

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

ANA CLAUDIA KRONBAUER

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI REFRIGERADOR COM
PASTILHAS TERMOELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2013

ANA CLAUDIA KRONBAUER

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI REFRIGERADOR COM
PASTILHAS TERMOELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira.

Orientador: Prof. Dr. Renato Cesar Pompeu

MEDIANEIRA

2013



Ministério Da Educação
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná
Gerência de Ensino
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em
Manutenção Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI REFRIGERADOR COM PASTILHAS TERMOELÉTRICAS

Por:

ANA CLAUDIA KRONBAUER

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 16:00 h do dia 27 de Março de 2013 como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo no Curso superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Medianeira. Os acadêmicos foram argüidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Renato Cesar Pompeu

UTFPR – *Câmpus* Medianeira

(Orientador)

Prof. Me. Yuri Ferruzzi

UTFPR – *Câmpus* Medianeira

(Convidado)

Prof. Me. Neron Alipio Cortes
Berghauser

UTFPR – *Câmpus* Medianeira

(Convidado)

Prof. Me. Yuri Ferruzzi

UTFPR – *Câmpus* Medianeira

(Responsável pelas atividades de TCC)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na coordenação do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial.

Aos meus pais, Ernesto e Teresinha e meus irmãos, Rudinei e Elisandra, referências de minha vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e perseverança que tem me dado, pois foi crucial para a conclusão deste trabalho.

A toda minha família, pelo apoio e incentivo durante o período acadêmico.

Agradeço ao meu orientador Renato Cesar Pompeu pela dedicação e orientação deste projeto, e aos professores Yuri Ferruzzi e Alberto Noboru Miyadaira que contribuíram para a concretização dos resultados alcançados.

Agradeço também a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira, pela oportunidade, espaço e equipamentos cedidos para a execução deste trabalho.

RESUMO

KRONBAUER, Ana Claudia. Projeto e construção de um mini refrigerador com pastilhas termoelétricas. 2013. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2013.

RESUMO: Este trabalho consiste no projeto e construção de um mini refrigerador, portátil, com pastilhas termoelétricas, baseadas no funcionamento do Efeito Peltier. A pastilha termoelétrica é um semicondutor formado por dois materiais diferentes que quando submetidos à corrente contínua, uma junção absorverá calor e a outra dissipará calor. Esse efeito será responsável pela refrigeração no mini refrigerador. As pastilhas são alimentadas por uma fonte chaveada, por apresentar maior eficiência e por ter uma estrutura mais compacta do que uma fonte linear. O circuito PWM será usado para controlar a tensão aplicada na pastilha de efeito Peltier. Esse sistema de refrigeração foi submetido a vários testes e aprimoramentos antes de chegar à versão final. Por fim, foi feita uma avaliação quanto à eficiência e a viabilidade econômica do uso das pastilhas de efeito Peltier, bem como a viabilidade comercial do mini refrigerador.

Palavras-chave: Pastilhas termoelétricas. Circuito PWM. Mini refrigerador.

ABSTRACT

KRONBAUER, Ana Claudia. Project and construction of a portable mini refrigerator with thermoelectric modules. 2013. 62f. Course Conclusion Paper (Industrial Maintenance Technology) – Federal Technological University of Paraná. Medianeira, 2013.

ABSTRACT: This activity, consists in the project and construction of a portable mini refrigerator, with thermoelectric modules, based on the Peltier effect. The thermoelectric module is a semiconductor formed by two different materials than, when submitted to DC power, one junction will absorb the heat, and the other one will dissipate it. This effect will be responsible for the refrigeration. The modules are energized by a switched power supply, because it is more efficient and has a more compact structure than a linear one. A PWM (Pulse Width Modulation) circuit was used to control the tension applied to the Peltier effect module. This refrigeration system was submitted to many tests and improvements before to reach the final version. Finally, the efficiency and economical viability of the modules were evaluated; the economical viability of the mini refrigerator was also evaluated too.

Key-words: Thermoelectric Modules. PWM Circuit. Mini refrigerator.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema interno do protótipo	13
Figura 2 - Exemplo de medição de temperatura e tensão com multíteste.....	15
Figura 3 - Exemplo de um circuito no <i>protoboard</i>	16
Figura 4 - Fonte Chaveada.....	19
Figura 5 - Controle da Potência através do PWM	21
Figura 6 - Circuito Integrado 555.....	22
Figura 7 - Forma de onda retangular.....	23
Figura 8 - Sinal resultante da oscilação do CI 555	24
Figura 9 - Circuito PWM com CI 555.....	24
Figura 10 - Funcionamento de um módulo termoeletrico	27
Figura 11 - Funcionamento interno de um módulo termoeletrico	28
Figura 12 - Pastilha Peltier	36
Figura 13 - Recorte da chapa.....	37
Figura 14 - Marcação das dobras e furações	38
Figura 15 - Resultado final do Protótipo	38
Figura 16 - Testes com protótipo montado para experimento	41
Figura 17 - Teste com carga após melhoramento do isolamento térmico	43
Figura 18 - Teste com carga com isolamento térmico completo	44
Figura 19 - Nova estrutura do protótipo.....	45
Figura 20 - Teste com apenas uma pastilha termoeletrica.....	46
Figura 21 - Teste com a pastilha fora da caixa térmica	47
Figura 22 - Novo sistema de fixação	48
Figura 23 - Novo sistema de montagem	49
Figura 24 - Ambiente interno do protótipo	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das Fontes.....	17
Tabela 2 – Espessura do isolamento	29
Tabela 3 - Temperatura média do Teste 1	40
Tabela 4 - Temperatura Média do Teste 2	42
Tabela 5 - Resultado do Teste A.....	50
Tabela 6 - Resultado do Teste B.....	51
Tabela 7 – Tensão e corrente	58
Tabela 8 - Custos Finais	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráficos 1 - Resultado do primeiro teste	40
Gráficos 2 - Resultado do teste número 2	41
Gráficos 3 - Temperatura x Tempo do teste A	50
Gráficos 4 - Temperatura x Tempo do teste B	51
Gráficos 5 - Temperatura interna do protótipo x tempo	53
Gráficos 6 - Temperatura interna x tempo.....	54
Gráficos 7 - Temperatura interna do protótipo x tempo	56
Gráficos 8 - Temperatura da água e ambiente interno x tempo	57

LISTA DE SIGLAS

A	Ampére
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
V	Volts
W	Watts
Hz	Hertz
Ω	Ohm
μF	Micro Faraday
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PWM	Modulador de Largura de Pulso
LED	Diodo Emissor de Luz
Kg	Quilograma
mm	Milímetros
cm	Centímetros
m	Metro
mL	Mililitros
L	Litros
°C	Graus Celsius
°F	Graus Fahrenheit
K	Kelvin
s	Segundos
min	Minutos
h	Horas
KJ	Quilo Joule
J	Joule
R\$	Real

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MATERIAIS E MÉTODOS	13
2.1 DETALHES CONSTRUTIVOS	13
2.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA EXECUÇÃO DO PROTÓTIPO	14
2.3 MULTITESTE	14
2.4 OSCILOSCÓPIO	15
2.5 PLACA DE ENSAIO	16
2.6 FONTE DE ALIMENTAÇÃO	17
2.6.1 Fonte Chaveada x Fonte Linear	17
2.6.2 Fonte de Alimentação Utilizada no Projeto	18
2.7 CIRCUITO PWM	19
2.7.1 Modo de Funcionamento	20
2.7.2 Circuito CI 555	21
2.7.2.1 Pinagem CI 555	22
2.7.3 PWM com CI 555	24
2.8 PASTILHAS TERMOELÉTRICAS	26
2.8.1 Efeito Peltier	26
2.9 ISOLAMENTO TÉRMICO	28
2.9.1 Determinação da espessura do isolamento	29
2.10 CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DAS PASTILHAS TERMOELÉTRICAS	30
3 PROTÓTIPO	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 TESTES COM O PROTÓTIPO	39
4.1.1 Testes Iniciais	39
4.1.2 Teste número 3	42
4.1.3 Teste com convecção forçada	44
4.1.4 Teste sem pasta térmica	47
4.1.5 Teste com novo sistema de fixação entre dissipadores	48
4.1.5.1 Análise e Resultado dos testes A e B	52
4.1.6 Teste C	53
4.1.7 Teste D	54
4.1.8 Teste E	55
4.1.9 Teste com medição de temperatura na água	56
4.1.9.1 Consumo de energia elétrica	57
5 CUSTOS	60
6 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Na refrigeração convencional é indispensável o uso de componentes para completar o ciclo da troca de calor. Tais componentes são: evaporador, compressor, condensador, dispositivo de expansão e também o fluido refrigerante, que “é a substância que circulando dentro de um circuito fechado, é capaz de retirar calor de um meio enquanto se vaporiza a baixa pressão”. (SILVA, 2003, p. 33). Portanto, o fluido refrigerante é responsável pelo resfriamento dos alimentos em uma geladeira doméstica ou industrial.

Esses elementos, na sua maioria, são de grande porte para a utilização em um sistema compacto, como um mini refrigerador. Portanto, esse sistema tradicional de refrigeração não é o mais adequado para o projeto apresentado.

Para o desenvolvimento e execução do mini refrigerador optou-se pelo uso da refrigeração termoelétrica, que permite um sistema com baixa vibração, melhor custo/benefício, compacto, leve e não prejudicial ao meio ambiente, devido à ausência do fluido refrigerante.

O presente trabalho tem por objetivo o projeto e construção de um mini refrigerador com pastilhas termoelétricas, que tem seu funcionamento baseado no Efeito Peltier. Outra finalidade é uma avaliação sobre a eficiência das pastilhas e a viabilidade comercial do mini refrigerador.

A alimentação das pastilhas deve ser feita com corrente contínua (CC), e, portanto optou-se por uma fonte chaveada que fornece 12V. Isto permite a utilização do mini refrigerador na quase totalidade de veículos, pois possuem esta tensão em seu circuito principal.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 DETALHES CONSTRUTIVOS

Segundo Silva (2003) no setor de refrigeração está aumentando a preocupação com relação à conservação de energia. Desta forma está sendo cada vez mais comum o uso de equipamentos com tecnologia mais avançada e que possui um menor consumo de energia, possibilitando uma maior eficiência, economia e controle dos equipamentos.

O Mini Refrigerador é um exemplo disso, pois seu funcionamento baseado no princípio termoelétrico tem como característica principal o baixo consumo de energia. É um sistema de refrigeração que permite portabilidade do equipamento, trazendo maior comodidade aos seus usuários.

Seu esquema de montagem pode ser observado na figura 1.

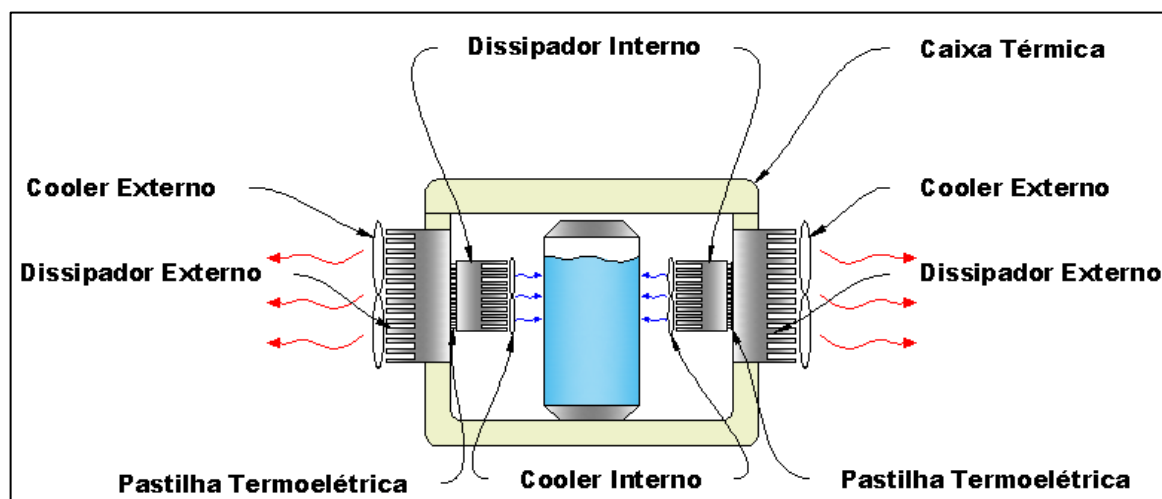


Figura 1 – Esquema interno do protótipo

Assim, o mini refrigerador será constituído de dissipadores e *coolers* internos e externos, que terão a função de liberar o ar quente para fora do mini refrigerador e também distribuir o ar frio em seu interior. A pastilha termoelétrica também faz parte do sistema, operando com base no Efeito Peltier, será responsável por “gerar” a diferença de temperatura entre suas faces, e conseqüentemente refrigerar o protótipo.

E por fim, utilizou-se uma caixa térmica constituída de poliuretano expandido, conhecido também como isopor, que fará o isolamento térmico, mantendo a temperatura interna menor do que a temperatura ambiente.

2.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA EXECUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para o estudo e a construção do protótipo, foram utilizados alguns materiais e equipamentos como: multíteste, osciloscópio, *protoboard*, fonte de alimentação, isolamento térmico, circuito PWM (*Pulse Width Modulation*), Modulação por largura de pulso, e pastilhas termoelétricas, que serão descritos a seguir.

