

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CÂMPUS CURITIBA

ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

DIOGO PRESTES DE ARAUJO

IGOR DE ALMEIDA GOUVEIA

VINICIUS LIMA FERREIRA

**FERMENTADOR COM CONTROLE DE TEMPERATURA PARA PRODUÇÃO DE
CERVEJA ARTESANAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

DIOGO PRESTES DE ARAUJO

IGOR DE ALMEIDA GOUVEIA

VINICIUS LIMA FERREIRA

**FERMENTADOR COM CONTROLE DE TEMPERATURA PARA PRODUÇÃO DE
CERVEJA ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentada à disciplina 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. Alceu André Badin

CURITIBA

2018

Diogo Prestes de Araujo
Igor de Almeida Gouveia
Vinicius Lima Ferreira

Fermentador com Controle de Temperatura para Produção de Cerveja Artesanal

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

Curitiba, 26 de Junho de 2018.

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

Prof. Amauri Amorin Assef, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Alceu André Badin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Daniel Flores Cortez, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adriano Ruseler, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alceu André Badin, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

ARAUJO, Diogo Prestes; FERREIRA, Vinicius Lima; GOUVEIA, Igor de Almeida. FERMENTADOR COM CONTROLE DE TEMPERATURA PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL. 82. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Este trabalho tem como objetivo a criação de um protótipo de fermentador de cerveja voltado para a produção artesanal caseira, com controle de temperatura utilizando células de efeito peltier. Para tanto, é utilizado um conversor CA-CC na topologia Ćuk para a alimentação do sistema, e usando o microcontrolador Tiva C com a implementação de um controlador PID digital, controla-se a tensão de saída do conversor e, conseqüentemente, a potência transmitida para as células peltier, estabilizando assim a temperatura numa referência desejada.

Palavras-chave: Conversor Ćuk , Fermentador, Controle de Temperatura, Tiva C, PID, Célula Peltier.

ABSTRACT

ARAUJO, Diogo Prestes; FERREIRA, Vinicius Lima; GOUVEIA, Igor de Almeida. FERMENTER WITH TEMPERATURE CONTROL FOR ARTISANAL BEER PRODUCTION. 82. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The objective of this paper is to develop a prototype of a beer fermenter, aimed at artisanal home production with a temperature control using peltier's effect cells. Therefore, a AC-DC Ćuk topology converter is used to power the system, and applying a Tiva C microcontroller with the implementation of a digital PID controller, the converter's output voltage is controlled and, consequently, the power transmitted to the peltier's cells, stabilizing the temperature in the setpoint required.

Keywords: Ćuk Converter, Fermenter, Temperature Control, Tiva C, PID, Peltier Cell.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Demonstrativo efeito Seebeck.
- Figura 2 - Demonstrativo efeito Peltier.
- Figura 3 - Demonstrativo módulo Peltier.
- Figura 4 - Módulo simples (a), módulo multiestágio (b).
- Figura 5 - Módulo Peltier com dissipador e ventilador.
- Figura 6 - Impedância x Corrente da célula peltier.
- Figura 7 - Ilustração dos sinais de saturação da célula.
- Figura 8 - Teste em série de 3 células.
- Figura 9 - Teste em paralelo de 3 células.
- Figura 10 - Imagem do módulo peltier.
- Figura 11 - Imagem da base de sustentação.
- Figura 12 - Imagem do protótipo parcial.
- Figura 13 - Protótipo Final.
- Figura 14 - Variação da tensão de uma célula, com carga.
- Figura 15 - Decaimento da temperatura da água.
- Figura 16 - Esquema básico do conversor tipo Ćuk.
- Figura 17 - 1ª Etapa de funcionamento do conversor Ćuk.
- Figura 18 - 2ª Etapa de funcionamento do conversor Ćuk.
- Figura 19 - 3ª Etapa de funcionamento do conversor Ćuk.
- Figura 20 - Topologia de simulação do conversor Ćuk.
- Figura 21 - Controle PI analógico para simulação.
- Figura 22 - Forma de onda simulada, em alta frequência, sobre L1 e L2.
- Figura 23 - Forma de onda simulada sobre a Chave(VS1) e no Diodo(VD).
- Figura 24 - Forma de onda simulada, em alta frequência sobre o Capacitor de acoplamento.
- Figura 25 - Forma de onda simulada, da tensão e corrente de entrada.
- Figura 26 - Forma de onda simulada, em baixa frequência, sobre L1 e L2.
- Figura 27 - Forma de onda simulada, baixa frequência, sobre a Chave(VS1) e o Diodo(VD).
- Figura 28 - Forma de onda simulada, baixa frequência, sobre o Capacitor de acoplamento.
- Figura 29 - Circuito Ponte H.

