensão durante o experimento e a tabela com o resumo dos dados supracitados.

Tabela 9 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 2 Com Controle

Dado	Valor
$T_{amb}$	$27^{\circ}C$
$T_{inicial}$	$28,07^{\circ}C$
$T_{setpoint}$	$15^{\circ}C$
$T_{estab_{max}}$	$15,25^{\circ}C$
$T_{estab_{min}}$	$14,73^{\circ}C$
$t_{total}$	$164min$

Fonte: própria, 2022

Figura 57 – Dinâmica da tensão no controle de temperatura do estudo de caso 2



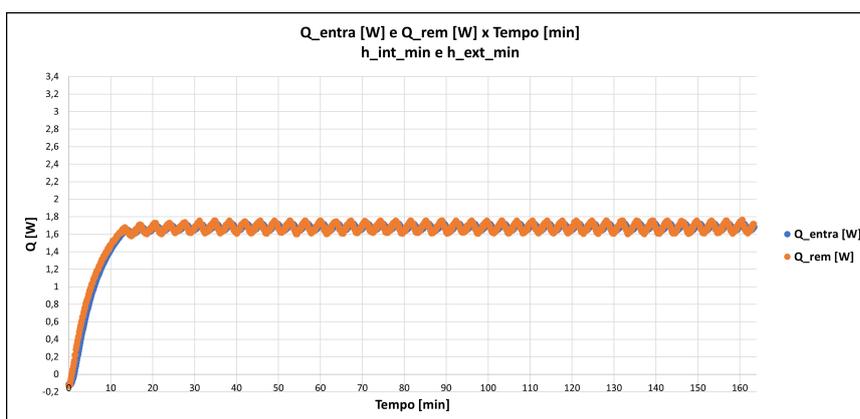
Fonte: própria, 2022

Com o gráfico acima, percebeu-se que a tensão segue o padrão apresentado no experimento anterior, quando seu pico se apresenta no início do experimento, quando a placa protótipo é energizada. Após isso, a tensão é mantida no seu valor máximo atingido: 11,15 V. Nessa fase do estudo de caso, o valor de 100% da tensão foi utilizado para atingir o set point de forma mais rápida. Dessa forma, a dinâmica das tensões obedecem ao experimento anterior. Após isso, a tensão progressivamente oscilou entre os valores máximo e mínimo para manter a temperatura controlada. Ou seja, quando a temperatura era registrada abaixo do set point, a tensão ficava no mínimo. Já quando a temperatura voltava a subir, a tensão aumenta de forma progressiva, elevando assim a potência da célula, até atingir os 100%, trazendo a temperatura de volta ao set point. E assim, o controle foi sendo realizado, sem oscilações bruscas de tensão à célula. Apesar disso, as oscilações entre os valores máximo e mínimo de tensão fazem com que o consumo energético seja mais elevado.

Em seguida, realizou-se a análise numérica dos calores que entram e são removidos da caixa protótipo. Assim, utilizou-se os mesmos valores de resistência térmica e tempo entre medições do estudo de caso anterior. Logo, foram obtidas as curvas de comparação dos calores envolvidos através do sistema termoeletrico, utilizando as temperaturas do atual experimento. Assim, apresentam-se os gráficos 58, 59, 60 e 61 abaixo que utilizam de combinação de coeficientes convectivos internos e externos.

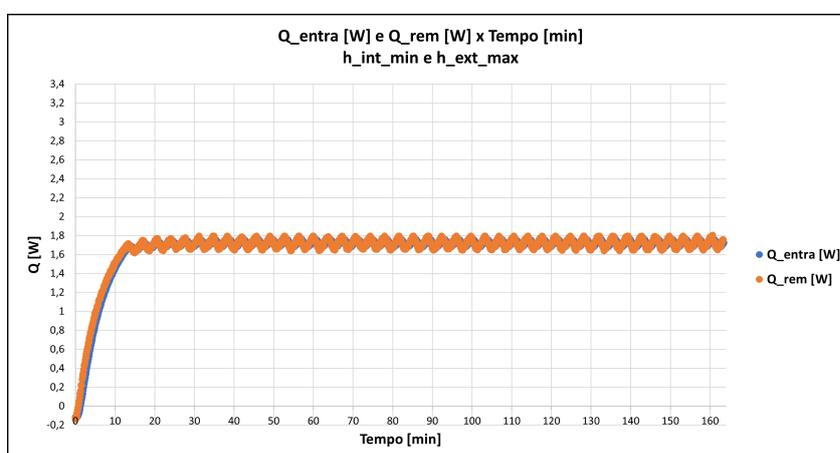
Com os referidos gráficos apresentados, foi possível perceber que o calor removido é um pouco maior que o calor que entra durante atuação dos 100% da tensão. Quando  $T_{atual}$  se aproxima de  $T_{setpoint}$ , tal calor praticamente foi equalizado ao calor que entra. Porém, nesse caso, percebe-se que o fato de a tensão ter bastante oscilação para manter o controle aceitável, vide gráfico da figura da dinâmica de tensão acima, o calor também sofre variações a cada ponto de temperatura registrado. Apesar disso, a dinâmica de bombeamento de calor ocorreu de forma adequada para cumprir o papel de controle designado ao sistema termoeletrico.

