

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ALUIZIO ANDREATTA JUNIOR
RAFAEL DITTERT PELIZZARO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA REFRIGERAÇÃO DE
LATAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

ALUIZIO ANDREATTA JUNIOR
RAFAEL DITTERT PELIZZARO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA REFRIGERAÇÃO DE
LATAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA

2016

Aluizio Andreatta Junior
Rafael Dittert Pelizzaro

Desenvolvimento de um Equipamento para Resfriamento de Latas

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

Curitiba, 09 de dezembro de 2016.

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

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Guilherme Luiz Moritz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Guilherme Luiz Moritz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alceu André Badin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ohara Kerusauskas Rayel, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação.

RESUMO

ADREATTA Jr, Aluizio; PELIZZARO, Rafael Dittert. Desenvolvimento de um Equipamento para Refrigeração de Latas. 2016. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento que realiza o resfriamento de uma lata de bebida, com volume aproximado de 350mL, de temperatura ambiente para um valor próximo de 3°C, em um tempo aproximado de um minuto. O equipamento em questão apresenta como premissas utilizar células Peltier como forma de transferência de calor do sistema e água para realizar a troca térmica entre as células Peltier e a lata de bebida. Apresenta detalhes construtivos do projeto como a estrutura do equipamento, de que forma acontece o resfriamento e como o calor é removido do sistema. Apresenta os cálculos de energia térmica acumulada na lata de bebida e discute as formas de transferência de calor, que acontecem durante a operação do equipamento, para remoção desta energia acumulada. Além disso, através do cálculo de energia térmica, determina o número de células necessárias para fornecimento de tal potência. Detalha a forma que ocorre o fornecimento de potência elétrica para o sistema e demonstra os circuitos elétricos para tal utilização, desde o sistema de entrada do equipamento (retificação), seguido do conversor, para controle da potência elétrica, até os filtros necessários para obtenção de uma alimentação elétrica de qualidade. Complementa com a apresentação do dispositivo utilizado para executar o controle da transferência de energia ao sistema, bem como, breves relatos da operação do sistema de controle.

Palavras chave: Peltier. Troca térmica. Resfriamento de latas.

ABSTRACT

ADREATTA Jr, Aluizio; PELIZZARO, Rafael Dittert. Development of a Can Refrigeration Equipment. 2016. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This work presents the development of a device that performs the cooling of a beverage can, with a volume of 350mL, from a room temperature to an approximate value of 3°C, in about one minute. The equipment has as premises the use of Peltier cells to take out the heat of the system and the use of water to perform the heat exchange between the Peltier and the beverage can. It shows some construction details of the project as the structure of the equipment, how the cooling happens and how the heat is removed from the system. It shows the accumulated thermal energy calculations in the beverage can and discusses the forms of heat transfer, which occur during the operation of equipment, in order to remove this accumulated energy. Besides that, with the thermal energy calculations determines how many cells are enough to supply the power rating to the system. Show details about how the supply of electrical power occurs to the system and the electrical circuits for operating, starting by the rectifier that is the input system of the equipment, followed by the converter, to control the electrical power, till the filters used in order to get an electrical power of quality. At the end, presents the device used to perform the control of the energy that is transferred to the system, and a quickly review of the control system operation.

Keywords: Peltier. Thermal heat exchange. Beverage can cooling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos de funcionamento do equipamento.....	12
Figura 2 - Efeito Seebeck	16
Figura 3 - Efeito Peltier	17
Figura 4 - Junções de um termoelemento	17
Figura 5 - Composição de uma pastilha termoelétrica.....	18
Figura 6 - Gráfico de ensaio Peltier $V=f(\Delta T)$ para diferentes curvas de corrente	19
Figura 7 - Gráfico de desempenho Peltier $Q_c=f(\Delta T)$ para diferentes curvas de corrente	20
Figura 8 - Retificador de onda em ponte completa	22
Figura 9 - Configuração básica do Conversor Buck	23
Figura 10 - Conversor Buck com filtro LC na saída	24
Figura 11 - Modulação da corrente em um conversor Buck em regime permanente	25
Figura 12 - Circuito de condicionamento do sensor de temperatura	27
Figura 13 - Circuito de potência completo	37
Figura 14 - Circuito de conexão entre Tiva e sistema de potência	38
Figura 15 - Simulação PT-100 em -2°C com saída de aproximadamente 0,01V	39
Figura 16 - Simulação PT-100 em 50°C com saída de aproximadamente 2,7V	40
Figura 17 - Partes separadas do equipamento em 3D - (a) Parede lateral, (b) Parede central dupla de alumínio, (c) Base inferior e (d) Base superior.....	42
Figura 18 - Bases inferior e superior em MDF e acrílico.....	43
Figura 19 - Equipamento montado	44
Figura 20 - Parte mecânica do equipamento	44
Figura 21 – Placa de retificação, potência e controle do equipamento.....	46
Figura 22 - Ripple do retificador em carga nominal	47
Figura 23 - Circuito retificador com banco de resistores.....	48
Figura 24 - Ondulação da tensão na carga em baixa frequência	49
Figura 25 - Ondulação da tensão na carga em alta frequência	49

Figura 26 - Ondulação da corrente em alta frequência no sensor de corrente	50
Figura 27 - Ondulação de corrente em baixa frequência sobre o sensor de corrente	50
Figura 28 - Transitório de tensão com a adição de carga.....	52
Figura 29 - Transitório de tensão na carga para setpoint de corrente de 4,5A	52
Figura 30 - Retificador construído.....	64
Figura 31 - Conversor Buck construído	64
Figura 32 – Circuito driver IR2110 construído	64
Figura 33 – Circuito condicionamento PT-100 construído	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	9
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS	9
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	Objetivo Geral	11
1.3.2	Objetivos Específicos	11
1.4	JUSTIFICATIVA	12
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	SISTEMAS TÉRMICOS	14
2.1.1	Efeito Termoelétrico	16
2.1.2	Dissipação de energia	20
2.2	SISTEMAS DE POTÊNCIA E CONTROLE	21
2.2.1	Retificador	21
2.2.2	Conversor Buck	22
2.2.3	Filtro da tensão de saída	24
2.2.4	Controle	26
3	EQUACIONAMENTO E MODELAGEM	27
3.1	CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DAS PASTILHAS	27
3.2	DADOS DA PASTILHA TERMOELÉTRICA	29
3.2.1	Cálculo do dissipador de calor	30
3.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	32
3.4	SISTEMAS DE POTÊNCIA E CONTROLE	34
3.4.1	Circuito de potência	34
3.4.2	Circuito de controle	37
3.5	ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO	40

3.6	MOTOR.....	41
4	AQUISIÇÕES E RESULTADOS.....	41
4.1	MECÂNICA.....	41
4.2	SISTEMA DE POTÊNCIA E CONTROLE.....	45
4.2.1	Retificador.....	46
4.2.2	Controle do Buck em malha aberta.....	48
4.2.3	Controle do Buck em malha fechada.....	51
4.3	DIFICULDADES E ALTERNATIVAS.....	53
4.3.1	Ponte retificadora.....	53
4.3.2	Utilização do conversor CC-CC Buck.....	54
4.3.3	Células Peltier.....	55
4.3.4	Mecânica do equipamento.....	56
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE A.....	64
	APÊNDICE B.....	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

As formas tradicionais de refrigeração de bebidas incluem, por exemplo, colocá-las em gelo ou em congeladores convencionais. Entretanto, esses métodos contêm um inconveniente: o tempo levado para o seu resfriamento.

A ideia aqui apresentada foi desenvolver um equipamento capaz refrigerar bebidas em um tempo da ordem de um minuto. O equipamento aqui abordado tem como propósito a refrigeração de uma lata de bebida, com invólucro em embalagem de alumínio, com volume aproximado de 350 mL. Dentre estes produtos podem ser utilizadas latas de suco, refrigerante ou cerveja.

Existem alguns equipamentos equivalentes no mercado, nos quais, para realizar a troca térmica com a lata, é utilizada uma mistura de água e gelo. A proposta aqui apresentada substitui esta mistura de água e gelo por um sistema de controle de temperatura de um líquido refrigerante, o qual é responsável pela troca térmica de todo o sistema.

Em um primeiro momento, o equipamento reduz a temperatura do líquido refrigerante para um valor aproximando do que se pretende atingir no produto da lata. Depois de atingida esta temperatura, a lata será imersa no líquido refrigerante e inicia a troca de calor. O equilíbrio do sistema é atingido quando o produto da lata atingir a temperatura do líquido refrigerante.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

Alguns problemas relacionados ao desenvolvimento do projeto já são conhecidos, como temperatura limite de congelamento do líquido refrigerante e dificuldade da troca térmica rápida com todo o líquido no interior da lata, sendo que ambos podem limitar a eficiência do equipamento.

A ideia inicial foi de utilizar água como líquido refrigerante no sistema. Desta forma, foi incluído no sistema de controle uma proteção para que quando a

temperatura do líquido refrigerante atingir os 3°C esperados, indicando o equilíbrio térmico do sistema, o fornecimento de potência para às células é interrompido, voltando à fornecer apenas para valores de temperatura acima deste ponto. Isso deve-se ao fato da temperatura de equilíbrio do sistema estar próximo à temperatura de congelamento da água (0°C à pressão de 1atm), portanto, uma proteção para operação do equipamento.

Em relação à dificuldade de troca térmica com o líquido no interior da lata, foi efetuado cálculo da quantidade de calor a ser retirada da lata para se atingir na temperatura desejada. Desta forma, através do cálculo da energia presente na lata, dimensionou-se o sistema de potência do equipamento de forma a fornecer toda a energia necessária para a remoção completa do calor. Além disso, para melhorar a troca térmica do sistema, optou-se por girar a lata para que o líquido do seu interior esteja sempre em circulação, renovando assim o contato com as paredes, que por sua vez acelera o processo de resfriamento. Com o giro da lata imersa no líquido refrigerante, este circula também, renovando o contato com o exterior da lata e acelera, também, a troca térmica.

Durante a imersão e troca de calor do sistema, o líquido no interior da lata tende a se resfriar e o líquido refrigerante recebe esse calor, tendendo a se aquecer. Para isso, foi desenvolvido um sistema de controle cuja função é de manter constante a temperatura do líquido refrigerante, dissipando o calor recebido da lata para atmosfera ou para outro líquido. Para que o equipamento trabalhe com uma boa eficiência, o sistema de controle necessita ser capaz de, na menor variação de temperatura, efetuar a correção garantindo uma temperatura constante para o sistema.

Para resfriamento do líquido refrigerante foram utilizados componentes conhecidos como Módulo Peltier ou Célula Peltier. O funcionamento desta célula é simples. O sistema de controle desenvolvido aplica uma tensão elétrica sobre as Células Peltier. A circulação de uma corrente por elas faz com que um dos lados da célula resfrie e o outro aqueça. Portanto, uma Célula Peltier pode ser utilizada para aquecer ou resfriar, dependendo de sua aplicação. Para o equipamento aqui apresentado, por exemplo, o lado da célula que resfria estará em contato com o líquido refrigerante e dissipa o calor removido da lata pelo lado quente da célula.

Há, porém, uma característica importante no funcionamento das células Peltier. Elas operam com um diferencial de temperatura entre a face fria e a face

quente. Exemplificando melhor: assumindo que seja escolhido um diferencial de temperatura na célula de 30°C entre a face fria e a face quente e que o controle de temperatura do líquido refrigerante seja mantido em 3°C (temperatura no lado frio da célula). Para que seja possível atingir ou manter os 3°C no líquido refrigerante, a face quente da célula não poderá ultrapassar os 33°C de temperatura. Para cada 1°C de temperatura acima dos 33°C aqui assumido, 1°C também aumentará no lado frio da célula. Portanto, foi projetado e calculado um sistema de dissipação de calor do lado quente da célula Peltier de modo a dissipar o calor do lado quente e permitir o controle atingir a temperatura desejada.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento capaz de efetuar o resfriamento de lata de bebida armazenado com volume aproximado de 350mL, em um tempo de, aproximadamente, um minuto.

1.3.2 Objetivos Específicos

Identificar o balanço de energia do sistema, ou seja, quantificar a energia contida na lata e calcular a potência necessária para remoção desta energia.

Desenvolver um equipamento com recipiente capaz de armazenar um líquido refrigerante e suportar variações de temperaturas, tanto a temperaturas baixas (próximas de 0°C), quanto a temperaturas mais elevadas (temperaturas próximas de 40°C no lado de dissipação térmica).

Implementar um sistema de controle capaz de manter constante a temperatura de um líquido, absorvendo variações bruscas e moderadas.

Desenvolver um sistema capaz de rotacionar uma lata imersa em um líquido, sem agitar o seu conteúdo.

Desenvolver um circuito de acionamento capaz de fornecer a potência elétrica necessária para funcionamento do equipamento, bem como um sistema de controle

que mantém essa potência constante na refrigeração, absorvendo variações bruscas e moderadas.

Para cumprir os objetivos apresentados, será desenvolvido um sistema de retificação CA-CC para suprimento das células Peltier, um circuito conversor CC-CC para baixar a tensão e controlar a corrente no sistema, bem como um sistema de controle para monitoramento e fornecimento de energia ao equipamento. Abaixo segue diagrama de representação do sistema de uma forma geral:

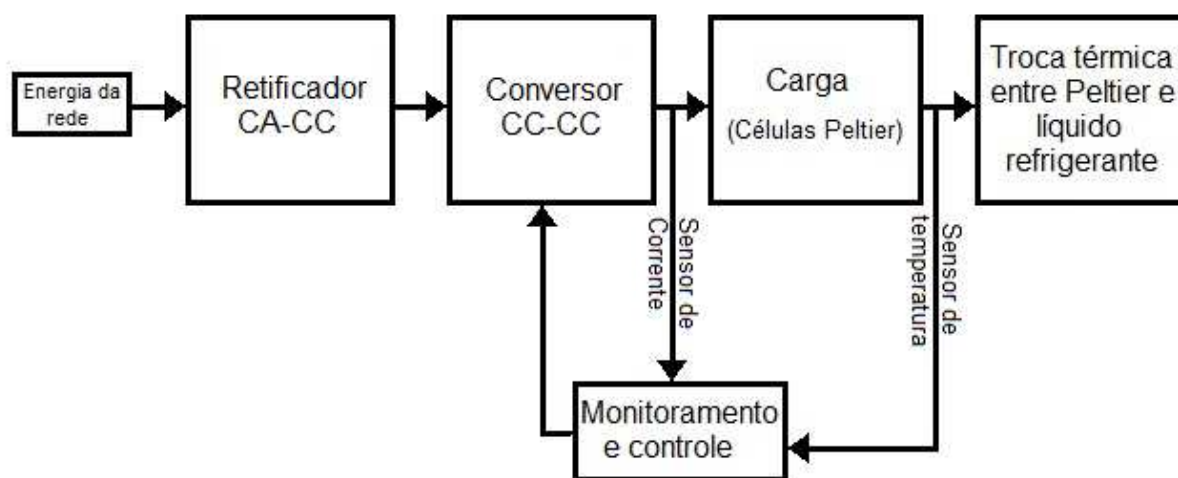


Figura 1 - Diagrama de blocos de funcionamento do equipamento

Desta forma, para fundamentar as discussões de desenvolvimento do equipamento, o capítulo 2 apresentará uma revisão bibliográfica referente à todos os conceitos envolvidos em seu funcionamento.