2.3 MULTITESTE

O multímetro ou multíteste é o instrumento mais usado no teste e verificação de componentes e circuitos ligados à Elétrica. Estes equipamentos permitem medir tensão e resistência elétrica, em que este último item é muito utilizado para encontrar fios interrompidos, cabos e conectores com defeitos, mau contato e problemas nos componentes.

Outra grandeza capaz de ser mensurada é a corrente elétrica, embora em alguns casos essa medição possa ser descartada. Porém quando em um circuito é preciso conhecer e/ou controlar a corrente consumida pela carga, esta medição se faz necessária.

Alguns desses equipamentos permitem a medição de temperatura, normalmente disponibilizando as escalas de °F e °C.

No caso do protótipo foi essencial a medida da temperatura, pois é necessário o controle desta grandeza na face quente da pastilha Peltier, possibilitando o desligamento do circuito em caso de sobreaquecimento.

Para medição da temperatura utilizou-se o multíteste da marca *Instrutherm*, modelo MD-700 e para medição de tensão utilizou-se o multíteste de mesma marca MD-360.

A Figura 2 apresenta os dois tipos de medições citadas anteriormente.

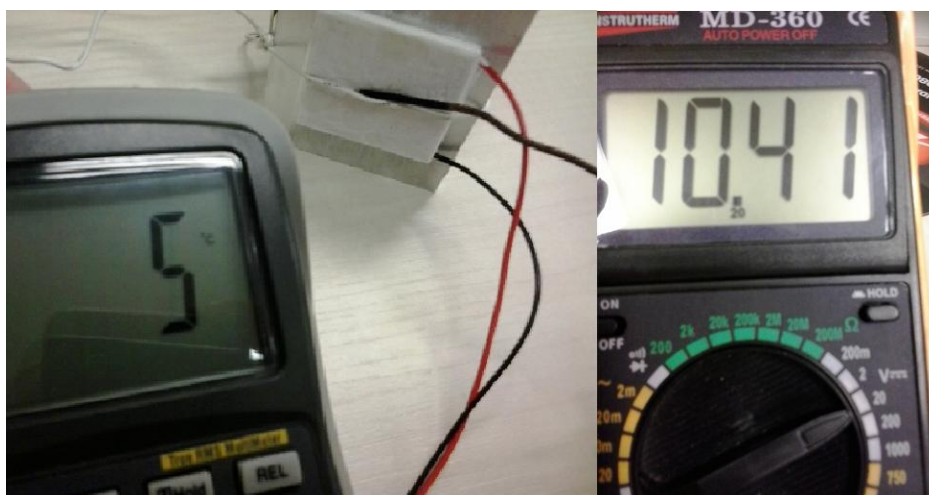


Figura 2 - Exemplo de medição de temperatura e tensão com multíteste

O primeiro multíteste MD 700 está ajustado na escala de °C enquanto o segundo MD 360 está ajustado para aferir medidas de tensão contínua, na escala de 20Vcc.

2.4 OSCILOSCÓPIO

O osciloscópio é um instrumento extremamente útil para os profissionais da área de Eletrônica, pois permite visualizar na tela as formas de ondas, frequências, amplitudes e observar outros detalhes, os quais sem ele seriam de difícil verificação.

O osciloscópio utilizado durante os testes iniciais com o circuito PWM é da marca MIT e modelo 1062, pertencente ao laboratório de Eletrônica da UTFPR.

Ao utilizar o osciloscópio o primeiro passo foi o ajuste da escala em 10x. A partir disto foi possível identificar a variação da onda de tensão na saída do circuito PWM, ou seja, sob as pastilhas termoeletricas, enquanto fazia-se o ajuste do potenciômetro.

O formato de onda identificado sobre a carga é uma onda quadrada, em que sua largura pode variar de acordo com o ajuste no circuito PWM, cujo funcionamento será ilustrado mais adiante.

Contudo a utilização do osciloscópio foi fundamental para saber se o circuito PWM seria efetivo na sua função, de variar a tensão de saída. Como foi visualizada a variação esperada, foi possível seguir o projeto do mini refrigerador, com a execução do circuito PWM.

2.5 PLACA DE ENSAIO

A placa de ensaio, ou *protoboard* como também é conhecida, possui furos e conexões que permitem a construção de circuitos experimentais. Esse equipamento tem a vantagem da fácil ligação dos componentes, e conseqüentemente, fácil correção do circuito caso este esteja incorreto.

A superfície do *protoboard* possui uma placa de plástico na qual são fixados os componentes, sendo na parte inferior o local dos contatos metálicos. Normalmente esse equipamento suporta uma corrente elétrica de até 3A.

Sobre esta matriz de contato, foi elaborado e testado o circuito PWM, que controlará a tensão das pastilhas Peltier. Este teste inicial evita que o circuito apresente defeitos quando estiver pronto em uma placa de cobre, o que dificultaria a correção.

Um exemplo de circuito montado em um *protoboard* é observado na Figura 3.

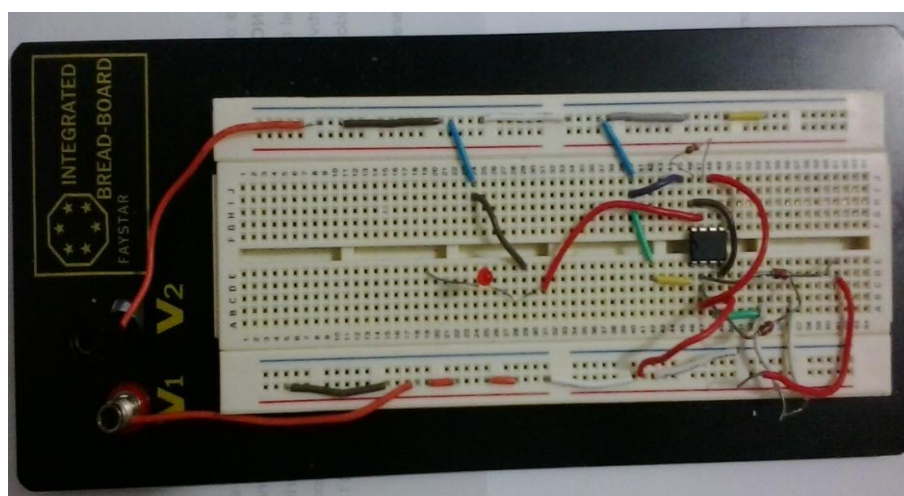


Figura 3 - Exemplo de um circuito no *protoboard*

2.6 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Para a maioria dos trabalhos que utilizam componentes eletrônicos é necessário o uso de tensão contínua para sua alimentação, o que não é comumente encontrado em residências e indústrias. Para isso é preciso o emprego de fontes de alimentação DC, que tem a função de transformar a tensão alternada, advinda das redes elétricas, em tensão contínua.

As fontes de alimentação podem ser classificadas de acordo com o tipo de potência em sua entrada e saída, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das Fontes

Entrada	Saída	Denominação
DC	DC	Regulador DC / Conversor DC
DC	AC	Inversor
AC	DC	Fonte
AC	AC	Regulador AC

Fonte: Mello, 1990, p.17

Os reguladores DC são utilizados para obter tensões em sua saída e são denominados conversores DC quando é utilizado fontes chaveadas.

Os inversores são bastante empregados como variadores de frequência.

As fontes AC/DC são empregadas como fontes de alimentação, que consiste no uso da tensão da rede elétrica como fonte primária, transformando-a em tensão contínua na sua saída. Já as fontes AC/AC são reguladores utilizados para melhorar as características da tensão da rede elétrica.

2.6.1 Fonte Chaveada x Fonte Linear

A fonte de alimentação série ou linear consiste em um circuito com um elemento de controle posto em série com a carga. Este elemento normalmente é o

transistor, que tem a função de manter a tensão na carga constante, independente do valor da mesma.

Este tipo de configuração possui uma boa eficiência, com a condição de que a tensão no transistor seja mantida em um valor desprezível com relação a tensão de saída. Mas na prática isso é bem difícil de acontecer, o que acarreta em grande perda de potência do elemento, necessitando o uso de grandes dissipadores de calor.

Ao contrário da fonte linear, a fonte chaveada não tem o problema de perda de potência, pois é utilizado um transistor em série com pulsos que o coloca na saturação. Portanto, o elemento série funciona como uma chave, e devido à baixa tensão de saturação do transistor o calor gerado será muito menor, o que ocasiona uma maior eficiência da fonte.

2.6.2 Fonte de Alimentação Utilizada no Projeto

Uma característica do mini-refrigerador é ser portátil, portanto ele deve ser feito de tal forma que seu transporte seja facilitado, utilizando componentes leves e que ocupem o menor espaço possível, incluindo o equipamento que fornecerá energia.

Pelo fato de operar em alta frequência, o transformador utilizado é menor que um transformador operando em 60Hz, por exemplo.

O fato básico que rege o funcionamento das Fontes Chaveadas (ou comutadas), está na capacidade de armazenamento de energia em capacitores (em forma de tensão) e em indutores (em forma de corrente). Assim, se colocarmos capacitores na saída de Fontes conseguiremos baixa ondulação (Ripple) e boa performance quanto a transientes de corrente. Já, os indutores são usados para transferência de energia (em forma de corrente) de uma fonte primária, normalmente uma fonte não regulada, para a saída. (MELLO, 1987, p.28).

Por apresentar vantagens relevantes, ao ser comparada com outras fontes de alimentação, como: maior eficiência, compacta e baixo ruído, a fonte de alimentação escolhida para o trabalho proposto foi a Fonte Chaveada, cujas principais características são:

- Corrente máxima de saída: 6,2 A
- Tensão de entrada: AC 96-264V
- Tensão de saída: 12V
- Potência máxima fornecida: 75W
- Dimensões: 35mm (A) x 76mm (L) x 110mm (P)

A fonte de alimentação utilizada no projeto pode ser visualizada na figura 4.



Figura 4 - Fonte Chaveada
Fonte: www.drlux.com.br

2.7 CIRCUITO PWM

PWM significa Modulação de Largura de Pulso, e é uma das técnicas que torna possível o controle da velocidade de um motor de corrente contínua sem que se altere seu torque. Permite também partidas suaves mesmo quando há cargas maiores sobre o motor.

A razão pelo uso do circuito PWM, é essa liberdade de controlar a tensão das pastilhas.

A partir disto pode ser feito um estudo detalhado da eficácia dos módulos termoelétricos quando exposto a diversas tensões, acompanhando e avaliando qual o limite de temperatura atingido para cada tensão ajustada. Esta avaliação pode ser feita através de gráficos, e como resultado poder afirmar quão eficiente é o sistema.

2.7.1 Modo de Funcionamento

Para entender melhor como essa tecnologia funciona, partimos de um circuito imaginário, composto por um interruptor, uma fonte de alimentação 6V, por exemplo, e a carga que deve ser controlada.

A onda representante da tensão na carga é uma onda quadrada, simbolizando o pulso do PWM.

Quando o interruptor estiver fechado, permitindo a passagem da corrente elétrica, estará sobre a carga uma tensão de 6V. Já no caso do interruptor aberto, a passagem de corrente elétrica será cessada, tendo sobre a carga uma tensão de 0V.

Imagine que seja possível abrir e fechar esse interruptor rapidamente, ora terá tensão total sobre a carga, e ora não haverá tensão sobre a mesma.

Para que a carga fique com 50% da tensão da fonte, metade do tempo o interruptor deve estar aberto, e a outra metade fechado, assim a tensão média sobre a carga será de 3V.

Em outro caso, se 80% do tempo o interruptor tenha ficado aberto, impedindo a passagem de corrente elétrica, e os 20% restante, o interruptor tenha ficado fechado, de modo que tenha tensão na carga, a diferença de potencial na saída do circuito será 80% menor que a nominal, em torno de 1,2V.

Isso significa que quanto maior a largura do pulso, maior a potência sobre a carga, e quanto menor a largura do pulso, menor a potência sobre a carga, como pode ser visualizado na figura 5.

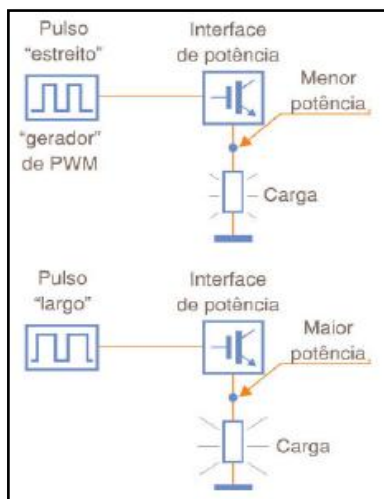


Figura 5 - Controle da Potência através do PWM
Fonte: www.sabereletronica.com.br

A vantagem dos circuitos PWM como controladores, quando comparado com os circuitos resistivos, é sua eficiência. Neste circuito, as perdas não ultrapassam 2%, enquanto em um circuito resistivo as perdas podem totalizar 20% da energia que deveria ser destinada à alimentação da carga.

Outra vantagem do PWM é que os pulsos estão com valor nominal de pico, o que gera maior torque nos motores. Já um controlador resistivo, que deve ter uma tensão reduzida, pode acarretar em uma parada do motor devido à redução do torque. Além disso, os potenciômetros usados no PWM são menores e controlam uma grande variedade de cargas, ao contrário dos circuitos resistivos que são maiores e mais caros.

2.7.2 Circuito CI 555

Como o circuito PWM utiliza o CI 555 em sua modulação, é crucial o entendimento sobre o funcionamento e a pinagem deste componente.

