



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

WERLY RENAN FERNANDES LUCENA

**CAIXA REFRIGERADORA COM CONTROLE DE TEMPERATURA
IMPLEMENTADO POR ARDUÍNO**

PAU DOS FERROS

2021

WERLY RENAN FERNANDES LUCENA

**CAIXA REFRIGERADORA COM CONTROLE DE TEMPERATURA
IMPLEMENTADO POR ARDUÍNO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal Rural
do Semi-Árido – UFERSA, Centro
Multidisciplinar de Pau dos Ferros –
CMPF, como requisito para a obtenção
do título de Bacharel Interdisciplinar em
Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Sharon Dantas Da
Cunha.

PAU DOS FERROS

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L935c Lucena, Werly.
Caixa refrigeradora com controle de
temperatura implementado por Aduino / Werly
Lucena. - 2021.
49 f. : il.

Orientador: Sharon Cunha.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2021.

1. Célula Peltier. 2. Substâncias termolábeis.
3. Sistema de controle de temperatura. I. Cunha,
Sharon, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 1115

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

WERLY RENAN FERNANDES LUCENA

**CAIXA REFRIGERADORA COM CONTROLE DE TEMPERATURA
IMPLEMENTADO POR ARDUÍNO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Centro Multidisciplinar de Pau dos
Feros – CMPF, como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar
em Ciência e Tecnologia.

DATA DA APROVAÇÃO: 12/11/2021.

BANCA EXAMINADORA

SHARON DANTAS DA
CUNHA:01085089436

Assinado de forma digital por SHARON
DANTAS DA CUNHA:01085089436
Dados: 2021.11.24 05:32:01 -03'00'

Prof.Dr. Sharon Dantas da Cunha – UFERSA
Presidente

GLAYDSON FRANCISCO
BARROS DE

Assinado de forma digital por
GLAYDSON FRANCISCO BARROS
DE OLIVEIRA:64615332300

Prof. Dr. Glaydson Francisco Barros de Oliveira – UFERSA
Examinador

KYTERIA SABINA LOPES
DE
FIGUEREDO:04965705440

Assinado de forma digital por
KYTERIA SABINA LOPES DE
FIGUEREDO:04965705440
Dados: 2021.11.18 15:25:09 -03'00'

Prof.^a. Dr.^a Kytéria Sabina Lopes de Figueredo – UFERSA
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus professores do ensino fundamental ao médio que contribuíram de forma fundamental no meu saber.

Ao meu orientador, professor Sharon Dantas da Cunha por me auxiliar neste trabalho, dedicando seu tempo e conhecimento, incentivando e disposição.

A Deus pelo dom da vida e pelas pessoas incríveis que colocou na minha vida.

Aos meus Amigos e Familiares, principalmente minha mãe, que não mediu esforços para me educar. Expresso aqui, toda a minha gratidão aos meus pais e irmãos, o amor incondicional de vocês me deu forças para concluir esta extraordinária etapa da minha vida.

RESUMO

O transporte de termolábeis, como as vacinas, é de extrema importância para a sociedade. O controle de temperatura nestas substâncias são fundamentais para garantir a integridade do seu funcionamento. Na pandemia do COVID-19, as vacinas desempenham um papel fundamental para sociedade, e inspirado no transporte de vacina, este trabalho desenvolveu um sistema de refrigeração, com controle de temperatura implementado por Arduino cuja comunicação é através de um aplicativo desenvolvido para aparelhos smartphone, que usem sistema Android. Foram realizados cinco testes, e os resultados dos três primeiros mostraram a influência da temperatura externa na temperatura interna, onde foi observado um gradiente de aproximadamente 16 °C, e uma temperatura mínima obtida abaixo de 8 ° C, podendo o protótipo ser uma alternativa de transporte quando a temperatura externa for menor ou igual a 20°C. No quarto teste o sistema alcançou uma temperatura mínima, e as células Peltier foram desligadas, sendo observado um aumento na temperatura, mostrando que as células possuem alto fluxo de calor. No quinto teste foi testado o funcionamento do aplicativo desenvolvido no controle de temperatura, e o erro em relação a temperatura desejada foi relativamente pequeno, atingindo erro máximo de 0,6°C.

Palavras-chave: Refrigeração; Transporte; Armazenamento; Arduino; Células Peltier.

ABSTRACT

Transporting thermolabiles, such as vaccines, is extremely important to society. Temperature control in these substances is essential to ensure the integrity of their functioning. In the COVID-19 pandemic, vaccines play a fundamental role for society, and inspired by the transport of vaccines, this work developed a refrigeration system, with temperature control implemented by Arduino, whose communication is through an application developed for smartphone devices, that use Android system. Five tests were carried out, and the results of the first three showed the influence of the external temperature on the internal temperature, where a gradient of approximately 16 °C was observed, and a minimum temperature obtained below 8 °C, the prototype being an alternative to transport when the outside temperature is less than or equal to 20°C. In the fourth test, the system reached a minimum temperature, and the Peltier cells were turned off, and an increase in temperature was observed, showing that the cells have a high heat flux. In the fifth test, the functioning of the application developed in temperature control was tested, and the error in relation to the desired temperature was relatively small, reaching a maximum error of 0.6°C.

Keywords: Refrigeration. Transport; Storage; Arduino; Peltier cells.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do princípio físico de um termopar	15
Figura 2 - Componentes de uma célula Peltier.....	17
Figura 3 - Junções de uma célula Peltier	17
Figura 4 - Posição dos dissipadores, célula Peltier e coolers	20
Figura 5 - Placa Arduino	22
Figura 6 - Célula Peltier	23
Figura 7 - Dissipadores de calor	24
Figura 8 - Módulo bluetooth HC-05.....	25
Figura 9 - Sensor de temperatura NTC-10K	26
Figura 10 - Módulo relé.....	27
Figura 11 - Esquema de ligação entre os componentes.....	28
Figura 12 - Montagem do sistema	29
Figura 13 - Fluxograma do código Arduino.....	31
Figura 14 - Fluxograma do MIT App Inventor	Erro! Indicador não definido.
Figura 15 - Interface do aplicativo.....	33
Figura 16 - Gráfico para temperatura ambiente de 32°C	35
Figura 17 - Gráfico para temperatura ambiente de 25°C	36
Figura 18 - Gráfico para temperatura ambiente de 20°C	37
Figura 19 - Comparação entre os resultados de temperatura mínima	38
Figura 20 - Aumento da temperatura no quarto teste.	39
Figura 21 - Gráfico da variação da temperatura para 12°C	41

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Quantidade de calor
W	Quantidade de trabalho
E	Quantidade de energia interna
ΔE	Variação da quantidade de energia interna
T	Temperatura
T_I	Temperatura inicial
T_F	Temperatura final
$T_{\max}$	Temperatura máxima
$T_{\min}$	Temperatura mínima
ΔT	Variação de temperatura
ΔV	Variação da tensão elétrica
σ	Condutividade elétrica
Π	Coeficiente Peltier
I	Corrente elétrica
S	Coeficiente Seebek
R_e	Resistência térmica
J	Densidade de corrente elétrica
η	Coeficiente de Thomson
m	Massa
c	Calor específico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS	12
2.1.	Geral	12
2.2.	Específicos	12
3.	REFENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1.	Leis da Termodinâmica	13
3.1.1.	Lei Zero	13
3.1.2.	Primeira Lei	14
3.1.3.	Segunda Lei	14
3.2.	Efeitos Termoelétricos.....	15
3.2.1.	Efeito Seebeck	15
3.2.2.	Efeito Peltier	16
3.2.3.	Efeito Thomson	18
3.3.	Substâncias Termolábeis e Normas de Transporte de Termolábeis.	18
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1.	Caixa Refrigerada	20
4.2.	Componentes	20
4.2.1.	Arduino	21
4.2.2.	Célula Peltier	22
4.2.3.	Dissipadores de Calor	23
4.2.4.	Módulo HC-05	24
4.2.5.	Sensor NTC 10K	25
4.2.6.	Módulo Relé	26
4.3.	Montagem do Circuito	27
4.4.	MIT App Inventor	30
4.5.	Sistema Automatizado	20
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1.	Valores Esperados	34
5.2.	Análise de Controle de Temperatura	35
5.2.1.	Primeiro Teste	35
5.2.2.	Segundo Teste	36

5.2.3.	Terceiro Teste	37
5.2.4.	Discussão dos Três primeiros Testes	37
5.2.5.	Quarto Teste	38
5.2.5.	Quinto Teste	40
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43
	ANEXO A	45
	ANEXO B	48

1. INTRODUÇÃO

A temperatura, a nível microscópico, é uma medida estatística do nível de agitação entre moléculas, relacionado com o deslocamento da energia cinética de um átomo ou molécula. Em Física, a temperatura está relacionada com a energia interna de um sistema termodinâmico, e a nível macroscópico, costuma ser medida por um termómetro. Quando existe diferença de temperatura, existe um fluxo de energia, denominado de calor, e o sentido natural do fluxo é dos corpos/sistemas de maior para os de menor temperatura (GHAJAR; ÇENGEL, 2012)

O controle de temperatura, torna-se essencial à vida, e mostra-se de diversas maneiras na natureza. Como por exemplo, o corpo humano, o qual, para que sejam mantidas as suas funções vitais, controla a temperatura média interna do corpo, a uma faixa de 37°C. Caso essa temperatura exceda 38°C, ou esteja abaixo de 35°C, o corpo apresenta dificuldades nas atividades fisiológicas (HAMMEL, 1968). Uma outra forma de controle de temperatura é utilizada na conservação de determinados materiais/substâncias, entre eles estão os termolábeis. O controle de temperatura ou manutenção em uma determinada faixa, deve apresentar alta eficiência e segurança, e no nosso dia a dia pode ser observado na presença de termostatos utilizados em diversos eletrodomésticos, como ar-condicionado; freezers; geladeiras; ferro de passar roupas etc.

A primeira demonstração de um processo artificial de resfriamento na Universidade de Glasgow foi feita por Willian Cullen, em 1748, porém este feito ficou contido apenas na esfera académica. O primeiro equipamento que se assemelha a uma geladeira foi construída em 1857 pelo australiano James Harrison para ser utilizado no processo da produção de cerveja (CASTELLMAQ, 2020). No transporte de mercadorias, como frutas e carnes, existiu a necessidade de mecanismos que mantivessem os produtos à uma baixa temperatura. Assim, o engenheiro francês Charles Tellier conseguiu instalar um sistema de arrefecimento em um navio no ano de 1876, conservando uma embarcação de carnes durante 105 dias (BBC NEWS, 2017).

No ano de 1913 surgiram os primeiros refrigeradores domésticos sendo comercializados em larga escala nos Estados Unidos. No Brasil, a empresa responsável pela popularização destas máquinas foi a CONSUL, com a fundação da primeira fábrica de refrigeradores em 1950. A CONSUL também foi responsável por tornar acessível o sistema frost free, o qual era aplicado apenas em refrigeradores mais sofisticados (COOPERMITI, 2021).