1.4 JUSTIFICATIVA

A escolha foi baseada na concorrência do mercado interno brasileiro, no que se refere ao desenvolvimento do equipamento, bem como, a procura, necessidade ou desejo na aquisição do produto pelo consumidor, levando em consideração questões mercadológicas como público alvo, por exemplo.

Assim, o desenvolvimento do equipamento aqui escolhido, da forma que foi colocada, é diferenciado em relação a todos os produtos equivalentes já existentes,

e, somado à inexpressiva concorrência e sua utilização, é um produto de grande desejo além de ser atrativo para o mercado consumidor.

Quando comparadas com os sistemas convencionais de resfriamento, as células Peltier apresentam algumas vantagens, dentre as quais, algumas se encaixam perfeitamente no desenvolvimento do trabalho, como por exemplo: o tamanho reduzido de cada célula contribui para desenvolver um equipamento compacto, o que não seria possível com o sistema convencional de resfriamento de uma geladeira, por exemplo.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O projeto foi dividido em três etapas principais, seguidas em ordem para melhor organização e funcionalidade deste.

1ª Etapa: Revisão Bibliográfica e Equacionamento.

Nesta etapa foi feita a pesquisa a respeito das trocas térmicas necessárias para o bom funcionamento do equipamento, bem como a viabilidade da utilização dos materiais escolhidos. Também foi definido como o sistema de controle funciona.

2ª Etapa: Montagem do Equipamento.

Com o equacionamento e a escolha dos materiais feitos na etapa anterior, foi montado o equipamento de refrigeração de latas, assim como seu sistema de controle.

3ª Etapa: Testes e Resultados.

Com o equipamento montado, foram feitos testes para verificar se o funcionamento deste condiz com o esperado, calculado na primeira etapa, e se o sistema de controle funciona adequadamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS TÉRMICOS

Sistemas térmicos são aqueles que possuem certa quantidade de calor armazenada e que estão submetidos, de alguma forma, a uma transferência de calor. Pode-se definir transferência de calor como sendo “o trânsito de energia provocado pela diferença de temperatura” (INCROPERA, c1992, p. 02). As transferências podem ocorrer de três formas: condução, convecção ou radiação. Em geral, estas três formas estão sempre presente nos processos de transferência de calor, porém, em alguns sistemas, uma ou duas formas são predominantes sobre as demais (IME – USP).

Uma forma de quantificar esta transferência de calor seria através da análise do fluxo de calor (Q). Para os sistemas que envolvem os princípios de condução e convecção o fluxo de calor é dado por:

$$Q = K \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde:

K – coeficiente de proporcionalidade;

ΔT – variação de temperatura do sistema.

Sendo que o coeficiente de proporcionalidade é dado por:

- Condução

$$K = \frac{(k \cdot A)}{\Delta x} \quad (2)$$

- Convecção

$$K = h \cdot A \quad (3)$$

Onde:

k – condutividade térmica;

A – área de contato para troca térmica;

Δx – espessura do material;

h - coeficiente de transferência de calor convectivo.

Ambas as formas acima citadas necessitam de um meio material para realizarem a transferência de calor. A radiação, por outro lado, é uma forma de transferência de calor que ocorre por ondas eletromagnéticas, não necessitando de nenhum meio material (INCROPERA, c1992). Seu fluxo de transferência de calor é dado por:

$$Q = K_R \cdot \Delta T^4 \quad (4)$$

Onde:

K_R – coeficiente de proporcionalidade, dependente de propriedade do material como emissividade, absorvidade entre outros;

ΔT – variação de temperatura entre o emissor e a vizinhança.

Sempre que existir uma diferença de temperatura entre dois meios haverá transferência de calor entre eles. Em síntese, analisando a diferença de temperatura em um sistema estacionário, seja este meio um sólido ou um fluido, a transferência de calor se dará por condução. Do contrário, quando há movimento no sistema, o fluxo de calor ocorrerá por meio de convecção. E por fim a radiação, que ocorre através de ondas eletromagnéticas, salientando que sua energia pode ser emitida tanto de superfícies sólidas, quanto de superfícies líquidas e gasosas, ocorrendo, inclusive, no vácuo onde a transferência possui maior eficiência (INCROPERA, c1992).

2.1.1 Efeito Termoelétrico

O Efeito termoelétrico é um conceito que trata o envolvimento entre eletricidade e temperatura. Porém, não é toda a conversão de energia relacionando estas grandezas que se encaixam neste conceito. Os efeitos termoelétricos estão restritivamente ligados aos fenômenos que possuem reversibilidade. Como exemplo pode-se citar dois efeitos muito conhecidos no mundo da Física: O Efeito Seebeck e o Efeito Peltier. De certa forma, pode-se dizer que estes dois efeitos são um o reverso do outro.

O Efeito Seebeck foi descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1822 e se resume da seguinte forma: em um experimento com materiais condutores diferentes conectados conforme Figura 2 e, tendo suas junções submetidas a uma diferença de temperatura, percebeu-se que um diferencial de tensão (d.d.p.) era gerado nos terminais destes conectores (FERENCE, [19-]).

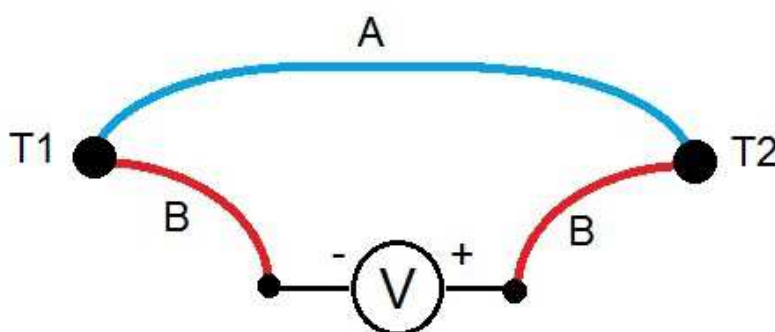


Figura 2 - Efeito Seebeck

Quando dois materiais condutores, de natureza diferente e conectados entre si, são submetidos a um gradiente de temperatura, os elétrons de um material tenderão a migrar para o outro material gerando uma d.d.p. em suas extremidades.

O efeito contrário ou, como conhecido, o Efeito Peltier foi observado por Jean Charles Athanase Peltier em 1834. Seu experimento consistiu em aplicar uma corrente contínua em um circuito fechado composto por dois condutores de

naturezas diferentes (FERENCE, [19- J]). Neste caso, foi observado que tal aplicação de corrente gerou um gradiente de temperatura em suas junções (Figura 3).

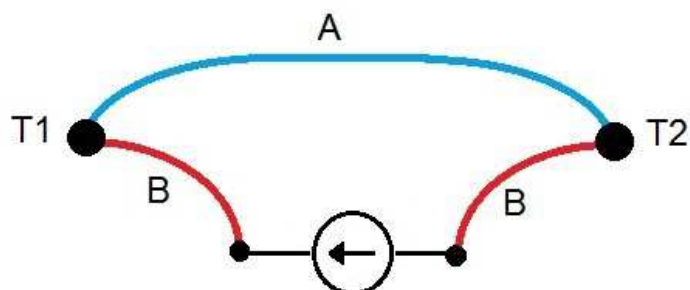


Figura 3 - Efeito Peltier

Partindo destes princípios acima é possível analisar o funcionamento básico das pastilhas termoelétricas. As pastilhas termoelétricas são formadas por elementos semicondutores, geralmente utilizando o Bismuto (Bi) e o Telúrio (Te), altamente dopados para criar os semicondutores Tipo "N" (mais elétrons no retículo cristalino) e Tipo "P" (menos elétrons no retículo cristalino), cercados por uma camada de material cerâmico, o qual geralmente é utilizado alumina (Al_2O_3) (VOLPE, 1992). A ligação entre estes materiais Tipo "N" e Tipo "P" são realizadas através de junções de barras metálicas, conforme apresentado na figura abaixo:

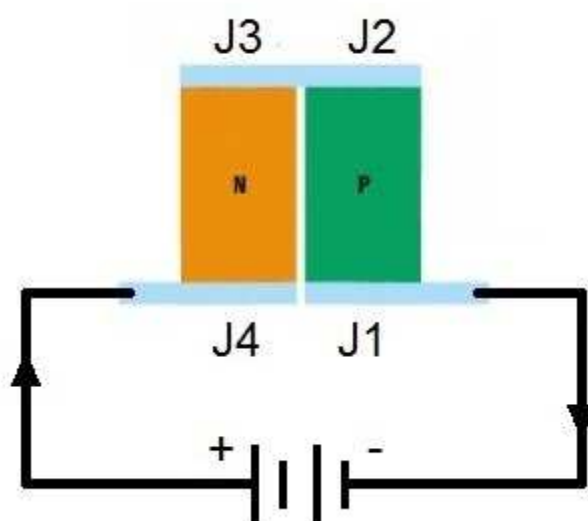


Figura 4 - Junções de um termoelemento
Fonte: Editada de DANVIC LTDA.

Quando estas junções são submetidas a uma fonte contínua, conforme na Figura 4, a circulação de corrente faz com que as junções J2 e J3 resfriem. O calor

absorvido nas junções frias é enviado para as junções quente, J1 e J4, num valor proporcional à corrente que circula pelo circuito fechado e ao número de par do Tipo “NP” presentes na pastilha (VOLPE, 1992). De uma forma geral, os pares “NP” presentes em uma pastilha termoelétrica são conectados em série eletricamente e em paralelo termicamente. A Figura 5 traz a representação da formação de uma pastilha termoelétrica em toda sua composição.

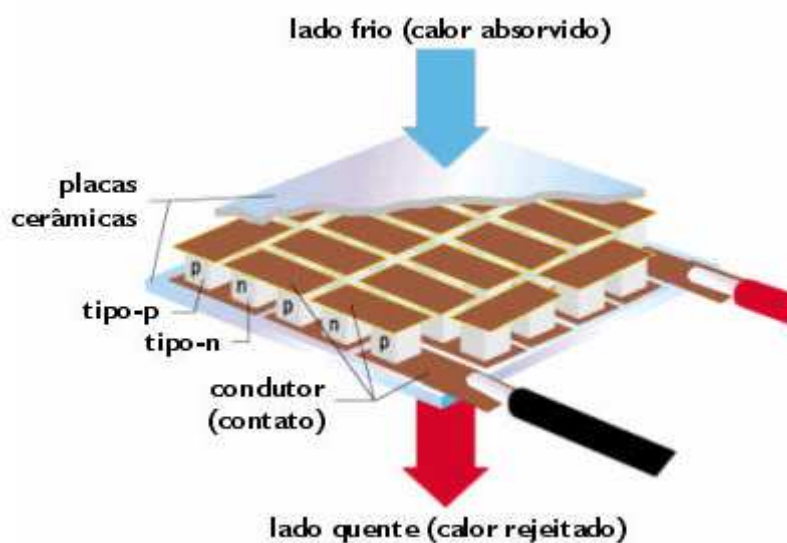


Figura 5 - Composição de uma pastilha termoelétrica
Fonte: DANVIC LTDA.

O funcionamento prático dos módulos se baseia nos dados de ensaio fornecidos pelo fabricante através da folha de dados do componente. A operação das pastilhas dependerá dos dados iniciais estipulados para o projeto a ser executado. As Figura 6 e Figura 7 representam gráficos de ensaio dos módulos Peltier, especificamente os que foram utilizados para o desenvolvimento do equipamento de refrigeração de latas (HB ELETRONIC COMPONENTS). Estes ensaios foram executados para uma temperatura no lado quente da pastilha de 25°C.

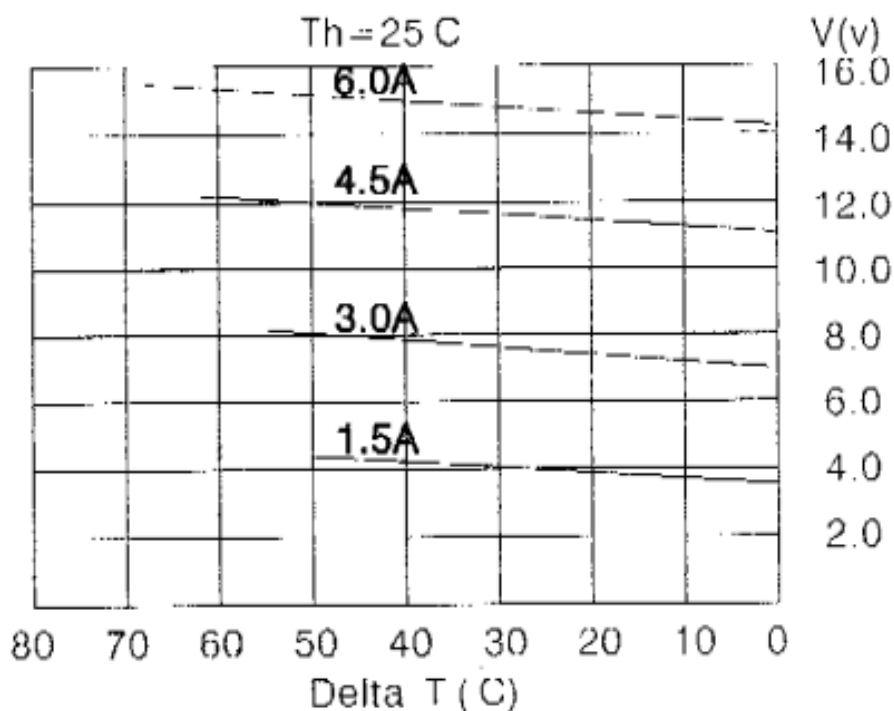


Figura 6 - Gráfico de ensaio Peltier $V=f(\Delta T)$ para diferentes curvas de corrente
Fonte: HB ELETRONIC COMPONENTS.

A Figura 6 apresenta curvas de corrente que circulam pela célula, em função da tensão aplicada e da variação de temperatura entre o lado quente e frio. Com a estipulação dos valores de temperatura entre dos lados quente e frio da pastilha e com determinado valor de tensão aplicado ao módulo é possível obter os níveis de correntes adequados para tal operação. Desta forma, com a definição da corrente que circula, utiliza-se o gráfico da Figura 7 para determinar a potência térmica dissipada pela célula, o qual demonstra a capacidade de dissipação da célula em função da diferença de temperatura para algumas curvas de corrente.