O CI 555 é utilizado em temporizadores de precisão e osciladores.

Com a função de temporizadores, é possível obter temporizações precisas desde microssegundos até horas.

Pode-se também utilizá-lo como multivibrador astável (oscilador), em que a frequência de oscilação é controlada externamente por resistores e capacitores.

No projeto em questão o CI 555 é configurado como um oscilador astável. Isto significa que, uma vez que é aplicada energia, o CI irá oscilar sem qualquer disparo externo.

2.7.2.1 Pinagem CI 555

- 1 – Terra
- 2 – Disparo
- 3 – Saída
- 4 – Reset
- 5 – Controle
- 6 – Limiar
- 7 – Descarga
- 8 – Vcc

A figura 6 representa o CI 555 com seus respectivos pinos.

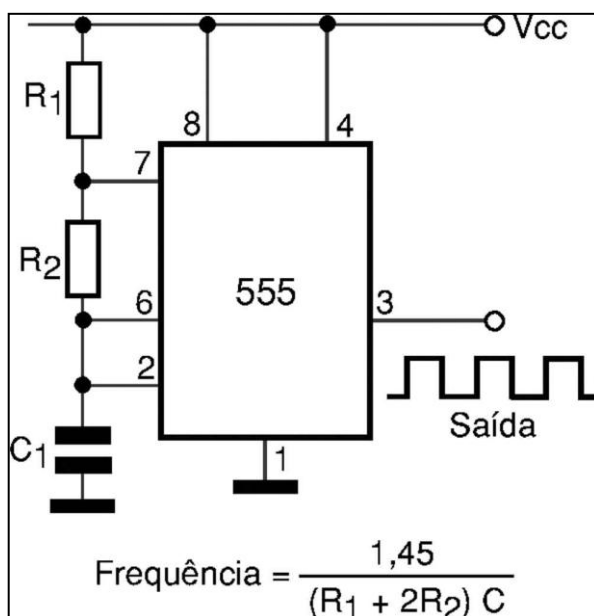


Figura 6 - Circuito Integrado 555
Fonte: www.sabereletronica.com.br

Nesta versão (oscilador), o circuito tem sua saída alternando estados entre o nível alto e baixo de modo a produzir um sinal retangular, cuja forma de onda é mostrada na figura 7.

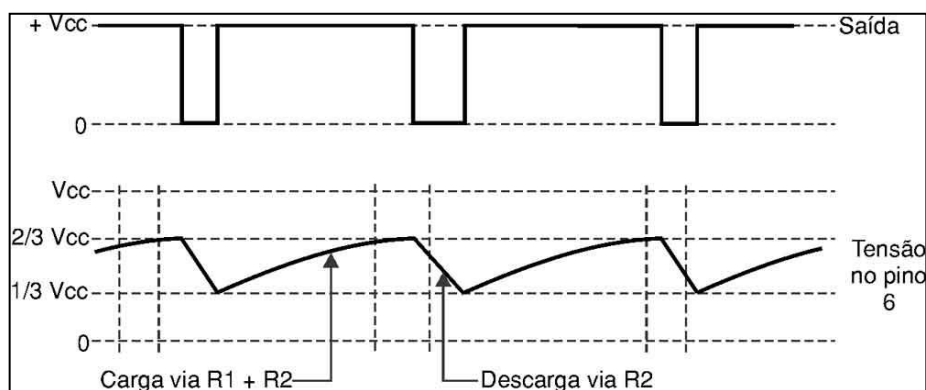


Figura 7 - Forma de onda retangular
Fonte: www.sabereletronica.com.br

Pode ser observado também nesta figura que não há um terminal de disparo, porque o circuito entra em funcionamento logo que é ligado.

Nesta configuração é preciso usar dois resistores e um capacitor, cujos valores determinarão a frequência de operação do circuito, de acordo com a equação apresentada na figura 6.

O funcionamento do oscilador ocorre da seguinte maneira:

1 - A tensão no capacitor sobe $1/3$ do valor da tensão de alimentação no ciclo de carga, quando o nível na saída do 555 se mantém alto.

2 - A partir do momento que a tensão alcança $2/3$ da tensão de alimentação, acontece a mudança de estado do circuito, quando então ao mesmo tempo em que a saída vai ao nível baixo, o capacitor se descarrega até $1/3$ da tensão de alimentação.

3 - Com $1/3$ da tensão de alimentação ocorre nova mudança de estado e temos um novo ciclo de carga.

Observe então que o capacitor carrega-se através dos dois resistores que estão em série (R_1+R_2), mas descarrega-se apenas pelo resistor R_2 .

Como a soma dos dois resistores (R_1+R_2) sempre é maior que cada uma das partes (R_2), este circuito produz um sinal que tem uma duração maior quando a saída está no nível alto do que quando está no nível baixo, conforme revela a figura 8.

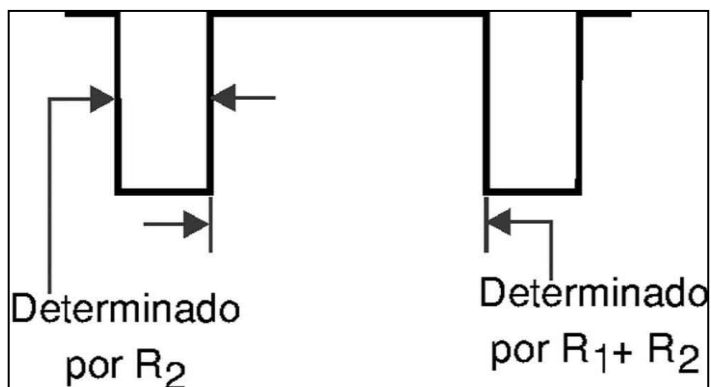


Figura 8 - Sinal resultante da oscilação do CI 555
 Fonte: www.sabereletronica.com.br

Para obter tempos iguais para carga e descarga obtendo um ciclo ativo de 50%, basta utilizarmos um valor de R_1 muito menor do que R_2 . Por exemplo:

$$R_1 = 200\text{k}\Omega$$

$$R_2 = 1,5\text{k}\Omega$$

2.7.3 PWM com CI 555

O circuito utilizado para controlar a tensão nas pastilhas termoelétricas é mostrado na figura 9.

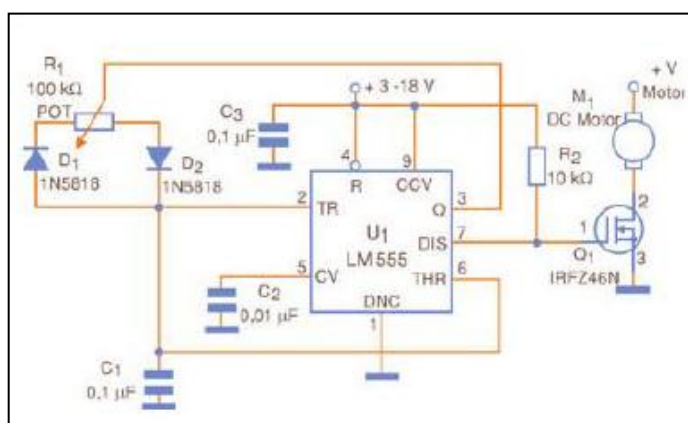


Figura 9 - Circuito PWM com CI 555
 Fonte: www.sabereletronica.com.br

Neste circuito os diodos ligados da forma apresentada garantem que a frequência se mantenha estável alterando-se apenas o ciclo ativo.

A frequência geral é dada por C1, que pode ser alterado conforme as características da carga. Como no caso das pastilhas termoelétricas a corrente consumida é significativa (em torno de 2A cada), o transistor de efeito de campo deve ser dotado de dissipador de calor.

Os componentes utilizados no circuito são:

- 01 Potenciômetro 100K Ω
- 02 Diodos 1N4001
- 01 CI 555
- 01 Mosfet IRFZ 48N
- 01 Resistor 100 Ω (em série com o LED)
- 01 Resistor de 1K Ω
- 02 Capacitores 0,1 μ F
- 01 Capacitor 01 η F
- 01 LED

O circuito apresentado na figura 8 teve algumas alterações, como a inserção do LED, que tem a função de identificar se o circuito está em funcionamento e constatar a variação de tensão sob a carga, portanto, é feita uma ligação em paralelo do LED com a carga.

O motor que está representado na figura acima simboliza as pastilhas termoelétricas ligadas eletricamente em paralelo.

Outro componente presente no circuito PWM é o potenciômetro que tem a função de variar a tensão que chega até os terminais de saída. E como anteriormente foi explicado, o potenciômetro vai regular a largura do pulso gerado no circuito, permitindo uma maior passagem de corrente elétrica ou não. Variando a tensão sobre a carga, variará também a temperatura entre as faces da pastilha termoelétrica.

Como cada valor de tensão terá uma temperatura correspondente na face fria, é fundamental a elaboração de um gráfico Tensão x Temperatura que nos permitirá conhecer o limite de refrigeração relacionado a cada tensão ajustada, como também identificar a estabilidade de temperatura da pastilha.

2.8 PASTILHAS TERMOELÉTRICAS

O uso da refrigeração termoelétrica ainda é um pouco restrito. No setor de climatização a sua utilização encarece o produto e não apresenta tanta eficiência quando comparada ao ar condicionado *split*, por exemplo.

Já na área de refrigeração, o uso de pastilhas de efeito Peltier está crescendo cada vez mais. Em bebedouros, seu uso é mais comum, pois não necessitam de uma potência muito elevada para que se atinja uma eficiência adequada.

Devido à diferença de temperatura entre suas faces atingir até 68°C, possibilitou o uso desta tecnologia em refrigeradores médicos, que necessitam de equipamentos leves, portáteis e com uma boa eficiência.

As pastilhas termoelétricas são perfeitas para certas aplicações e não recomendadas para outras. Dependendo de seu uso ela pode ser muito melhor que um compressor, por exemplo, para resfriar um microprocessador, ou pode se tornar inviável, que é o caso de um ar condicionado.

Estas pastilhas são muito pequenas, leves e também não emitem qualquer ruído, e por não possuir peças móveis facilita a precisão no controle de temperatura.

Portanto, como o objetivo para a construção do mini refrigerador, é que seja um aparelho leve, de fácil transporte e que tenha o mínimo de ruídos, a pastilha termoelétrica é ideal para realizar essa refrigeração.

2.8.1 Efeito Peltier

O Efeito Peltier, é dado como o inverso do efeito Seebeck, cujo funcionamento, é dado como “em um circuito fechado constituído por dois metais diferentes, circula uma corrente elétrica, sempre que as junções sejam mantidas a temperaturas diferentes.” (COSTA 1982, p.215)

Segundo Costa (1982, p. 215), o Efeito Seebeck é um gradiente de temperatura entre dois materiais condutores diferentes quando submetidos a uma tensão.

As pastilhas termoelétricas operam utilizando o efeito Peltier. Uma teoria que expõe que há um efeito aquecedor ou resfriador quando uma corrente elétrica passa por dois condutores. A tensão aplicada aos pólos de dois materiais distintos cria uma diferença de temperatura.

Este efeito ocorre porque uma junção destes materiais diferentes é dopada para atuar como um material do tipo P, tendo facilidade em receber elétrons. A outra junção atua como um material do tipo N, que tem facilidade em doar elétrons.

Ao se aplicar uma corrente elétrica contínua no terminal de material tipo N, elétrons migram do material tipo P para o material tipo N. Em função disso, essas junções irão permitir o fluxo de calor.

Assim, uma das superfícies esfria a medida que a outra aquece, sendo esse calor dissipado para o ambiente através de um sistema conveniente.

Para Costa (1982 p.216) o Efeito Peltier é caracterizado por um circuito elétrico formado por dois materiais semicondutores diferentes, e mediante a aplicação de corrente elétrica, uma junção vai absorver calor enquanto a outra vai dissipar calor.

Na figura 10 podemos acompanhar o funcionamento desse processo.

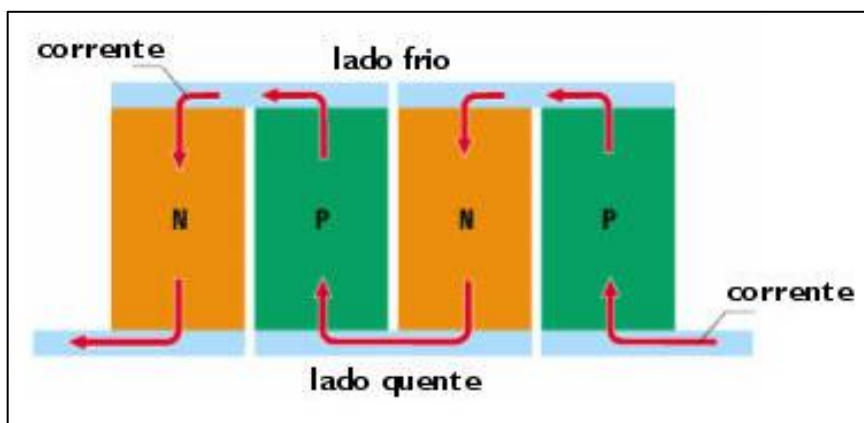


Figura 10 - Funcionamento de um módulo termoelétrico
Fonte: www.peltier.com.br

Uma típica pastilha Peltier conterà uma série de elementos semicondutores do tipo P e tipo N, agrupados como pares, que agirão como condutores diferentes.