Com o passar dos anos, houve uma adaptação do sistema utilizado em barcos no transporte terrestre (caminhões), porém o tremor causado no deslocamento sobre as estradas gerava a inoperância dos refrigeradores. Com o passar dos anos existiram adequações e

melhorias para garantir o transporte de insumos perecíveis na área médica. Este fato se evidenciou na segunda guerra mundial na conservação de medicamentos e sangue, e seu transporte para áreas de difícil acesso (BBC NEWS, 2017)

O manuseio de algumas substâncias deve ocorrer de maneira muito cautelosa, para evitar situações as quais prejudiquem a qualidade e eficácia delas. Um exemplo são as substâncias termolábeis, em que o controle principal deve ocorrer com a temperatura a qual são armazenados. Um exemplo, de falta de controle aconteceu no dia 3 de julho de 2021, no qual 40,1 mil doses da vacina contra a Covid-19, desenvolvidas pela Janssen, chegaram congeladas ao Brasil. Isso aconteceu porque a temperatura no transporte estava abaixo da estabelecida pelo fabricante, 2°C. Após testes do Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde (INCQS), verificou-se que não foi afetada a eficácia destas e não houve a inutilização destes imunizantes, porém gerou atraso na aplicação (G1, 2020).

O controle de temperatura é de extrema importância no nosso cotidiano, e uma aplicação observada no período da pandemia da COVID-19 é o transporte de vacinas. Este transporte ocorre em caixas térmicas com gelo, e deve ocorrer num determinado espaço de tempo para garantir a eficácia e integridade das vacinas. Propondo-se a promover e melhorar o transporte e armazenamento de vacinas, principalmente na região semiárida do Brasil, este trabalho desenvolveu uma caixa refrigeradora com temperatura controlada através de uma interface pelo celular, utilizando Arduino e células Peltier. Os resultados obtidos até o momento mostram a potencialidade do aparato desenvolvido, com grande chance de se torna uma tecnologia aplicada na sociedade pelo seu baixo custo para produção.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Desenvolver um sistema de armazenamento para transporte de substâncias termolábeis de baixo custo, que apresente eficiência no controle da temperatura, assegurando que as propriedades dessas substâncias sejam preservadas.

2.2. Específicos

- Usar sistemas de prototipagem de baixo custo;
- Criar um sistema refrigerado utilizando uma caixa de Isopor, Arduino e seus componentes;
- Utilizar a interface de comunicação Bluetooth do Arduino para comunicar com o celular;
- Desenvolver um aplicativo Android para ler e controlar a temperatura do sistema refrigerado.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Os conceitos da termodinâmica, tais como calor, que pode ser entendido como um fenômeno em trânsito de transferência de energia de um sistema para outro em virtude de uma diferença de temperatura entre ambos (VAM WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE,1995). Sem gradiente de temperatura, não existirá troca energética. É importante enfatizar também que, naturalmente, o calor flui apenas de sistemas de maior temperatura (maior energia), para os de menor temperatura (menor energia). O processo inverso também ocorre, em freezers e geladeiras por exemplo, que retiram a energia de um determinado ambiente, fonte fria, e transferem para o ambiente externo, e sempre ocorrerá com gasto de energia, normalmente elétrica.

As principais formas de transferência de calor são três: condução, convecção e radiação. As três diferenciam-se, principalmente, pelo meio ao qual se propagam. A condução ocorre em meios condutores, geralmente sólidos, sendo mais eficientes em metais. Neste processo, a energia é transferida de molécula a molécula do material. De maneira similar, ocorre a convecção, porém em meio aos fluidos (líquidos e gases), mas neste caso, é gerado um movimento interno no fluido, causado pela diferença de temperatura em suas partes mais próximas ao sistema com maior temperatura e a parte mais distante. Quando os fluidos aquecem, sua densidade diminui, esta parte mais quente sobe para a parte superior do sistema que o contém, e a parte mais fria vai para o fundo do sistema. A parte que está mais fria é aquecida e gera novamente este movimento, ocorrendo assim, sucessivas vezes, até que a fonte geradora de calor cesse. Por fim, a radiação, é um meio de propagação de calor em forma de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer no vácuo, sendo possível mencionar como exemplo a energia térmica advinda do sol, a qual percorre um longo caminho em meio ao vácuo até atingir a terra. Todos os corpos que possuem energia diferente de zero, emitem calor na forma de ondas eletromagnéticas.

3.1. Leis da Termodinâmica

3.1.1. Lei Zero

A lei Zero da Termodinâmica define temperatura através do equilíbrio térmico. Esta lei é expressa como: Caso dois sistemas A e B estejam em equilíbrio térmico com um terceiro sistema C, os dois também estarão em equilíbrio térmico entre si

3.1.2. Primeira Lei

Esta lei é também uma Lei da Conservação de Energia e estabelece uma relação matemática entre calor e trabalho de um determinado sistema através da energia interna do sistema, que é a variável que caracteriza a Primeira Lei, como pode ser visto na equação 1:

$$dE = dQ - dW \quad (1)$$

onde dE é a variação de energia interna, dQ é a energia trocada na forma de calor, e dW é a energia trocada na forma de trabalho. A energia interna é uma variável de estado e independe do caminho percorrido.

Em um caminho fechado, denominado de ciclo, a integral cíclica da variação de calor é igual a integral cíclica da variação de trabalho (VAN WYLEN, 1995) como pode ser observado na equação 2:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (2)$$

As equações (1) e (2) são bastante interessantes para determinar se é o meio que está cedendo energia para o sistema, ou se é o sistema que está cedendo energia para o meio.

3.1.3. Segunda Lei

A Primeira Lei estabelece a relação entre a quantidade de calor e o trabalho de um determinado sistema, mas não especifica qual o sentido que tais processos ocorrem. Em resumo, pela primeira lei todos os processos podem acontecer desde que a energia se conserve. A Segunda Lei da Termodinâmica trata do sentido ao qual tais processos ocorrem. Sabe-se que o calor flui naturalmente apenas de corpos mais quentes para corpos mais frios, e que para realizar o inverso, é necessário gastar alguma energia de alguma fonte. As máquinas que realizam tal processo são chamadas de refrigeradores, e gastam energia para transferir calor de um corpo para outro que se encontra mais quente. Porém, toda a energia que é gasta para realizar tal atividade não é totalmente convertida em trabalho, existindo perdas durante o processo.

Existe quatro formas distintas, porém equivalentes de apresentar esta lei. A primeira forma diz que não existe uma máquina térmica perfeita, ou seja, não se pode construir uma

máquina, a qual opere em um ciclo, que transforme toda energia gasta em trabalho, transferindo calor de um corpo frio para um corpo quente (VAN WYLEN, 1995). A segunda forma, não existe uma máquina térmica cuja eficiência seja maior que uma máquina que opere num ciclo de Carnot. A terceira forma, não existe um refrigerador perfeito, ou seja, uma máquina que extraia calor da fonte fria para a fonte quente sem a realização de trabalho. E a quarta, que o somatório da entropia do sistema e do ambiente tem que ser maior ou igual a zero.

3.2. Efeitos Termoelétricos

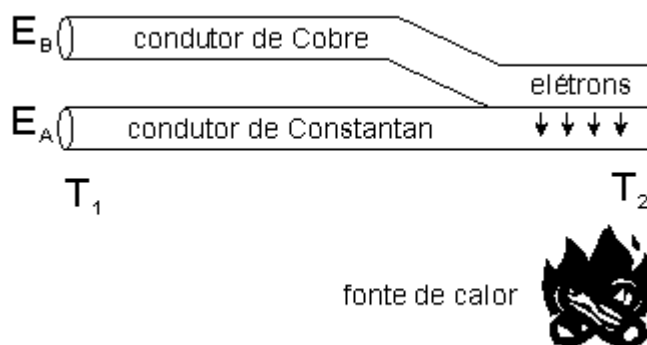
3.2.1. Efeito Seebeck

Observado pelo físico Thomas Johann Seebeck, no ano de 1821, o Efeito Seebeck consiste na criação de uma diferença de potencial em um circuito aberto, ao qual é gerado pela diferença de temperatura das junções de dois materiais distintos, sendo eles condutores ou semicondutores. Relacionando as variações de temperatura e o potencial elétrico, obtêm-se o coeficiente Seebeck (S), dado pela equação 3:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3)$$

onde ΔV e ΔT são, a diferença de potencial elétrico gerada e a diferença de temperatura das junções dos materiais, respectivamente. Uma aplicação deste efeito está presente nos termopares, instrumentos usados para medição de temperatura, e seu funcionamento é ilustrado na figura 1:

Figura 1 – Ilustração do princípio físico de um termopar



Fonte: WIKIPÉDIA (2021).

Os termopares são instrumentos de medição de temperatura constituídos de dois materiais distintos unidos nas suas extremidades, formando assim, um circuito fechado. Ao entrar em contato com uma fonte de calor, surge uma força eletromotriz gerada pelos materiais. Através da calibração deste instrumento é possível determinar a temperatura através da diferença de potencial. No geral, são instrumentos simples, de baixo custo e bastante eficientes.

3.2.2. Efeito Peltier

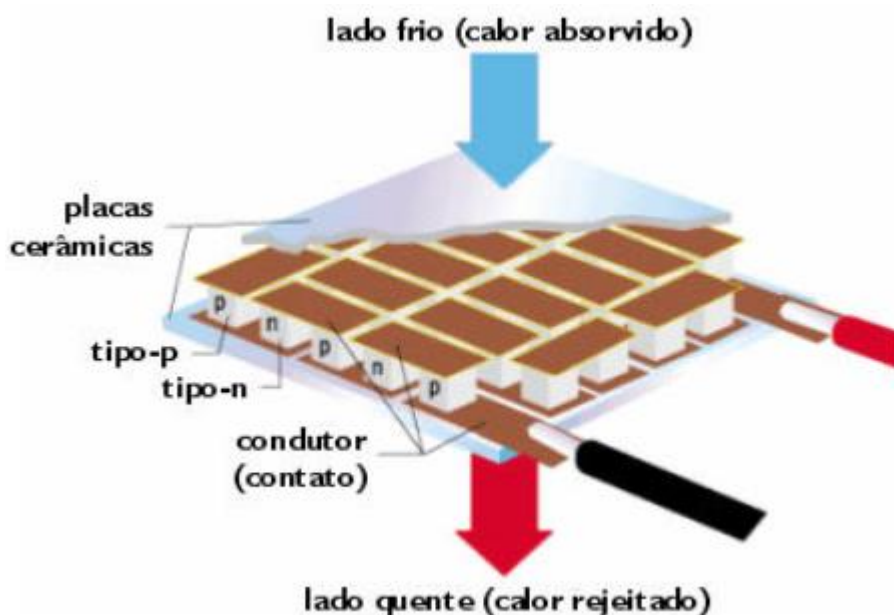
É o inverso do efeito Seebeck e foi observado pelo físico francês Jean Peltier, em 1834. Neste efeito, um gradiente de temperatura surge entre as junções de dois materiais semicondutores quando uma corrente passa pelos dois materiais. Assim como o efeito abordado anteriormente, este também permite a relação entre a quantidade de calor gerado pelo aquecimento ou resfriamento e a corrente que percorre a junção. A partir desta relação, obtêm-se o coeficiente de Peltier (Π), dado pela equação 4:

$$\Pi = \frac{Q}{I} \quad (4)$$

onde Q é quantidade de calor associado, e I a corrente que percorre o circuito.