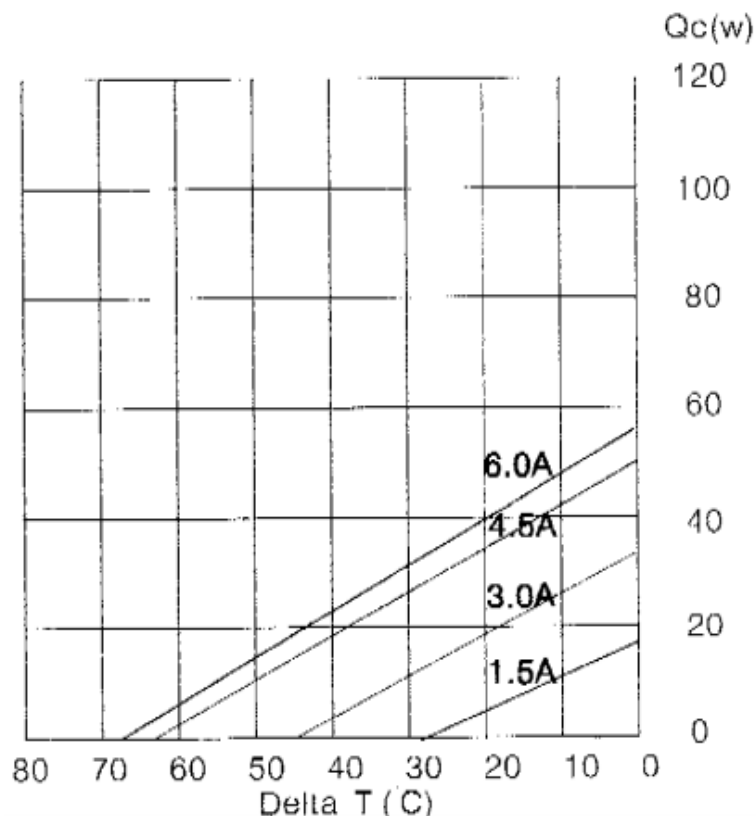


Figura 7 - Gráfico de desempenho Peltier $Q_c=f(\Delta T)$ para diferentes curvas de corrente
Fonte: HB ELETRONIC COMPONENTS.

Como pode ser visto, para obtenção da potência máxima de cada célula é necessário manter uma diferença de temperatura baixa entre as faces quente e fria. Quanto maior for a variação de temperatura menor será a capacidade de dissipação de calor do módulo.

2.1.2 Dissipação de energia

A determinação da quantidade de calor presente em um sistema é de suma importância para quantificar a transferência de calor. Esta quantidade de calor pode ser determinada como a carga térmica a ser retirada ou fornecida para determinado meio. As cargas térmicas dividem-se em: cargas ativas e passivas. Cargas térmicas ativas são aquelas que serão dissipadas pelo elemento resfriador para seu funcionamento, neste caso as células Peltier, e são, praticamente, equivalentes à

potência dissipada pela fonte. Cargas térmicas passivas são aquelas presentes no sistema de acordo com sua variação de temperatura, por exemplo, e podem consistir de radiação, convecção e/ou condução (DANVIC LTDA).

Através da escolha do ponto de operação do sistema, ou seja, análise dos gráficos da Figura 6 e Figura 7 obtém-se a potência térmica dissipada. Além disso, com a corrente elétrica e tensão encontrada pode-se calcular a potência elétrica dissipada. Desta forma, a dissipação total de energia através de um módulo Peltier se dará pela somatória das cargas ativas e passivas presentes no sistema.

$$Q_{Peltier} = Q_{térmica} + P_{elétrica}$$

Onde:

$Q_{peltier}$ – potência total dissipada na célula;

$Q_{térmica}$ – carga passiva presente no sistema;

$P_{elétrica}$ – carga ativa presente no sistema.

2.2 SISTEMAS DE POTÊNCIA E CONTROLE

Para fornecimento da potência elétrica necessária para alimentar o sistema foi utilizado um retificador em ponte completa conectado diretamente à rede elétrica e um conversor CC-CC do tipo Buck para regular a tensão no nível requerido.

2.2.1 Retificador

A Figura 8 representa um retificador em ponte completa com um filtro capacitivo para reduzir a ondulação de tensão.

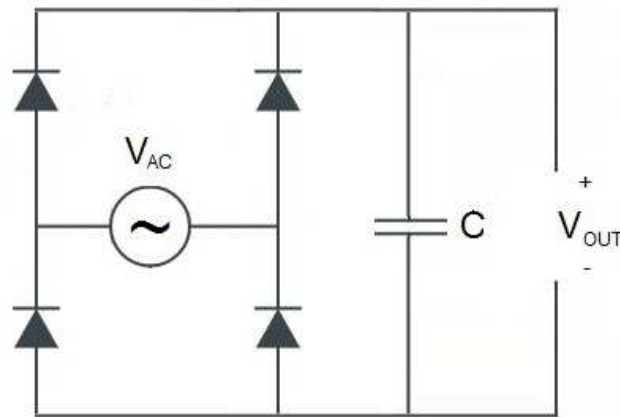


Figura 8 - Retificador de onda em ponte completa

O cálculo deste filtro capacitivo é feito através da equação abaixo (BARBI, 2007, p. 10):

$$C = \frac{P_{in}}{f(V_{pk}^2 - V_{Cmin}^2)} \quad (5)$$

Onde:

P_{in} – Potência de entrada;

f – Frequência da rede retificada;

V_{pk} – Tensão de pico da rede;

V_{Cmin} – Tensão mínima admitida para a saída do retificador.

2.2.2 Conversor Buck

Os conversores CC-CC abaixadores de tensão, também conhecidos como Buck, como o próprio nome diz, são conversores utilizados para efetuar o abaixamento da tensão de saída em relação à tensão de entrada. Este abaixamento de tensão é realizado através de uma chave de controle presente no conversor. Os valores da tensão média de saída podem variar de zero até o valor médio de tensão de entrada do circuito, enquanto que a corrente média de saída é maior que a corrente média de entrada (BARBI, 2000).

O circuito da Figura 9 representa uma configuração básica de um conversor CC-CC abaixador de tensão.

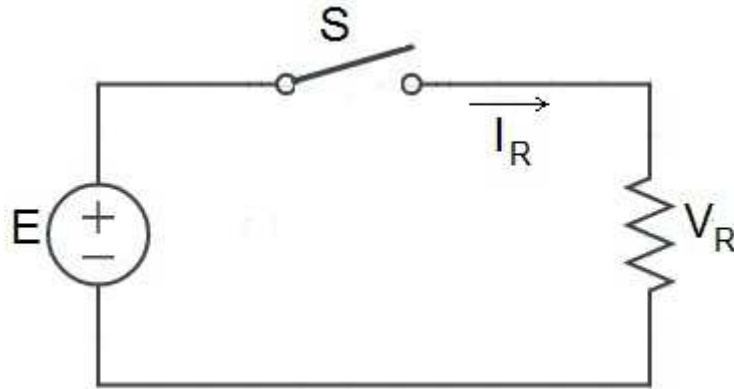


Figura 9 - Configuração básica do Conversor Buck
Fonte: BARBI, 2000.

Analisando a tensão média na carga, dada por V_{Rmd} , assumindo que a chave S inicie um ciclo constante de abertura e fechamento, obtém-se:

$$V_{Rmd} = \frac{1}{T} \int_0^T V_R(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_c} E \cdot dt = \frac{t_c}{T} \cdot E \quad (6)$$

Onde:

t_c – tempo em que a chave S permanece fechada;

t_a – tempo em que a chave S permanece aberta;

$T = t_c + t_a = 1/f$ – período de chaveamento.

Definindo:

$$D = \frac{t_c}{T} \quad (7)$$

Onde D é chamado de razão cíclica do conversor, obtém-se:

$$V_{(Rmd)} = D \cdot E \quad (8)$$

Como a razão cíclica é uma relação entre o tempo de condução e o período total de operação da chave, pode-se concluir que os possíveis valores assumidos por D são dados por:

$$0 \leq D \leq 1 \quad (9)$$

A partir da Equação (8), pode-se observar que a tensão média aplicada na carga tem um comportamento linear em relação à razão cíclica (D) da chave do conversor (BARBI, 2000).

2.2.3 Filtro da tensão de saída

O chaveamento no conversor Buck faz com que haja uma oscilação na tensão aplicada à carga. Desta forma, para cargas que necessitem uma baixa ondulação é necessário aplicar um filtro na saída constituído por um capacitor e um indutor (BARBI, 2000), conforme apresentado na Figura 10.

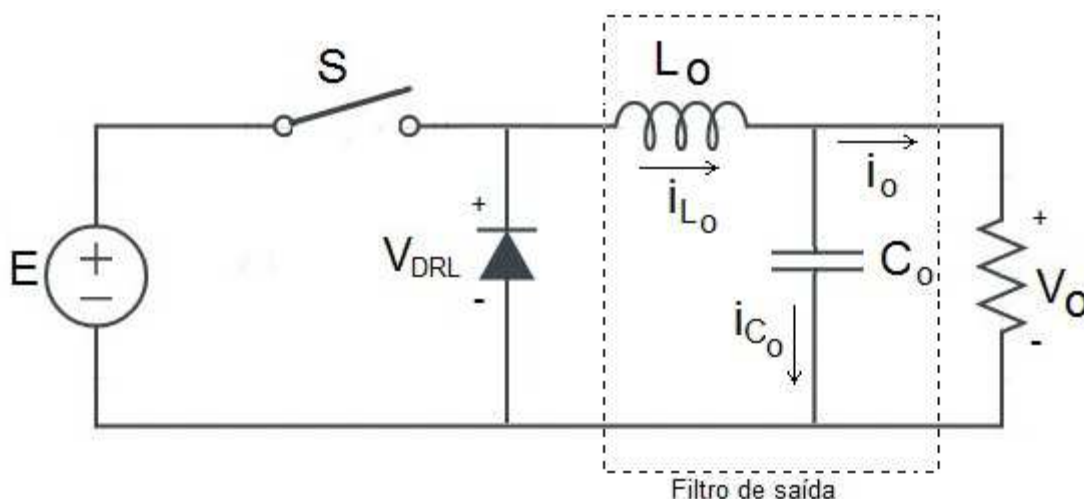


Figura 10 - Conversor Buck com filtro LC na saída
 Fonte: BARBI, 2000.

Da mesma forma que a tensão, a corrente na carga também será ondulada devido ao chaveamento do conversor. A Figura 11 representa a modulação desta corrente de um circuito em regime permanente.

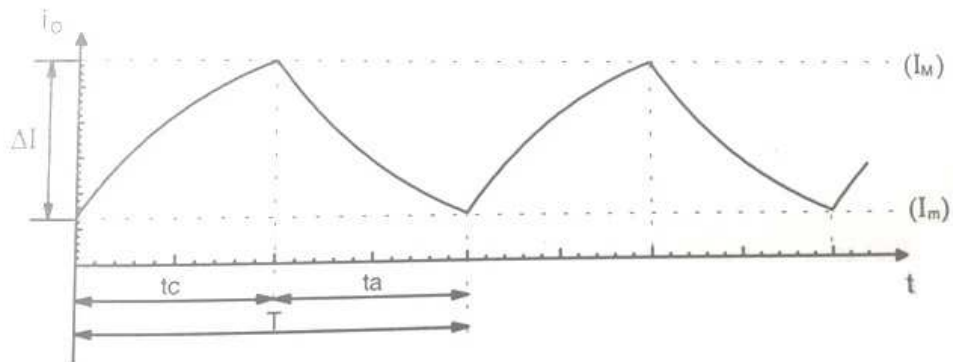


Figura 11 - Modulação da corrente em um conversor Buck em regime permanente
Fonte: BARBI, 2000.

Fazendo uma análise conjunta da corrente na carga apresentada no gráfico da Figura 11 e do circuito da Figura 10, a variação da corrente no indutor pode ser representada como (BARBI, 2000):

$$\Delta I_{L_{\text{omax}}} = \frac{E}{4 \cdot L_o \cdot f} \quad (10)$$

Onde:

$\Delta I_{L_{\text{omax}}}$ – máxima oscilação de corrente;

E – tensão de entrada do conversor;

f – frequência de chaveamento do conversor;

L_o – indutância do filtro.

Portanto, a indutância do filtro pode ser determinada por:

$$L_o = \frac{E}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{L_{\text{omax}}}} \quad (11)$$

O filtro capacitivo deve ser determinado através da ondulação da tensão admissível na carga, levando em consideração a ondulação de corrente no indutor.

Admite-se que toda essa componente alternada da corrente seja absorvida pelo capacitor, sendo então a resistência série equivalente (RSE) do capacitor responsável pela ondulação de tensão na carga. Portanto, para o dimensionamento do filtro capacitivo deve ser determinado o valor máximo admissível da RSE para o capacitor (adaptado de BARBI, 2007):

$$RSE = \frac{\Delta V_{Cmax}}{\Delta I_L} \quad (12)$$

Onde:

RSE – resistência série equivalente máxima para o capacitor;

ΔV_{Cmax} – máxima oscilação de tensão na carga;

ΔI_L – ondulação de corrente no indutor.

2.2.4 Controle

Para o controle do sistema foi utilizado o microcontrolador EK-TM4C123GXL acoplado em uma placa Tiva C Series TM4C *LaunchPad Evaluation Board* (EK-TM4C123GXL) (TEXAS Instruments).

Inicialmente, pretendia-se realizar o controle através de uma sintonia PID em cascata. O primeiro nível de *setpoint* seria comparado com o valor retornado pelo sensor de temperatura utilizado no sistema e o segundo, com o sensor de corrente nas células Peltier. Contudo, após uma sequências de testes, foi determinado que o controle de corrente deveria manter a potência máxima estipulada para as células e o nível de temperatura apenas ligar e desligar a alimentação do sistema, para evitar o congelamento do líquido refrigerante.

Como sensor de temperatura foi utilizado um termoresistor de platina (PT-100) a 3 fios. Para seu funcionamento adequado com as especificações do sistema, foi necessário montar um circuito de condicionamento para o sensor, de acordo com a Figura 12, cuja função é servir como uma fonte de corrente constante para o

sensor, relacionar a temperatura de operação a níveis de tensão escolhidos e remover erros associados às resistências dos fios do PT-100.

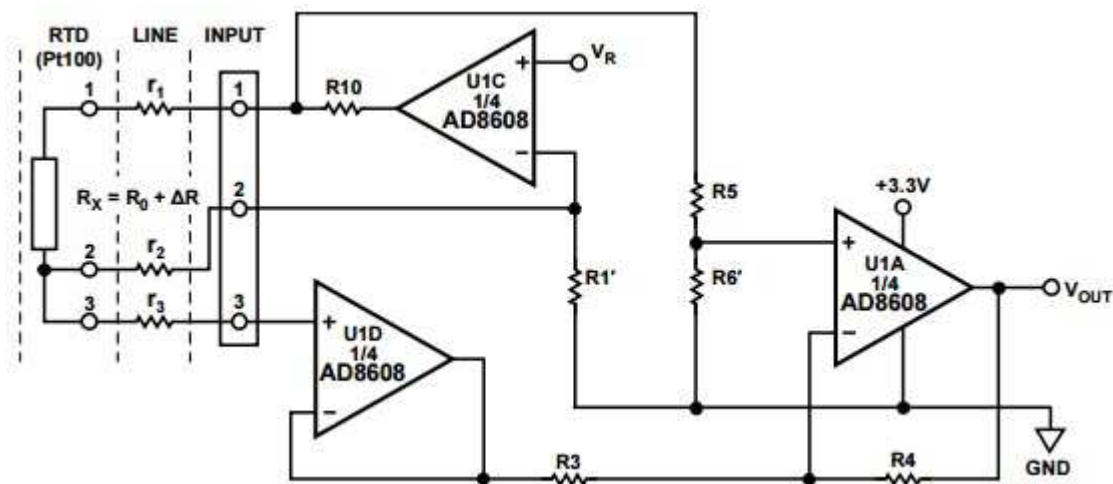


Figura 12 - Circuito de condicionamento do sensor de temperatura
Fonte: Editado de ANALOG DEVICES.