Essa série de elementos é soldada entre duas placas cerâmicas, conforme mostra a figura 11.



Figura 11 - Funcionamento interno de um módulo termoelétrico
 Fonte: www.peltier.com.br

2.9 ISOLAMENTO TÉRMICO

Para o desenvolvimento do mini refrigerador se faz necessário o uso de um isolamento térmico, para que a temperatura interna possa ser mantida, e também para que não haja perda de energia com o meio externo.

Costa (1982, p.19) enfatiza que para a conservação de um sistema que tenha uma temperatura inferior à do meio ambiente, é necessário a criação de resistências térmicas elevadas, para que assim seja reduzido o fluxo natural de calor que tende levar a um equilíbrio térmico dos corpos.

Resistências térmicas elevadas são obtidas por meio dos isolamentos térmicos. Assim, a técnica da conservação de frio está ligada à construção de ambientes isolados e a problemas relacionados com o cálculo da carga térmica de manutenção da temperatura dos mesmos. (COSTA, 1982, p.19)

Os isolantes térmicos são materiais que possuem baixo coeficiente de condutividade “k”. Normalmente são materiais porosos, cuja resistência térmica se deve à baixa condutividade do ar contido em seus vazios.

Um bom isolamento térmico é caracterizado pelas seguintes propriedades:

- Ter baixa condutividade térmica
- Não sofrer fisicamente, influência da temperatura em que é aplicado.
- Não ser combustível
- Ser abundante e barato

- Ter baixa permeabilidade ao vapor da água.

Por tomar conhecimento das características principais, optou-se por utilizar no mini refrigerador o isolamento de poliestireno expandido (isopor), que segundo Costa (1982, p. 223) é um derivado de petróleo que quando expandido por meio de vapor de água torna-se um material plástico altamente poroso e praticamente impermeável.

Tendo em vista que o coeficiente de condutividade do isopor é 0,028, e por isto já se apresenta como um bom isolante, pode-se citar outra vantagem que é sua abundância e baixo custo quando comparado à espuma de poliuretano, por exemplo.

2.9.1 Determinação da espessura do isolamento

Pode-se identificar na tabela 2 o isolamento adequado de acordo com a diferença de temperatura entre a temperatura interna do protótipo e a temperatura do meio ambiente.

Tabela 2 – Espessura do isolamento

Δt	"k" isolante em kcal/mh°C					
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
10	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm
20	4	6	8	10	12	14
30	6	9	12	15	18	21
40	8	12	14	20	24	28
50	10	15	20	25	30	35

Fonte: Costa, 1982, p.225

Portanto como a diferença de temperatura do protótipo com a temperatura ambiente foi estimada em 22°C, e com o coeficiente de condutividade do isopor em 0,028, de acordo com a tabela 2, deve ser utilizado um isolamento com uma espessura de 4cm.

2.10 CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DAS PASTILHAS TERMOELÉTRICAS

Comercialmente há vários tipos de pastilhas termoeletricas, com uma ampla variação de tensão e corrente, portanto há também muitas pastilhas com diferentes capacidades de transferência de calor.

Para escolher a pastilha mais adequada para cada função é necessário efetuar alguns cálculos relacionados à carga térmica total do sistema, ou seja, estimar qual a potência necessária para resfriar o ambiente sob condições pré determinadas.

Os cálculos levam em consideração o isolamento térmico e a carga térmica do sistema, e para determinar a pastilha termoeletrica desse projeto, as equações dependem de alguns dados, como:

- Dimensões interna da caixa térmica: Altura: 14,5cm
Largura: 19cm
Profundidade: 11cm
- Temperatura Ambiente prevista: 30°C
- Temperatura Interna prevista: 8°C
- Isolamento de Isopor 1,5cm de espessura

Nota-se que a espessura do isolamento térmico utilizado é diferente da espessura anteriormente estimada, isso porque comercialmente a caixa térmica utilizada só disponibiliza uma espessura de 1,5cm.

- Capacidade da caixa térmica: 3L, ideal para armazenar uma lata de 350mL.
- Tempo de resfriamento previsto: 30 minutos.

Com os dados pré determinados elaborou-se os cálculos, como são apresentados a seguir.

A Energia Térmica do Refrigerante e da Água pode ser calculada pela equação (1).

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (1)$$

Sendo:

Q = Energia Térmica (KJ)

m = Massa (Kg)

c = Calor específico (KJ/Kg°C)

ΔT = Variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Portanto a energia térmica do refrigerante e da água é:

$$Q_{\text{Refri}} = 0,350 \times 4,20 \times 22$$

$$Q_{\text{Refri}} = 32,34 \text{ KJ}$$

$$Q_{\text{Água}} = 0,350 \times 4,186 \times 22$$

$$Q_{\text{Água}} = 32,23 \text{ KJ}$$

A Potência térmica do Refrigerante e da Água pode ser calculada pela equação (2).

$$P = Q \div t \quad (2)$$

Sendo:

P = Potência térmica (W)

Q = Energia térmica (J)

t = Tempo (s)

Portanto:

$$P_{\text{Refri}} = 32340 \div 1800$$

$$P_{\text{Refri}} = 17,97\text{W}$$

$$P_{\text{Água}} = 32230 \div 1800$$

$$P_{\text{Água}} = 17,90\text{W}$$

A Energia térmica do Alumínio pode ser calculada através da equação (1), cujo resultado é:

$$Q_{\text{Alumínio}} = 0,02 \times 0,92 \times 22$$

$$Q_{\text{Alumínio}} = 0,4048 \text{ KJ}$$

A Potência térmica do Alumínio pode ser estimada efetuando o cálculo através da equação (2) resultando em:

$$P_{\text{Alumínio}} = 404,8 \div 1800$$

$$P_{\text{Alumínio}} = 0,22\text{W}$$

Portanto podemos calcular a Potência térmica total da Lata + Refrigerante com a equação (3).

$$P_{\text{total}} = P_{\text{refri}} + P_{\text{Alumínio}} \quad (3)$$

Sendo:

P_{total} = Potência total do refrigerante + lata de alumínio (W)

$P_{\text{Alumínio}}$ = Potência térmica da lata de alumínio (W)

$P_{\text{Refrigerante}}$ = Potência térmica do refrigerante (W)

Logo a potência total é:

$$P_{\text{total}} = 17,97 + 0,22$$

$$P_{\text{total}} = 18,19\text{W}$$

Tendo o resultado da potência total consumida pela carga do sistema, é necessário efetuar o cálculo térmico das paredes da caixa térmica, que pode ser feito através das equações (4), (5) e (6).

$$A1 = P \times H \quad (4)$$

$$A2 = P \times L \quad (5)$$

$$A3 = L \times H \quad (6)$$

Sendo:

A = Área (m²)

P = Profundidade (m)

L = Largura (m)

H = Altura (m)

Como a caixa térmica possui seis faces, será calculada a área de três delas, e em seguida multiplicado por dois. Portanto, utilizando a equação (4), (5) e (6) teremos os seguintes resultados:

$$A1 = (0,11 \times 0,145) \times 2$$

$$A1 = 0,01595 \times 2$$

$$A1 = 0,0319\text{m}^2$$

$$A2 = (0,11 \times 0,19) \times 2$$

$$A2 = 0,0209 \times 2$$

$$A2 = 0,0418\text{m}^2$$

$$A3 = (0,145 \times 0,19) \times 2$$

$$A3 = 0,02755 \times 2$$

$$A3 = 0,0551\text{m}^2$$

É necessário também calcular a Resistência térmica (R_t) e o coeficiente global de transferência de calor (U) do isolamento térmico utilizado. Para isso utilizamos as equações (7) e (8).

$$R_t = L \text{ isopor} \div K \text{ isopor} \quad (7)$$

$$U = 1 \div R_t \quad (8)$$

Onde:

R_t = Resistência térmica ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

L = Espessura do material isolante (m)

K = Condutibilidade térmica (W/mK)

U = Coeficiente global de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

Logo utilizando a equação (7) obtemos:

$$R_t = 0,015 \div 0,035$$

$$R_t = 0,43\text{m}^2\text{K/W}$$

E conseqüentemente, com o uso da equação (8), temos:

$$U = 1 \div 0,43$$

$$U = 2,33\text{W/m}^2\text{K}$$

Tendo os dados necessários podemos calcular a quantidade de calor que atravessa a parede da caixa térmica com a equação (9).

$$Q = U \times A \times \Delta T \quad (9)$$

Sendo:

Q = Quantidade de calor que atravessa a parede (W)

U = Coeficiente global de transferência de calor (W/m²K)

A = Área da parede (m²)

ΔT = Variação de temperatura (K)

Assim, a quantidade de calor que atravessa as paredes da caixa térmica está representada pelos cálculos abaixo:

$$Q_1 = 2,33 \times 0,0319 \times 22$$

$$Q_1 = 1,63\text{W}$$

$$Q_2 = 2,33 \times 0,0418 \times 22$$

$$Q_2 = 2,14\text{W}$$

$$Q_3 = 2,33 \times 0,0551 \times 22$$

$$Q_3 = 2,82\text{W}$$

Por fim, para finalizar os cálculos de potência térmica devem ser somadas as potências das paredes da caixa térmica, da lata de alumínio e a do refrigerante, de acordo com a equação (10).

$$P_{\text{sistema}} = P_{\text{total}} + Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (10)$$

Sendo:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{Alumínio}} + P_{\text{Refrigerante}} \text{ (W)}$$

Portanto a potência térmica total do sistema é:

$$P_{\text{sistema}} = 18,19 + 1,63 + 2,14 + 2,82$$

$$P_{\text{sistema}} = 24,78\text{W}$$

Com o resultado final da potência total do sistema, pode ser feito o dimensionamento da pastilha termoelétrica, que deve ser escolhida de tal forma a suprir a energia térmica calculada, 24,78W.

Desta forma optou-se por adquirir duas pastilhas termoelétricas HTC 40-03-15.4 fornecida pela Loja Danvic, cujas características são:

Dimensões: 4cm (L) x 4cm (P) x 0,4mm (E)

Número de pares semicondutores: 127

Corrente máxima (A): 3

Tensão máxima (V): 15,4

Calor máximo (W): 29,5

Variação de temperatura máxima: 68°C

Resistência (Ω): 3,4

Observa-se que o calor máximo transferido de cada pastilha Peltier é de 29,5W, mas isso trabalhando em seus valores limites de corrente e tensão, porém como a fonte chaveada que alimentará a pastilha termoelétrica é de 12V, ela não estará operando em seu limite máximo, por isso escolheu-se duas pastilhas iguais com uma capacidade de transferência de calor acima do calculado para poder suprir a demanda de potência do sistema.

A Figura 12 apresenta o modelo de pastilha termoelétrica utilizada.



Figura 12 - Pastilha Peltier
Fonte: www.lojadanvic.com.br

Vale salientar que os cálculos de potência térmica foram realizados tanto para o refrigerante quanto para água, mas como os resultados foram semelhantes, a potência total do sistema é com base na potência térmica do refrigerante, pois este apresentou um maior consumo de energia para ter sua temperatura reduzida, sendo assim, se for necessário resfriar 350 mL de água, o sistema também será eficiente.

3 PROTÓTIPO

Antes do projeto final, foi feito um protótipo para conhecer e avaliar o comportamento das pastilhas de efeito Peltier em um sistema isolado.

O esquema de montagem do protótipo consiste em um dissipador e um *cooler* para resfriar a face quente da pastilha enquanto a face fria está diretamente em contato com o ambiente.

Esse sistema foi executado no Laboratório de Eletromecânica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, aproveitando retalhos de chapas de aço e utilizando equipamentos para cortes e dobras do laboratório.

A construção deste protótipo iniciou com o recorte da chapa de aço e as marcações para executar as dobras necessárias. Seguido disto, fez-se os furos para fixar os equipamentos, como *coolers* e dissipadores, na carcaça do protótipo como também para possibilitar a saída de ar das ventoinhas.

As figuras 13 e 14 demonstram o processo de corte e marcação.



Figura 13 - Recorte da chapa

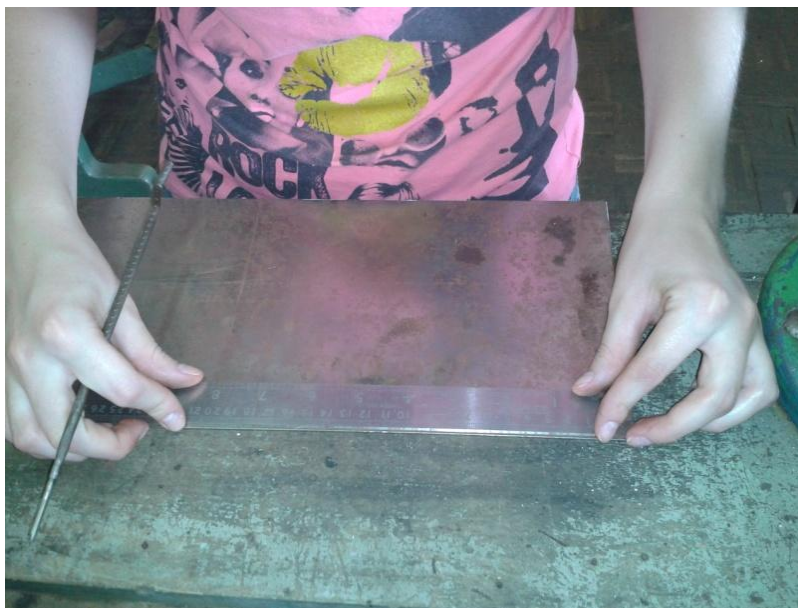


Figura 14 - Marcação das dobras e furações

Os furos nas laterais foram feitas com a furadeira fresadora FFC – 20 do laboratório de eletromecânica. A função dos furos é possibilitar a passagem do ar pelo *cooler*, que terá a função de refrigerar o dissipador ligado à face quente das pastilhas. Há também rasgos nas laterais do protótipo com a função de liberar ar quente do dissipador.