Figura 30 - Conversor Implementado Experimentalmente.

Figura 31 - Forma de onda, alta frequência, sobre os indutores L1 e L2, respectivamente.

Figura 32 - Forma de onda da tensão, em alta frequência, na Chave(1) e no Diodo(2).

Figura 33 - Forma de onda da tensão, em alta frequência, no Capacitor de Acoplamento C1.

Figura 34 - Forma de onda da tensão e corrente de entrada, obtido empiricamente.

Figura 35 - Forma de onda da tensão, sobre L1 e L2, respectivamente, experimentalmente.

Figura 36 - Forma de onda da tensão na Chave(1) e no Diodo(2), obtido experimentalmente.

Figura 37 - Forma de onda da tensão no Capacitor de Acoplamento C1, experimentalmente.

Figura 38 - Tiva C LaunchPad.

Figura 39 - Driver de acionamento da chave.

Figura 40 - Leitura da temperatura.

Figura 41 - Leitura da tensão de saída.

Figura 42 - Fluxograma do código.

Figura 43 - Comparativo valores eficazes.

Figura 44 - Teste do protótipo resfriando.

Figura 45 - Teste do protótipo esquentando.

Figura 46 - Teste do limite resfriando.

Figura 47 - Teste do limite esquentando.

Figura 48 - Atuação do controle PWM.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 TEMA	11
1.1.1 Delimitação do Tema	11
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA	13
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. A CERVEJA	16
2.1.1. Etapas da Produção	16
2.1.1.1. Mosturação	16
2.1.1.2. Fervura	16
2.1.1.3. Fermentação	17
2.1.1.4. Maturação	17
2.1.2. Tipos de Cerveja	18
2.1.2.1. Ales	18
2.1.2.2. Lagers	19
2.1.2.3. Lambic	20
2.2. O TRANSPORTE DE CALOR	21
2.2.1 Calorimetria	23
2.2.2 Calor sensível	23
2.3. FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS	24
2.3.1 Efeito Seebeck	24

2.3.2.	Efeito Peltier	25
2.3.3	Efeito Thomson	26
2.4.	MÓDULO PELTIER	27
2.4.1	Estágio do Módulo Peltier	27
2.4.2	Cuidados na Utilização	28
3.	PROTÓTIPO PARA TESTE DAS CÉLULAS	29
3.1	PARÂMETROS DA CÉLULA PELTIER	29
3.2	O PROTÓTIPO	31
3.2.1	Cálculo da Quantidade de Células	31
3.2.3	Montagem do Protótipo	35
3.2.4	Protótipo Final.	37
3.3.	RESULTADOS COM CARGA	37
4.	CONVERSOR CA-CC	39
4.1	ESCOLHA DO MODO DE OPERAÇÃO E DO CONVERSOR	39
4.2	FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR ĆUK	40
4.3	PROJETO DO CONVERSOR ĆUK	42
4.3.1	Determinação dos Parâmetros	42
4.3.2	Cálculo das Indutâncias	43
4.3.3	Cálculo dos Capacitores	43
4.4	SIMULAÇÃO DO CONVERSOR ĆUK	44
4.4.1	Simulação em Alta Frequência	45
4.4.2	Simulação em Baixa Frequência	46
4.5	CIRCUITO DE INVERSÃO DA TENSÃO DE SAÍDA	48
4.6	MONTAGEM DO CIRCUITO	49
4.6.1	Aferições Experimentais em Alta Frequência	50
5.2.2	Aferições Experimentais em Baixa Frequência	52
5.	CONTROLE DO CONVERSOR	55