Este efeito é observado nas pastilhas ou células Peltier, que se utilizam deste efeito para promover o resfriamento de determinados sistemas. Estas pastilhas podem ser uma alternativa ao uso de compressores de sistemas refrigerados de pequeno porte. As células Peltier são capazes que resfriar um de seus lados, e são compostas por dois semicondutores, tipo-p e tipo-n, interligados em série, e ao fluir corrente por eles, um lado da junção esquenta, e o outro esfria. Caso a polaridade seja invertida, há a inversão também dos lados ‘quente’ e ‘frio’ como pode ser observado na figura 2:

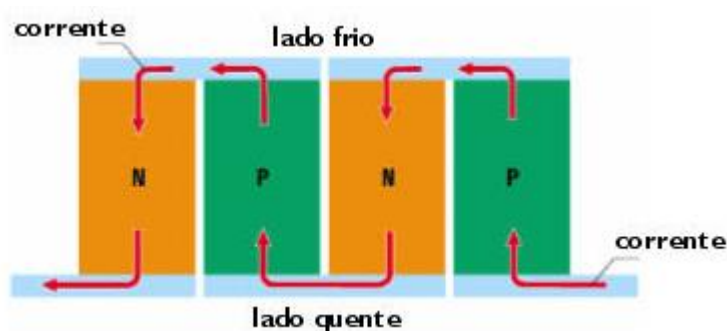
Figura 2 - Componentes de uma célula Peltier



Fonte: PELTIER (2021).

A intensidade a qual ocorre o processo de resfriamento depende da diferença de potencial aplicada nos terminais da placa, assim como a intensidade da corrente elétrica. Geralmente é utilizando o material semiconductor Bi_2Te_3 (telureto de bismuto).

Figura 3 - Junções de uma célula Peltier



Fonte: PELTIER (2021).

Na figura 3 se observa o resultado da passagem de corrente pelas junções dos materiais do tipo-n e tipo-p. Como descrito anteriormente, um lado irá esfriar e o outro esquentar, na mesma proporção, de tal modo que a diferença de temperatura entre as duas faces da placa não exceda 60°C . Para o funcionamento das pastilhas, deve-se aplicar uma diferença de potencial na faixa de 12 volts, a qual fonte de alimentação seja do tipo corrente contínua. Além da tensão, é importante também que a corrente seja 6 amperes. É importante salientar que as placas

possuem um limite para a quantidade de calor transferido ($Q_{\max}$), e para que este valor seja atingido se deve aplicar uma tensão $V_{\max}$ e uma corrente $I_{\max}$. Caso estes valores sejam ultrapassados, as placas poderão ser danificadas

Para que não ocorra o superaquecimento da placa, recomenda-se acoplar um dissipador na parte quente e fria da célula. Além disso, para aumentar a eficiência é sugerido o uso de ventiladores (coolers) tanto no lado externo, quanto interno.

3.2.3. Efeito Thomson

Em 1854, Willian Thomson conseguiu unificar as teorias do Efeito Seebeck e Peltier de forma empírica (COSTA, 2015). Quando um condutor, com exceção dos supercondutores, é submetido a uma diferença de temperatura entre suas extremidades e uma corrente elétrica que o percorre, este tende a absorver ou emitir calor. Esse calor cedido ou absorvido depende do sentido da corrente e sua intensidade (ARANTES, 2013). Essa relação matemática é dada pela equação 5 (COSTA, 2015):

$$\frac{dQ}{dT} = \frac{J^2}{\sigma} - \eta \cdot J \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

onde J é a densidade de corrente, σ a condutividade elétrica, η o coeficiente de Thomson que depende da temperatura e do material, e dT/dx o gradiente de temperatura na direção x

3.3. Substâncias Termolábeis e Normas de Transporte

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é o órgão responsável por determinar as diretrizes referentes as boas práticas relacionadas ao armazenamento e transporte de termolábeis, que são definidas como substâncias que necessitam ser submetidas a um acondicionamento a uma temperatura igual ou inferior a 8°C (ANVISA, 2020), onde o valor específico deve ser fornecido pelo fabricante. Estes compostos correspondem a medicamentos que apresentam alta sensibilidade a variações abruptas de temperatura, como por exemplo vacinas.

O transporte de medicamentos, no geral, é normatizado pela Resolução de Diretoria Colegiada - RDC N° 430, de 8 de outubro de 2020, publicada no Diário Oficial da União no dia

9 de outubro de 2020. Esta resolução, tem por finalidade, estabelecer as boas práticas referentes à armazenagem, transporte e distribuição de medicamentos, segundo a ANVISA.

Algumas definições devem ser apresentadas para melhor entendimento das diretrizes e normas. Boas Práticas de Armazenagem (BPA), Boas Práticas de Distribuição e Armazenagem (BPDA) e Boas Práticas de Transporte (BPT), referem-se ao conjunto de ações necessárias para garantir a qualidade e eficácia dos medicamentos no que diz respeito a armazenagem, distribuição e armazenagem e transporte, respectivamente. Quanto as medidas de controle de temperatura, pode-se diferenciar em dois sistemas: Sistema Ativo de Controle (são capazes de alto-ajuste, de acordo com a interferência do meio externo, por exemplo, caminhões refrigeradores) e Sistema Passivo de Controle (unidade termicamente isolada, contendo material refrigerante, não sendo capaz de ajuste mediante as variações externas de temperatura).

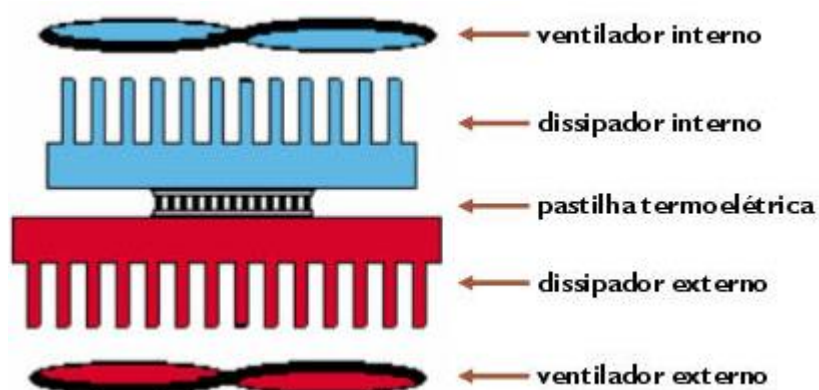
No seu art. 40, é firmado que, antes da utilização de um sistema informatizado, o mesmo deve ser testado e garantido a sua eficácia e confiabilidade. Caso o sistema passe por mudanças significativas, deve-se realizar novos testes. Por fim, pode-se mencionar o art. 64, que confere às empresas contratadas para a realização do transporte, obrigações legais a respeito do monitoramento das condições de temperatura, umidade e acondicionamento as quais os medicamentos foram expostos, e fornecer esses dados de forma segura aos contratantes. A obrigatoriedade do monitoramento pode ser isenta, caso o tempo de transporte seja inferior a 8 horas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caixa Refrigerada

A caixa refrigeradora foi construída com os seguintes materiais: uma caixa de isopor de 5 litros, 2 células Peltier, 3 dissipados de calor, dois coolers e pasta térmica. A caixa de Isopor possui as seguintes dimensões no seu interior: 16,2 centímetros de altura; 15 centímetros de largura e 21 centímetros de comprimentos. Realizou-se uma abertura na tampa da caixa para acoplar as células Peltier, e para a junção entre as Peltier e os dissipadores, utilizou-se a pasta térmica para melhorar a eficiência da troca térmica. Um dos coolers foi posicionado no lado externo, com a finalidade de resfriar o dissipador, já o outro cooler foi acoplado na parte interior da caixa, para a convecção ser forçada. O posicionamento da célula Peltier e os dissipadores está ilustrada na figura 4.

Figura 4 - Posição dos dissipadores, célula Peltier e coolers



Fonte: PELTIER (2021).

Os dissipadores foram retirados de computadores sem uso, diminuindo o custo do aparato.

4.2. Componentes

O sistema de controle de temperatura da caixa refrigerada foi feito usando os hardwares e softwares da plataforma Arduino, que inclui: placa UNO, módulo Bluetooth HC-05, sensor de temperatura modelo NTC e módulo relé. Estes componentes serão descritos nas próximas subseções. Utilizou-se também de resistores de $1K\Omega$, fios e protoboard para realizar as conexões. A alimentação do sistema foi realizada através de uma fonte de computador, que

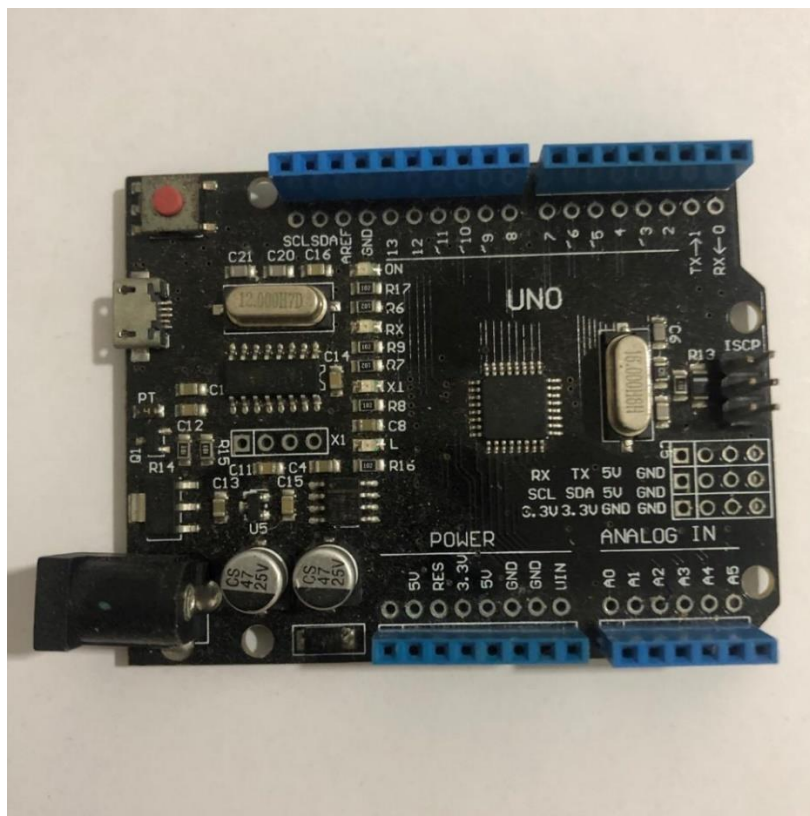
possui saída de 12 Volts e corrente máxima de 20 ampère. Após a montagem dos sistemas, realizou-se os testes necessários e para dados mais precisos, a temperatura foi aferida com um termômetro digital.

4.2.1. Arduino

A implementação do controle de temperatura foi feita no sistema de prototipagem Arduino. Este sistema é direcionado tanto a hobistas quanto a programadores profissionais, e usam esta plataforma de código aberto na implementação de circuitos que transformam sinais de entrada de sensores em algum tipo de ação, como por exemplo o acionamento de motores, leds ou qualquer outro tipo de saída. Alguns dos aspectos positivos da plataforma escolhida: baixo custo, se comparados a outros tipos de sistemas de prototipagem, facilidade de manipulação dos seus hardwares e softwares, nos quais apresentam uma grande diversidade de sensores e placas que podem ser escolhidas a depender de cada aplicação, é compatibilidade com os principais sistemas operacionais: Windows, Linux e Macintosh OSX.