Após as dobras e a furação, iniciou a confecção de um suporte para fixar o circuito PWM no protótipo. Este exigiu os mesmos procedimentos já feitos com a caixa principal, recorte, marcações e furação.

Terminado a estrutura do protótipo, iniciou-se a fixação dos equipamentos. O resultado final do protótipo é apresentado na figura 15.



Figura 15 - Resultado final do Protótipo

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TESTES COM O PROTÓTIPO

Após a montagem do protótipo foram feitos mais de 10 testes e seus respectivos aperfeiçoamentos até atingir o resultado final.

4.1.1 Testes Iniciais

O teste inicial foi feito para tomar conhecimento do funcionamento real das pastilhas termoelétricas, identificando o tempo e o limite de refrigeração bem como sua capacidade térmica em um sistema isolado.

Foram utilizados três multímetros Instrutherm MD 700, sendo dois para medir a temperatura na face fria da pastilha termoelétrica e o terceiro multímetro foi utilizado intercalando a medição entre a temperatura no dissipador fixo na face quente da pastilha e a temperatura interna do protótipo.

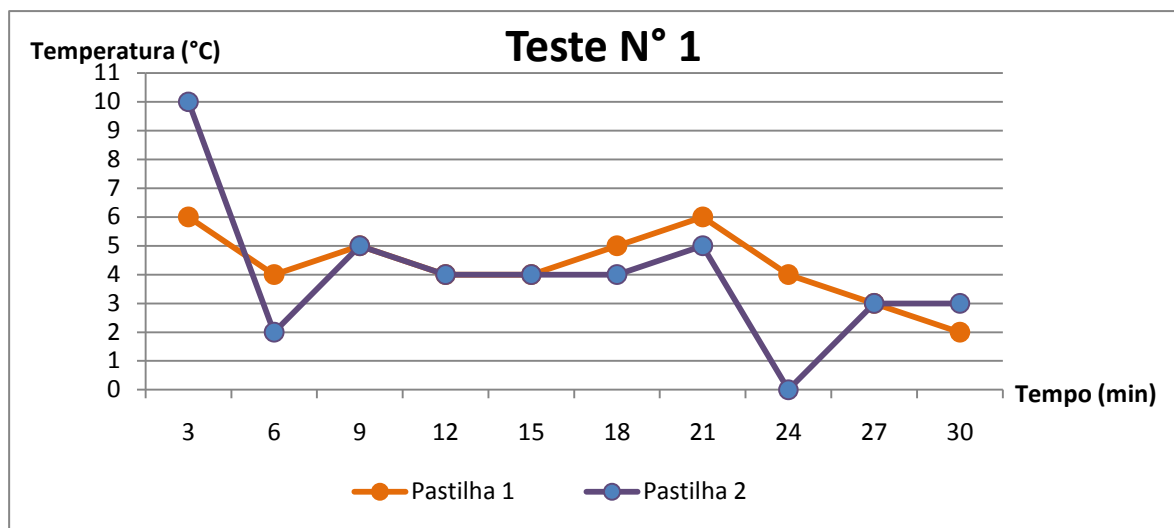
Esse primeiro teste consistiu no refrigerador sem carga, ou seja, não havia nenhum líquido a ser refrigerado no interior do protótipo.

O teste foi realizado sob as seguintes condições:

- Temperatura ambiente: 32°C
- Tensão de alimentação das pastilhas; 11,94V

Vale salientar que a partir dos 21 minutos de funcionamento foi retirado o isolamento térmico da tampa para identificar se haveria alguma interferência nas medidas finais.

O gráfico 1 apresenta os resultados do primeiro teste.



Gráficos 1 - Resultado do primeiro teste

Analisando o gráfico 1, observa-se uma redução de temperatura nos primeiros 20 minutos, e após a retirada da tampa isolada a temperatura continuou diminuindo, isto significa que o isolamento com poliestireno expandido (isopor) não interferiu no sistema. Este fato possivelmente ocorreu devido à troca de calor no interior do protótipo ser feita através de contato da pastilha direto com o ambiente, caso fosse feita uma transferência de calor através de convecção forçada, a perda de energia térmica seria maior.

Outra ressalva é em relação a uma redução brusca após 24 minutos de funcionamento, que pode ter sido ocasionado devido a um contato da ponteira do termopar diretamente na face da pastilha termoeletrica.

Com os dados do primeiro teste foram feitos cálculos da temperatura média das pastilhas termoeletricas durante o intervalo de 30 minutos, que está representada na tabela 3.

Tabela 3 - Temperatura média do Teste 1

TEMPERATURA MÉDIA	
Pastilha 1	Pastilha 2
4,3 °C	4°C

O segundo teste foi feito imediatamente após o primeiro. Com a mesma temperatura ambiente e a mesma tensão sobre as pastilhas. O que difere o primeiro

teste do segundo é a presença de carga no sistema, ou seja, uma lata de 350 mL de água, como é apresentado na figura 16.

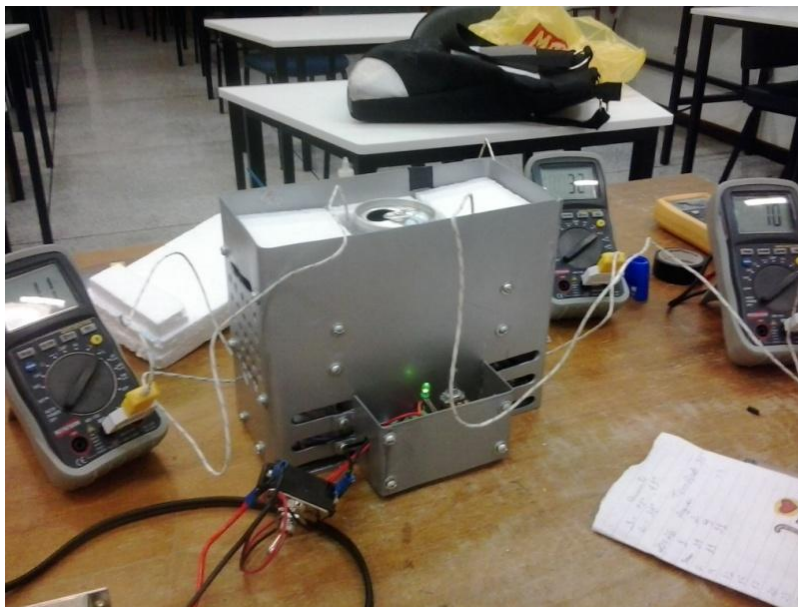
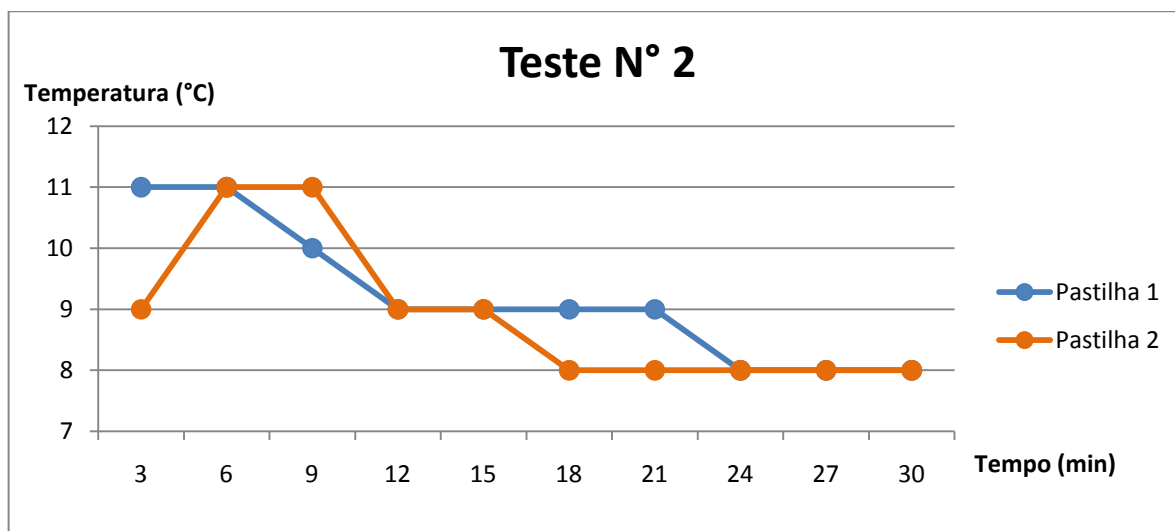


Figura 16 - Testes com protótipo montado para experimento

O resultado do teste com carga pode ser visualizado no gráfico 2.



Gráficos 2 - Resultado do teste número 2

Com a presença da lata teve também uma redução da temperatura, mas essa por sua vez se estabilizou em 8°C, enquanto no teste sem carga foi obtido uma temperatura média de aproximadamente 4°C.

A temperatura média das pastilhas no segundo teste está representada na tabela 4.

Tabela 4 - Temperatura Média do Teste 2

Temperatura Média	
Pastilha 1	Pastilha 2
9,2 °C	8,9 °C

Vale salientar que a temperatura na superfície do dissipador da pastilha 1 e da pastilha 2 estabilizou em 43 °C e 38 °C respectivamente, tanto no teste com carga quanto no teste sem carga.

Esta diferença de temperatura no dissipador da face quente das pastilhas possivelmente está relacionada com a utilização de *coolers* diferenciados, sendo que o *cooler* da pastilha 1 pode ser insuficiente para baixar a temperatura do dissipador.

Com os dados dos dois primeiros testes apurados, conclui-se que as pastilhas foram eficientes em resfriar sua face, porém não houve um resultado satisfatório para o resfriamento do ambiente interno do protótipo, podendo ser ocasionado pelo mau contato das pastilhas com os dissipadores da face quente, dificultando a troca de calor, e ainda um deficiente isolamento térmico entre o dissipador e o ambiente interno, propagando o ar quente gerado pela pastilha para dentro do protótipo.

Com esses resultados foi visível que a estrutura do protótipo deveria ser aperfeiçoada, buscando melhorar o isolamento térmico, e o contato entre as pastilhas termoelétricas e o dissipador.

4.1.2 Teste número 3

Para realizar este teste, foram feitas melhorias no isolamento térmico entre o dissipador quente com o ambiente interno do protótipo. A partir disto foi feito um teste com carga, contendo uma lata de refrigerante de 350 mL de água.

Lembrando que o sistema é composto por duas pastilhas termoelétricas e cada uma possui um conjunto dissipador/cooling na face quente, enquanto na face fria há apenas uma chapa de alumínio que faz o contato com a lata que deve ser refrigerada.

As condições para este teste são as seguintes:

- Temperatura ambiente: 26°C
- Tensão de alimentação das pastilhas: 11,94V
- Isolamento do protótipo com poliestireno expandido (isopor).
- Temperatura inicial da água: 18°C

O teste pode ser visualizado na figura 17.

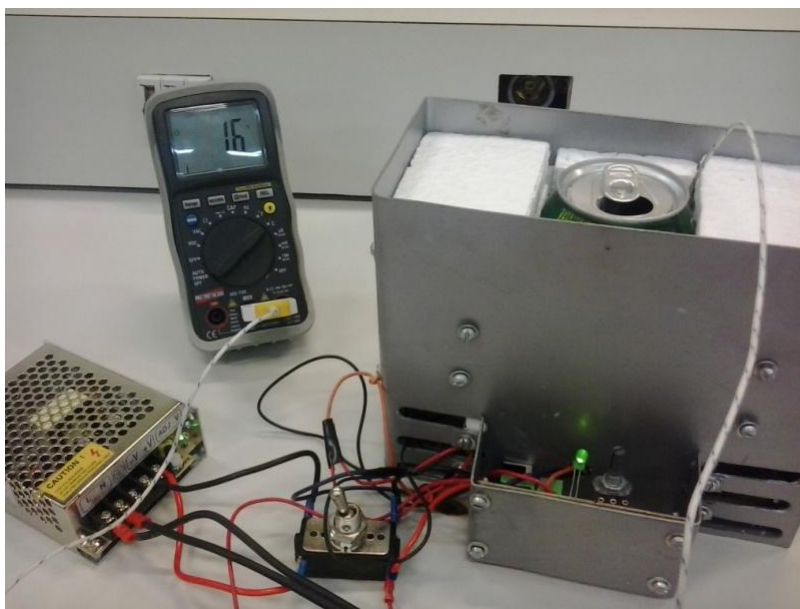


Figura 17 - Teste com carga após melhoramento do isolamento térmico

Com um multímetro na escala de graus Celsius (°C) foi realizada a medição da temperatura do ambiente interno, mas próximo à pastilha, o resultado obtido foi de 16°C inicial.

Após 5 minutos foi feita outra medição, desta vez com a tampa sobre a estrutura, como é apresentado na figura 18.