5.1	MICROCONTROLADOR TIVA C	55
5.1.2	Utilização do Tiva C	56
5.2	MODULAÇÃO PWM	56
5.3	SENSOR DE TEMPERATURA	57
5.3.1	Filtro Anti-Aliasing	58
5.3.2	Leitura da Temperatura	59
5.4	LEITURA DA TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR	60
5.5	CONTROLADOR PID	61
6.	RESULTADOS E CONCLUSÕES	65
6.1	RESULTADOS DO CONVERSOR	65
6.1.1	Operação em potência nominal..	65
6.2	RESULTADOS DO PROTÓTIPO	65
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO I - Código Desenvolvido	76
	ANEXO II - Quadro de componentes	82

1. INTRODUÇÃO

O consumo de cerveja no Brasil está em franca expansão e acompanhando esta tendência, está o consumo de cervejas artesanais. Estas, são mais elaboradas e tem um valor agregado maior. São destinadas a atender paladares exigentes e buscam suprir padrões de satisfação mais refinados. São, portanto, consumidas por um público mais seletivo. (EUROMONITOR INTERNACIONAL, 2011 apud FRANZEN, 2011).

No Brasil, o mercado das cervejas artesanais corresponde a pouco mais de 2% do total, mas sua taxa de crescimento é três vezes maior que a média do total, correspondendo a 8%, enquanto o mercado de cervejas de consumo em larga escala cresce entre 2,5% e 5% (EUROMONITOR INTERNACIONAL, 2011 apud FRANZEN, 2011).

Partindo do mesmo princípio de cervejas artesanais, há ainda uma outra parcela de produção que é ainda mais restrita, os produtores caseiros, que fazem cerveja exclusivamente ao seu gosto e as compartilham com poucas pessoas, muitas vezes nem vendendo o produto final. Esses produtores muitas vezes não têm acesso à produtos adequados para a produção integral da cerveja, por possuírem pouco poder de investimento (haja visto que produzem cerveja como um hobby) ou por não encontrarem no mercado produtos que satisfaçam as suas necessidades, isto é, insumos para a produção em pequena escala.

Segundo Arnold (2005), O processo de fabricação de cerveja, em geral, pode ser dividido em quatro etapas: mosturação, fervura, fermentação e maturação. A mosturação é basicamente a mistura do malte e de seus complementos com a água, criando assim o mosto¹. A segunda parte é a fervura, onde o mosto é fervido por um tempo obedecendo certas rampas de aquecimento dependendo da receita que está sendo feito. Após isso, passa-se à etapa de fermentação, quando são colocadas as leveduras (fermento) no líquido obtido após a fervura; estas transformam os açúcares do mosto em álcool e gás carbônico. Por último, tem-se a maturação, onde o líquido é resfriado e fica descansando no tanque por um determinado tempo dependendo do tipo de cerveja sendo feita.

¹ Mistura açucarada destinada a fermentação alcoólica, produto resultante da brassagem(fervura).

A fermentação é a umas das partes mais críticas na produção da cerveja, pois é nela que acontece a transformação do mosto na cerveja propriamente dita, e para que essa etapa da produção seja feita com sucesso o controle da temperatura durante todo o processo é essencial.

O processo de fermentação pode ocorrer em várias faixas de temperatura dependendo do tipo de cerveja a ser produzido, e como a temperatura ambiente pode variar dependendo da localidade em que se faz a produção é necessário ter um controle de temperatura no fermentador que possa refrigerar ou aquecer.