A título de informação, outra placa bastante utilizada por projetistas são as placas baseadas em FPGA (Arranjo de Portas Programáveis em Campo), como por exemplo a linha Cyclone da Altera. Porém, preferiu-se o Arduino devido seu baixo custo, diversidade de sensores e facilidade de uso. O Arduino usado neste trabalho foi o do tipo UNO, como apresentado na figura 5:

Figura 5 - Placa Arduino



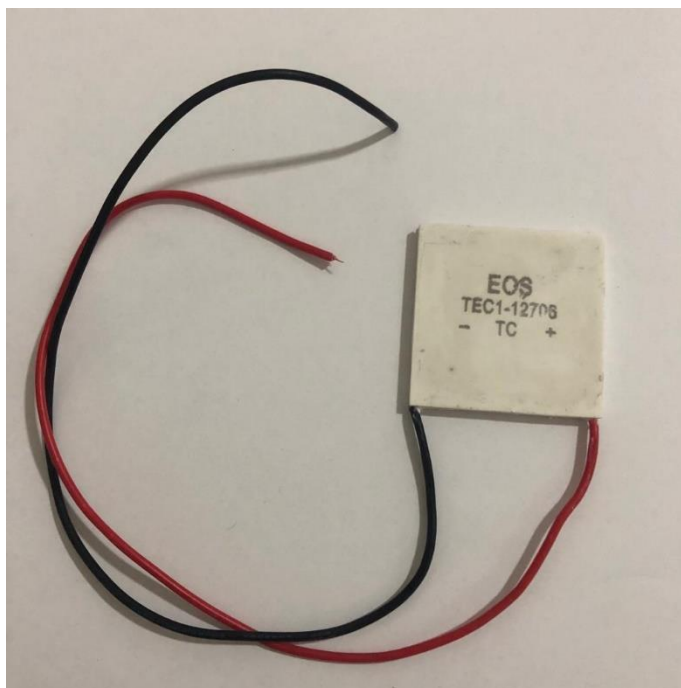
Fonte: autoria própria (2021).

O microcontrolador principal do Arduino da figura 5 é o ATmega328P da fabricante Atmel, que apresenta 14 portas digitais, e 6 analógicas, nas quais se diferem nos valores de entrada ou de saída. As portas digitais trabalham com valores digitais (binário) que podem ser entendidos como LOW (0 volts) e HIGH (5 volts). Neste Arduino é permitido uma resolução entre leituras de: 5 volts / 1024 unidades ou 4,9 mV por unidade.

4.2.2. Célula Peltier

Para o resfriamento da caixa térmica, além da caixa de isopor, utilizou-se duas células Peltier para realizar efetivamente as trocas de calor entre o meio externo e interno da caixa. As duas placas utilizadas neste trabalho são do modelo TEC1-12706, como pode ser visto na figura 6:

Figura 6 - Célula Peltier



Fonte: autoria própria (2021).

A faixa de temperatura está entre -30°C a 70°C , e a alimentação é através de tensão contínua de até 15,2 Volts, e uma corrente máxima de 6 ampère.

4.2.3. Dissipadores de Calor

Usou-se também, três dissipadores de calor, observados na figura 7, um grande para o lado quente das placas e dois menores para os lados frios. O dissipador do lado quente foi posicionado em cima da caixa de modo que ficasse externa a ela, já os dissipadores menores foram posicionados no interior da caixa de modo a evitar o congelamento de água na superfície das placas, ajudando na distribuição das trocas caloríficas. Ambos os dissipadores foram retirados de computadores inutilizados.

Figura 7 - Dissipadores de calor

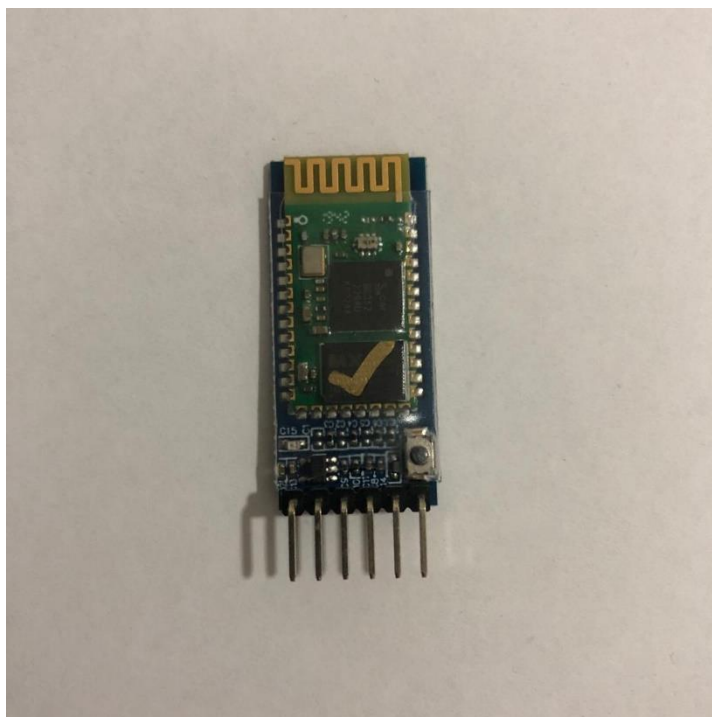


Fonte: autoria própria (2021).

4.2.4. Módulo HC-05

Para o controle de temperatura foi utilizado alguns equipamentos eletrônicos e sensores de implementação via Arduino. O sistema de comunicação foi realizado através do Bluetooth, onde um celular se comunica através do módulo Bluetooth HC-05 para Arduino, como pode ser observado na figura 8.

Figura 8 - Módulo Bluetooth HC-05



Fonte: autoria própria (2021).

Este módulo trabalha com nível de sinal de 3.3V, e para utilizá-lo junto ao Arduino deve ser implementado um divisor de tensão com um resistor de 1 k Ω , já que o Arduino possui nível de sinal de 5V. Outra observação deste módulo é que existe três formas de operação, o modo SLAVER, MASTER e LOOPBACK. Estes três modos se diferenciam no seguinte aspecto: o modo SLAVE permite apenas receber conexão de outros dispositivos Bluetooth; o modo MASTER é possível a conexão com estes outros dispositivos, podendo realizar envio de dados; por fim, o modo LOOPBACK é utilizado para testes, já que recebe os dados do modo master e envia novamente os mesmos dados. Este módulo possui um alcance de 10 metros.

4.2.5. Sensor NTC 10K

A temperatura no interior da caixa será aferida por um sensor NTC a prova de água, modelo MF58, destacando-se o fato de ser envolto por uma cápsula de aço inox. Tal sensor, atua em uma faixa de medição de -20 a 105°C (NATALMAKERS). Para que não haja a interferência do ambiente externo, seu cabo é revestido por um material isolante. Este sensor, recebe o nome de termistor, pois sua resistência varia conforme a temperatura do meio em que está inserido varia. O valor enviado pelo sensor passa por uma biblioteca, que foi referenciada

no início do código, e esta biblioteca determina qual a temperatura referente ao valor digital. O modelo usado neste trabalho é apresentado na figura 9:

Figura 9 - Sensor de temperatura NTC-10K



Fonte: autoria própria (2021).

4.2.6. Módulo Relé

Para ligar e desligar as células Peltiers foi utilizado um relé. Este dispositivo funciona como um interruptor eletrônico, e possui duas chaves de acionamento, uma que fica normalmente aberta e outra que fica normalmente fechada. Quando aplicado uma tensão de 5 volts, o relé inverte as chaves, fechando a que estava aberta e abrindo a que estava fechada. Essa funcionalidade é atribuída a um indutor que está localizado no interior do relé, sendo que, quando o indutor é ligado (relé recebe uma entrada de 5 volts), a chave é invertida devido o campo magnético gerado. Então, quando for preciso acionar a placa de resfriamento, o relé receberá um sinal de 5 volts da placa de Arduino, e consequentemente fechará a chave que alimenta as células. Para fornecer a tensão e a corrente elétrica necessárias para o funcionamento das células de Peltier, fez-se o uso de uma fonte de computador, a qual fornece uma diferença de potencial de 12 volts e corrente elétrica de até 25 ampère. É apresentado a seguir, na figura 10:

Figura 10 - Módulo relé

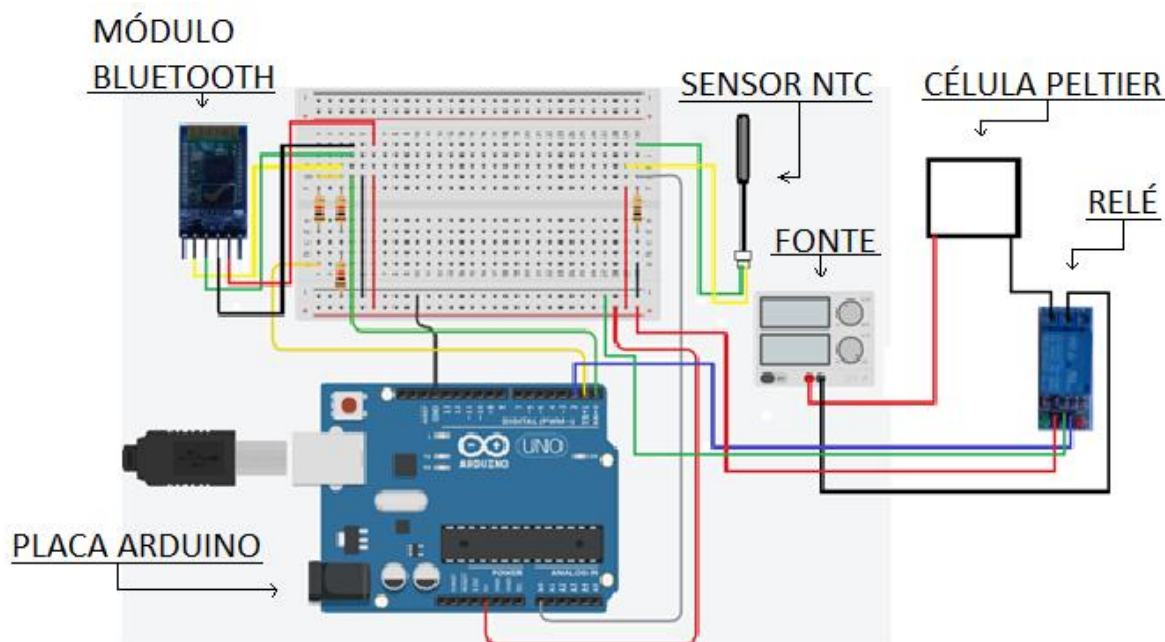


Fonte: autoria própria (2021).

4.3. Montagem do Circuito

Para fazer as ligações dos elementos do Arduino se utilizou um protoboard. O termistor NTC possui dois pinos, um deles foi ligado na saída 5V do Arduino, já o outro passou por uma divisão de tensão, onde um dos fios da divisão foi conectado ao pino A0 da placa e o outro passou por um resistor de 100 ohms e em seguida conectado no GND da placa. O esquema das conexões é apresentado na figura 11.