Figura 58 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{min}}$



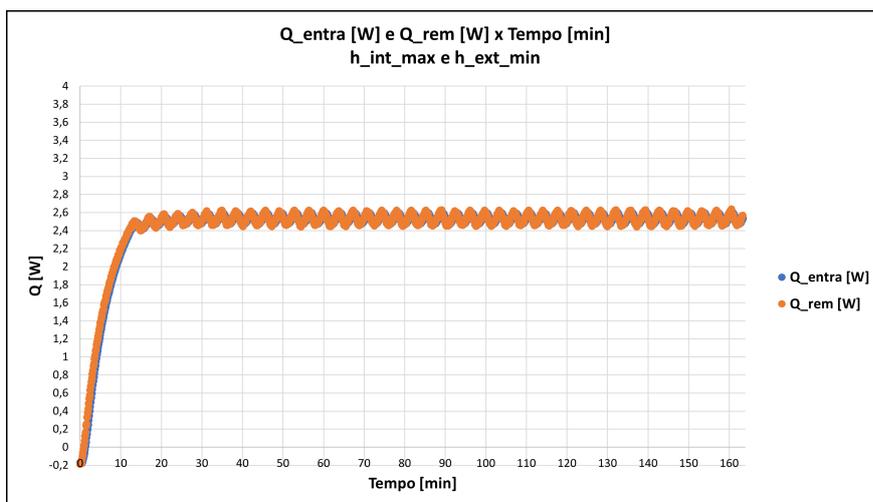
Fonte: própria, 2022

Figura 59 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{min}}$



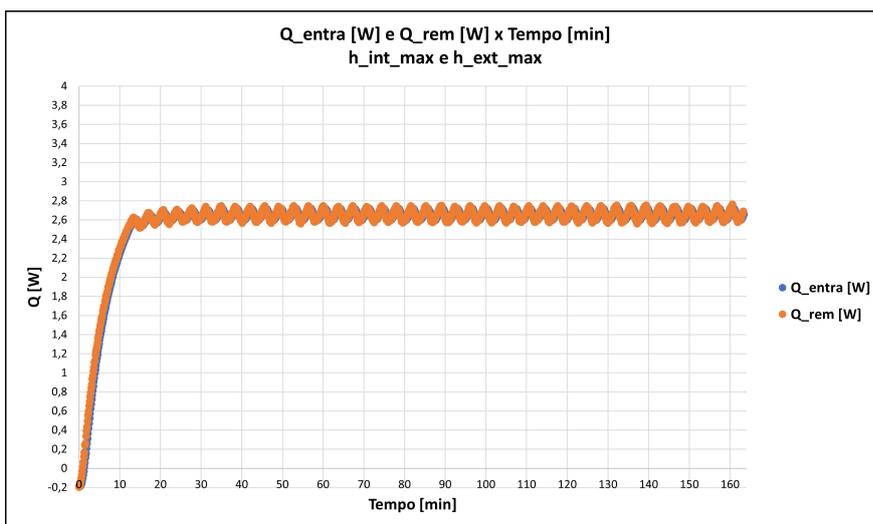
Fonte: própria, 2022

Figura 60 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{max}}$



Fonte: própria, 2022

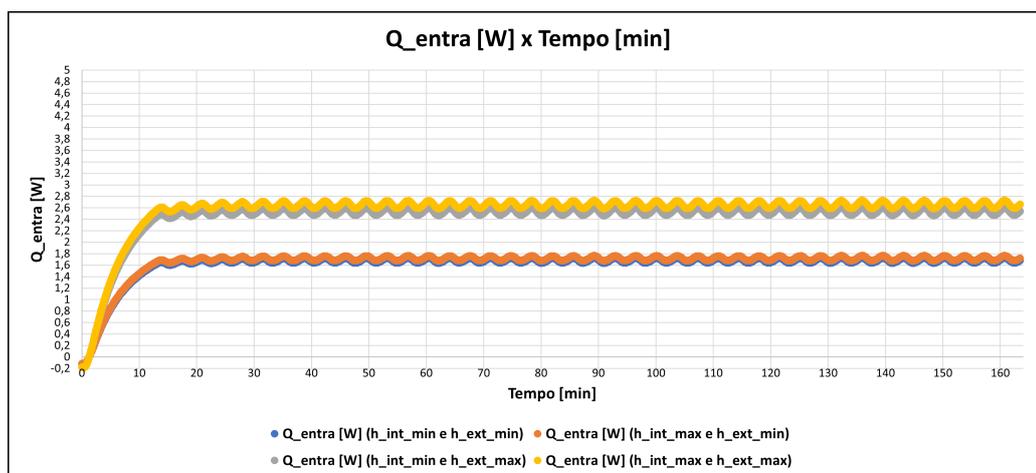
Figura 61 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{max}}$