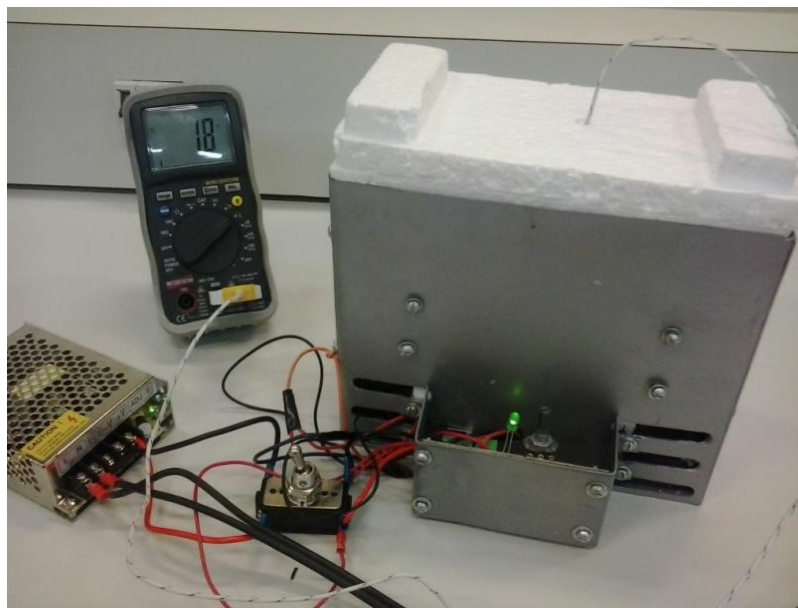


Figura 18 - Teste com carga com isolamento térmico completo

O comportamento inicial da pastilha é como o esperado, há uma redução de temperatura, mas nota-se que com o passar do tempo a temperatura interna começa a aumentar, portanto o isolamento térmico neste caso também não foi eficiente, e, além disto, a pastilha termoelétrica não estava conseguindo refrigerar da forma prevista.

Isto pode estar acontecendo pela ineficiente troca de calor entre o lado frio da pastilha e a carga, pois neste teste há somente uma chapa de alumínio responsável pelo contato entre as partes.

Outra causa pode ser a má dissipação de calor na face quente da pastilha termoelétrica juntamente com o isolamento térmico, que ainda é insuficiente, ocasionando uma transferência de calor para o interior do protótipo.

Neste caso foi feito um novo teste com a presença de um sistema de convecção forçada na face fria da pastilha termoelétrica.

4.1.3 Teste com convecção forçada

Nos testes anteriores foram observadas algumas falhas no sistema, como o isolamento térmico insuficiente e também a pouca troca de calor entre a face fria da pastilha termoelétrica com a carga.

Com o objetivo de sanar estes problemas optou-se por alterar a estrutura do protótipo, utilizando uma caixa térmica ao invés da estrutura de aço, pois desta forma haverá um isolamento térmico uniforme e com o mínimo de perdas.

Já para melhorar a troca de calor da face fria da pastilha Peltier no interior do protótipo, foi utilizado um conjunto dissipador/*cooler* para cada pastilha. Esse sistema será responsável por manter o ambiente interno refrigerado constantemente, fazendo o ar circular.

A estrutura montada na caixa térmica está representada pela figura 19.



Figura 19 - Nova estrutura do protótipo

Executou-se um novo teste, mas apenas com um sistema de refrigeração, ou seja, primeiro foi montado uma pastilha termoelétrica com um conjunto dissipador/*cooler* para a face fria e outro conjunto para a face quente. Utilizou-se também espuma de poliuretano para isolar o dissipador do lado quente com o dissipador do lado frio. Optou-se por este tipo de isolamento térmico entre os dissipadores, pela facilidade de aplicação, ao contrário do isopor, que deveria ser recortado resultando em uma espessura uniforme de 0,4 mm.

Optou-se por fazer este teste com apenas uma pastilha termoelétrica para conhecer a eficiência. Em caso de resultados satisfatórios será instalado o segundo módulo termoelétrico para então realizar os testes finais.

O teste com apenas uma pastilha instalada foi executado dentro das seguintes condições:

- Temperatura ambiente 24°C
- Tensão de alimentação: 12V
- Protótipo sem carga

A figura 20 apresenta os instantes iniciais do teste.

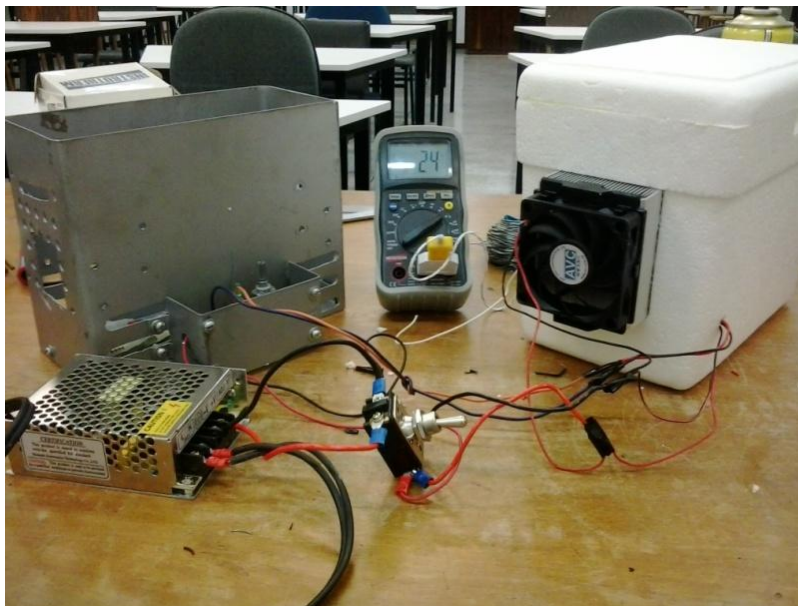


Figura 20 - Teste com apenas uma pastilha termoelétrica

Nesta medição o comportamento da pastilha foi semelhante aos testes anteriores. Apesar de ter um bom isolamento e possuir um sistema de convecção forçada na face fria, este sistema não apresentou boa eficiência.

Nos primeiros minutos teve uma queda de temperatura interna de 6°C abaixo da temperatura ambiente, estabilizando em 18°C. Porém após 6 minutos do início do teste a temperatura interna aumentou gradativamente até 26°C, com isso o sistema foi desligado para evitar um possível dano à pastilha termoelétrica.

Nesta condição apontou-se como uma provável causa, o uso da pasta térmica, pois quando utilizada em excesso acaba prejudicando a troca de calor da face da pastilha com o dissipador.

Outra possível causa é a falha na montagem dos dissipadores, pois eles foram fixados na pastilha utilizando somente a pasta térmica, podendo assim ter ocorrido um mau contato e uma ineficiente troca de calor.

Para corrigir isso foi elaborado um esquema adequado de fixação dos dissipadores, de forma a obter um contato adequado com a pastilha, para melhorar a troca de calor.

4.1.4 Teste sem pasta térmica

Após identificar os possíveis defeitos foi executado um novo teste retirando a pastilha da caixa térmica, e removendo totalmente a pasta térmica.

Este teste visa identificar até que ponto a presença da pasta térmica é prejudicial para o sistema.

A nova medição consistiu na pastilha termoelétrica conectada ao dissipador na face fria e um conjunto (dissipador/cooler) na face quente, como mostra a figura 21.

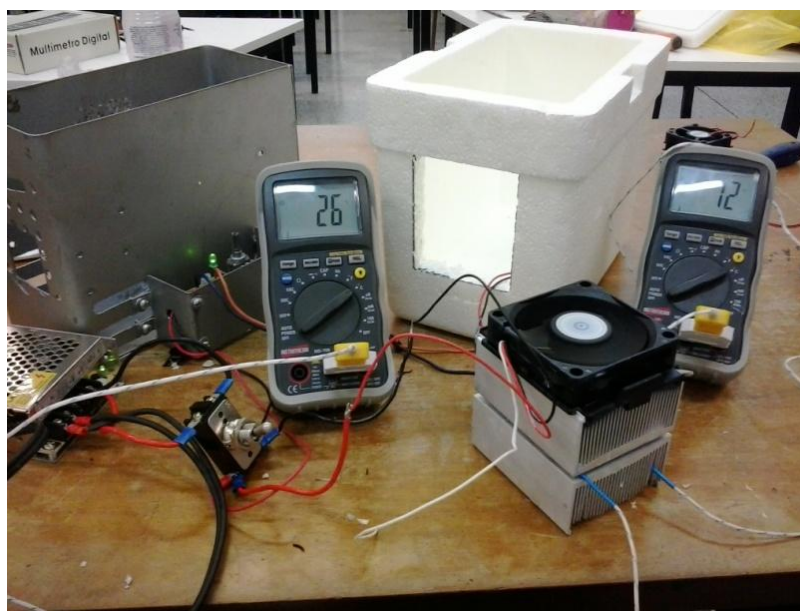


Figura 21 - Teste com a pastilha fora da caixa térmica

O teste sem o uso da pasta térmica realizou-se em uma temperatura ambiente de 24°C e tensão de alimentação, em torno de 12V.

Foi acionado o sistema e após 6 minutos de funcionamento o dissipador da face fria da pastilha estava em 16°C, e o dissipador fixado na face quente apontava 29°C.

Decorrido 20 minutos do teste, o dissipador do lado frio estava em 12°C enquanto o dissipador do lado quente apresentava uma temperatura de 26°C.

Com esses dados foi possível afirmar que a pasta térmica teve influência nos testes anteriores, possivelmente pelo excesso de produto na superfície da pastilha

termoelétrica, prejudicando a transferência de calor da face quente, que por sua vez aumentava a temperatura do lado frio.

Por outro lado sem a presença da pasta térmica torna-se difícil a fixação da pastilha nos dissipadores.

Uma solução é refazer os testes, mas com a mínima quantidade de pasta térmica.

4.1.5 Teste com novo sistema de fixação entre dissipadores

Analisado os testes anteriores, foi necessário o aprimoramento do sistema de refrigeração com pastilha Peltier.

Para realizar as novas medições o sistema de montagem passou por algumas alterações, entre elas:

- Dissipadores fixados através de parafusos, formando um sanduíche com a pastilha de efeito Peltier.
- Uso da pasta térmica, em quantidade mínima.
- Utilização de isolamento térmico entre dissipadores, com isopor.

As devidas modificações podem ser observadas na figura 22.



Figura 22 - Novo sistema de fixação

A figura 22 apresenta o sistema composto por um dissipador na face fria da pastilha e um dissipador/cooling na face quente da mesma. Contém também um isolamento térmico de isopor entre os dois dissipadores para impedir a propagação de calor para o dissipador conectado a face fria, desta forma o sistema pode atingir uma eficiência maior.

Neste teste o *cooling* da face fria foi retirado, pois como as medições são feitas em um ambiente sem isolamento térmico, a presença do mesmo pode gerar perda de energia térmica.

Na figura 23, pode-se notar a presença de um parafuso, que é responsável pela fixação entre um dissipador e outro, assim a pressão sob a pastilha termoelétrica aumenta, melhorando o contato entre a pastilha/dissipador, e consequentemente melhorando a troca de calor.

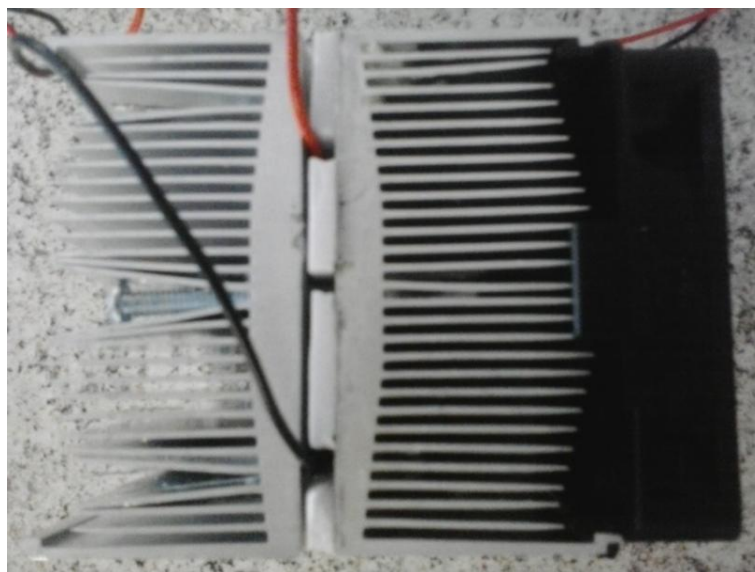


Figura 23 - Novo sistema de montagem

Ao finalizar a montagem efetuaram-se duas avaliações, A e B.

O teste A foi realizado sob as seguintes condições:

- Alimentação do sistema através da fonte chaveada fornecendo 11,9V.
- Presença do circuito PWM, fornecendo 11V para a pastilha termoelétrica.
- Temperatura ambiente: 26°C
- Duração do teste de 30 minutos, coletando informações a cada 3 minutos.