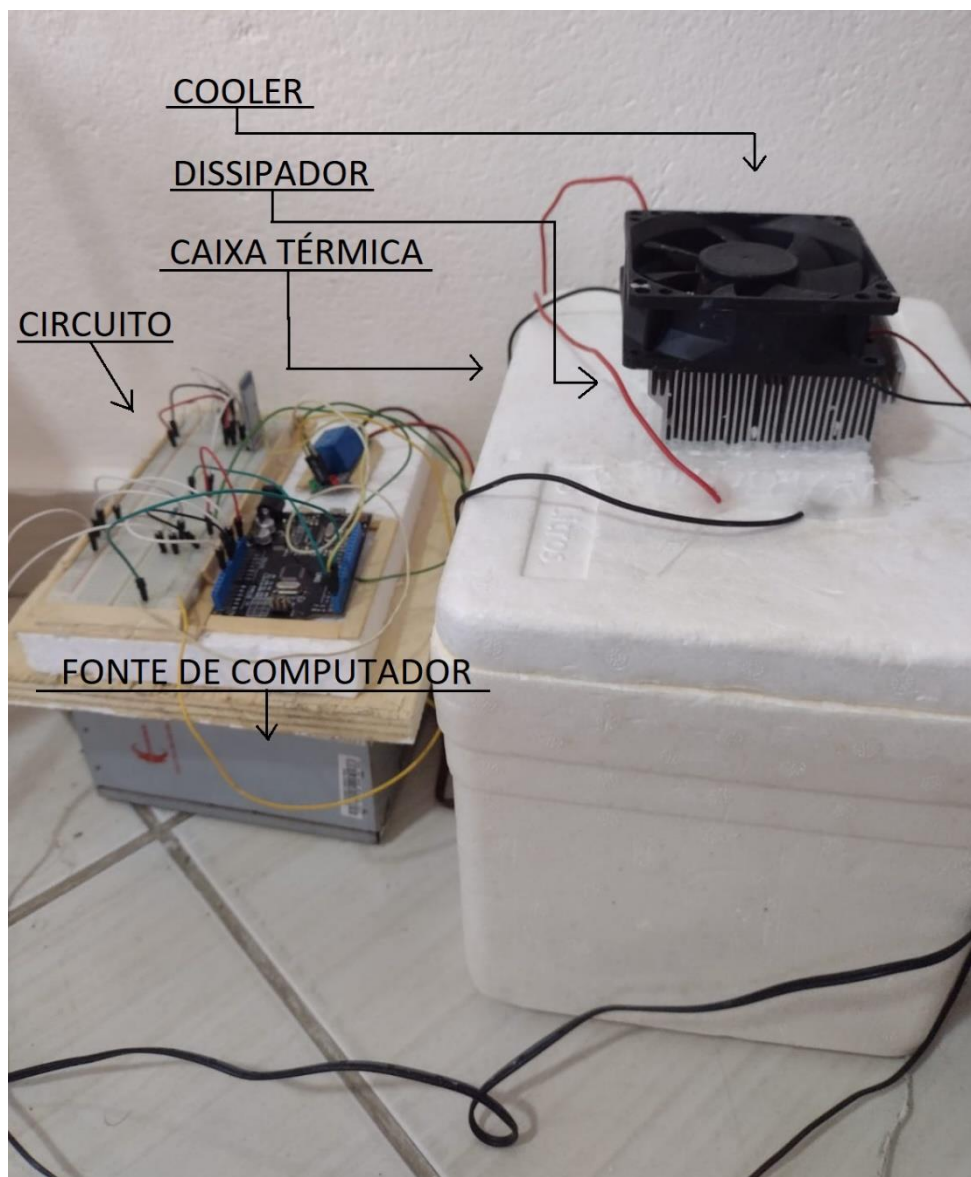
Figura 11 - Esquema de ligação entre os componentes



Fonte: autoria própria (2021).

Para o módulo HC-05, quatro, dos seis pinos foram utilizados. Um dos pinos foi ligado a alimentação de 5V (fio vermelho), outro ao GND (fio preto). O pino TX do módulo foi ligado ao pino RX da placa; já o pino RX do módulo passou por um divisor de tensão, onde um dos fios da divisão passou por um resistor de 1000 ohms e foi ligado no pino TX da placa, e o outro fio da divisão passou por dois resistores de 1000 ohms e em seguida foi conectado ao GND. O protótipo construído pode ser visualizado na figura 12.

Figura 12 - Montagem do sistema



Fonte: autoria própria (2021).

A ligação do relé foi mais simples que os demais, pois não foi necessário realizar divisão de tensão. O pino 5V do relé foi ligado no 5V do Arduino, o GND do relé foi conectado ao GND da placa e o pino in foi ligado no pino 2 da placa. As duas células Peltier foram montadas em paralelo.

O sistema criado se comunica com um dispositivo, o qual determinará qual a temperatura média deve-se manter no interior da caixa. Essa comunicação será auxiliada por um aplicativo desenvolvido no MIT App Inventor, cujos detalhes serão comentados na próxima seção.

4.4. MIT App Inventor

Para o desenvolvimento deste projeto se utilizaram duas plataformas: uma para o sistema de acionamento das células Peltier, e outra para a criação do aplicativo que se comunicará com o sistema de resfriamento. Para a desenvolvimento do aplicativo foi utilizado o MIT App Inventor (MIT APP INVENTOR, 2021), que consiste em um ambiente de desenvolvimento de aplicativos baseado em programação por blocos, o qual atribui a esta ferramenta uma característica mais visual, e por consequência, de maior interatividade e facilidade de uso. Esta plataforma tem por objetivo, democratizar o desenvolvimento de software e transformar, principalmente os jovens, em criadores de tecnologia, ao invés de serem apenas consumidores, onde atinge a marca de mais de um milhão de visitantes mensais. É notável os vários aplicativos desenvolvidos nesta plataforma, que possuem um forte elo social e educacional, empoderando as crianças a fazerem a diferença no meio onde vivem.

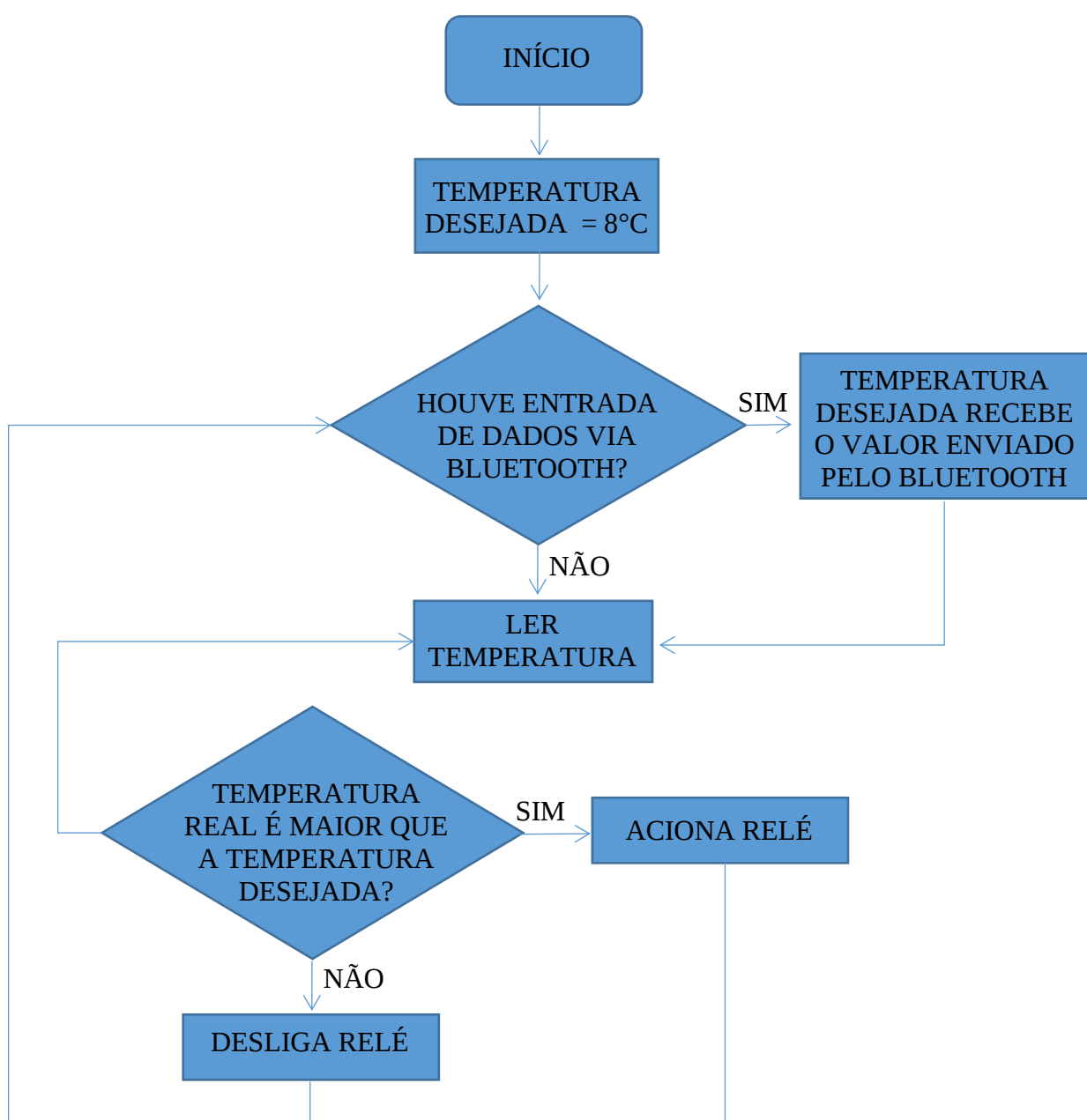
4.5. SISTEMA AUTOMATIZADO

Para o código do Arduino se tem a seguinte estrutura: inicia-se o código com a inclusão das bibliotecas para o termistor e para o módulo Bluetooth, e é definido a porta a qual será responsável pelo acionamento do módulo relé. As variáveis são definidas e determina-se o valor inicial destas. As variáveis são: tempReal(temperatura em tempo real do interior da caixa térmica); state(valor enviado pelo aplicativo de celular para o módulo Bluetooth), sendo que, state assume valor inicial 0, e quando for atribuído valor 1, a temperatura deve ser mantida em 8°C, quando for 2, a temperatura deve ser mantida em 10°C, caso seja 3, mantém a temperatura em 12°C, para 4 a temperatura desejada é 14°C, para 5 a temperatura é 16°C e por fim, para 6, a temperatura deve ser mantida em 18°C; quando inicializado o programa a temperatura a ser mantida é 8°C, definida pela variável initialTemp, que assume valor inicial de 8, até que haja alteração do valor de state, quando isso ocorrer, initialTem assume o valor definido para cada valor de state; já o valor almejado em cada valor de state, é armazenado na variável tempWant. Após estas etapas é definido o pino do relé como uma saída (OUTPUT). Seguidamente, é criado duas funções, uma que irá atribuir o valor de tempWant a initialTem, e outra que irá realizar a verificação da temperatura. Nessa segunda função, há 3 situações possíveis, a primeira é que: tempReal é maior que tempWant, por isso deve-se acionar as Peltier; tempReal é menor que tempWant, então, deve-se desligar as Peltier e esperar a temperatura aumentar; e se os dois valores forem iguais, as Peltier devem ser ligadas até que tempReal seja menor que tempWant.