Fonte: própria, 2022

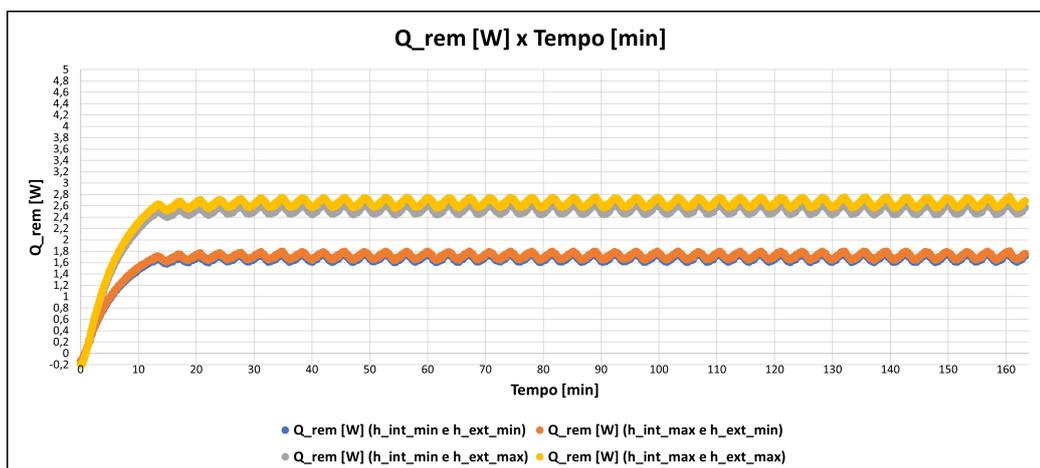
Em seguida, os gráficos das figuras 62 e 63 abaixo são apresentados e é evidente que, mais uma vez, o aumento do coeficiente convectivo externo faz com que o calor que entra assuma valores mais altos. Dessa forma, o sistema termoelétrico e seu mecanismo de controle serão mais requisitados. Logo, o controle proporcional atuará por um tempo mais longo, aumentando o consumo energético em razão da utilização de 100% do ciclo de trabalho por mais tempo.

Figura 62 – Gráfico de  $Q_C$  com combinação de coeficientes convectivos



Fonte: própria, 2022

Figura 63 – Gráfico de  $Q_H$  com combinação de coeficientes convectivos



Fonte: própria, 2022

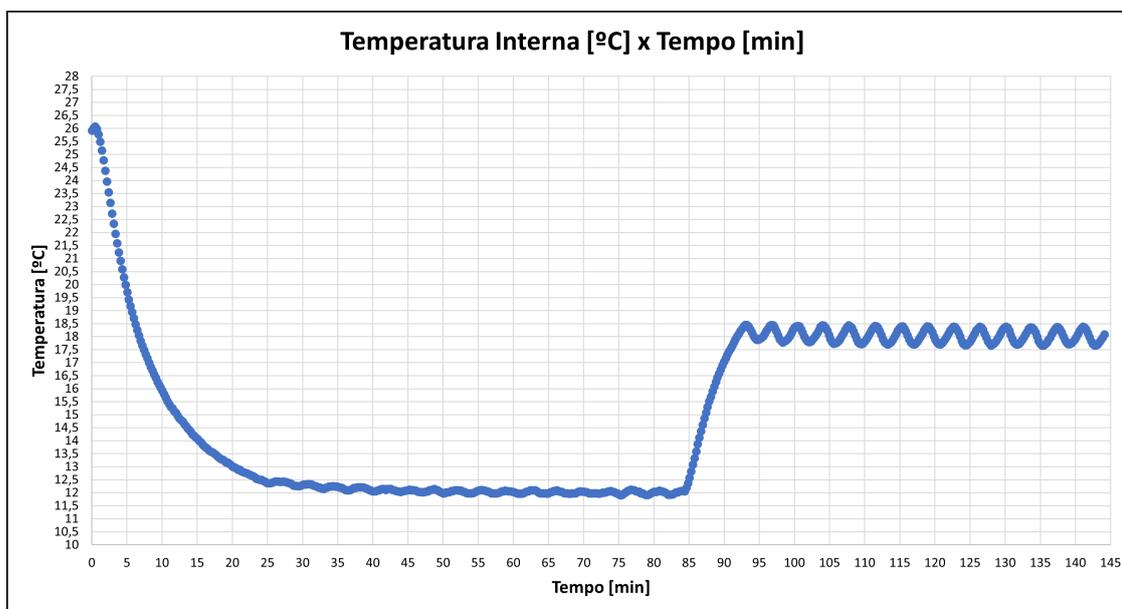
### 5.2.3 Estudo de Caso 3 – Com Controle

No estudo de caso 3, foi registrada a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) de  $27^{\circ}\text{C}$  e utilizou-se as mesmas condições do item 5.2.1. Assim, foi inserido pelo usuário na programação uma temperatura de set point ( $T_{setpoint_1}$ ) no valor de  $12^{\circ}\text{C}$ . Entretanto, ao chegar na condição de estabilização de temperatura, o mesmo usuário modificou o set point ( $T_{setpoint_2}$ ) para o valor de  $18^{\circ}\text{C}$ . Essa atitude buscou simular uma situação real, onde o usuário consegue modificar a temperatura de set point do equipamento que está com sua temperatura já controlada. Assim, o controle PID necessita atuar, acionando o sistema termoeletrico, para sair de sua situação de controle para uma nova situação de controle.

Dessa forma, o estudo de caso foi iniciado com a temperatura do interior da caixa ( $T_{inicial}$ ) saindo de  $25,92^{\circ}\text{C}$  para a temperatura da estabilização de  $12^{\circ}\text{C}$ , com um tempo

de, aproximadamente, 85 min (1 hora e 25 minutos). Ao modificar o valor do set point para 18°C, o experimento do referido estudo de caso teve duração de mais 60 minutos. Com isso, tal experimento teve, aproximadamente, o tempo de duração de 2 horas e 25 minutos.

Figura 64 – Curva de Resfriamento 3 com controle de temperatura



Fonte: própria, 2022

Com isso, para o set point de 12°C, foi atingido na estabilização da temperatura o valor mínimo ( $T_{estab1_{min}}$ ) de 11,96°C e máximo ( $T_{estab1_{max}}$ ) 12,09°C, havendo aceitação de ocorrência de um controle de temperatura aceitável, com destaque para um erro muito baixo, o que caracteriza um ótimo controle.