Tendo em vista que o uso de células de Efeito Peltier vem se tornando cada vez mais comum para controle de temperatura em pequenas escalas, por ter a capacidade de resfriamento e aquecimento. As principais vantagens da utilização das células de Peltier são a ausência de barulho e vibrações, alta precisão no controle de temperatura, baixa, ou nenhuma manutenção, ocupa pouco espaço, não possui gás poluente e não agride o meio ambiente. (DANVIC, 2017a).

Considerando que pode haver uma grande oscilação da temperatura para a fermentação e sabendo as vantagens das células de efeito Peltier, em relação ao uso de compressores, que é comumente utilizado para resfriamento em maior escala, o uso dessas células no controle de temperatura é uma solução viável para o problema.

Tais células utilizam o efeito Peltier para a refrigeração ou aquecimento que segundo Balbinot e Brusamarello (2007, apud ROCHA et al., 2013), pode ser definido como “a mudança no conteúdo de calor quando uma quantidade de carga (1 coulomb) atravessa a junção, sendo este efeito reversível, no qual dependerá da composição das junções e da temperatura, sendo a dependência linear”.

1.1 TEMA

Fermentador com controle de temperatura para produção de cerveja artesanal.

1.1.1 Delimitação do Tema

A fermentação de cervejas é um processo que vem sendo desenvolvido e melhorado desde as primeiras produções, acerca de dez mil anos na Suméria, com tecnologia de ponta aplicada aos processos industriais controlando principalmente a

temperatura e a higiene que são fundamentais para a fermentação. Ainda assim, não há um fermentador que controle a temperatura de modo eficiente para os produtores caseiros. Estes, muitas vezes, recorrem a modos improvisados como procurar geladeiras antigas em ferro velho e usá-las em conjunto com um termostato para controlar a temperatura. Deste modo, neste trabalho será desenvolvido um fermentador automatizado para produção de cerveja artesanal com a utilização de células Peltier para o controle de temperatura no processo de fermentação.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Tendo em vista a crescente procura por uma cerveja artesanal de qualidade, os brasileiros estão cada vez mais em busca da fermentação perfeita, pois esta é a etapa mais crítica de todo o processo e onde podem ocorrer os principais “off-flavors”, que são sabores indesejados na produção da cerveja. Um controle eficiente da temperatura é essencial para que essa fase seja concluída com êxito.

A temperatura está relacionada a uma boa cerveja, pois o desempenho das leveduras é diretamente afetado por ela. Assim, uma temperatura abaixo da faixa mínima faz com que ela adormeça, elevando o tempo de fermentação, que em muitos casos não é percebida quando está se seguindo uma receita; uma temperatura muito alta contribui para a produção de compostos indesejáveis, tais como a formação excessiva de ésteres frutados, a produção do “fusel” que é a formação de álcool superior, o que remete sabores de solvente à cerveja, oxidação dando sabor de papelão, sulfeto dimetilo (DMS) remetendo a sabor de vegetais cozido, etc. O controle de temperatura também evita que microrganismos concorrentes no processo atrapalhem a fermentação, por exemplo as bactérias.(NACHEL, 2014).

No geral existem dois grandes grupos da levedura as de alta fermentação que são as Ale e as de baixa fermentação as Lager, são desses dois tipos que originam a maioria das cervejas, cada uma com sua variação. As Ale fermentam entre 17°C a 24°C variando nessa faixa durante as etapas da fermentação; já as Lager fermentam entre 9°C a 14°C. Vale ressaltar que cada fermento tem sua temperatura mais indicada. (CONDADO DA CERVEJA, 2017).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um fermentador automatizado com controle de temperatura para a produção de cerveja artesanal com células Peltier para controle de temperatura.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar bibliografia especializada;
- Especificar e estudar as células de Peltier;
- Dimensionar o sistema de refrigeração;
- Especificar, projetar e desenvolver o conversor de alimentação das células;
- Projetar e desenvolver um controlador capaz de manter a temperatura dentro das especificações do processo de fermentação;
- Construir o protótipo do sistema;
- Confeccionar relatório final.