Esta etapa de verificação de temperatura e análise é realizada a cada 2 segundos, devido o comando `delay(2000)`.

O código desenvolvido para a placa de Arduino, funciona de acordo com o fluxograma da figura 13, apresentado abaixo.

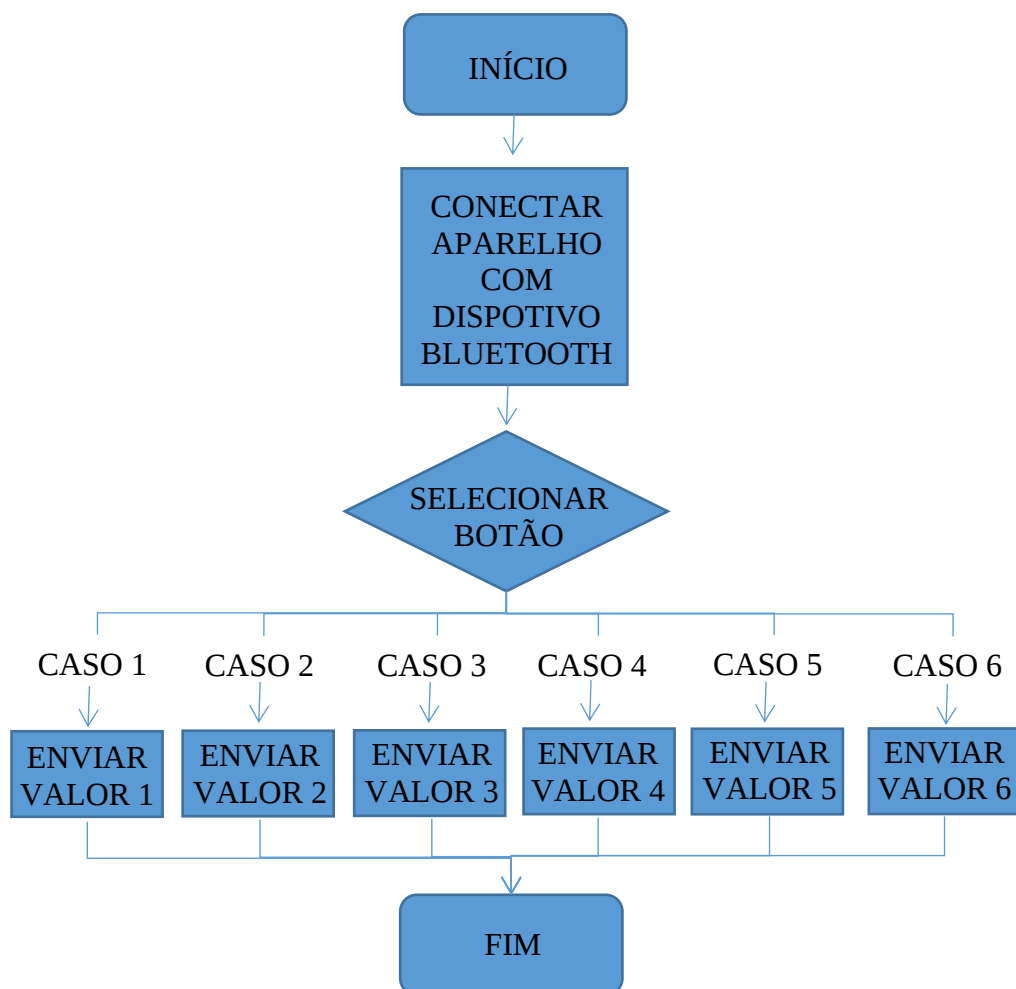
Figura 13 - Fluxograma do código Arduino



Fonte: autoria própria (2021).

Na figura 14 é apresentado o fluxograma referente ao funcionamento do software do aplicativo.

Figura 14 - Fluxograma do MIT App Inventor



Fonte: autoria própria (2021).

Nas estruturas condicionais, tem-se que o botão 1 é referente a temperatura 8°C, e assim sucessivamente. Em cada caso, é enviado um valor decimal, que pode ser 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 que definirá o valor de state.

A interface do aplicativo é bastante simples e de fácil uso. Na tela, na parte inferior é apresentado o comando para realizar a conexão via Bluetooth do aparelho com o módulo do Arduino. É apresentada as opções para a temperatura, onde o valor varia de 8 a 18°C num intervalo de dois em dois graus, a interface do aplicativo é apresentada na figura 15.

Figura 15 - Interface do aplicativo



Fonte: autoria própria (2021).

Para melhor iteratividade, foi adicionado comandos de voz, os quais confirmam a escolha da temperatura, e confirmam a conexão Bluetooth. Quando estabelecido a conexão, o aparelho emite o seguinte som “dispositivo conectado”, e quando é selecionado, por exemplo, a temperatura 8°C, o aparelho emite: “temperatura 8°C”.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Valores Esperados

Os mecanismos de resfriamento serão inseridos na caixa por uma abertura realizada na tampa, durante o acionamento da refrigeração o sistema irá conter bem a temperatura no interior da caixa, porém quando as pastilhas forem desligadas, a temperatura cairá vertiginosamente, pois as células Peltier são compostas de um material cerâmico, o qual atua como um excelente condutor, em virtude disso, quando as células forem desligadas, pressupõe-se que elas, juntamente com os dissipadores acoplados, atuarão como condutores realizando tocas de calor com o meio, causando queda abrupta na temperatura no interior da caixa térmica.

Conforme descrito no código, espera-se que o sistema de controle de temperatura mantenha a temperatura estável, com uma margem de erro de 0,5°C. Além disso, espera-se que o sistema consiga refrigerar o interior da caixa, mantendo a uma temperatura mínima de, pelo menos, 8°C, pois esta é a condição ideal para o armazenamento de uma grande variedade de termolábeis. Espera-se quando a temperatura do ambiente for elevada, o sistema não perca suas funcionalidades e precisão. Imagina-se que a temperatura do ambiente interfira no valor da temperatura interna da caixa, mas não de forma tão severa.

Usando as dimensões da caixa de isopor é possível determinar o máximo de calor que poderá ser retirado da caixa a fim de refrigerar seu interior. A temperatura da região refrigerada, depende das dimensões do recipiente, da potência do equipamento e da temperatura externa. Para tal dimensionamento é importante salientar que foi adicionado folhas de isopor no interior da caixa, a fim de diminuir seu volume e consequentemente, atingir valores mais amenos na temperatura interna. O interior da caixa após a adição das folhas de Isopor apresenta os seguintes valores de altura, largura e comprimento, respectivamente em centímetros: 16,2; 7 e 13. A quantidade de calor a ser retirado do interior da caixa é dado pela equação 6:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_{\max} - T_{\min}) \quad (6)$$

onde m é a massa do ar contido na caixa (tomando a densidade do ar como 1,16 kg/m³), “ c ” o calor específico do ar (1,014 kJ/kg.K), $T_{\max}$ a temperatura externa (tomada como 30°C) e $T_{\min}$ o valor objetivado para o sistema (8°C). Fazendo as devidas substituições, chega-se ao valor de 38 J. Para maximizar o tempo de resfriamento foi utilizado duas células Peltier em paralelo.

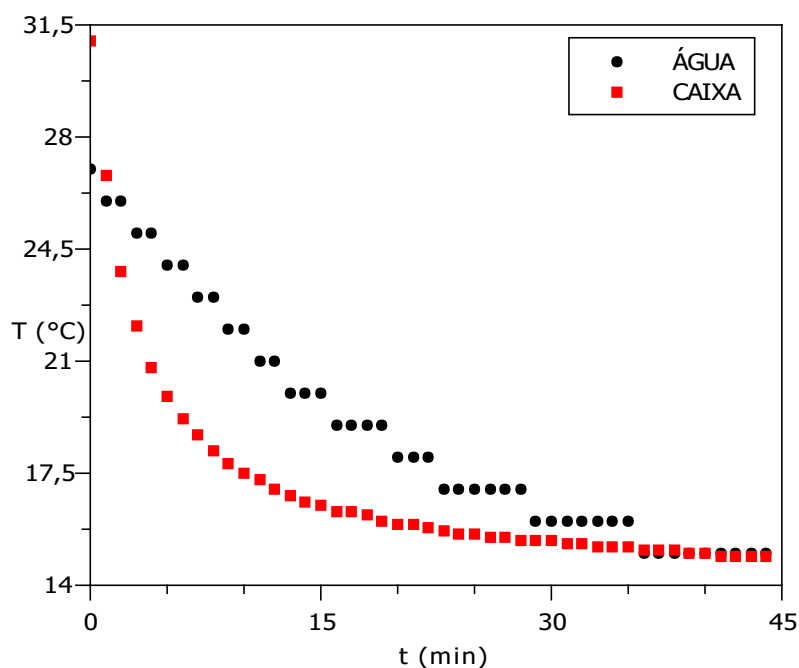
5.2. Análise do controle de temperatura

Foram realizados 5 testes, onde cada um possui uma temperatura ambiente. Para o primeiro, a temperatura média foi 32°C, no segundo 25°C e a terceira 20°C. Nos três primeiros testes foi analisado o comportamento do sistema em função da temperatura externa. No quarto teste, desligou-se o sistema para notar o comportamento do aumento da temperatura. E o quinto teste é referente a aplicação do controle de temperatura. Para todas as situações, colocou-se um recipiente com 20 ml de água destilada no interior da caixa. As informações coletadas eram a relação entre tempo após o acionamento do sistema de resfriamento, temperatura no interior da caixa e temperatura no interior da água contida no recipiente, além de a temperatura mínima atingida para ambos os meios água e ar.

5.2.1. Primeiro Teste

Neste teste o sistema funcionou quarenta e cinco minutos, tempo necessário para a temperatura permanecer estável. Uma observação neste teste é que ele foi realizado ao ar livre, e por isso a temperatura do ambiente não era controlada, sendo observada pequenas variações de temperatura externa. O gráfico obtido neste teste é apresentado na figura 16:

Figura 14 - Gráfico para temperatura ambiente de 32°C



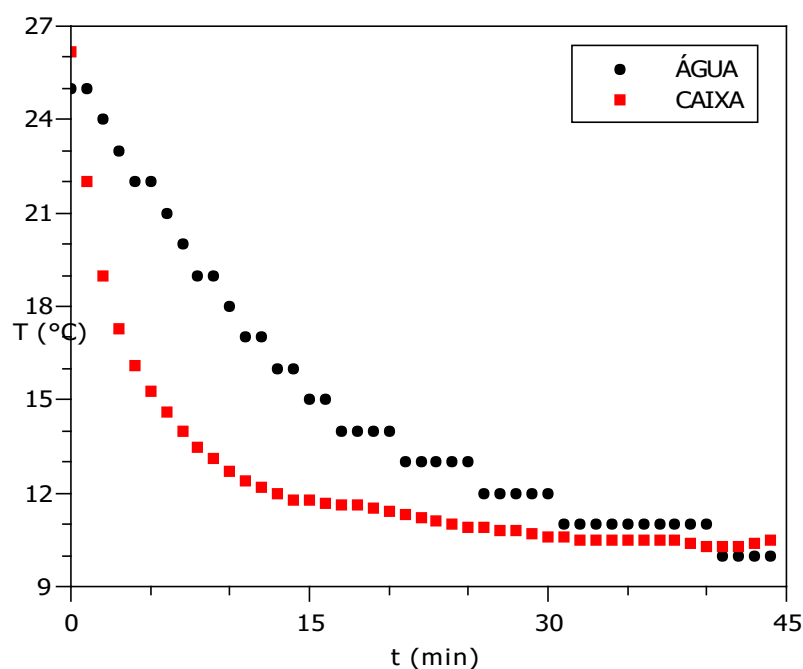
Fonte: autoria própria (2021).