Para realizar a medição da corrente que circula pelas células, foi utilizado o sensor de efeito Hall ACS712 da ALLEGRO Microsystems, LLC, com uma faixa de corrente de $\pm 5A$ para sua operação (ALLEGRO).

O esquemático completo da solução com inclusões descritas no decorrer deste trabalho pode ser encontrado no APÊNDICE A.

3 EQUACIONAMENTO E MODELAGEM

3.1 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DAS PASTILHAS

Inicialmente, para determinar a carga térmica presente no sistema foi necessário estipular algumas condições iniciais à serem tomadas como base para realização dos cálculos conforme seguem:

- Considerado o conteúdo de uma lata de bebida com aproximadamente 350mL, estimou-se uma massa de, aproximadamente, 350g para cada invólucro;

- Para o cálculo da energia existente na lata de bebida foi considerado apenas presença de água no interior da lata;
- Considerou-se a temperatura inicial do sistema de 25°C, definida como ambiente, e que a temperatura final requerida para resfriamento da lata foi de 3°C;
- Considerou-se que o líquido refrigerante utilizado no sistema já se encontra na temperatura final desejada para o resfriamento da lata;
- Mantida a corrente média na célula em 4,5A para atingir a dissipação de potência térmica de acordo com o desempenho requerido;
- Definiu-se que a temperatura do lado quente da célula é de aproximadamente 28°C, mantendo uma variação entre o lado quente e frio do componente de 25°C.

As definições para o funcionamento das células foram feitas com a análise da Figura 6 e da Figura 7, visando uma maior potência térmica nas células sem grandes perdas em seu rendimento.

Dado estas condições iniciais a energia térmica presente em uma lata foi definida como (INCROPERA, c1992):

$$Q = m.c.\Delta t \quad (13)$$

Onde:

Q - Energia Térmica;

m = Massa;

c = Calor específico;

ΔT = Variação de temperatura.

Portanto:

$$Q = 350.1.(25 - 3)$$

$$Q = 7700 \text{ cal} = 32216,8 \text{ J}$$

Logo, para baixar a temperatura da lata de 25°C para 3°C é necessário retirar 32216,8 Joules da lata, o que, para o tempo de um minuto, corresponde a uma potência de 536,9W.

Para os dados estipulados do funcionamento do sistema, observando os gráficos da Figura 6 e Figura 7, cada célula possui uma potência de dissipação de aproximadamente 35W, ou seja, cada célula é capaz de dissipar 35 Joules por segundo. Utilizando um tempo de resfriamento de 60 segundos, temos que cada célula irá retirar 2100 Joules de energia. Desta forma:

$$n^{\circ} \text{ de células} = \frac{32216,8}{2100} = 15,34 \text{ células}$$

Portanto, para fazer o resfriamento da lata nas condições acima mencionadas e com um tempo máximo de 60 segundos é necessário utilizar, no mínimo, um número de 16 células Peltier.

3.2 DADOS DA PASTILHA TERMOELÉTRICA

O modelo de pastilha termoelétrica escolhido para o projeto foi a TEC1-12706, devido o seu baixo custo, tamanho reduzido – 40x40mm - e por ser um elemento de fácil aquisição no mercado. Segue abaixo uma tabela contendo os dados técnicos da pastilha em questão:

Tabela 1 - DADOS DE DESEMPENHO CÉLULAS PELTIER

Dados de Desempenho		
Temperatura Lado Quente (°C)	25	50
Qmax (W)	50	57
Delta Tmax (°C)	66	75
I _{max} (A)	6,4	6,4
V _{max} (V)	14,4	16,4
Resistência do Módulo (Ω)	1,98	2,30

Fonte: Folha de Dados TEC-12706 – HB Eletronic Components.

Com os dados da Tabela 1 e os gráficos da Figura 6 e Figura 7 é possível verificar que as condições estabelecidas para as células se enquadram ao funcionamento das mesmas. Como definido, o sistema trabalha com o lado quente da célula em aproximadamente 28°C e o lado frio em aproximadamente 3°C. Contudo, para que seja possível manter estas temperaturas, será necessário o uso de um dissipador de calor.

3.2.1 Cálculo do dissipador de calor

O dissipador de calor tem a função de facilitar as trocas térmicas do sistema. Algumas maneiras podem ser utilizadas para executar esta função: aumento da superfície de contato do componente que se necessita remoção de calor; ou uso de materiais com diferentes coeficientes de troca térmica, por exemplo.

Para o projeto aqui em questão, há a necessidade de se usar um dissipador de calor no lado quente da pastilha de forma a remover o calor absorvido do sistema, mantendo o delta de temperatura na operação da pastilha próximo do requerido. O tipo de dissipador será definido abaixo conforme especificações do sistema.

Um dissipador térmico é definido através da seguinte equação (DANVIC LTDA):

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{Q} \quad (14)$$

Onde:

R = resistência térmica;

T1 = temperatura do dissipador;

T2 = temperatura ambiente ou do resfriador;

Q = carga térmica no dissipador (neste caso inclui a potência elétrica da pastilha mais carga térmica absorvida).

Para o modo de operação da pastilha, considerando uma corrente de 4,5A e um delta de temperatura de 25°C, tem-se, através do gráfico da Figura 6 e Figura 7, um valor aproximado de tensão de 12Vdc, o que leva a um valor de potência elétrica de 54W por célula Peltier. Considerando os valores de 25°C para temperatura ambiente, 28°C para temperatura do lado quente da pastilha e 35W de carga térmica, definidos anteriormente, obtém-se:

$$R = \frac{28 - 25}{54 + 35} = \frac{3}{89} = 0,034^{\circ}\text{C/W}$$

Existem 3 tipos básicos de dissipadores e possuem diferentes resistências térmicas conforme listados abaixo:

- Convectivo natural - 0,5°C/W à 5°C/W;
- Convectivo forçado – 0,02°C/W a 0,5°C/W;
- Resfriamento líquido – 0,005°C/W a 0,15°C/W.

Opta-se para o projeto um resfriamento líquido, utilizando água corrente a temperatura ambiente. Considerando para cálculos as potências elétrica e térmica máximas desenvolvidas em cada uma das 16 células, tem-se que a quantidade de calor total a ser dissipada em um minuto é de 85440J.

Levando em consideração que o calor específico da água é de 4,184J/(g.°C) e a variação de temperatura da água pode ser de até 3°C, e utilizando a Equação (13), de uma forma reorganizada, podemos calcular a quantidade mínima de água circulando necessária para resfriar o sistema:

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta t}$$

$$m = \frac{85440}{4,184.3} = 6806,9g$$

Desta forma, para remoção da quantidade de calor calculada de 85440J é necessário aproximadamente 6,8kg de água. Levando em consideração a massa específica da água de 1kg/L, temos que, para as condições acima determinadas, é necessário um valor próximo de 6,8 litros de água circulando em 1 minuto.

3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para realizar os cálculos de transferência de calor do sistema é de suma importância determinar as cargas térmicas nele presentes. A carga térmica ativa, como definida na seção 3.1, baseada nos cálculos de dimensionamento das pastilhas, é de aproximadamente 536,9W. Além disso, é necessário determinar, também, de que maneira a carga térmica passiva será transferida.

A agitação da água para realizar a troca de calor com a célula Peltier e o movimento de giro da lata, acompanhando o movimento da água, definem a transferência de calor do sistema, quase em sua totalidade, como convecção forçada.

A seguir, será analisada a transferência de calor entre a célula Peltier e a água utilizada como líquido refrigerante. Os cálculos abaixo demonstrados referem-se à apenas uma célula Peltier.

Com base na literatura (KREITH, 2003) o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) para a água, considerando uma convecção forçada pode ser considerada de 300 a 18000 W/m².K. As dimensões da célula Peltier escolhida – TEC1-12706 - são de 4cm cada lado. Desta forma a superfície de contato da célula com a água para realização da troca térmica é de:

$$A = (\text{lado})^2 = (0,04)^2 = 0,0016\text{m}^2$$

Tomando como base, para os cálculos da transferência de calor, o mesmo gradiente de temperatura utilizado no cálculo do dimensionamento das células Peltier ($T_{\text{inicial}} = 25^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{final}} = 3^{\circ}\text{C}$), temos que:

- Utilizando $h = 300\text{W/m}^2.\text{C}$ (mínimo para convecção forçada em água) nas Equações (1) e (3):

$$Q = 300 \times 0,0016 \times (25 - 3)$$

$$Q = 10,56W$$

- Utilizando $h = 18000W/m^2 \cdot ^\circ C$ (máximo para convecção forçada em água) nas Equações (1) e (3):

$$Q = 18000 \times 0,0016 \times (25 - 3)$$

$$Q = 633,6W$$

Como o projeto prevê a utilização de 16 células Peltier, cada célula deverá ser capaz de dissipar 33,6W de calor do sistema. Para estas condições, através da junção das Equações (1) e (3), pode-se definir um coeficiente de convecção como segue (KREITH, 2003):

$$h = \frac{Q}{A \cdot (T_{inicial} - T_{final})} = \frac{33,6}{0,0016 \times (25 - 3)} = 954,6 W/m^2 \cdot ^\circ C$$

Desta forma, a agitação da água, assim como, a adição de aditivos ao líquido refrigerante, se necessário, contribuirão para que este coeficiente de troca térmica convectivo seja atingido.

Existe, ainda, a troca térmica entre o conteúdo no interior da lata com a água que fará a refrigeração do sistema. Considerando as dimensões da lata de bebida como sendo: altura de 12,5cm e diâmetro de 6cm, tem-se:

- Superfície das bases da lata (considerando a base superior e inferior):

$$A_{base} = \pi r^2 \cdot 2 = \pi \cdot 0,03^2 \cdot 2 = 0,0056m^2$$

- Superfície lateral da lata:

$$A_{lateral} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot 0,03 \cdot 0,12 = 0,0226m^2$$

Sendo assim, a área de troca térmica total da lata será de aproximadamente 0,0282m² e a das células 0,0256m². Neste caso, considerando um coeficiente convectivo mínimo do líquido refrigerante para o funcionamento do equipamento, deve-se garantir que no mínimo 90% da lata esteja submersa neste.

3.4 SISTEMAS DE POTÊNCIA E CONTROLE

3.4.1 Circuito de potência

Para o fornecimento da potência do sistema, ficou definido o uso de um retificador de ponte completa ligado diretamente à rede. A quantidade de energia por unidade de tempo para a alimentação das 16 células Peltier é de cerca de 860W. Para suprir esta necessidade, decidiu-se fazer um retificador de 1kW.

Devido ao número de células utilizadas no projeto e a busca por redução da corrente de operação do circuito, foi definida a alimentação elétrica do equipamento em 220V CA. Desta forma, a retificação da tensão da rede estaria próximo de 310V CC. Isto permite fazer a ligação das 16 células Peltier todas em série, implicando em uma tensão na carga de 192V CC (16 células multiplicados por 12V - tensão escolhida para operação da célula).

Para a obtenção dessa potência no retificador, calcula-se a corrente média de 1,6A circulando pelos diodos. Portanto é escolhido o diodo 1N5408 para a ponte, capaz de suportar, segundo seu *datasheet* (DIODES), uma corrente média de 3A com tensão reversa de 700V.

Com a configuração da carga acima definida bem como a potência a ser dissipada por esta carga de 860W, temos uma corrente na carga de 4,5A circulando.

Estima-se um rendimento aproximado para o retificador e conversor de 90% cada. Portanto, toma-se para base de cálculos a potência do retificador em 1060W. Com base nestes dados, é possível, através da Equação (5), calcular o filtro capacitivo do retificador, levando em consideração como pior caso a tensão retificada com redução de 15% (perda possível na rede) e uma máxima oscilação de 5%, reduzindo o esforço do conversor sem elevar muito o filtro:

$$C = \frac{1060}{120 \cdot (264^2 - 251^2)} = 1320\mu F$$

Para o chaveamento de controle de potência na carga através de um conversor Buck é definida uma frequência de 40kHz na chave, com o intuito de reduzir o tamanho do filtro utilizado. Analisando o circuito da Figura 10 foi possível determinar que a chave deve suportar uma tensão reversa equivalente à tensão de entrada, ou seja, a saída do retificador. Para o pior caso, estima-se um valor aproximado de 357V (15% acima dos 310V retificados). Para isto foi utilizado MOSFET IRFP460 que, segundo seu *datasheet* (VISHAY), é capaz de suportar até 500V de tensão e 13A de corrente do sistema (considerando uma temperatura de encapsulamento de 100°C).

Abaixo segue análise das perdas (BARBI, 2007, p. 169) sobre o MOSFET escolhido, sendo P_{cond} as perdas por condução e P_{com} as perdas por comutação da chave, com base nos parâmetros da folha de dados do componente, sempre considerando o pior caso possível. Considerando uma temperatura de junção de 80°C, tem-se um fator de normalização da $R_{ds(on)}$ de aproximadamente 1,6 e calcula-se:

$$P_{cond} = \frac{T_1}{T} \cdot n \cdot r_{ds(on)} \cdot i_{d(on)}^2 = \frac{192}{264} \cdot 1.6 \cdot 0,27.4,5^2 = 6,351W$$

Onde:

P_{cond} – perdas por condução;

T_1/T – equivalente à razão cíclica;

n – fator de normalização;

$r_{ds(on)}$ – resistência da chave em condução;

$i_{d(on)}$ – corrente média na chave em condução.

$$P_{com} = \frac{f}{2} (t_r + t_f) i_{d(on)} V_{ds(off)} = \frac{40000}{2} \cdot (120n + 98n) \cdot 4.5 \cdot 357 = 7,02W$$

Onde:

P_{com} – perdas por comutação;

f – frequência de comutação;

t_r – tempo de subida;

t_f – tempo de descida;

$i_{d(on)}$ – corrente média na chave em condução;

$V_{ds(off)}$ – tensão sobre a chave bloqueada.

Logo, a perda total na chave é:

$$P = P_{cond} + P_{com} = 13,37W$$

Calculando a resistência térmica máxima admissível na chave (adaptado de BARBI, 2007), segue:

$$R_{ja_{max}} = \frac{T_j - T_a}{P} = \frac{80 - 25}{13,37} = 4,113^{\circ}C/W$$

Onde:

$R_{JA_{max}}$ – máxima resistência térmica junção-ambiente;

T_j – temperatura de junção;

T_a – temperatura do ambiente;

P – perdas na chave.

Pela folha de dados a resistência térmica do MOSFET sem dissipador é de $40^{\circ}C/W$. Portanto, será necessário utilizar dissipador na chave.

Através de análise do circuito da Figura 10 foi verificado que a tensão reversa máxima sobre o diodo de roda livre do conversor é igual ao valor de tensão da fonte. Para isso, foi definido a utilização do diodo C4D10120A (CREE), com máxima tensão reversa de 1200V e corrente de 10A. Foi utilizado um diodo de carbeto de silício visando a diminuição da corrente reversa sobre este, reduzindo picos de tensão no momento do chaveamento.