Adotando as mesmas premissas do parágrafo anterior, o controle PID estabilizou a nova temperatura de set point (18°C) no valor mínimo ( $T_{estab2_{min}}$ ) de 17,71°C e no valor máximo ( $T_{estab2_{max}}$ ) de 18,38°C. Assim, também houve aceitação do controle aplicado para o referido set point, visto que tal temperatura encontrou-se dentro da faixa aceitável pelo autor.

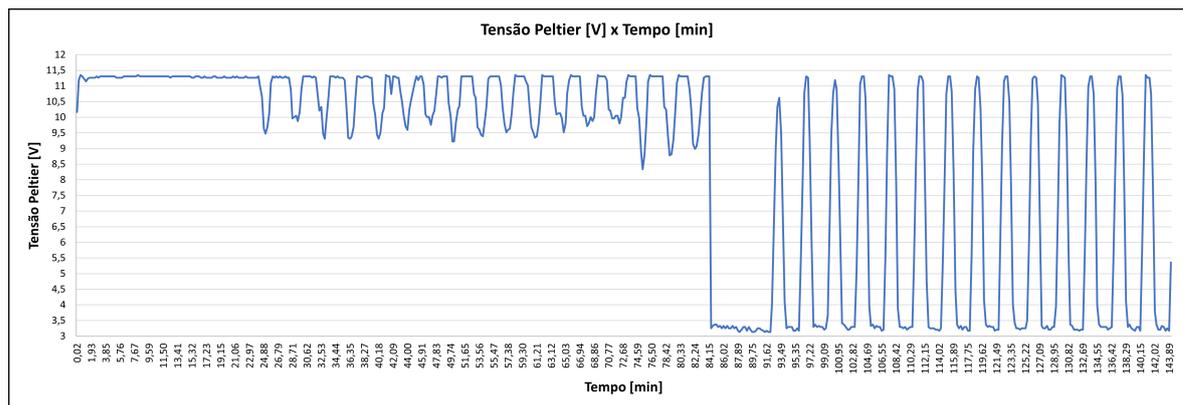
Dessa forma, com a curva desenvolvida no resfriamento da caixa protótipo, é notória a compreensão que existe uma variação de tensão em cada ponto da experientno realizado que pôde ser analisada de forma gráfica como nos itens anteriores. Assim, segue abaixo o gráfico da figura 65 que mostra a dinâmica da tensão durante o estudo de caso, bem como a tabela resumo dos dados supracitados.

Tabela 10 – Resumo - Dados do Estudo de Caso 3 Com Controle

Dado	Valor
$T_{amb}$	$27^{\circ}C$
$T_{inicial}$	$25,92^{\circ}C$
$T_{setpoint_1}$	$12^{\circ}C$
$T_{setpoint_2}$	$18^{\circ}C$
$T_{estab1_{max}}$	$12,09^{\circ}C$
$T_{estab1_{min}}$	$11,96^{\circ}C$
$T_{estab2_{max}}$	$18,38^{\circ}C$
$T_{estab2_{min}}$	$17,71^{\circ}C$
$t_{setpoint_1}$	$85min$
$t_{setpoint_2}$ <td $60min$	

Fonte: própria, 2022

Figura 65 – Dinâmica da tensão no controle de temperatura do estudo de caso 3



Fonte: própria, 2022

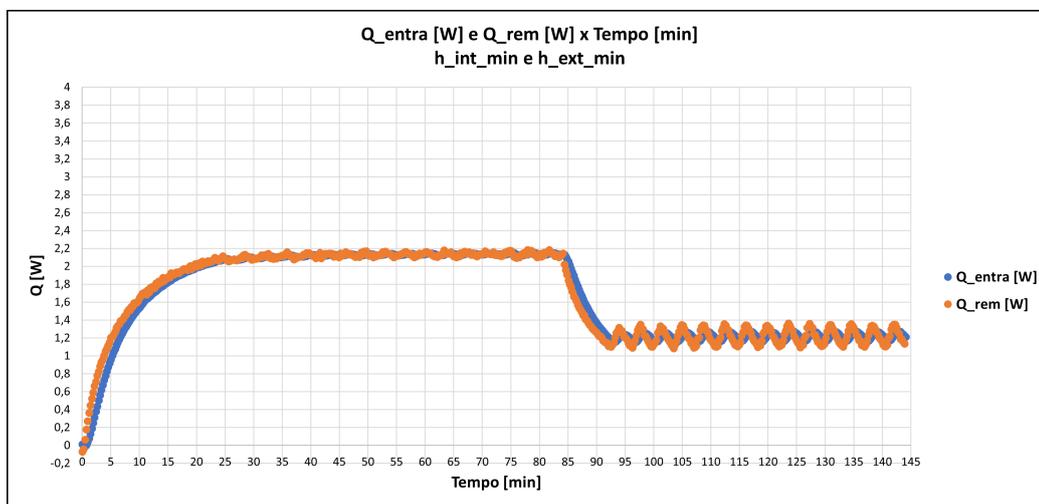
Com o gráfico demonstrado acima, percebeu-se que a tensão tem seu pico no início do experimento, quando a placa protótipo é energizada, assim como nos dois últimos itens. Logo, a tensão atinge o valor máximo de 11,31 V e se mantém nesse valor com intuito de se aproximar mais rápido da temperatura de set point de  $12^{\circ}C$ , atuando com 100% da tensão fornecida. Entretanto, percebeu-se que, quando  $T_{atual}$  se aproximou de  $T_{setpoint_1}$ , a tensão começou a variar entre valores acima de 8 V e abaixo do valor

máximo atingido. Logo, apesar do controle ter sido bastante efetivo, como mostrado na curva de resfriamento, a tensão da célula peltier sempre esteve em valores elevados. Entretanto, a baixa oscilação da tensão pode trazer uma vida útil maior para o módulo termoelétrico.