1.4 JUSTIFICATIVA

Segundo pesquisa inédita do Instituto da Cerveja no Brasil realizada em dezembro de 2016, o Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja artesanal do mundo produzindo cerca de 138,6 milhões de hectolitros (medida correspondente a 100 l) em 2015. O número de cervejarias artesanais no Brasil em 2011 era de 159, esse número mais que dobrou em 2015 chegando a 372, a pesquisa estima que é aberto uma nova cervejaria artesanal por semana e que 91% das cervejarias estão localizadas na região Sul e Sudeste. A revista Beer Art prevê que o número chegue a pelo menos 500 cervejarias artesanais no Brasil até o fim de 2017.

Um dos principais insumos para a produção da cerveja é o malte, que tem boa parte da sua produção nacional voltada para abastecer as grandes cervejarias, e muito pouco para a produção de cervejas artesanais, por esse motivo o malte para a

produção de cervejas especiais tem que ser importado, no entanto, há um movimento nacional de cervejeiros que, unidos no Festival Brasileiro da Cerveja em março de 2012, vem fortalecendo o mercado dos produtores nacionais de cerveja artesanal fazendo com que, em breve, possa ter a produção de malte exclusivo para a produção de cervejas especiais.

No processo da produção de cerveja é facilmente observado que a fermentação é a etapa mais delicada, necessitando de controle rigoroso de temperatura. Como a fermentação é uma reação exotérmica é necessário fazer a refrigeração, e as pessoas que fazem a produção de cerveja em casa não encontram um fermentador eficaz, de pequeno porte, para a produção em residências, então, na maioria das vezes, acabam improvisando com um refrigerador e um termostato para controlar a temperatura, ligando e desligando o refrigerador quando necessário; este método além de ser totalmente improvisado e muito barulhento, só consegue resfriar o tonel de fermentação. Um compressor de geladeira é utilizado somente para resfriamento e em cidades onde o clima pode chegar a temperaturas muito baixas, como é o caso de Curitiba, a fermentação ficaria totalmente prejudicada, haja visto que a temperatura de fermentação varia entre 9°C e 24°C dependendo do tipo de cerveja a ser fabricada.

Com células de efeito peltier tem-se a flexibilidade de tanto resfriar como esquentar um sistema. Portanto, a ideia deste trabalho é produzir um fermentador automatizado próprio para a produção em pequena escala (até 30L), com um controle preciso de temperatura utilizando células de efeito peltier.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia aplicada para o cumprimento deste TCC será:

Etapa 1: Revisar bibliografia especializada;

Etapa 2: Estudar e Especificar as células de Peltier;

Etapa 3: Dimensionar o sistema de refrigeração e iniciar o protótipo;

Etapa 4: Especificar, projetar e desenvolver o conversor de alimentação das células;

Etapa 5: Projetar e desenvolver um controlador capaz de manter a temperatura dentro das especificações do processo de fermentação;

Etapa 6: Concluir o protótipo do sistema;

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1: é composto pela introdução ao tema, a delimitação do tema, os problemas e premissas, os objetivos, e a justificativa.

Capítulo 2: é composto pelo referencial teórico e alguns conceitos para melhor entendimento deste trabalho.

Capítulo 3: é composto pelo protótipo do fermentador e testes das células.

Capítulo 4: é composto pelo conversor de alimentação das células.

Capítulo 5: será composto pelo controlador de comando do refrigerador.

Capítulo 6: será composto pelas considerações finais e conclusões do trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A CERVEJA

2.1.1. Etapas da Produção

O processo de fabricação de cerveja, em geral, pode ser dividido em quatro etapas: mosturação, fervura, fermentação e maturação.

2.1.1.1. Mosturação

Entende-se por mosturação a mistura do malte moído com a água, e a adição de seu complemento, como maltes e cereais que compõem a receita.

Faz-se a dissolução de grande número de substâncias, entre outras, contam-se algumas obtidas pelas transformações inerentes à malteação como os açúcares, proteínas, etc. (VENTURINI FILHO, 2005).