Estipulando um valor máximo de 20% de oscilação de corrente no indutor, 1% de oscilação de tensão na carga e o maior valor possível de tensão para a rede, de acordo com as Equações (11) e (12), obtém-se como filtro de saída:

$$L_o = \frac{E}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{L_{omax}}} = \frac{357}{4 \cdot 40k \cdot 0,9} = 2,485mH$$

$$RSE = \frac{\Delta V_{Cmax}}{\Delta I_L} = \frac{1,92}{0,9} = 2,1\Omega$$

Foi utilizado um capacitor de 220 μ F 250V, cuja RSE é de 0,110 Ω (TDK) devido às facilidades de encontrá-lo e valor comercial.

Tendo em vista a dificuldade de se encontrar um indutor com esse valor de indutância e que suporte os valores de corrente necessários, este foi desenvolvido especialmente para o projeto. Os cálculos do indutor podem ser observados no APÊNDICE B (BARBI, 2007).

Desta maneira, o circuito de potência completo fica como a Figura 13 a seguir:

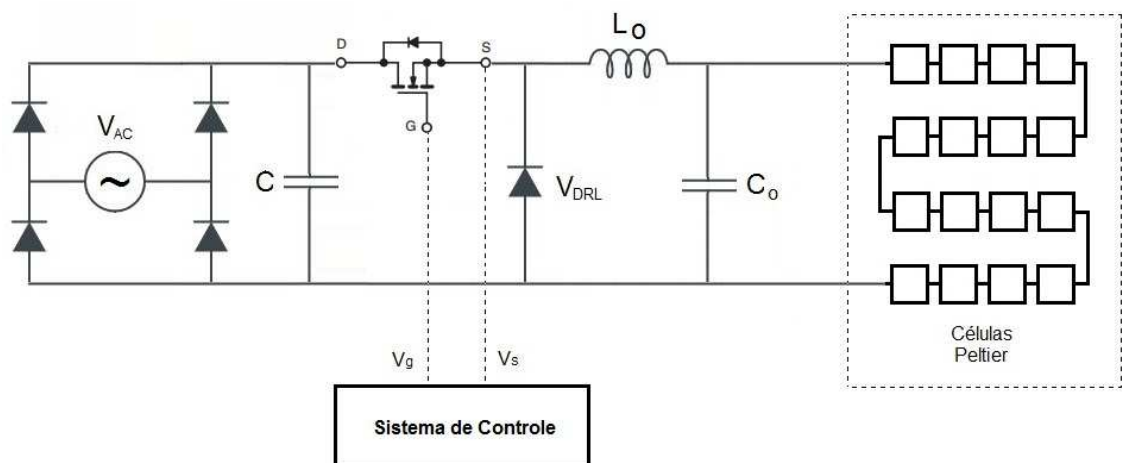


Figura 13 - Circuito de potência completo

3.4.2 Circuito de controle

A placa de controle Tiva (TEXAS Instruments) utilizada no equipamento trabalha com níveis de tensão mais baixos que o sistema de potência aqui projetado. Desta forma, foi necessário desenvolver um circuito de conexão entre a placa de controle e o sistema de potência. Para tal, foi utilizado o *driver* IR2110

(INTERNATIONAL RECTIFIER) para realizar o acionamento da chave. Seu circuito corresponde à Figura 14 a seguir:

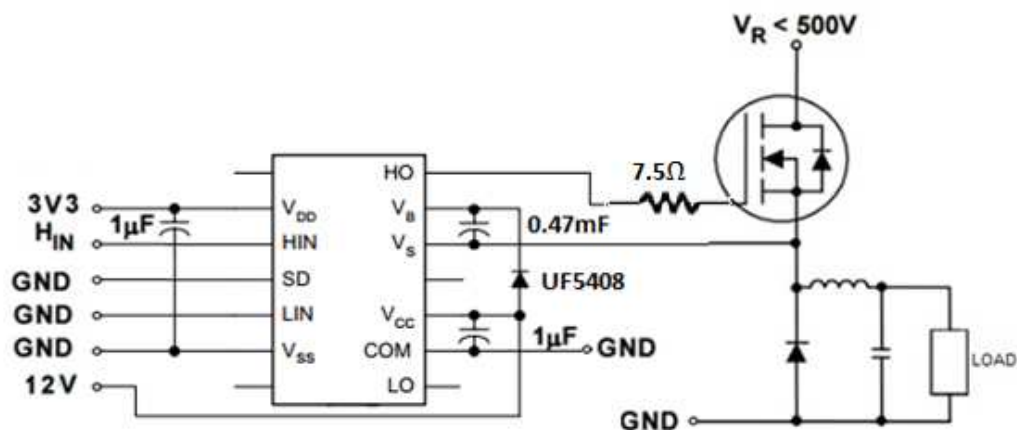


Figura 14 - Circuito de conexão entre Tiva e sistema de potência
Fonte: Adaptado de Internetal Rectifier e Analog Devices.

Para o funcionamento do sensor de temperatura, foi necessário montar o circuito da Figura 12 como visto anteriormente. A faixa de valores de temperatura de operação do sensor é estipulado de -10°C a 50°C , com seus equivalentes em resistência de $96,09\Omega$ e $119,4\Omega$, respectivamente (RHOMBERG), representando uma variação máxima de $23,31\Omega$. Os componentes do circuito podem ser calculados de acordo com as equações a seguir, retiradas diretamente das notas de aplicação referidas para o circuito de condicionamento do PT-100 (ANALOG DEVICES):

Primeiro determina-se o ganho do sistema através da equação que segue:

$$\text{Ganho} = \frac{V_R}{2 \cdot R_0} \cdot \frac{R_4}{R_3} = \frac{V_{OUT}}{\Delta R} = \frac{3,2V - 0V}{23,31\Omega} = 137,28mA$$

Assumindo que a corrente no sensor é de $1mA$ e que $R_0 = 96,09\Omega$, calcula-se a tensão de referência (V_R):

$$V_R = 96,09\Omega \cdot 1mA = 0,096V$$

Resolvendo a equação do ganho para encontrar R_4/R_3 :

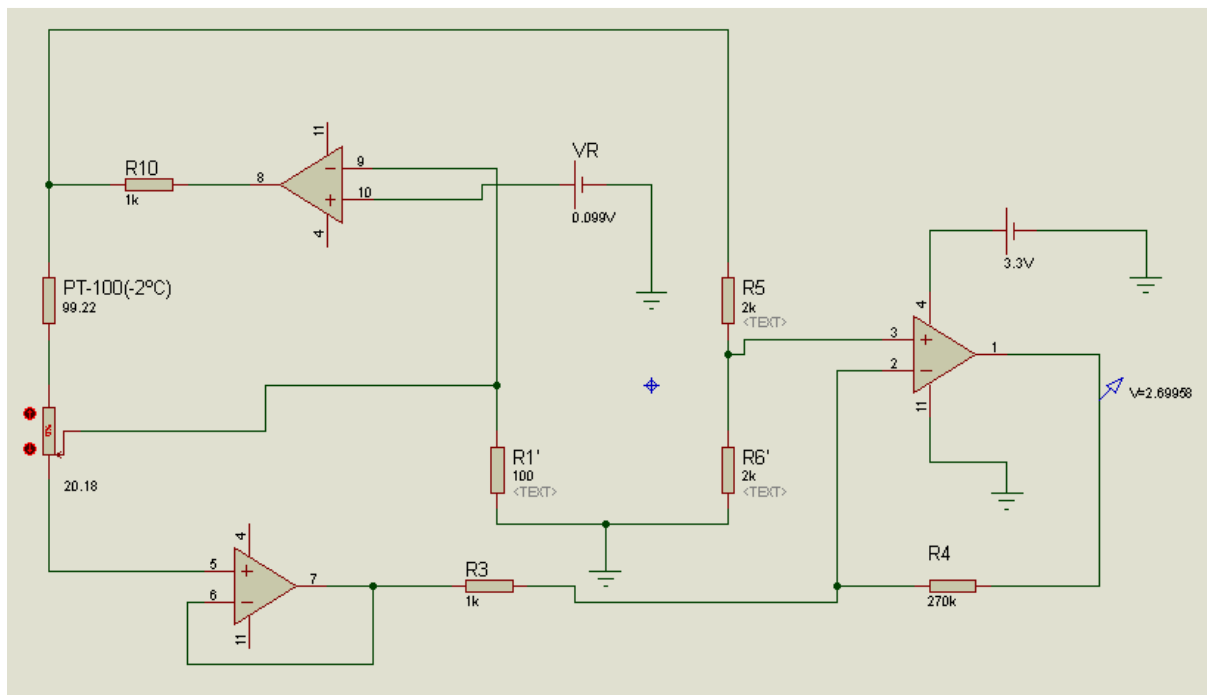


Figura 16 - Simulação PT-100 em 50°C com saída de aproximadamente 2,7V

Para medição de corrente das células foi utilizado o sensor da família ACS712 (ALLEGRO), especificamente o ACS712ELCTR-05B-T, que tem como parâmetros de funcionamento uma medição de corrente de até 5A com alimentação de 5V e transdução de 185mV/A.

3.5 ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO

Optou-se por desenvolver o equipamento com alojamento da lata na posição vertical. Dois detalhes são extremamente importantes no desenvolvimento do equipamento: a completa separação entre o lado de resfriamento da lata e o lado de resfriamento das células; e, a vedação da partes girantes.

Como medida para realizar a separação entre a água de resfriamento da lata e a das células, foram utilizadas duas paredes de alumínio, uma em contato com o lado quente das células e outra em contato com o lado frio. Esta solução trouxe alguns benefício ao sistema como: aumento da superfície de troca térmica do sistema; e, vedação necessária para realizar a separação entre os lados. O contato

das células com o alumínio foi complementado com a utilização de pasta térmica para melhorar a troca de calor do sistema.

Quanto às partes girantes antes comentado, foi utilizado uma hélice de liquidificador para realizar a movimentação da água de resfriamento. Este sistema de hélice já possui uma vedação na sua composição, o que facilitou o desenvolvimento do equipamento.

Os demais detalhes do equipamento foram projetados com o uso de ferramentas computacionais e serão abordados em seções posteriores.

3.6 MOTOR

Como já visto em seções anteriores, o coeficiente convectivo do líquido refrigerante pode ser um limitante na troca térmica do sistema neste projeto e, como alternativa para melhorar este coeficiente, foi necessário agitar o líquido refrigerante.

Sendo assim, foi utilizado um motor de liquidificador para executar tal tarefa. Esta escolha foi baseada no fato de que a hélice utilizada na agitação da água é um conjunto de liquidificador, isto facilitou seu acoplamento. Para evitar o contato da lata com a hélice girante ao fundo do equipamento, foi idealizado uma grade acoplada acima da lamina de modo a não permitir a lata descer até o fundo do recipiente.

4 AQUISIÇÕES E RESULTADOS

4.1 MECÂNICA

Várias ideias foram discutidas para desenvolvimento do equipamento, dentre elas: disposição da lata na horizontal ou na vertical; projetar a estrutura externa do equipamento em uma peça só através a impressora 3D; com o uso da impressora

3D, também, dividir em partes a estrutura; entre outras. Entre todas estas opções buscou-se a facilidade por montar o equipamento.

Desta forma, optou-se por desenvolver toda a estrutura do equipamento em partes separadas, sendo ela dividida da seguinte forma:

- Base inferior;
- Base superior;
- Parede lateral;
- Estrutura das células Peltier.

A estrutura foi dividida toda como peças de encaixe para facilitar a montagem e vedação do equipamento. Utilizando o software SketchUp Make 2016 User foi possível realizar um desenho 3D do equipamento para auxiliar no desenvolvimento do projeto conforme segue na Figura 17:

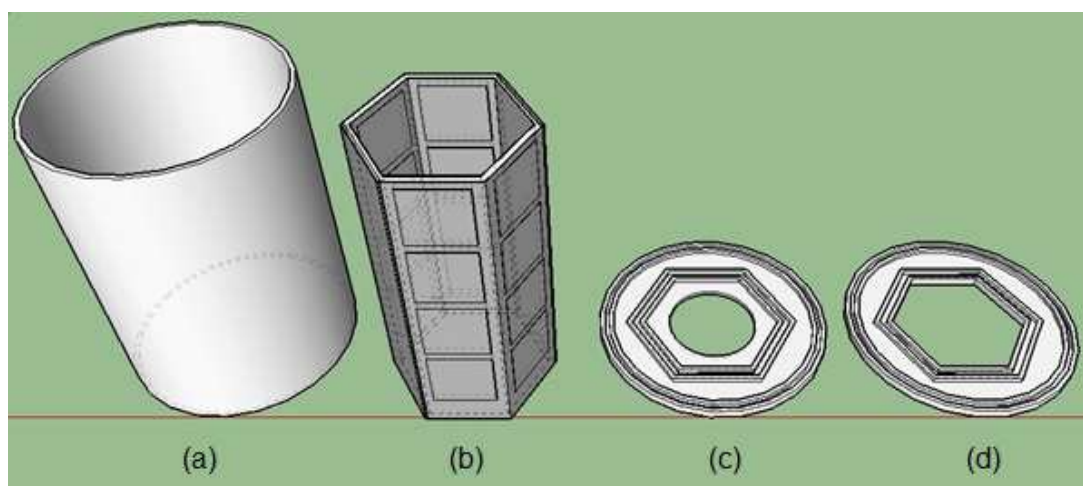


Figura 17 - Partes separadas do equipamento em 3D - (a) Parede lateral, (b) Parede central dupla de alumínio, (c) Base inferior e (d) Base superior.

As bases inferior e superior, Figura 17 – Item (c) e (d), foram fabricadas em acrílico de 6mm de espessura. Para realizar esta fabricação foi utilizado uma fresa para fazer o recorte das peças bem como o desbaste para encaixe das paredes externa e interna do equipamento. Inicialmente as peças foram fabricadas em MDF para verificar as medidas e a qualidade dos encaixes das peças e, só então, foram desenvolvidas em acrílico. Abaixo segue Figura 18 com a imagem das peças desenvolvidas em MDF e a fabricação em acrílico.



Figura 18 - Bases inferior e superior em MDF e acrílico

A parede externa foi projetada como sendo um cilindro como visto na Figura 17 – Item (a). Devido as dimensões do equipamento, foi possível utilizar um tubo de PVC de 150mm como parede externa.

A parede interna, ou o suporte das células Peltier, foi idealizada como uma parede sextavada conforme Figura 17 – Item (b). Duas chapas de alumínio fazem a separação entre a água de resfriamento da lata e das células. As células, no interior das paredes de alumínio, foram suportadas por uma estrutura recortada em EVA. Além da função de estrutura para manter as células em seus lugares, este material possui, também, um bom isolamento térmico o que ajudou na conservação de energia em ambos os lados das paredes. As 16 células previstas para uso no projeto foram distribuídas por quatro lados das paredes de alumínio, ficando 4 células por lado. As outras duas faces das paredes foram reservadas para passagem dos fios de ligação da células.