Após isso, ao modificar a temperatura de set point para 18°C, a tensão da célula caiu bruscamente para a tensão correspondente ao valor mínimo do ciclo de trabalho do PWM, visto que o valor de temperatura registrado estava muito abaixo do novo set point. Logo, após cerca de 8 minutos, a temperatura chegou ao valor de 18°C, onde a oscilação maior de temperatura acarretou numa maior variação da tensão, atuando praticamente entre valores mínimo e máximo da tensão fornecida pelo PWM em consonância com a programação.

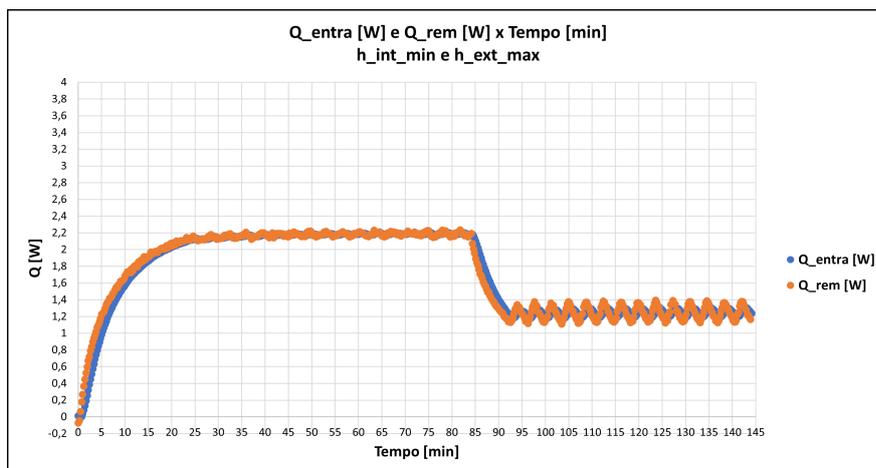
Em seguida, foi analisada a dinâmica de calor da caixa protótipo. Assim, com a utilização dos mesmos valores de resistência térmica e tempo entre medições do estudo de caso anterior, obteve-se curvas comparativas dos calores envolvidos para o atual experimento. Assim, apresentam-se os gráficos das figuras 66, 67, 68 e 69 abaixo que utilizam de combinação de coeficientes convectivos internos e externos.

Figura 66 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{min}}$



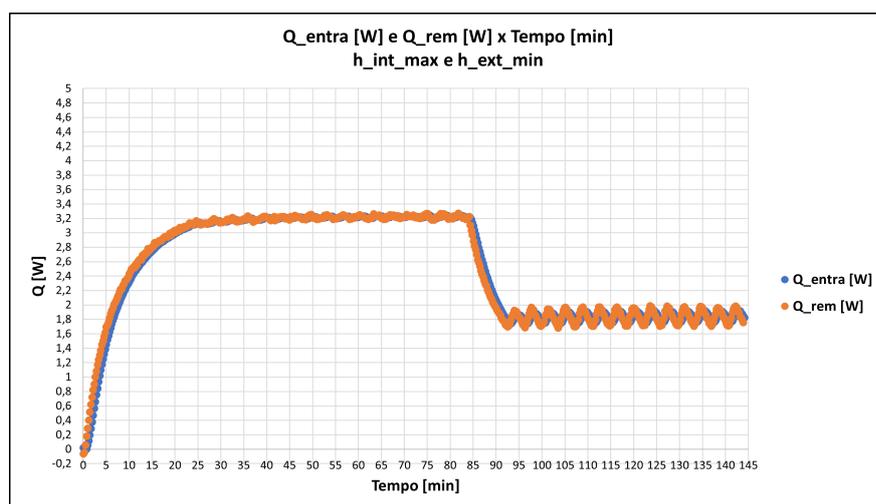
Fonte: própria, 2022

Figura 67 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{min}}$



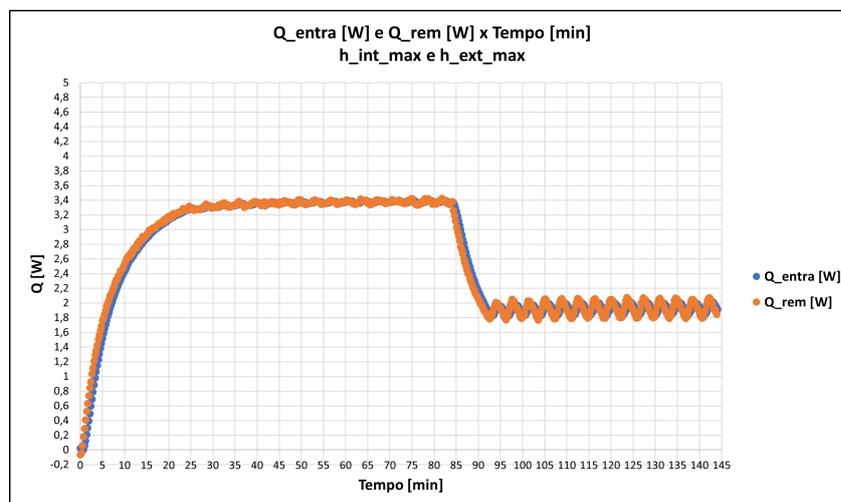
Fonte: própria, 2022

Figura 68 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{min}}$  e  $h_{int_{max}}$