Pelo uso de temperaturas e pH adequados dá-se condições, às enzimas do malte, para que prossigam as transformações iniciadas durante o processo de maltagem, já que cada enzima tem um desempenho ótimo a uma determinada temperatura e um determinado pH. (ARNOLD, 2005).

Este líquido, rico em açúcares, proteínas, aminoácidos, sais minerais, vitaminas, entre outros componentes chama-se mosto.

2.1.1.2. Fervura

O mosto é fervido, no sistema convencional, por volta de 90 minutos. Esta operação processa-se na caldeira de fervura.(ARNOLD, 2005).

Os principais objetivos da fervura são:

- Estabilização biológica
- Estabilização bioquímica
- Extração e transformação dos componentes do lúpulo. Também é feita a extração dos componentes aromáticos.

- Concentração do mosto - Como vimos, na filtração do mosto é usada água para extrair o extrato residual do bagaço. Com a fervura faz-se a evaporação do excesso de água usada, deixando o mosto com o grau de extrato desejado.

O lúpulo é acrescentado no meio e/ou no final da fervura. Tudo vai depender da receita.

2.1.1.3. Fermentação

É nesta etapa que acontece a biotransformação do mosto doce à bebida que conhecemos como cerveja. Sendo uma fase em que se depende da atuação de organismos vivos, a fermentação corresponde, em termos de controle, a um ponto crucial do processamento de cerveja.

A descrição tradicional do processo de fermentação em cervejarias é a conversão processada pela levedura (fermento) de glicose, em etanol e gás carbônico, sob condições anaeróbicas. Esta conversão se dá com a liberação de calor.

Durante as primeiras 24 horas se forma na superfície do líquido uma camada de espuma branca composta por proteínas e resíduos de lúpulo e outras substâncias amargas que durante a fermentação flutuam na superfície, além de leveduras mortas. Ao final da fermentação se alisa a camada de espuma para diminuir a produção de CO_2 . (VENTURINI FILHO, 2005).

O processo de fermentação pode ser modificado conforme o tipo de cerveja a ser produzido, de fermentação superficial (alta) ou profunda (baixa).

O fermento de alta fermentação é usado para cerveja tipo Ale e se caracteriza por permanecer no alto da cerveja após a primeira fermentação. Já o fermento de baixa fermentação é usado para preparar cervejas tipo Lager e outros tipos continentais, e, após a primeira fermentação, deposita-se no fundo dos tanques. (VENTURINI FILHO, 2005).

2.1.1.4. Maturação

Após a fermentação o líquido é transferido para o tanque de maturação. Este tanque possui um sistema de refrigeração por solução alcoólica que permite que, a

cerveja, nesta fase, se mantenha à temperatura de 0°C a -2°C. Este tanque possui, também, um sistema que permite manter a cerveja sob pressão de CO₂. Assim, a cerveja não perde todo o gás que trouxe da fermentação e permite acumular mais um pouco produzido no próprio maturador.(ARNOLD, 2005).

Nesta fase, algumas substâncias se combinam e decantam juntamente com as células de levedura que acompanharam a cerveja na transferência.

Também são liberados alguns componentes que afetariam negativamente o gosto e o aroma da cerveja. A este processo que clarifica, estabiliza e afina o gosto e o aroma da cerveja dá-se o nome de maturação ou decantação e dura, dependendo das tecnologias, de poucos dias a várias semanas. A cerveja, após clarificação, é carbonatada sobre pressão usando-se gás carbônico.(VENTURINI FILHO, 2005).

2.1.2. Tipos de Cerveja

Os estilos de cerveja são, em geral, divididos em três famílias denominadas Ales, Lagers e Lambic. A principal diferença entre elas é o tipo de fermentação empregada no processo.