Os quadrados vermelhos correspondem a temperatura no interior da caixa, aferida por um termômetro digital, e os círculos pretos, a temperatura da água no interior do sistema. Nota-se que a água demora um certo tempo para entrar em equilíbrio com o meio e que a temperatura mínima atingida na caixa foi de 14,8°C, e para a água foi 15°C, após 45 minutos da ligação do sistema de refrigeração.

5.2.2. Segundo Teste

Neste teste o experimento foi feito em um ambiente fechado e climatizado, para atingir a temperatura ambiente de 25°C. O gráfico obtido neste teste é apresentado na figura 17:

Figura 15 - Gráfico para temperatura ambiente de 25°C



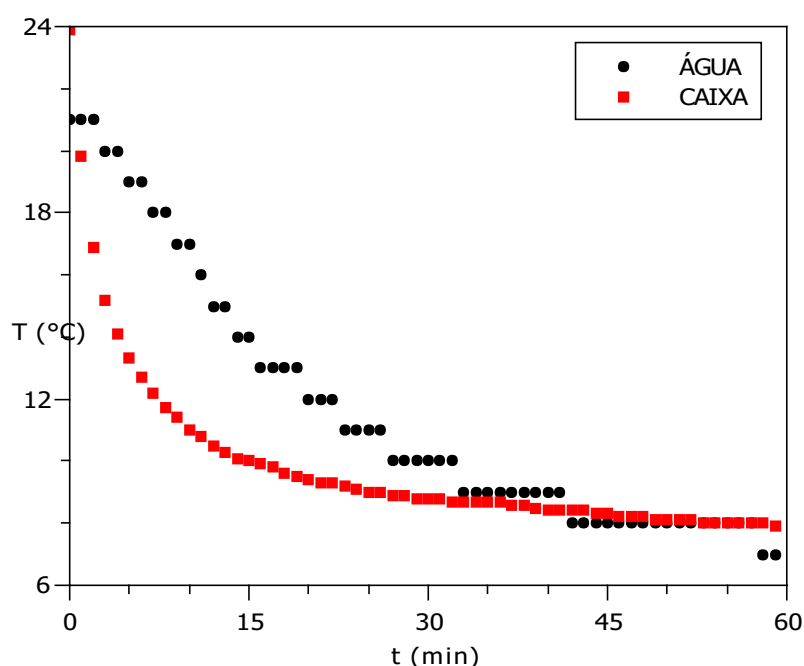
Fonte: autoria própria (2021).

A legenda é a mesma do teste anterior. Neste teste se observa um leve aumento na inclinação dos dados referentes a temperatura da água. A temperatura mínima atingida para a água foi 10°C e para o ar foi de 10,5°C.

5.2.3. Terceiro Teste

No terceiro teste também foi utilizado um ambiente fechado e climatizado, para atingir a temperatura ambiente de 20°C. Neste caso, a temperatura continuou variando, mesmo após passado 45 minutos, chegando a um valor mínimo de 6,6°C, passado um período de, aproximadamente, duas horas e meia. Os valores obtidos para formação do gráfico 18 foram obtidos apenas durante um intervalo de uma hora.

Figura 16 - Gráfico para temperatura ambiente de 20°C



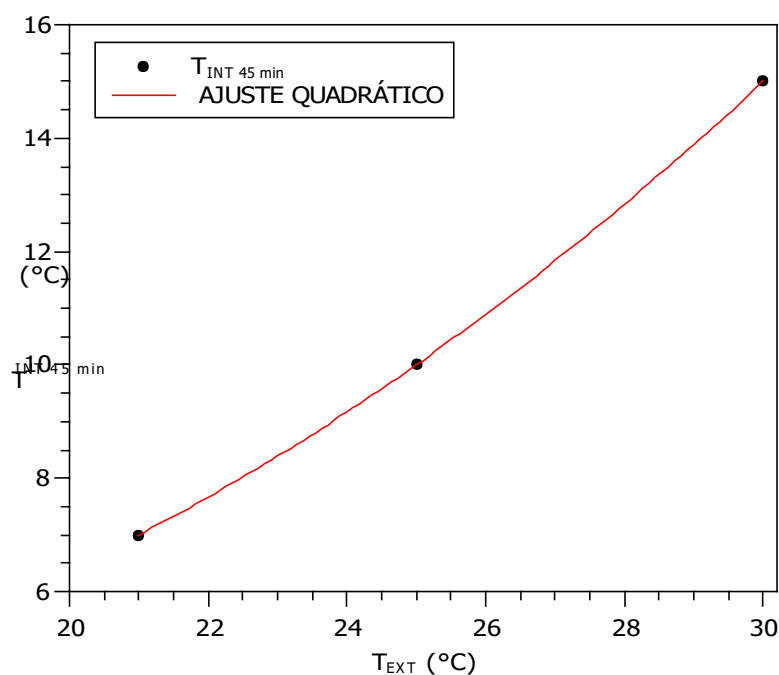
Fonte: autoria própria (2021).

Após uma hora, o valor mínimo para o ar no interior da caixa foi de 7,9°C, e para a água, foi de 7°C. A legenda é a mesma do primeiro teste. Os valores temperatura foram inferiores a 8°C, podendo o protótipo desenvolvido neste trabalho ser uma alternativa no transporte de termolábeis quando a temperatura externa for aproximadamente 20°C.

5.2.4. Discussão dos Três Primeiros Testes

É notório que, quando a temperatura externa é reduzida, obtêm-se valores menores para a temperatura no interior da caixa térmica. A figura 19 mostra o comportamento da temperatura exterior versus a interior após 45 minutos de testes:

Figura 17 - Comparação entre os resultados de temperatura mínima



Fonte: autoria própria (2021).

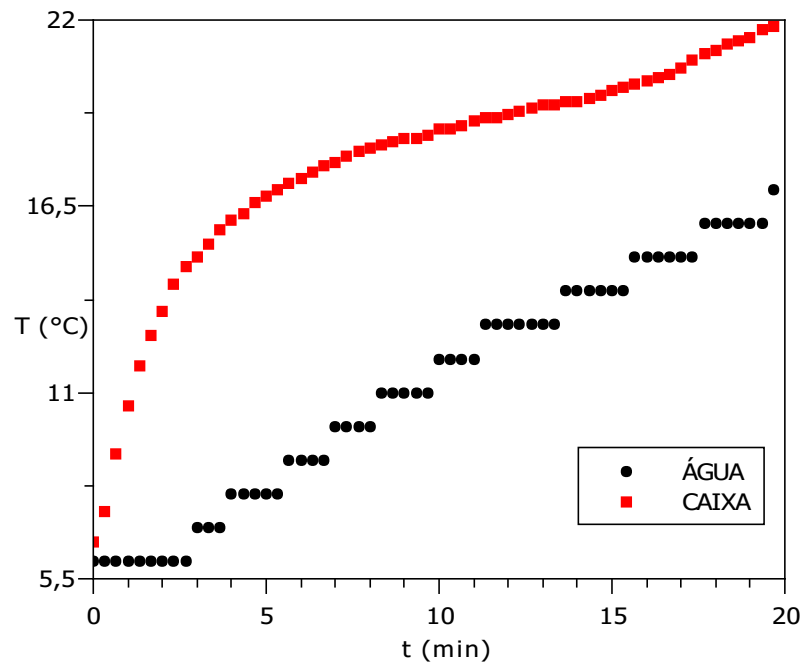
onde a linha vermelha é a ajuste quadrático dos dados. A partir destes dados é possível extrapolar qual o valor mínimo que pode ser atingido no decorrer de 45 minutos. Para isso, usa-se as relações de ponto mínimo para uma equação de segundo grau (a gerada pela linha de ajuste). Após a aplicação destas relações se obtêm que o valor mínimo possível ocorre quando a temperatura do meio ambiente for 18,49°C, que permite o sistema chegar a um valor de 7,67°C. Assim, para um intervalo de 45 minutos, a temperatura mínima que o interior da caixa pode atingir é de 7,67°C.

Outra observação é que durante o monitoramento da temperatura, notou-se que o gradiente máximo obtido entre a temperatura do meio e do interior do sistema foi de aproximadamente 16°C, e com a redução da temperatura ambiente, o gradiente é de aproximadamente 13°C.

5.2.5. Quarto Teste

O quarto teste consistiu em resfriar o sistema até o valor máximo possível, e depois desligar o sistema, checando a temperatura no interior da caixa a um intervalo de 20 segundos. A figura 20 apresenta este aumento da temperatura:

Figura 18 - Aumento da temperatura no quarto teste.



Fonte: autoria própria (2021).

O aumento de temperatura ocorreu de maneira rápida, como já tinha sido discutido anteriormente. Esse acontecimento se deve ao fato de que as células Peltier e os dissipadores são formados por materiais que atuam como excelentes condutores, as trocas caloríficas entre o meio e o interior da caixa ocorrem intensamente, e justifica-se esta elevação abrupta da temperatura. A maior parte do calor trocado com o meio ocorre através das células Peltier. Mas também há um fluxo térmico entre o ambiente externo e interno o qual atravessa as paredes da caixa, mas este possui um valor muito pequeno, e pode ser desprezada

A perda de energia através de calor tem uma relação inversamente proporcional a resistência térmica do sistema. A resistência térmica é caracterizada como a dificuldade que o sistema impõe as trocas de calor do seu interior com o meio externo, sendo quantificada pela razão entre a variação de temperatura que o sistema sofre e a quantidade de calor cedido para o ambiente (COSTA; MONTEIRO, 2018), como descrito na equação 7:

$$R_e = \frac{\Delta T}{Q} \quad (7)$$

Isolar a temperatura final na equação 7, obtêm-se a equação 8:

$$T_F = (R_e \cdot Q) + T_I \quad (8)$$

Fazendo um ajuste linear nos dados do crescimento da temperatura da água, obtém-se a equação: $y = 0,0098x + 5,4157$, sendo que, y representa T_F , e T_I a temperatura inicial. Comparando com os valores da equação (8), pode-se dizer que o produto entre R_e e Q é igual a 5,4157.