Fonte: própria, 2022

Figura 69 – Gráfico de  $Q_{entra}$  x  $Q_{rem}$  usando  $h_{ext_{max}}$  e  $h_{int_{max}}$



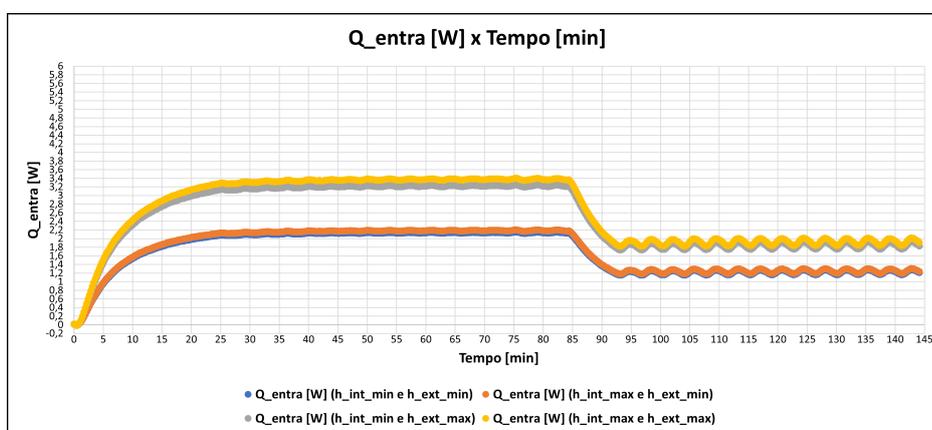
Fonte: própria, 2022

Com a apresentação dos gráficos de calor acima, foi percebido que, no primeiro momento do controle de temperatura, o calor removido é um pouco maior que o calor que entra. Nessa fase, a atuação do controle proporcional é exclusiva, da mesma forma que nos estudos de caso anteriores. Com a queda de temperatura até o set point, a programação acionou a atuação conjunta dos controles integral e derivativo, fazendo com que os referidos calores praticamente sejam iguais e o controle atingido. Entretanto, com a modificação do set point de temperatura para o valor de 18°C, o calor que entra precisou ser maior que o calor removido para atingir tal set point. Nessa fase, a tensão atuou em seu valor mínimo, apenas para manter a célula em funcionamento. Quando o novo set point foi alcançado, os calores envolvidos também foram praticamente equalizados, mantendo o controle.

Porém, como nos casos anteriores, as oscilações na região do set point observadas nos gráficos de calor acima se deveram ao fato da condição natural de erro em regime permanente do mecanismo de controle PID. Apesar disso, a dinâmica de bombeamento de calor aconteceu de forma coerente a curva de resfriamento apresentada, afirmando que o controle de temperatura foi bem executado.

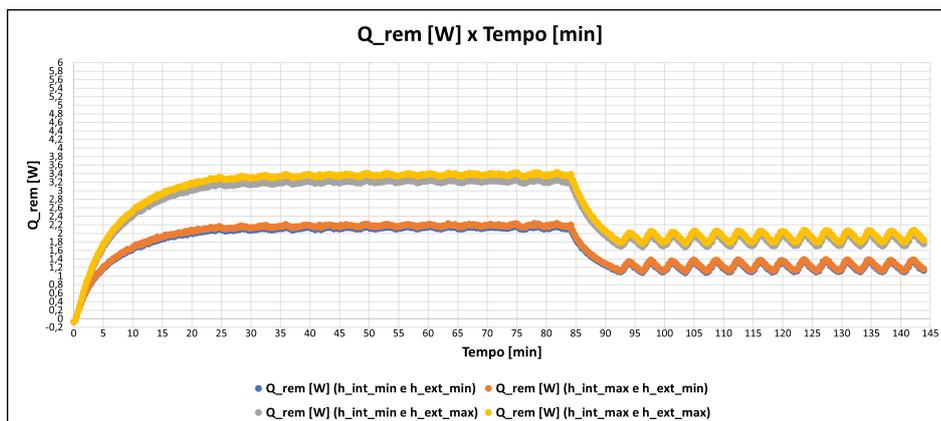
Em seguida, os gráficos das figuras 70 e 71 abaixo demonstram uma comparação dos calores que entra e que é removido da caixa protótipo com base na modificação dos coeficiente convectivos. Assim, é notório observar que, mais uma vez, o aumento do coeficiente convectivo externo faz com que o calor que entra assuma valores mais altos. Dessa forma, 100% da tensão fornecida será acionada por um maior tempo, havendo maior gasto energético e exigindo uma maior performance da célula.

Figura 70 – Gráfico de  $Q_{entra}$  com combinação de coeficientes convectivos



Fonte: própria, 2022

Figura 71 – Gráfico de  $Q_{rem}$  com combinação de coeficientes convectivos



Fonte: própria, 2022

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados resultados a partir do desenvolvimento de uma mini geladeira ou adega termoelétrica que continha um circuito com componentes eletrônicos ligados a placa microcontroladora Arduino capaz de realizar controle PID de temperatura.