Abaixo segue Figura 19 com demonstração dos traçados do equipamento com as peças montadas, com diferentes sombreamentos para diferenciação da parte interna e externa do mesmo:

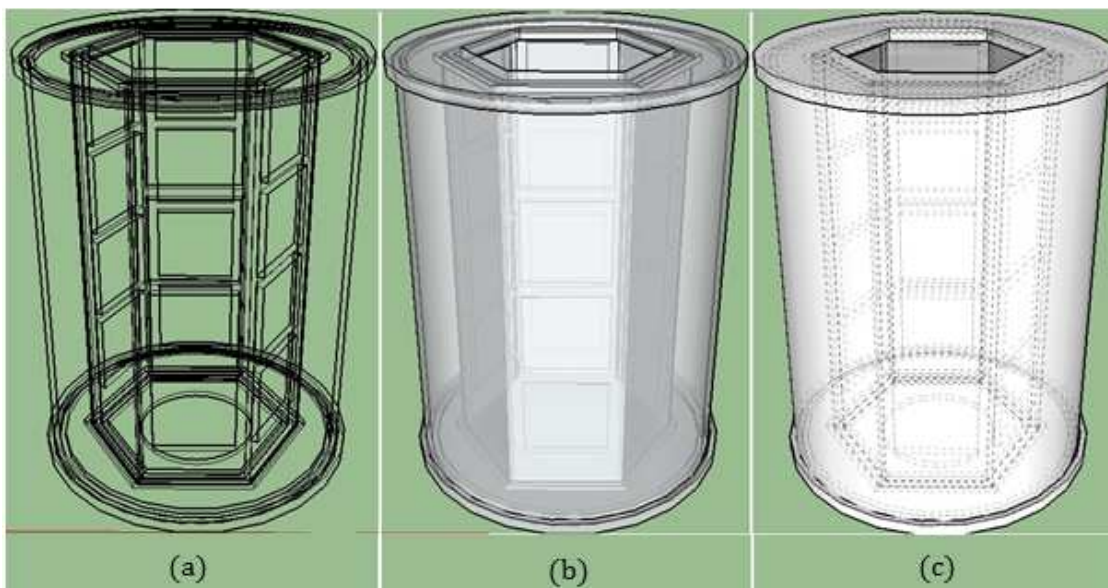


Figura 19 - Equipamento montado

Devido a necessidade de água para resfriamento das células, como já visto anteriormente, foi idealizado duas conexões na parte externa cilíndrica do equipamento. As conexões foram efetuadas em lados opostos sendo a entrada de água realizada pela parte de baixo do equipamento e a saída pelo lado de cima. Estas medidas aqui citadas foram assim realizadas para forçar a água circular por todas as células, evitando um caminho preferencial, bem como, evitando deficiência no resfriamento das células. A seguir é mostrada uma imagem da parte externa completa do equipamento:

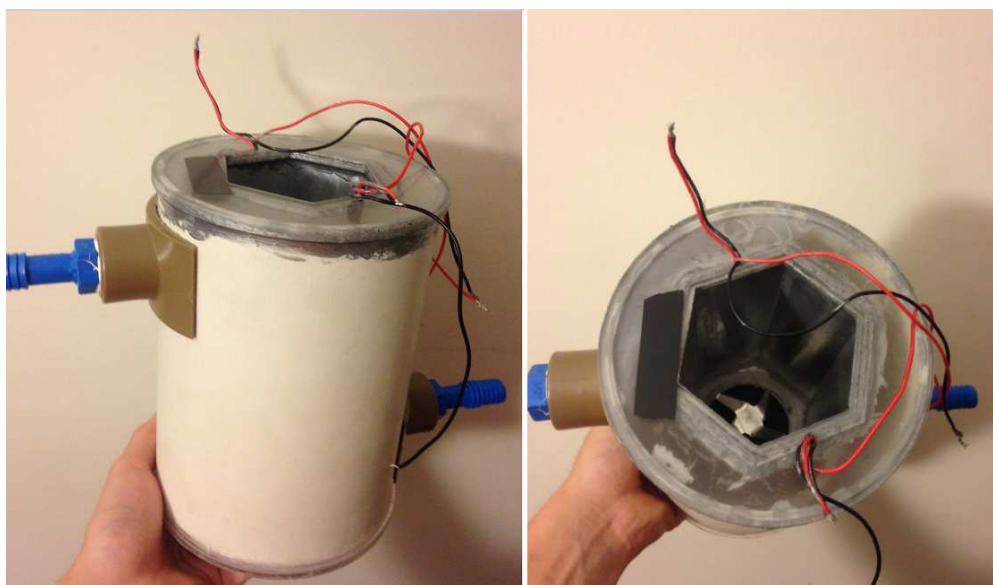


Figura 20 - Parte mecânica do equipamento

A circulação da água foi realizada através da utilização de uma bomba capaz de fornecer os 6,8 litros de água previstos na seção 3.2.1.

Com as partes mecânica e de potência prontas, foi possível fazer a integração entre os sistemas. Os testes de resfriamento foram executados com a parte interna do equipamento cheia de água, o que, comparado ao volume de um lata de bebida, representa uma quantidade de água aproximadamente três vezes maior. Isso fez com que o resfriamento da água levasse mais tempo além do minuto definido no projeto.

A montagem do equipamento apresentou alguns problemas durante seu desenvolvimento. As principais dificuldades estão relacionadas ao encaixe das peças, vedação do equipamento e à troca térmica das células Peltier. Estes três pontos serão discutidos na seção 4.3.4, bem como, a apresentação de algumas alternativas para estes problemas.

4.2 SISTEMA DE POTÊNCIA E CONTROLE

A Figura 21 a seguir demonstra a integração dos sistemas de retificação e potência desenvolvidos no protótipo deste projeto. A seção 4.2 foi toda reservada para apresentação dos resultados referente aos testes realizados sobre estes sistemas, conforme será visto a seguir.

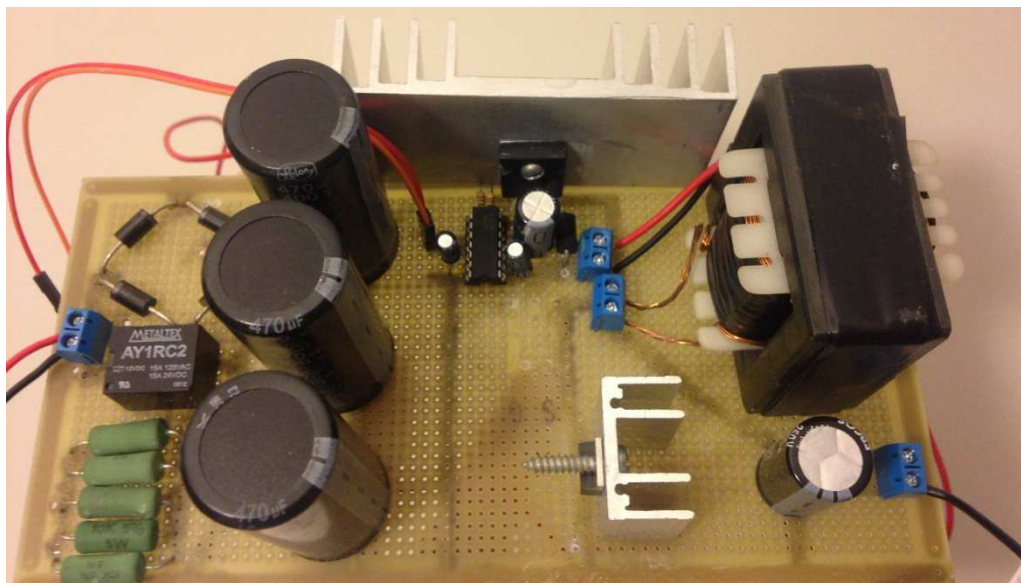


Figura 21 – Placa de retificação, potência e controle do equipamento

4.2.1 Retificador

Após a montagem do retificador como visto na seção 2.2.1, foram executados alguns testes para coleta de dados e análise de operação do circuito. Os dados abaixo demonstrados foram coletados com o retificador operando em carga nominal, utilizando reostatos para a simulação desta carga.

A Figura 22 abaixo representa a ondulação da tensão na saída do retificador com o filtro capacitivo. Como pode ser observado, os valores máximo e mínimo da tensão são 332V e 314V respectivamente.

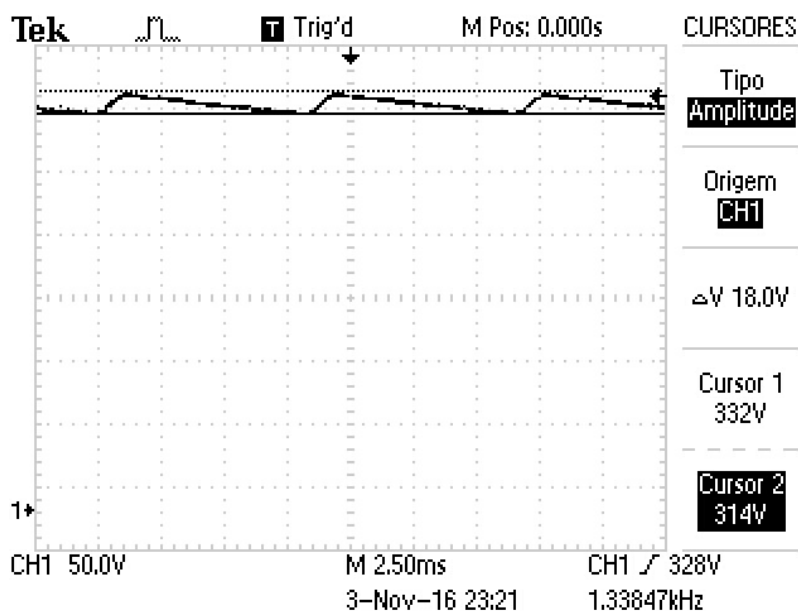


Figura 22 - Ripple do retificador em carga nominal

Com os dados acima, verifica-se que a ondulação na saída do retificador é de aproximadamente 5,4%, muito próximo do projetado, para 5%.

No instante da energização do circuito, devido ao tamanho do filtro utilizado na saída do retificador, como visto na seção 3.4.1, a corrente tende a ser instantaneamente elevada até o carregamento dos capacitores, pois estes atuam quase como um curto circuito até estarem carregados. Esta corrente elevada pode danificar os diodos do retificador, visto que os mesmos foram dimensionados apenas para corrente nominal de operação. Sendo assim, foi desenvolvido um circuito resistivo conectado em série com a entrada do retificador para limitar esta corrente de partida do circuito. A Figura 23 demonstra o esquema de ligação aqui descrito:

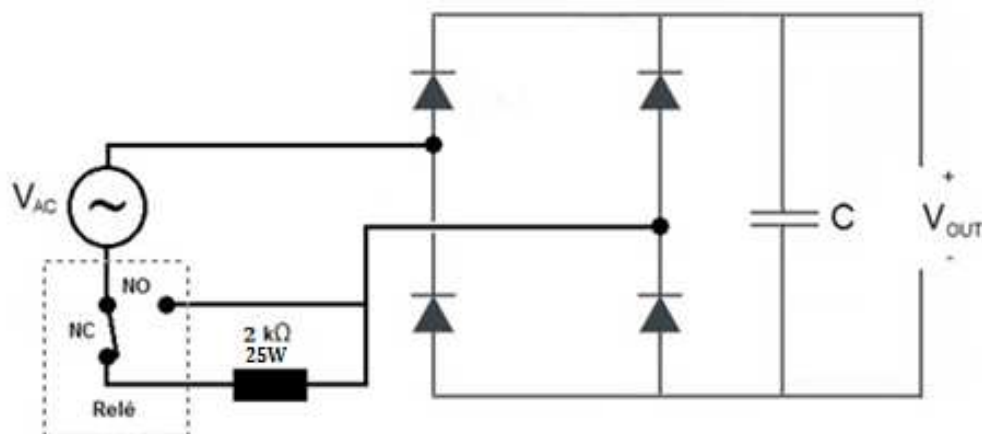


Figura 23 - Circuito retificador com banco de resistores

No momento da energização o banco de resistores está em série com o retificador limitando a corrente. Passado alguns segundos até o carregamento dos capacitores, o relé é acionado e desvia os resistores, deixando o circuito em condições de operação normal. O acionamento do relé foi realizado através de uma das portas do próprio controlador Tiva usado no controle do conversor.

4.2.2 Controle do Buck em malha aberta

Com o conversor Buck ligado diretamente na saída do retificador foram realizadas algumas medições para acompanhamento do comportamento da tensão e corrente na carga. Os teste iniciais aqui apresentados foram executados em malha aberta. Abaixo segue a Figura 24 e Figura 25, as quais representam a tensão na carga com as oscilações em baixa e alta frequência, respectivamente.

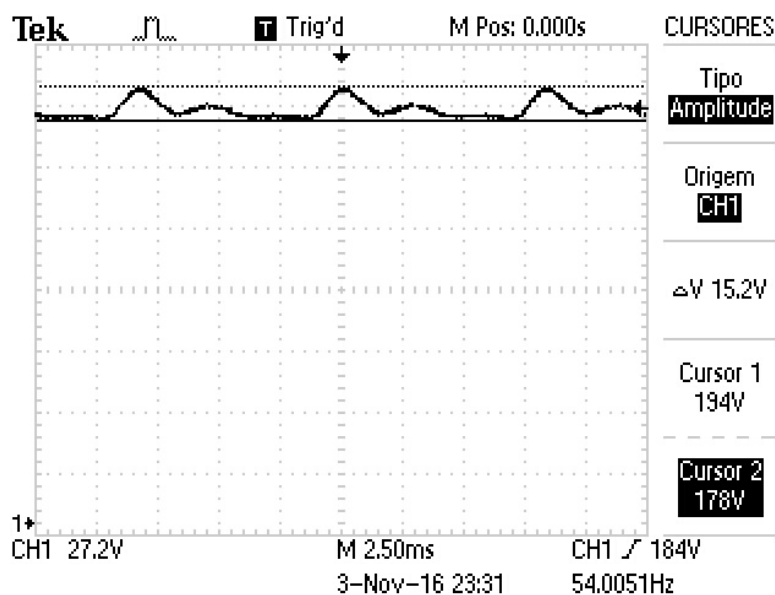


Figura 24 - Ondulação da tensão na carga em baixa frequência

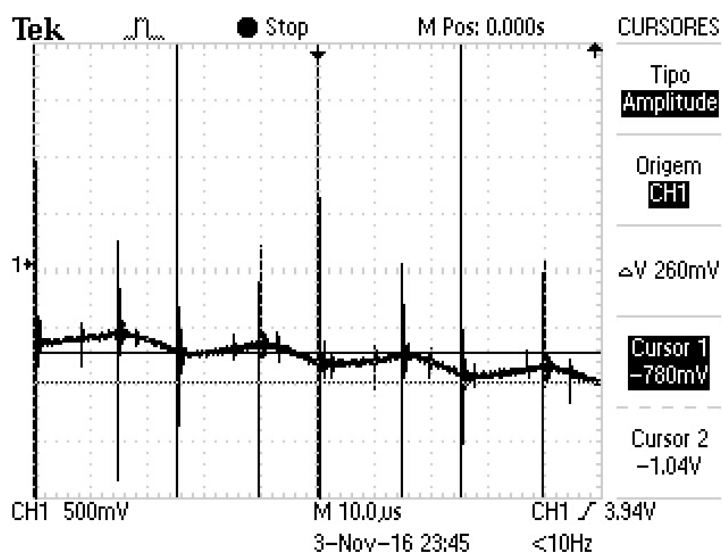


Figura 25 - Ondulação da tensão na carga em alta frequência

Além das aquisições sobre a carga foram executadas, também, algumas medições sobre o sensor de corrente conforme seguem Figura 26 e Figura 27 a seguir. A primeira imagem refere-se às ondulações de corrente em alta frequência.