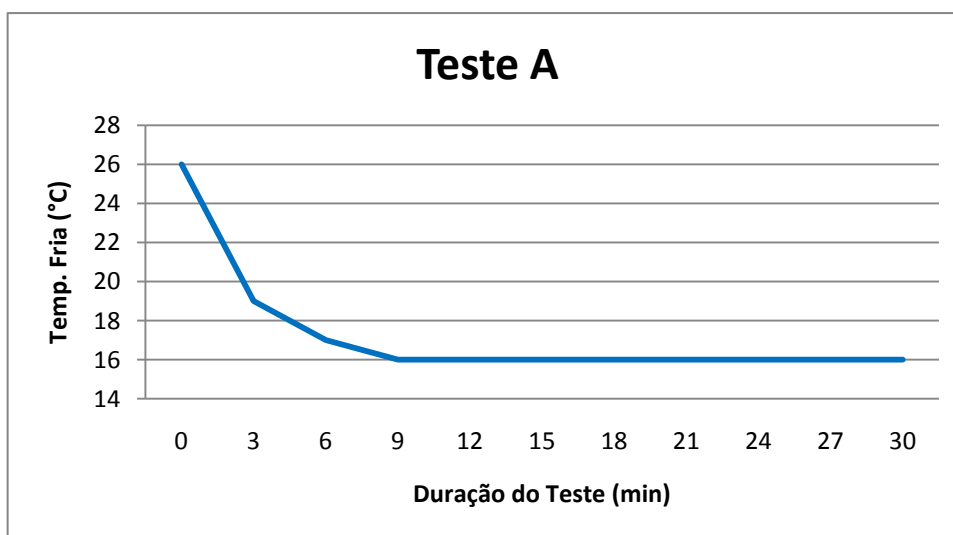
Os resultados do Teste A estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 5 - Resultado do Teste A

TESTE A		
Duração do Teste (min)	Temperatura Fria (°C)	Tensão (V)
0	26	10.9
3	19	10.9
6	17	10.9
9	16	11
12	16	10.9
15	16	11
18	16	10.9
21	16	11
24	16	10.9
27	16	10.9
30	16	11

Analisando os resultados da tabela 5 foi possível elaborar um gráfico para poder identificar a curva de temperatura no decorrer do teste.

O gráfico 3 demonstra o resultado final da curva citada.

**Gráficos 3 - Temperatura x Tempo do teste A**

O teste B foi efetuado seguindo tais condições:

- Fonte de alimentação fornecendo 11,9V
- Temperatura ambiente: 26°C
- Duração do teste de 30 minutos, coletando informações a cada 3 minutos.
- Ausência do circuito PWM

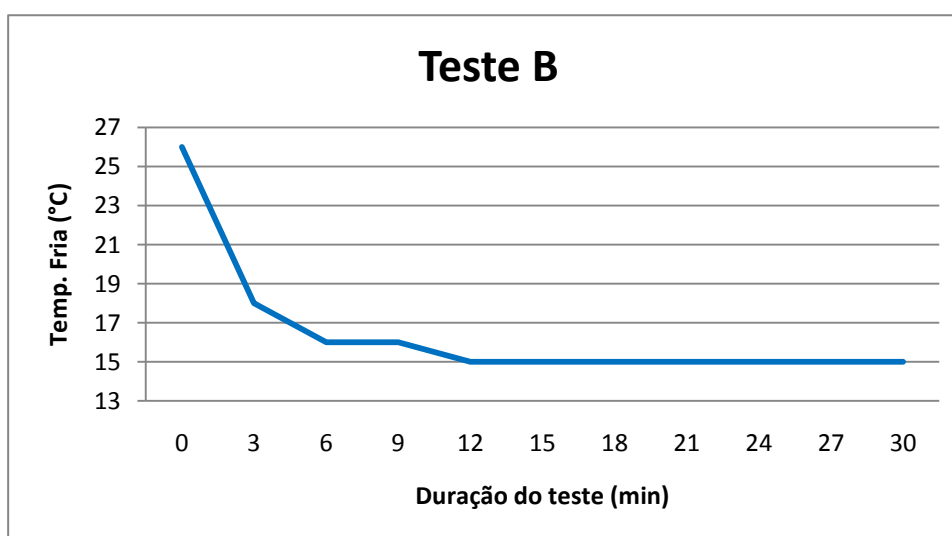
Os resultados coletados no teste B podem ser visualizados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultado do Teste B

TESTE B		
Duração do Teste (min)	Temperatura Fria (°C)	Tensão (V)
0	26	11,7
3	18	11,7
6	16	11,7
9	16	11,6
12	15	11,5
15	15	11,4
18	15	11,4
21	15	11,5
24	15	11,5
27	15	11,5
30	15	11,6

Assim como no teste A, com os dados do teste B foi elaborado um gráfico para poder fazer uma análise mais completa da curva de temperatura da face fria da pastilha ao longo do tempo.

Tal curva é apresentada no gráfico 4.



Gráficos 4 - Temperatura x Tempo do teste B

4.1.5.1 Análise e Resultado dos testes A e B

Os testes A e B foram feitos ao ar livre, sem isolamento térmico, pois visam apenas demonstrar os melhoramentos propostos antes do teste final.

No teste A, todo o sistema foi alimentado por uma fonte chaveada, que por sua vez alimenta o circuito PWM, sendo este quem limita o fornecimento de tensão para a pastilha termoelétrica. A tensão registrada sob a pastilha sofreu algumas perdas pelo circuito, possivelmente advindas das conexões e o consumo dos componentes do circuito PWM.

O resultado do teste A provou que a fixação entre os dissipadores foi efetiva, pois a pastilha termoelétrica tem a temperatura da face fria reduzida até estabilizar. Apesar de não atingir uma temperatura ideal para refrigerar uma lata de 350ml por exemplo, os resultados foram aceitáveis.

Já no teste B, a pastilha termoelétrica foi conectada diretamente à fonte chaveada, sem a presença do circuito PWM. Este teste tinha como objetivo, além de avaliar a eficiência da pastilha com uma boa fixação entre os dissipadores, verificar qual o consumo do circuito PWM, que poderia vir a causar uma queda de tensão considerável, resultando em uma menor eficiência da pastilha Peltier.

Esse efeito pode ser observado comparando os resultados finais do teste A e B.

No teste A, a temperatura mínima na superfície do dissipador estabilizou em 16 °C e a tensão média registrada resultou em 10,9V. Enquanto no teste B, a temperatura mínima na superfície do dissipador estabilizou em 15°C e a tensão média permaneceu em 11,5V.

Portanto houve uma diferença de 0,6V com o uso do circuito PWM, e a diferença de temperatura foi de 1°C.

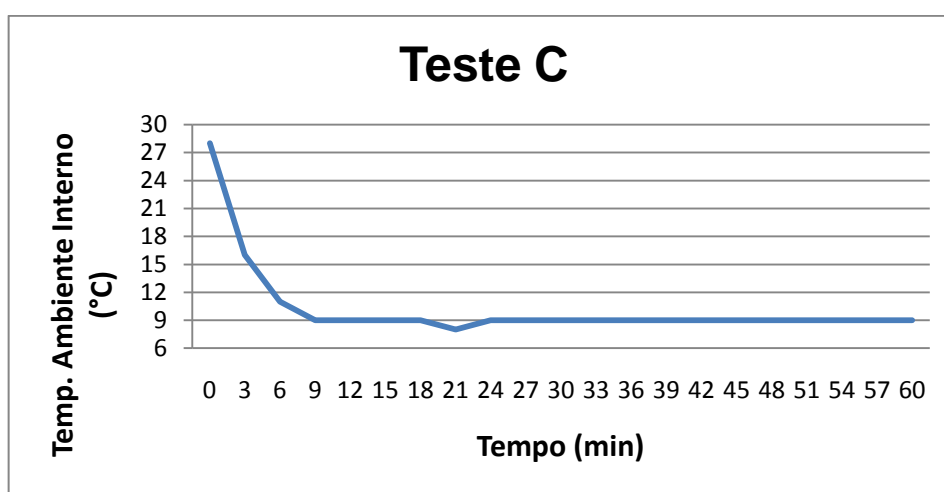
Esta diferença é considerável, pois no resultado final 1°C supriria uma possível perda do sistema.

A partir deste teste conclui-se que é necessário fazer algumas melhorias, como a troca do dissipador da face fria por outro de menor dimensão, pois o atual tem uma área de contato muito grande, resultando em um maior tempo para que esta energia térmica seja dispersa no ambiente interno, além disso, o dissipador atual ocupa muito espaço no interior do mini refrigerador.

4.1.6 Teste C

Este teste consistiu nas medições com as pastilhas termoelétricas funcionando em um sistema isolado com o uso do PWM, porém sem carga. As medições foram coletadas durante 1 hora, a cada 3 minutos, para que se possa identificar a estabilidade da temperatura interna durante um período maior.

O resultado pode ser observado no gráfico 5.



Gráficos 5 - Temperatura interna do protótipo x tempo

Ao iniciar o teste, a temperatura ambiente estava 28°C.

Analisando os resultados tem-se que em 9 minutos de funcionamento a temperatura diminuiu 19°C abaixo da temperatura ambiente, estabilizando em 9°C.

Considerando as condições deste teste, o sistema continha:

- Cooler/Dissipador na face quente
- Cooler/Dissipador na face fria
- Isolamento térmico entre os dissipadores
- Circuito PWM
- Ausência de carga

Pode-se concluir que o resultado foi plausível, pois a temperatura atingida no final do teste, 9°C, é semelhante a temperatura de uma geladeira convencional, possibilitando assim a refrigeração de uma lata de refrigerante. Mas para poder comprovar este feito, é necessário executar um teste com carga, apresentado no próximo tópico.

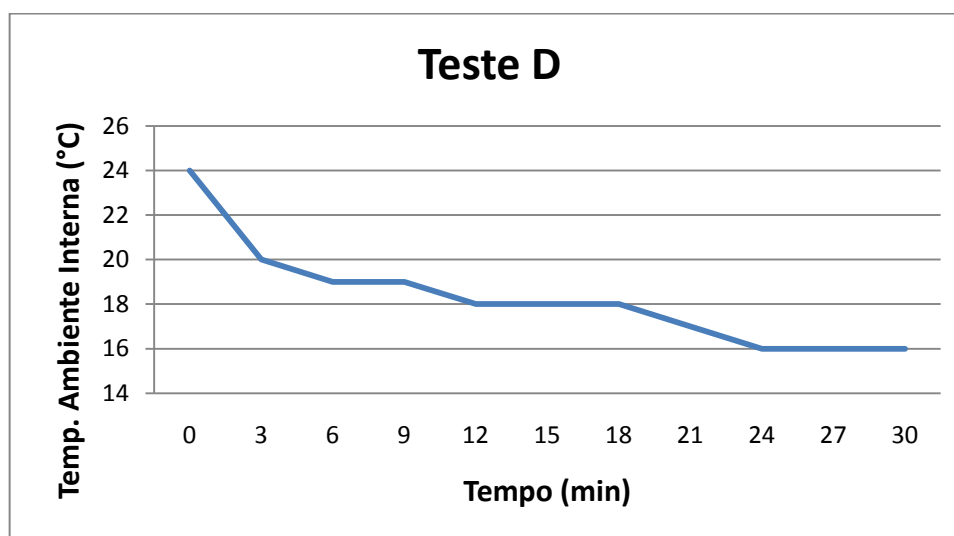
4.1.7 Teste D

Para avaliar a eficiência real do mini refrigerador, faz-se necessário a execução de um teste com carga.

Portanto, foi feito este teste nas seguintes condições:

- Presença de uma lata de refrigerante inicialmente a 24°C.
- Utilização do circuito PWM.
- Tensão máxima do PWM sobre as pastilhas termoelétricas, em torno de 9,9V.
- Utilização de dissipadores e *coolers* na mesma condição do teste anterior.
- Duração do teste: 30 minutos.

Com as medições foi possível elaborar um gráfico com os dados obtidos, como é apresentado no gráfico 6.



Gráficos 6 - Temperatura interna x tempo

Durante 30 minutos de funcionamento a temperatura interna do protótipo reduziu 8°C abaixo da temperatura ambiente, estabilizando em 16°C. Na prática a temperatura de 16°C não é o suficiente para gelar uma lata de refrigerante.

Portanto este teste mostrou que as pastilhas termoelétricas não foram suficientes para reduzir a uma temperatura adequada durante os 30 minutos previstos. Mas é possível que esta temperatura diminua caso o teste seja feito durante um tempo maior.

Um possível motivo para baixa eficiência nessas condições é que o fornecimento de tensão máxima do circuito PWM na carga limitou-se em 9,9V, e não 12V como previsto. Para assegurar ser esta é a causa da baixa eficiência das pastilhas termoelétricas, deve ser realizado um novo teste com a carga ligada diretamente na fonte chaveada.

4.1.8 Teste E

Este teste visa estimar a eficiência da pastilha Peltier quando alimentada diretamente pela fonte chaveada em 12V, com a presença de carga no sistema.

As condições do teste foram as seguintes:

- Temperatura ambiente inicial: 29°C
- Ausência do circuito PWM
- Teste com a presença de uma lata de refrigerante inicialmente em 24°C
- Duração do teste: 2 horas

Na figura 24 pode ser visualizado o ambiente interno do protótipo.