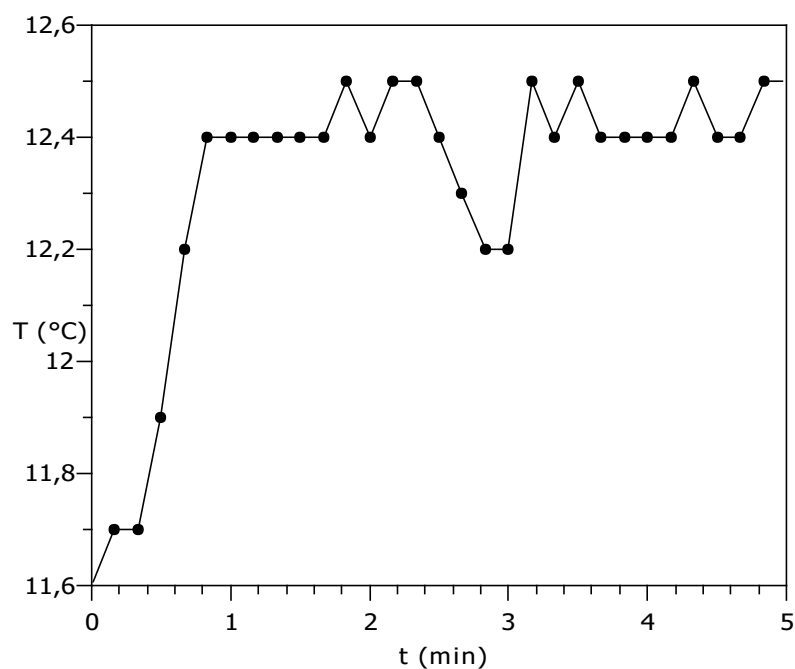
A quantidade de calor que a água perdeu pode ser calculada pela equação 6. A densidade da água a uma temperatura baixa como 6°C é de 999,9 kg/m³, podendo-se aproximar 1 g de água é igual a 1 ml. Assim, a massa da água contida no recipiente é de 20 g. O seu calor específico é de 4186 J/kg, e o calor da água é aproximadamente $Q=920,92$ J.

Dessa forma, a resistência térmica do sistema é 5,88 mK/W. Como o valor da resistência é muito pequena, pode-se constatar que o sistema troca calor de forma muito rápida com o meio externo quando as placas de Peltier estão desligadas.

5.2.6. Quinto Teste

O quinto teste consistiu em testar o sistema de controle de temperatura, no qual foi selecionado a temperatura de 12°C, e verificou-se a temperatura com o auxílio de um termopar a cada 10 segundos, num período de 5 minutos. Foi escolhido esse intervalo para obtenção de dados mais precisos com relação a variação de temperatura em torno do valor desejado. O resultado obtido é apresentado na figura 21:

Figura 19 - Gráfico da variação da temperatura para 12°C



Fonte: autoria própria (2021).

O sistema de controle de temperatura se mostrou bastante eficiente, tendo uma variação máxima de 0,6°C. Esse erro é causado pelo atraso que o sensor de temperatura possui para entrar em equilíbrio com o meio. Além disso, o valor lido gera apenas valores inteiros para a temperatura. O sistema de refrigeração é acionado quando o sensor de temperatura ler um valor inferior ao valor escolhido pelo usuário, sendo este, um valor de até 0,6°C abaixo do da temperatura escolhida pelo usuário. O proposto era que a temperatura se mantivesse abaixo do valor escolhido, mas o que ocorreu de fato foi que a temperatura se manteve acima do valor escolhido. Como apresentado na figura 21, o sistema de refrigeração foi acionado ao atingir 11,6°C e o valor máximo atingido foi de 12,5°C.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a fazer uma caixa refrigerada com um sistema de controle de temperatura utilizando a plataforma Arduino. Os objetivos foram atingidos devido os seguintes aspectos: o protótipo desenvolvido apresentou resultados significativos no que confere o controle de temperatura; a refrigeração da caixa atingiu valores consideráveis, chegando até a 6,6°C; o custo para a implementação foi baixo, aproximadamente R\$ 200,00 (duzentos reais); o aplicativo comunicou-se de forma eficiente com o sistema Arduino. É válido ressaltar ainda que, um dos pontos positivos do uso das células Peltier é que, elas resfriam de forma muito rápida após o seu ligamento, e elas não geram vibrações quando estão em funcionamento.

A refrigeração por células de Peltier se mostrou eficiente, porém, não foi possível nesse experimento utilizar de todo o potencial de refrigeração delas. Isso porque, por limitações de projeto, fez-se uso de apenas um dissipador para o lado quente, caso este fosse maior ou fosse acoplado um dissipador para cada célula, eficiência das placas iria aumentar.

Outro ponto a ser analisado é que, a temperatura ambiente interfere de maneira significativa no valor da temperatura interna da caixa. Isso porque o valor médio do gradiente de temperatura entre os dois meios é de aproximadamente 16°C, dificultando sua aplicação em regiões com temperatura ambiente elevada, como na região semiárida brasileira.

Um dos problemas do protótipo deste trabalho é a troca de calor com o meio de maneira muito rápida quando as células são desligadas. O ideal seria o sistema manter a temperatura do interior da caixa estável por um período significativo, com isso, reduzir-se-ia a energia elétrica consumida quando ocorresse o desligamento.

O aparato deste trabalho pode ser aperfeiçoado através: da melhoria do isolamento, do uso de capacitor e resistor para filtrar o sinal do sensor de temperatura, do uso de display para mostrar o valor da temperatura lida pelo termistor, do uso de sistemas de bateria para alimentar o sistema, da implementação de um sistema de armazenamento dos valores da temperatura, para que ao final do uso do refrigerador se observe as variações na temperatura para analisar a integridade das substâncias transportadas, ou armazenadas.

REFERÊNCIAS

COSTA, Vânia A. Efeitos Termoelétricos em Ligas e Nanoestruturas de Semicondutores IV – VI, 2015.

Yunus A. Çengel & Afshin J. Ghajar, Transferência de Calor e Massa, Editora Mcgraw Hill.

KREITH, Frank. Princípios de transferência de calor / Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn ; revisão técnica Keli Fabiana Seidel, Sergio Roberto Lopes; tradução Noveritis do Brasil. -- São Paulo: Cengage Learning, 2014.

VAN WYLEN, Gordon John. Fundamentos da termodinâmica clássica/Gordon John Van Wylen, Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke; tradução da quarta edição americana: Euryale de Jesus Zerbini, Ricardo Santilli Ekman Simões. – São Paulo: Blucher, 1995.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. “Fundamentos de Tranferencia de Calor e Massa”. Editora LTC. Tradução da 6ª edição Americana, 2008.

ASSUNÇÃO, Germano Scarabeli Custódio. Termodinâmica [recurso eletrônico] / Germano Scarabeli. Custódio Assunção, Pollianna Jesus de Paiva Mendes Godoi ; [revisão técnica: Henrique Martins Rocha]. – Porto Alegre : SAGAH, 2019.

BORGNAKKE, Claus. Fundamentos da termodinâmica [livro eletrônico] / Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag; coordenação e tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. – São Paulo: Blucher, 2018.

GOV. **RDC Nº 430**. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-de-diretoria-colegiada-rdc-n-430-de-8-de-outubro-de-2020-282070593> >. Acesso em: 8 de outubro de 2021.

CASTELMAQ. **História da refrigeração: quem inventou a geladeira?**. Disponível em: < <https://blog.castellmaq.com.br/historia-da-refrigeracao-quem-inventou-a-geladeira/> >. Acesso em: 26 de outubro de 2021.

BBC NEWS. **Como a invenção da geladeira mudou a história - e a forma como fazemos comércio**. Disponível em: < <https://www.bbc.com/portuguese/geral-42074161> >. Acesso em: 26 de outubro de 2021.

COOPERMITI. **A história da geladeira**. Disponível em: < <https://coopermiti.com.br/museu/a-historia-da-geladeira/> > . Acesso em 26 de outubro de 2021.

NATAL MAKERS. **Sensor de Temperatura a prova d'água NTC10K encapsulado**. Disponível em: < <https://nataalmakers.lojaintegrada.com.br/sensor-de-temperatura-a-prova-dagua-ntc10k-encapsulado-mf58> >. Acesso em: 28 de agosto de 2021.

DANVIC. **Módulo Peltier**. Disponível em: < <http://www.peltier.com.br/index.php?url=faq> >. Acesso em: 15 de maio de 2021.

G1. Disponível em: < <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2021/07/03/covid-19-df-recebe-401-mil-doses-da-janssen-congeladas-e-indisponiveis-para-uso.ghtml> > . Acesso em 28 de agosto de 2021.

ALMEIDA, AYRTON GISSONI. Adega climatizada para vinhos utilizando a célula de Peltier. Orientador: Prof.^a. MSc. Maria Marony Sousa Farias. 2013. 135 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da computação, Centro Universitário de Brasília, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, s.d..

MONTEIRO, Amanda Millions. Desenvolvimento e avaliação de banho termostático com controle e aquisição por Arduino. Orientador: Fábio Toshio Kanizawa. 2018. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Niterói, Universidade Federal Fluminense, Niterói, s.d..

DE VALÉCIO, Marcelo. ICTQ. **Transporte de vacinas – o que você precisa saber. Indústria Farmacêutica, s.d..** Disponível em: < <https://ictq.com.br/industria-farmaceutica/756-transporte-de-vacinas-o-que-voce-precisa-saber> >. Acesso em: 14, maio 2021.

Hammel, H. T., & Pierce, J. B. (1968). Regulation of internal body temperature. *Annual review of physiology*, 30(1), 641-710.

ARANTES, Rodrigo Cordeiro. Controle da temperatura da água utilizando microcontrolador. Brasília, 2013. 60 f. Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia de Computação – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2013.

ARDUINO. **O que é Arduino ?**. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> >. Acesso em: 20 de outubro de 2021.

MIT APP INVENTOR. Disponível em: < <http://appinventor.mit.edu/> >. Acesso em: 9 de setembro de 2021.

WIKIPÉDIA. **Efeito Seebeck**. Acesso em: < https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Seebeck >. Acesso em 07 de novembro de 2021.

ANEXO A

```
#include <Thermistor.h> //INCLUSÃO DA BIBLIOTECA
#include <SoftwareSerial.h>
#define rele 2

int tempReal = 0;
int state = 0;
int initialTemp = 8;
Thermistor temp(0);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(rele, OUTPUT);
}

void setTemp(int tempWant){
  initialTemp = tempWant;
}

void verifyTemp(){
  if(tempReal == initialTemp) {
    Serial.print("Estah igual\n");
    digitalWrite(rele, false);
  } else{
    if (initialTemp < tempReal){
      Serial.print("aciona a peltier\n");
      digitalWrite(rele, false);
    }else{
      Serial.print("espere estabilizar\n");
      digitalWrite(rele, true);
    }
  }
}
```

```
void loop() {  
    tempReal = temp.getTemp();  
    Serial.print("Temperatura: ");  
    Serial.print(tempReal);  
    Serial.println("*C");  
    if (Serial.available()) {  
        state = Serial.read();  
  
        switch(state){  
            case 1:  
                setTemp(8);  
                state = 0;  
                break;  
  
            case 2:  
                setTemp(10);  
                state = 0;  
                break;  
  
            case 3:  
                setTemp(12);  
                state = 0;  
                break;  
  
            case 4:  
                setTemp(14);  
                state = 0;  
                break;  
  
            case 5:  
                setTemp(16);  
                state = 0;  
                break;
```

```
    case 6:
        setTemp(18);
        state = 0;
        break;
    }
}

delay(2000);
Serial.print("teste\n");
Serial.print(" \n");
Serial.print(state);
Serial.print(" \n");
verifyTemp();
}
```

ANEXO B