Assim, em primeiro lugar, buscou-se realizar a construção de um protótipo do equipamento supracitado capaz de garantir que o calor que entra ( $Q_C$ ) fosse o menor possível. Para isso, o isolamento térmico citado no item 4.1 do referido trabalho conseguiu cumprir seu papel, pois criou maior resistência térmica para entrada de calor. Além disso, buscou-se que o conjunto célula peltier, dissipadores e coolers estivessem bem ajustados entre si e posicionados a ponto de não ter frestas com a caixa para entrada de calor. Logo, com essas garantias, o conjunto em questão não registrou intercorrências, trabalhando adequadamente durante todos estudos de caso realizados.

Com o protótipo finalizado, foi possível dar início ao monitoramento da temperatura por meio do sensor DS18B20, fazendo uso da placa Arduino para registro de tal grandeza física. Assim, foi possível cumprir este objetivo pois o sensor funcionou durante todos os experimentos sem intercorrências e forneceu dados fidedignos, visto que o referido sensor foi devidamente calibrado. Além disso, todas as temperaturas foram captadas e impressas em tela pelo software Arduino no momento da experimentos dos estudos de caso. Logo, foi possível acompanhar em tempo real qual a medida de temperatura do ambiente refrigerado estudado.

Com o final dos experimentos sempre era permitido ao autor o transporte dos registros de temperatura para o software Excel, a fim de realizar uma planilha. Entretanto, para que fossem plotadas curvas de resfriamento, foi contemplado na programação o registro do tempo de cada medição realizada. Logo, foi possível apresentar gráficos com curvas exponenciais decrescentes que demonstraram o comportamento da temperatura no ambiente interno da caixa protótipo durante todo o período de tempo simulado. Dessa forma, foi possível concluir que a célula peltier cumpriu seu papel de realizar resfriamento até atingir seu regime permanente sem utilização de mecanismos de controle de temperatura.

Após os estudo de caso sem controle, foi montada uma placa eletrônica protótipo com componentes eletrônicos básicos, onde o houve o auxílio inicial do software Proteus para realizar seu funcionamento de forma prévia. Com isso, foi possível che-

gar a um modelo simples e de fácil montagem e programação utilizando o Arduino. Dessa forma, a programação foi realizada obedecendo os princípios matemáticos do controle PID bem como comandos para os componentes eletrônicos cumprirem tal controle. Logo, foi possível usar o sinal PWM para modular a potência da célula peltier que, conseqüentemente, aumentava ou diminuía a temperatura, realizando assim um controle.

Com o controle realizado, foi possível obter novas curvas de temperatura por meio de novos estudo de caso, variando o dado inserido pelo usuário que foi a temperatura de setpoint. Logo, visualizou-se que o controle obedeceu a programação e o circuito da placa protótipo, fazendo com que a temperatura de setpoint fosse sempre obedecida. Entretanto, sempre pode ser observado nos mecanismos de controle que existe um erro em regime permanente associado e, no caso da referida pesquisa, não foi diferente. Entretanto, o autor estipulou um erro de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  como aceitável e todos os estudos de caso realizados se enquadraram nessa premissa. Além disso, houve a coleta da tensão em cada medição de temperatura registrada, visto tal dado tornou-se variável, diferentemente dos estudos de caso sem controle onde este permanecia constante no seu fornecimento máximo. Dessa forma, verificou-se que o sistema de controle empregado pode fornecer ao usuário melhor desempenho de consumo energético, bem como se adequar a sua necessidade de temperatura.

Após os referidos estudo de caso acima, foi realizado um estudo termodinâmico acerca dos estudos de caso com e sem controle de temperatura. Dessa forma, foi visualizado que os calores envolvidos eram o calor que entra  $Q_{entra}$  e o calor removido  $Q_{rem}$ . Assim foi observado em todos os estudos de caso que o calor que foi removido sempre era um pouco maior que o calor que entra, caracterizando um resfriamento. Entretanto, ao atingir uma estabilização de temperatura, os calores se igulavam e mantinham a temperatura da caixa. Porém, ao perturbar o sistema com aumento da temperatura do setpoint, visualizou-se que a tensão foi mantida no seu valor mínimo e o calor que entra foi maior até o ponto dos calores serem equalizados e manter a temperatura controlada. Assim, é possível inferir que o protótipo consegue acompanhar a dinâmica de calor (retirada ou adição de calor) para manter a temperatura controlada.

Logo, conclui-se que o objetivo do trabalho foi cumprido, visto que, tanto experimentalmente quanto numericamente, a caixa protótipo teve seu resfriamento realizado, com temperatura controlada, monitoramento de tensão e bombeamento de calor adequado a cada estudo de caso testado. Apesar disso, sugere-se melhorias no trabalho como o aumento da instrumentação do sistema estudado para captar mais informações e tornar a pesquisa mais precisa, a confecção de uma placa de circuito impresso em

substituição à placa protótipo apresentada, a instalação de uma bateria 9V com plug P4 para alimentação da placa Arduino e uma bateria 12V para ligação da célula peltier, com fins de deixar o equipamento volante e a instalação de um IHM para o usuário selecionar sua temperatura de setpoint sem uso de computador e sem acesso à programação. Dessa forma, garante-se que a pesquisa poderá ter resultados ainda mais satisfatórios.

Como trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- Realizar inserção do conjunto peltier, dissipadores e coolers em uma adega comercial já existente;
- Realizar controle ON-OFF utilizando as mesmas ferramentas do controle PID utilizado nessa pesquisa, a fim de realizar uma comparação entre estes mecanismos de controle;
- Diminuir o erro em regime permanente do controle de temperatura.