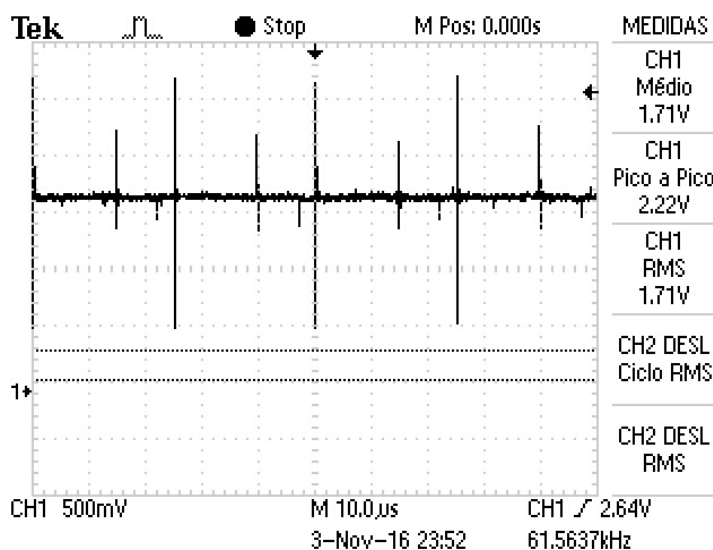


Figura 26 - Ondulação da corrente em alta frequência no sensor de corrente

A imagem seguinte refere-se à ondulação de corrente em baixa frequência:

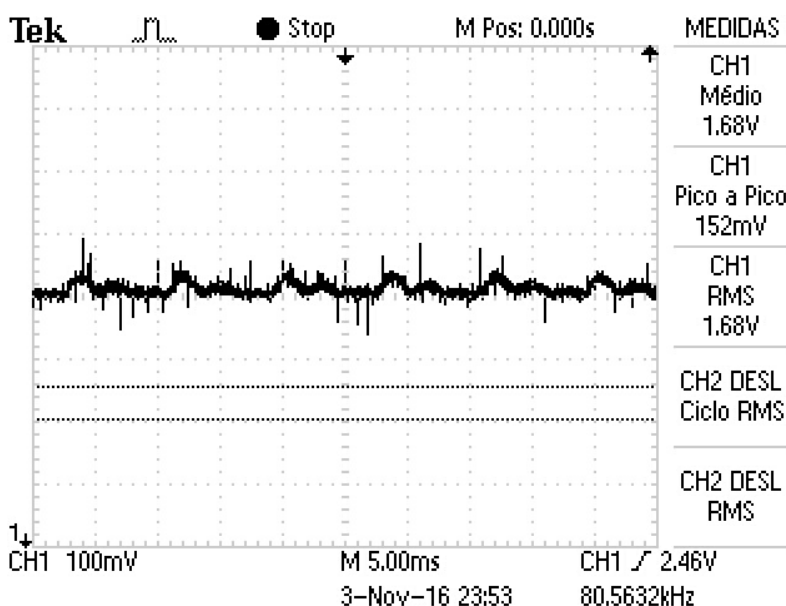


Figura 27 - Ondulação de corrente em baixa frequência sobre o sensor de corrente

Pode ser observado alguns picos de corrente nas aquisições. Estes picos são ruídos de interferência do chaveamento do conversor. Esta interferência quando conectada ao sistema de controle podem dificultar a sua estabilização ou levá-lo à instabilidade. Para contornar essa interferência, o ponto de amostragem da corrente para o sistema de controle foi defasado em relação ao chaveamento, garantindo, desta forma, uma grande redução de ruídos na leitura efetuada pelo sensor.

4.2.3 Controle do Buck em malha fechada

A intenção inicial do projeto era realizar um controle em malha fechada operando em cascata, tendo como variável principal de controle a temperatura da água de resfriamento. Porém, os ruídos do chaveamento do conversor em alta frequência, conforme já comentado na seção 4.2.2, se propagaram por todo o circuito, interferindo diretamente no circuito de medição de temperatura. Com isso, foi implementado um sistema de controle de malha fechada apenas para controle de corrente das células.

Devido ao ruído em alta frequência apresentado no sistema, foi desenvolvido apenas um controlador PI para este projeto. A utilização do derivativo, neste caso, amplificaria ainda mais estes ruídos, interferindo na estabilização do sistema de controle.

Apesar de apenas utilizar um controlador PI, não foi possível fazer uma sintonia adequada com a grande interferência gerada pelo conversor no sensor de corrente. Foi optado então por utilizar um filtro capacitivo mais efetivo na leitura do Tiva, o que deixou o controle consideravelmente mais lento, porém estável.

Com o controle implementado foram realizados alguns testes com diferentes *setpoints* de corrente para sintonizar o controlador. Inicialmente foi realizada a aquisição do transitório de aumento de carga no circuito. Ajustado o controlador com um *setpoint* de corrente mais baixo e com uma carga fixa de aproximadamente 90Ω , foi adicionado uma carga de mesmo valor da anterior em paralelo, caindo pela metade a resultante de carga. Através da Figura 28 a seguir é possível verificar a resposta do controlador para o teste descrito:

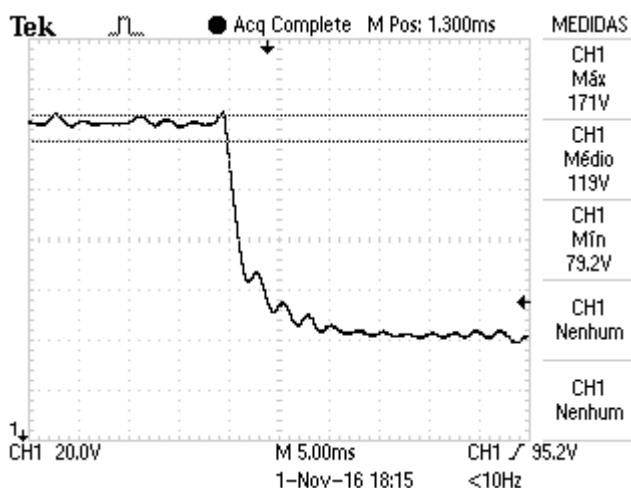


Figura 28 - Transitório de tensão com a adição de carga

Outra aquisição realizada foi demonstrando o transitório de tensão na carga durante a energização do circuito conforme Figura 29. O ajuste de *set-point* para esta aquisição foi de 4,5A (corrente nominal de operação do circuito escolhida em seções anteriores).

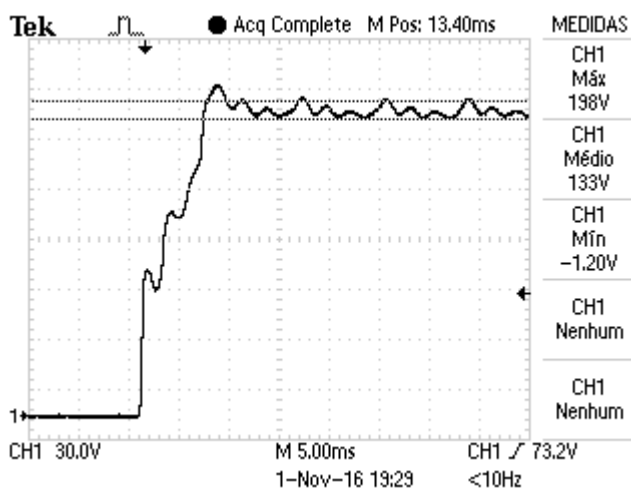


Figura 29 - Transitório de tensão na carga para *setpoint* de corrente de 4,5A

As curvas apresentadas nas Figura 28 e Figura 29 representam a tensão sobre a carga. Como estes testes foram realizados utilizando reostatos para simulação da carga, as curvas de tensão e corrente são semelhantes.

O conversor implementado possui um filtro capacitivo na saída à carga, desta forma, o transitório de energização do circuito sofre uma pequena interferência

devido ao carregamento deste capacitor, como pode ser visto na curva de subida da Figura 29, porém, não trouxe grandes problemas ao controle.

As oscilações constantes em baixa frequência apresentadas nas aquisições acima devem-se ao fato da utilização de um filtro capacitivo no canal de amostragem de dados do sensor de corrente pelo Tiva. Com a filtragem destas frequências o controlador acabou não respondendo à estas pequenas variações.

De uma forma geral, o conversor construído foi capaz de suprir as necessidades energéticas estipuladas no projeto. Devido à fatores construtivos, por exemplo, a utilização de *driver* não isolado, ele não foi a melhor escolha para fazer o controle de potência do sistema, embora o conversor em si tenha funcionado corretamente. Demais problemas e sugestões serão discutidos na seção 4.3.2.

Na Figura 29 pode-se observar alguns dados de operação do conversor como, tensão de saída em aproximadamente 190V, e uma corrente de 4,5A como já citado anteriormente. Desta forma, é possível calcular a potência máxima fornecida pelo conjunto de 855W, valor muito próximo do estipulado no projeto de 864W.

4.3 DIFICULDADES E ALTERNATIVAS

Durante pesquisa para desenvolvimento do projeto foram encontradas algumas dificuldades que necessitaram de comprovação por testes práticos para determinar seu correto funcionamento. Abaixo estão descritos estas dificuldades e algumas possíveis soluções que podem ser tomadas para contornar os problemas.

4.3.1 Ponte retificadora

Dificuldades:

- Controle da corrente na energização do circuito: inicialmente foi utilizado um NTC de 20Ω entre a fonte de alimentação e o circuito de retificação. Porém, com o circuito em operação contínua, o componente não resistiu e acabou queimando. Realizada a busca por

um componente de maior resistência, porém, não foi encontrado no comércio local.

Alternativas:

- Utilizar um componente de maior resistência;
- Substituir o componente por um banco de resistores de potência acionados por relé (alternativa escolhida para o projeto).

4.3.2 Utilização do conversor CC-CC Buck

Dificuldades:

- Aquecimento do diodo de roda livre;
- Encontrar indutor comercial para o filtro de saída;
- Ruído de alta frequência no chaveamento.

Alternativas:

- Utilizado dissipador de calor no diodo de roda livre do conversor para minimizar os impactos do aquecimento no componente. O dissipador utilizado se mostrou suficiente não trazendo impactos diretos à operação do circuito;
- Na dificuldade de se encontrar um indutor comercial para o filtro, foi adquirido um núcleo E55 de ferrite junto à Universidade e construído o indutor necessário para o circuito. Os cálculos do desenvolvimento do indutor foram apresentados em seção anterior;
- Devido a influência em todo o circuito por ruídos de alta frequência gerados pelo conversor Buck, seria ideal que os demais circuitos, medição de corrente, temperatura e tantos outros quanto necessários, sejam isolados completamente do conversor. Desta forma, sugere-se utilizar um *driver* completamente isolado com optoacoplador para evitar esta interferência.

4.3.3 Células Peltier

Dificuldades:

- A quantidade de pastilhas necessárias para desenvolvimento do projeto pode ser inviável considerando um tamanho de equipamento próximo ao tamanho de uma latinha;
- A utilização das células Peltier em série trouxe um problema devido ao desequilíbrio de resistência entre as células (talvez devido ao seu fator construtivo). Como a corrente circulando no circuito se mantinha fixa, o aumento de resistência em uma célula faz com que a tensão sobre ela aumente proporcionalmente. Desta forma, esta célula em questão tende à aquecer mais e, conseqüentemente, aumentar ainda mais a tensão até que ocorre o seu colapso e interrompe o circuito. Para o projeto foram compradas diversas células e utilizadas as que se encontravam em melhores condições de equilíbrio entre elas. Mesmo após o equilíbrio entre as células, durante os testes foram realizados acompanhamentos da tensão sobre as células para garantir o seu correto funcionamento.

Alternativas:

- O número de pastilhas utilizadas no projeto se mostrou o suficiente, não comprometendo o tamanho do equipamento. Pode-se buscar um forma de se otimizar a operação das células fazendo com que elas dissipem uma energia térmica maior e, desta forma, reduzir o número de células;
- A utilização das células Peltier em série trouxe um problema devido ao desequilíbrio de resistência entre as células (devido ao seu fator construtivo). Abaixo seguem algumas alternativas:
 - a) Utilizar células com maior precisão (menores variações de resistência);
 - b) Limitação da tensão sobre as células, podendo ser realizada por um diodo zener (lembrando que a tensão seria de 12V e

corrente de 4,5A – não foi encontrado zener para esta potência no comércio local);

- c) Utilizar as células em paralelo com uma fonte de alimentação de 12V. Em caso de desequilíbrio da resistência, a tensão se manteria constante e a corrente diminuiria. Isto causará uma perda de potência na célula, o que é menos prejudicial que o seu colapso como visto anteriormente. Com a queda de potência ela tende a resfriar, diminuindo, por sua vez a resistência, e voltando a fornecer mais potência. Possivelmente ela ficará nesta oscilação de potência durante sua operação;
- d) A utilização das células em paralelo gera o problema de necessitar de uma fonte de tensão de 12V para suprimento de uma corrente de mais de 70A (16 células para 4,5A cada uma).

4.3.4 Mecânica do equipamento

Dificuldades:

- Encaixe das peças;
- Vedação dos encaixes para não haver infiltração de água;
- Troca térmica das células com as paredes.

Alternativas:

- As peças foram construídas com desbastes para encaixe. Os encaixes das paredes centrais de alumínio e a parede externa à base foram realizados com facilidade. Porém, o fechamento do equipamento com a base superior dificultou o encaixe das paredes internas de alumínio. Desta forma, foi efetuado um desbaste maior no encaixe destas paredes na base superior e completado com silicone para realizar a vedação do equipamento;

- Para vedação dos encaixes foi utilizado silicone em todo o equipamento. Verificado que a vedação não foi 100% eficiente devido às dificuldades de montagem acima descritas. Alternativas para este caso seriam desenvolver o equipamento com menor número de peças de encaixe possível ou fazer utilização de outros materiais nas peças que ajudem nesta vedação (prever juntas de vedação para os encaixes);
- Apesar das paredes de alumínio aumentarem a área de troca térmica do equipamento, o contato das células Peltier com as paredes devem ser perfeitos, caso contrário, a troca de calor do equipamento pode ser comprometida. Foi utilizado pasta térmica para ajudar no contato entre os componentes, porém, foi verificado que o contato não foi 100% eficiente. Alternativas seriam realizar a dobra do alumínio o mais perfeito possível à garantir este contato ou utilizar as células diretamente em contato com a água. Esta segunda solução traria o problema de vedação entre a parede de sustentação das células e as bordas das células.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Durante as pesquisas para desenvolvimento do trabalho muito se encontrou sobre a utilização das células Peltier com a finalidade de resfriamento, porém, nada do porte de potência do equipamento aqui apresentado. A realização deste projeto, um tanto quanto arrojado, mostrou que é possível desenvolver trabalhos muito mais elaborados utilizando tal componente e não limitar-se apenas à modos básicos de operação.