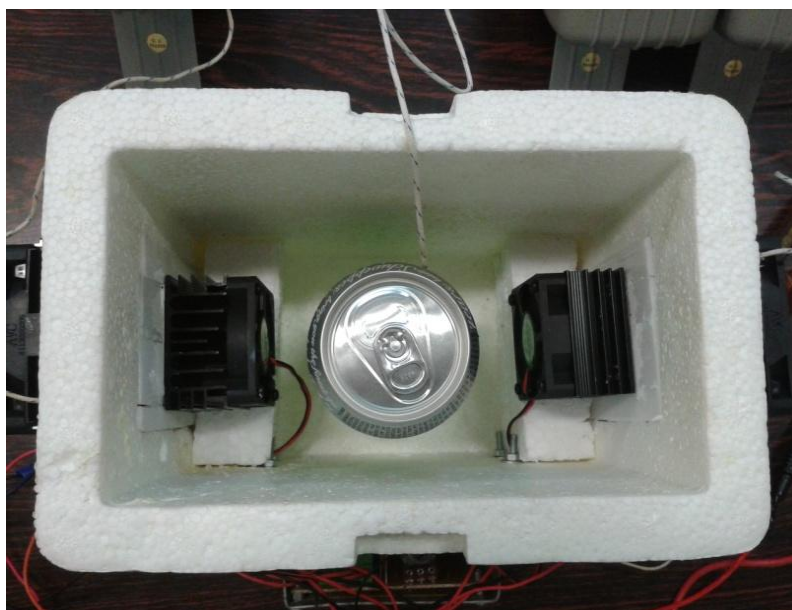
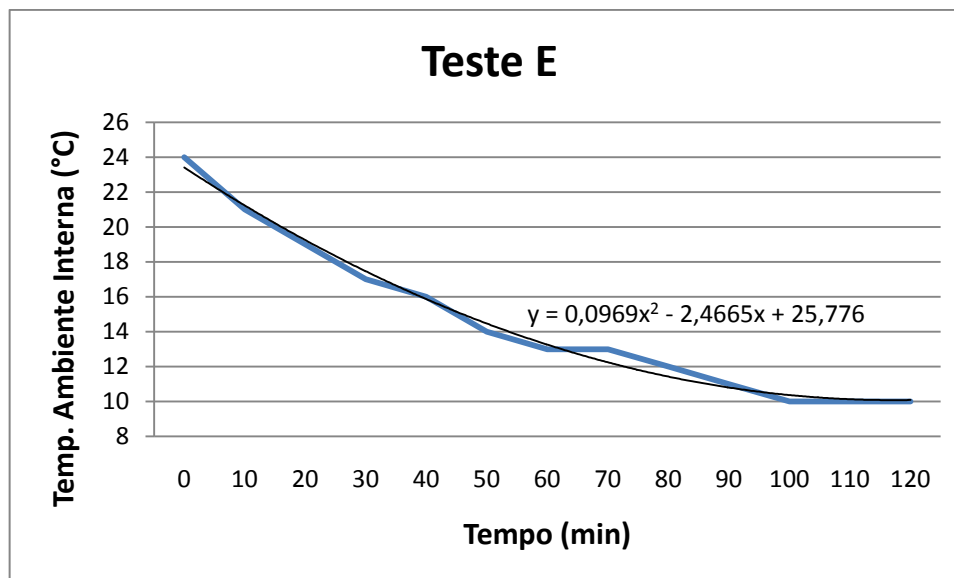


Figura 24 - Ambiente interno do protótipo

Com os dados obtidos nas medições, foi elaborado um gráfico que relaciona a temperatura interna do protótipo com o tempo, com é apresentado abaixo.



Gráficos 7 - Temperatura interna do protótipo x tempo

Observando o gráfico 7, nota-se que em 30 minutos de funcionamento o resultado foi semelhante ao teste anterior, com a presença do PWM, mas no decorrer das 2 horas de funcionamento foi possível atingir um resultado satisfatório, em que a temperatura ambiente chegou a 10°C.

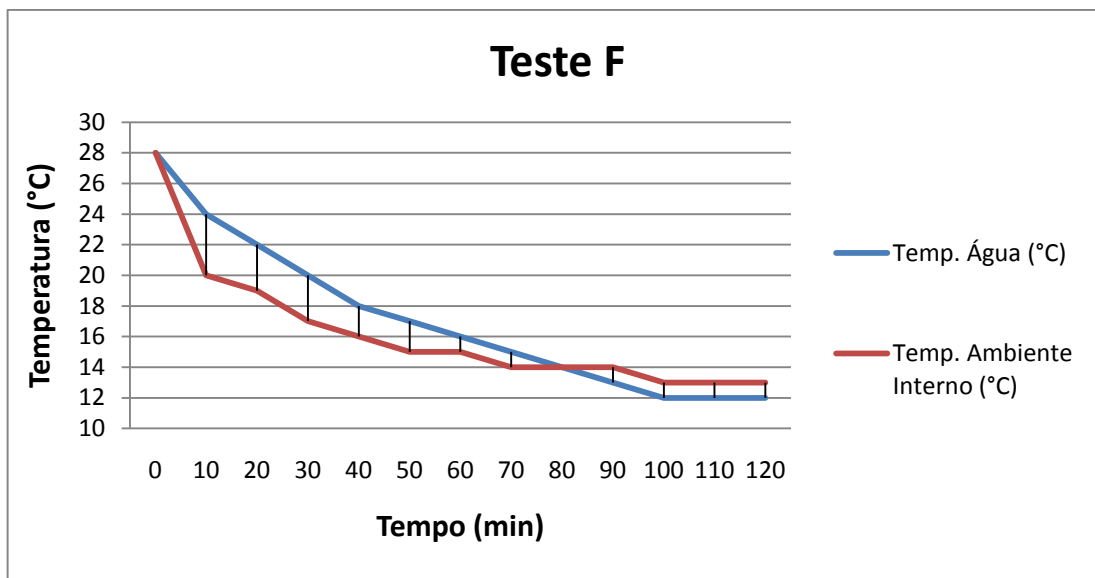
O gráfico 7 apresenta também uma equação polinomial representando a curva característica Temperatura x Tempo. Assim é possível identificar em qual instante o mini refrigerador atinge 0°C.

Para provar a eficácia das pastilhas termoelétricas, foi executado um novo teste, desta vez com a medição da temperatura diretamente no líquido.

4.1.9 Teste com medição de temperatura na água

Este teste tem como objetivo determinar a temperatura atingida pelo líquido a ser refrigerado em um período de 2 horas.

Os dados colhidos podem ser observados no gráfico 8.



Gráficos 8 - Temperatura da água e ambiente interno x tempo

O gráfico 8 apresenta duas variáveis, a temperatura interna do protótipo e a temperatura da água. Nos primeiros minutos há uma redução mais acentuada na temperatura do ambiente dentro do mini refrigerador, porque o ar tem maior facilidade de ser refrigerado, isto significa, segundo Silva (2004, p.34), que o ar possui um menor calor específico quando comparado a água, possuindo uma menor resistência à variação de temperatura.

Portanto ao final do teste as temperaturas, da água e do ar interno, estabilizaram em 12°C e 13°C respectivamente.

Como este teste apresentou resultados satisfatórios foi calculado o consumo de energia elétrica das pastilhas termoelétricas, visando comprovar sua eficiência na refrigeração do protótipo.

4.1.9.1 Consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica baseado no teste F pode ser calculado a partir da equação 11.

$$\text{Consumo de energia elétrica} = P \times t \quad (11)$$

Onde:

P = Potência consumida (W)

t = tempo de funcionamento (h)

A potência consumida no teste F pode ser determinada com a equação 12.

$$P = V \times i \quad (12)$$

Onde:

P – Potência (W)

V = Tensão média (V)

i = Corrente elétrica média (A)

Para obter o valor médio de tensão e corrente elétrica no teste F, foi feita uma média aritmética com os valores obtidos durante a medição, que são mostrados pela tabela 7

Tabela 7 – Tensão e corrente

Tensão (V)	Corrente (A)
11,93	4,68
11,94	4,05
11,93	4,06
11,94	4,07
11,93	4,06
11,93	4,06
11,94	4,06

Portanto a tensão média e a corrente elétrica média do teste F resultaram em 11,93V e 4,14A, respectivamente.

Com o uso da equação 12, tem-se que:

$$P = 11,93 \times 4,14$$

$$P = 49,3W$$

Determinado a potência consumida do sistema pode ser calculado o consumo de energia elétrica utilizando a equação 11.

$$\text{Consumo de energia elétrica} = 49,3 \times 1$$

$$\text{Consumo de energia elétrica} = 49,3 \text{ Wh}$$

$$\text{Consumo de energia elétrica} = 0,049 \text{ KWh}$$

Sabendo qual o consumo de energia elétrica por hora, podemos estimar qual será o consumo de energia elétrica mensal, utilizando o mini refrigerador 4 horas por dia. Para este cálculo utiliza-se a equação 13.

$$\text{Consumo mensal} = C \times h \times 30 \quad (13)$$

Sendo:

C = Consumo de energia elétrica (KWh)

h = Horas de utilização do mini refrigerador

Portanto, o consumo mensal do mini refrigerador é:

$$\text{Consumo mensal} = 0,049 \times 4 \times 30$$

$$\text{Consumo mensal} = 5,88 \text{ KWh}$$

Como a taxa por KWh é aproximadamente R\$0,20, podemos estimar o gasto de energia elétrica do mini refrigerador por mês, utilizando a equação 14.

$$\text{Custo mensal} = C_m \times a \quad (14)$$

Sendo:

C_m = Consumo mensal (KWh)

a = Taxa de energia elétrica (R\$/KWh)

Portanto o custo mensal é de:

$$\text{Custo mensal} = 5,88 \times 0,20$$

$$\text{Custo mensal} = \text{R\$ } 1,17$$

5 CUSTOS

O custo final do protótipo pode ser visualizado na tabela 8.

Tabela 8 - Custos Finais

Componentes	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Subtotal (R\$)
Pastilha termoeétrica	2	48,00	96,00
Pasta Térmica	1	3,50	3,50
Circuito PWM	1	45,00	45,00
Caixa Térmica 3 litros	1	4,50	4,50
Dissipadores com ventilador (externo)	2	20,00	40,00
Dissipadores com ventilador (interno)	2	13,00	26,00
Fonte Chaveada 12V/6,2A	1	48,00	48,00
Diversos (parafusos, conectores, chave liga/desliga, cabos, etc...)		25,00	25,00
Total			288,00

Os custos apresentados estimam o investimento para construção do protótipo.

Com um resultado plausível da eficiência das pastilhas termoeétricas no protótipo, pode ser considerado a possibilidade do mini refrigerador ser fabricado comercialmente, fazendo com que este valor tenha uma redução.

6 CONCLUSÃO

O protótipo desenvolvido foi submetido a testes iniciais e de aprimoramento, demonstrando o funcionamento da pastilha termoelétrica, seu comportamento, em um sistema isolado, e também sua capacidade de refrigeração.

Os testes tinham como objetivo expor a pastilha termoelétrica a várias condições específicas, para que fosse possível adquirir o máximo de dados e então obter uma conclusão plausível ao que diz respeito à sua eficiência.

De acordo com o resultado final, em que a pastilha termoelétrica foi capaz de refrigerar uma lata de 350 mL de água, inicialmente a 28°C, para uma temperatura de 12°C em duas horas, pode-se dizer que o objetivo foi alcançado, embora o tempo estimado de refrigeração tenha sido ultrapassado. Portanto uma proposta de melhoria para diminuir o tempo de refrigeração, é a utilização de pastilhas termoelétricas com maior capacidade de transferência de calor.

Em relação ao sistema de controle utilizado, o circuito PWM não se mostrou eficiente, pois houve uma queda de tensão considerável sobre o mesmo, portanto o teste em tensões diversas, como proposto inicialmente, não foi necessário.

Outra opção de controle de tensão, indicada para o mini refrigerador, é a utilização de um sensor de temperatura, que além de indicar qual a temperatura interna é também responsável por ligar e desligar as pastilhas termoelétricas controlando então sua capacidade de transferência de calor.

Quanto ao aspecto comercial, tendo em vista que deve ser feitas algumas melhorias relacionadas à sua estrutura, o protótipo se mostrou viável, pois o custo investido para a construção do mesmo terá um decréscimo quando produzido em maior escala.

O trabalho desenvolvido, em que foi necessário efetuar vários testes até atingir o objetivo final, serviu também para demonstrar que no âmbito industrial, muitas das soluções também não são imediatas, fazendo-se necessário a análise e estudo completo das variáveis antes de atingir uma solução efetiva.

REFERÊNCIAS

COSTA, Ênnio Cruz da. **Refrigeração**. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

DALLAS PERSONAL ROBOTICS GROUP, **A simple PWM circuit based on the 555 timer**. Disponível em: <http://www.dprg.org/tutorials/2005-11a/index.html>. Acesso em 15 fev. 2013.

MELLO, Luiz Fernando Pereira de. **Projetos de Fontes Chaveadas**. São Paulo: Érica, 1987.

NEVES, Aramias Fernandes; RESZKO, Fábio dos Santos; SILVA, Marcelo Rodrigues da. **Efeito Peltier Aplicado em um Mini-Refrigerados com Controle de Temperatura**. 2007. 55f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Tecnologia em Eletrônica Automação de Processos Industriais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PELTIER, **Tecnologia em Efeito Peltier**. Disponível em: <http://www.peltier.com.br/>. Acesso em 10 de dez. 2012.

SILVA, Jesué Graciliano da. **Introdução à Tecnologia da Refrigeração e da Climatização**. São Paulo: Artliber, 2003.

SABER ELETRÔNICA, **PWM na prática**. Disponível em: <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1868>>. Acesso em 20 jan. 2013.

TESTTECH LABORATÓRIOS, **Fontes Chaveadas**. Disponível em: <http://www.faiscas.net/Fontes%20chaveadas.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2012.