Por fim, informa-se que a pesquisa em questão obteve aprovação de abstract no *International Congress of Refrigeration 2023*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROCOOL. Coller. Disponível em: <<https://aerocool.com.br/cooler-fan-darkforce-120-x120-preto-aerocool>>. Acesso em: 01 set 2022;

AQIB, Muhammad. Arduino PWM Tutorial. Disponível em: <<https://create.arduino.cc/projecthub/muhammad-aqib/arduino-pwm-tutorial-ae9d71>>. Acesso em: 30 set 2022;

ARDUINO. The Education Team and Mission. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Education>>. Acesso em: 30 set 2022;

ALVES, Edvaldo de Oliveira. Propriedades Físicas do Semicondutor  $Bi_2Te_3$ . 2007. 131 f. (Mestrado) - UFRN, Natal, 2007;

BLOG PORTAL DA REFRIGERAÇÃO. História da Refrigeração e Ar Condicionado. Disponível em: <<https://www.refrigeracao.net/>>. Acesso em: 10 nov 2019;

CAMARGO, Trajano. Controle de Automação Industrial. Disponível em: <<http://www.trajanocamargo.com.br/>>. Acesso em: 25 nov 2019;

CANUTO, César; BIASOTTO, Tiago. Modelagem e controle de um sistema termoelétrico aplicado à conservação de medicamentos termolábeis. 2018. 68 f. (Monografia) - UFPR, Curitiba, 2018;

CARDIM, Felipe. Estudo via CFD de um sistema de condensação de vapor do ar atmosférico por efeito peltier. 2018. 82 f. (Mestrado) - UFPE, Recife, 2018;

CESAR, Paulo. Controladores PID. Disponível em: <<https://smartiblog.br/controladores-pid/>>. Acesso em: 05 set 2022;

COELHO, Ítalo. O que é um optoacoplador? Disponível em: <<https://smartiblog.br/controladores-pid/>>. Acesso em: 07 ago 2022;

DANVIC. Introdução ao Efeito Peltier. Disponível em: <<http://www.peltier.com.br/>>. Acesso em: 20 set 2022;

DORF, Richard; BISHOP, Robert. Sistemas de Controle Moderno. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2001;

ECIL. Fornos Portáteis de Calibração. Disponível em: <<https://ecil.com.br/instrumentacao/fornos-portateis-de-calibracao/>>. Acesso em: 02 set 2022;

GLOBAL ELETRONICS. Fonte de Alimentação Variável YaXun 30V 5A. Disponível em: <<https://www.globalelectronics.com.br/fonte-alimentacao-variavel-yaxun-ps-305d-30v-5a.html>>. Acesso em: 20 nov 2019;

IBGE. Séries Históricas e Estatísticas. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 10 nov 2019;

INCB. Mosfet. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php>>. Acesso em: 20 nov 2019;

INCROPERA, Frank P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014;

IZIDORO, Cléber L. Desenvolvimento de uma bancada didática para estudos dos efeitos termoelétricos aplicados na engenharia. 2015. 140 f. (Mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 2015;

KHERKHAR, Abdelkrim et al. Thermal investigation of a thermoelectric cooler based on Arduino and PID control approach. Case Studies in Thermal Engineering, China, v. 36, n°102249, 14 p., 2022;

MAESTRELLI, Everlise. Desenvolvimento de um sistema de condicionamento de ar em escala reduzida utilizando módulos termoelétricos. 2015. 85 f. (Mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 2015;

MIRMANTO, M.; SYAHRUL, S.; WIRDAN, Y. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations - Engineering Science and Technology, an International Journal = Indonesia - 21 set 2018 - p. (177-174);

MORAN, Michael J. et al. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013;

NISE, Norman. Engenharia de Sistemas de Controle. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013;

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010;

OKAMURA, Cássio et al. Sistema de refrigeração termoelétrica de peltier usado para arrefecer o processador de computador. Anápolis, volume 2, número 1, p.(1-13), 04 a 06 jun 2018;

OLIVEIRA, Klaudio. Aplicação numérica do desempenho termodinâmico das células termoelétricas. 2014. 144 f. (Mestrado) - UFPR, Curitiba, 2014;

PINHEIRO, José Antonio. Desenvolvimento de um controlador PID para aplicação de uma mesa angular rotativa. 2009. 79 f. (Mestrado) - USP, São Carlos, 2009;

PROTEUS DESIGN SUIT. Versão 8: LabCenter, 2022;

REFRITON. Célula Peltier TEC1-12708. Disponível em: <<https://www.refritron.com.br/bebedouros-e-purificadores/placa-pastilha-peltier-termoeletrica-40x40mm-tec1-12708-eos>>. Acesso em: 12 set 2022;

SANTOS, Paulo Vitor dos. Desenvolvimento de recipiente fechado para condicionamento de produtos termolábeis. 2016. 57 f. (Monografia) - UnB, Brasília, 2016;

SEDRA, Adel; SMITH, Kenneth. Microeletrônica. 5ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007;

SILVA, Carla. Sistema Termoelétrico aplicado ao estudo de efeitos de congelamento e de propriedades térmicas. 2012. 195 f. (Doutorado) - Unicamp, Campinas, 2012;

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. Controle PID de Forma Simples e Descomplicada. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/controle-pid/>>. Acesso em: 20 set 2022;

SLADECEK, Zdenek Slanina M. U. V. Cooling Device with Peltier Element for Medical Applications. IFAC Papers Online. 2018: 51 (pt 6), 6 p.;

THOMSEN, Adilson. Medindo Temperatura debaixo d'água. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino/>>. Acesso em: 20 nov 2022.