Através do balanço de energia realizado na 1^o Etapa do projeto, foi possível mensurar as grandezas que seriam necessárias para desenvolvimento do projeto, dentre elas, a potência para a realização do resfriamento da lata. Apesar de os

testes terem sido realizados apenas com o líquido refrigerante, foi possível verificar que o sistema de potência projetado estava adequado às necessidades do sistema.

Referente ao conversor Buck, especificamente, utilizado no equipamento, obteve-se um bom desempenho operando em carga nominal, porém, seu controle foi muito prejudicado devido ao ruído gerado pelo próprio conversor. Desta forma, não foi possível realizar a aplicação do controle em cascata, limitando o sistema à operar apenas acompanhando o *setpoint* estabelecido, com um controle mais lento.

Através conexão do conversor com as células Peltier como carga do sistema, foi possível verificar sua funcionalidade. Apesar da utilização deste conjunto com baixa potência, o desempenho se mostrou bastante satisfatório para testes preliminares, sendo possível verificar um início de resfriamento do líquido refrigerante do sistema. Esta junção entre o conversor e as células Peltier foram realizadas com o equipamento sem a rotação interna, portanto, não operando em suas condições ideais.

Apesar de observado o resfriamento do líquido refrigerante, como citado no parágrafo anterior, acredita-se que as células tiveram seu funcionamento comprometido pela dificuldade de realizar o contato integral das suas faces com as paredes de alumínio do sistema. Isso pode ser observado durante as diversas desmontagens do equipamento para tentar melhorar esta troca térmica e eliminar folgas perceptíveis nas faces das células, bem como solucionar problemas de vedação do equipamento. A solução para estes problemas seria, talvez, idealizar um novo modelo mecânico para o equipamento, em que os encaixes das peças sejam realizados com maior facilidade.

Embora a dificuldade apresentada no parágrafo anterior possa ter comprometido o resfriamento da célula, o protótipo desenvolvido foi construído de tal forma a suportar grandes variações de temperatura, não trazendo grandes problemas à mecânica do equipamento.

Devido às diversas dificuldades apresentadas, foi possível realizar poucos testes com o equipamento integrado, pois o ruído do sistema fez com que o controlador deixasse de responder, elevando o sinal de saída para 100%, aplicando, aproximadamente, 310V e 6,5A à carga. Estas variáveis proporcionaram valores de potência acima do dobro da potência de saída estimada para o projeto, comprometendo diversos componentes do sistema. Dentre este e demais fatores já apresentados anteriormente, a integração total do sistema não foi realizada.

Outro objetivo específico do sistema foi o desenvolvimento do sistema de rotação da lata para acelerar a troca térmica. A adaptação do sistema de um liquidificador ao equipamento foi bem sucedida, sendo possível executar alguns testes de rotação do líquido refrigerante no interior do equipamento. Porém, os teste com a lata inserida junto ao sistema não foi executado devido os diversos contratempos já apresentados neste trabalho.

Apesar das dificuldades encontradas na realização do trabalho foi possível comprovar que as principais ideias para operação do equipamento, como o sistema de controle, fornecimento de potência para o equipamento e operação das células Peltier, realmente funcionam. Portanto, os testes aqui apresentados demonstram que o projeto foi bem sucedido como forma de validação de conceitos e pode ser utilizado em gerações futuras para desenvolvimento de outros projetos.

Sendo assim, para continuidade deste trabalho, os esforços para realização de trabalhos futuros podem ser aplicados no desenvolvimento de circuitos de forma a eliminar os ruídos existentes, na mecânica do equipamento, solucionando as dificuldades aqui encontradas, e, por fim, criar um novo design, juntando o sistema de potência do equipamento com a mecânica para torná-lo um equipamento comercial.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca pela construção de um equipamento atrativo para o mercado consumidor, atrelado à viabilidade de desenvolvimento do mesmo, fez com que fossem efetuados diversos estudos para melhor desenvolver o projeto em questão. Inicialmente, o projeto foi idealizado dentro de alguns parâmetros mínimos de operação considerados diferenciais em relação aos produtos já existentes, parâmetros estes mantidos até esta etapa de desenvolvimento.

Diversas ideias foram discutidas e mensuradas na procura das melhores alternativas, identificando seus problemas e procurando por soluções e, até mesmo substituindo-as, com o intuito de se obter a forma mais vantajosa na operação do equipamento. As propostas até aqui definidas estão todas baseadas em estudo de

viabilidade da construção do equipamento, bem como nos cálculos de melhor eficiência para sua operação.

O desenvolvimento do protótipo foi uma grande oportunidade para comprovar algumas das ideias discutidas mas, também, refutar outras das quais não se tinha muito conhecimento. Embora não tenha sido possível realizar o resfriamento da lata de bebida, devido ao curto tempo para desenvolvimento do projeto, comprovou-se que as ideias que estão relatadas nesta última fase do trabalho são de grande valia para desenvolvimento deste equipamento e, para projetos futuros, poderão ser utilizadas.

REFERÊNCIAS

Departamento Acadêmico de Eletrotécnica. Proposta de Implementação do Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2011. Disponível em: <<http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/>>. Acesso em: 20 out. 2015, 12:20.

FERENCE, Michael; LEMON, Harvey Brace; STEPHENSON, Reginald J.. Curso de física: eletromagnetismo. São Paulo: E. Blucher, [19-] 328 p.

LEE, John F.(John Francis); SEARS, Francis Weston. Termodinâmica. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969. 667 p.

VOLPE, Pedro L. O. O que são termopastilhas, como funcionam e como os químicos podem utilizar estes componentes. Instituto de Química – Departamento de Físico-Química – UNICAMP – Campinas – SP, 1992.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, c1992.

KREITH, Frank; BOHN, Mark. Princípios de transferência de calor. São Paulo: Pioneira Thomson, 2003. xxi

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados. Florianópolis Ed. do Autor, 2000.

BARBI, Ivo. Eletrônica de potência: projetos de fontes chaveadas. 2. ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2007.

HB ELETRONIC COMPONENTS. Thermoelectric Cooler Peltier – TEC-12706 Datasheet. Disponível em: <<http://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>> Acesso em: 10/05/2016.

DANVIC LTDA. Introdução ao efeito Peltier. SÃO PAULO - SP. Disponível em: <<http://www.peltier.com.br/index.php?url=faq> > Acesso em 15/05/2016.

IME – USP. Modelagem matemática de sistemas térmicos. Disponível em: <http://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%20E1tica/01Sistemas%20Din%20E2micos/12_Modelagem_Mat_Sist_Term.pdf>. Acesso em: 27/05/2016.

DIODES INCORPORATED, 1N5400 – 1N5408 Datasheet. Disponível em: <http://www.diodes.com/_files/datasheets/ds28007.pdf> Acesso em: 17/11/2016.

VISHAY Siliconix, IRFP460 Datasheet. Disponível em: <<http://www.vishay.com/docs/91237/91237.pdf>> Acesso em: 17/11/2016.

CREE, C4D10120A Datasheet. Disponível em: <<http://www.wolfspeed.com/media/downloads/82/C4D10120A.pdf> > Acesso em: 17/11/2016.

TDK, Aluminum electrolytic capacitors. Disponível em: <https://en.tdk.eu/inf/20/30/db/aec_2015/B43644.pdf > Acesso em: 17/11/2016.

TEXAS Instruments. Disponível em: <<http://www.ti.com/ww/en/launchpad/launchpads-connected-ek-tm4c123gxl.html>> Acesso em: 14/06/2016.

ANALOG DEVICES. 12-Bit, 300 kSPS, Single-Supply, Fully Isolated RTD Temperature Measurement System with 3-Wire Compensation. Disponível em: <<http://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0337.pdf>> Acesso em: 14/06/2016.

RHOMBERG, PT-100 datasheet. Disponível em: <http://www.acdc.co.za/rhomberg/docs/RTD_PT100temp.pdf> Acessado em: 15/06/2016.

INTERNATIONAL RECTIFIER, High and low side driver datasheet. Disponível em: <<http://www.infineon.com/dgdl/ir2110.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e>> Acesso em: 17/11/2016.

ALLEGRO Microsystems, LLC, High Performance Semiconductors. ACS712 datasheet. Disponível em: <<http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>> Acesso em: 19/11/2016.

APÊNDICE A

Segue abaixo esquemático completo da solução montada, separado por figuras de acordo com a sua função no sistema.

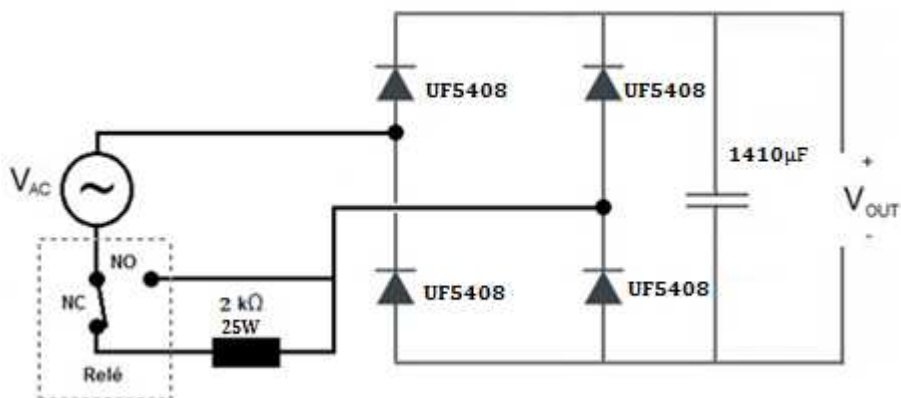


Figura 30 - Retificador construído

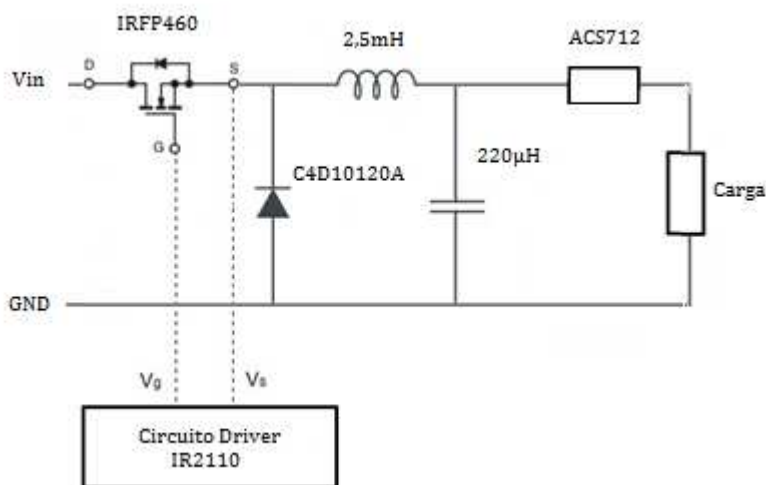


Figura 31 - Conversor Buck construído

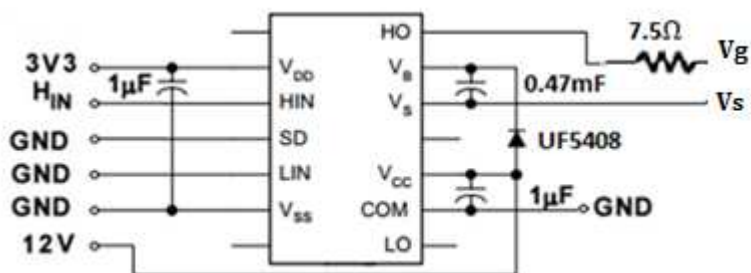


Figura 32 – Circuito driver IR2110 construído

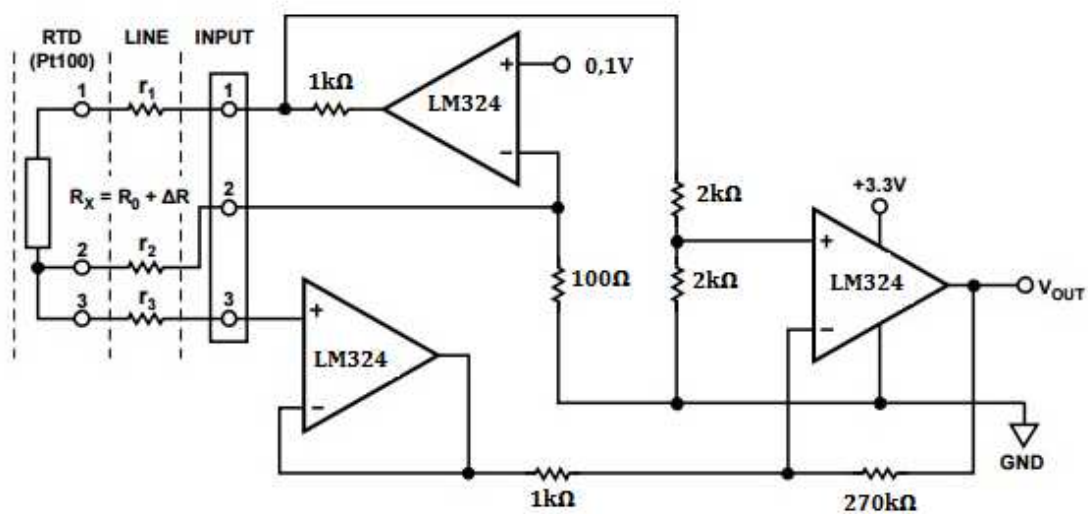


Figura 33 – Circuito condicionamento PT-100 construído

APÊNDICE B

Abaixo seguem os cálculos utilizados para definição do indutor utilizado no filtro de saída do Conversor Buck:

Para escolha do núcleo, utiliza-se valores calculado anteriormente e dados de tabela encontrados na literatura (BARBI, 2007):

$$AeAw = \frac{L_0 \cdot (1,1 \cdot I_{med})^2}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot K_w} = \frac{2.485m \cdot (1,1 \cdot 4,5)^2}{0,3 \cdot 450 \cdot 0,7} = 6,642cm^4$$

Com o valor do produto $AeAw$ obtido escolhe-se o núcleo E55 .

Calcula-se o número de espiras do indutor:

$$N = \frac{L_0 \cdot 1,1 \cdot I_{med}}{B_{max} \cdot A_e} = \frac{2.485m \cdot 1,1 \cdot 4,5}{0,3 \cdot 3,54} = 115,8 \text{ espiras}$$

Portanto são necessárias 116 espiras para a construção do indutor.

É calculado o diâmetro do fio para não haver perdas pelo efeito *skin*, relativo à frequência de chaveamento, através da penetração do mesmo:

$$2\Delta = 2 \cdot \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} = 2 \cdot \frac{7,5}{\sqrt{40k}} = 0,053cm$$

Através de dados de tabela, foi escolhido o fio de cobre AWG 24.

Calcula-se então o número necessário de condutores de cobre em paralelo, levando em consideração a densidade de corrente do fio, área de condução e corrente média no indutor:

$$N_{par} = \frac{I_{med}}{J_{max} \cdot S_{fio}} = \frac{4,5}{450 \cdot 0,41m} = 2,4 \text{ condutores}$$

Portanto foram necessários 3 condutores de cobre em paralelo.