2.1.2.1. Ales

São fermentadas com o fermento *Saccharomyces Cerevisiae*, a temperaturas mais altas que as Lagers. Essa temperatura, dependendo do tipo de cerveja, gira em torno de 20° C. Além disso, o fermento tende a ficar em suspensão no tanque durante o processo de fermentação. Por esses motivos são consideradas cervejas de alta fermentação. O resultado deste processo são cervejas geralmente frutadas, que se caracterizam por apresentarem aromas e sabores complexos, com notas, em muitos casos, de especiarias. Como os padres foram grandes produtores de cerveja, o termo ALE, acredita-se, vem da palavra anglo-saxã ALU, que significava um êxtase religioso.(ARNOLD, 2005).

Alguns tipos de Ales:

- *Cervejas de Trigo*: Cervejas geralmente produzidas com 50% de malte de trigo e 50% de malte de cevada. Variam entre as bem claras e leves, como as

Weizenbier, indo até as mais alcoólicas, escuras e encorpadas, como as Weizenbock. Geralmente não são filtradas por esse motivo são turvas. São cervejas que tradicionalmente apresentam aromas de banana e cravo.

- *Ales Belgas*: É um vasto grupo de cervejas especiais, que incluem as Dubbee, Tripel e Strong Golden Ales, entre outras.
- *Amber Ale*: É um termo usado por muitos cervejeiros norte-americanos para denotar uma cerveja produzida com alta percentagem de malte caramelo. Essas cervejas são frequentemente adocicadas, com aroma de nozes, caramelo e tostado. O caráter de lúpulo varia desde leve a muito pronunciado.
- *Ales Alemãs*: São frequentemente chamadas de Altbiers ou Alt. “Alt” é a palavra alemã para “velho” e refere-se ao estilo de cerveja produzido antes da descoberta dos fermentos tipo “lager”. Somada às Altbiers, de cor cobre e alta lupulagem, típicas da cidade de Düsseldorf, há o estilo Kölsch, dourada e de baixo amargor, da cidade de Colônia.
- *Porter e Stouts*: São as mais escuras na família das Ales. Fazem parte da escola britânica. Podem variar de doces e achocolatadas a secas e tostadas.

2.1.2.2. Lagers

São as chamadas cervejas de baixa fermentação. Fermentadas a temperaturas mais baixas que as Ales, em torno de 10° C, são produzidas com o fermento *Saccharomyces Carlsbergensis*. São muito pouco ou nada frutadas, com aromas e sabores de cereais (cevada e/ou trigo), pão e lúpulo. No caso das Lagers escuras, predomina o sabor de cereal torrado, parecido com o do café. Como a produção de cerveja exige temperaturas amenas, não se produzia cerveja no verão, já que a refrigeração foi inventada somente em 1873. Os alemães descobriram que sob os Alpes a temperatura ficava baixa mesmo no verão. Com isso, passaram a produzir maiores quantidades na primavera e armazenavam a cerveja nesses “armazéns” sob as montanhas. Lager significa armazém em alemão. Daí a origem do nome dessa família. (ARNOLD, 2005).

Tipos de Lagers:

- *Pilsen*: Cerveja mais consumida no mundo. Atingiu sucesso devido a sua cor dourada, diferente das cervejas escuras da época, e de seu sabor mais leve. Originária da cidade de Pilsen, na República Tcheca, em 1842.
- *Dunkel*: Significa escuro em alemão. São, portanto, cervejas escuras, produzidas com malte de cevada torrado.
- *Bock*: São cervejas com teor alcoólico que varia de 6,8% a 8,75%. De coloração avermelhadas para marrom, são cervejas encorpadas. Originárias de Einbock, na Alemanha.
- *Rauchbier*: Cervejas defumadas típicas da cidade de Bamberg, na Alemanha. Entre Ales e Lagers existem no mundo em torno de 120 diferentes estilos de cerveja. Cada um com determinado teor alcoólico, coloração, aroma e sabor.

2.1.2.3. Lambic

É a cerveja elaborada pelo método mais antigo de fermentação conhecido. Ela utiliza leveduras selvagens, ou seja, leveduras presentes no ambiente e que não temos controle sobre suas linhagens. Estas leveduras, por serem dos mais variados tipos, produzem uma grande variedade de produtos aromáticos e deixam presentes na cerveja uma grande quantidade de açúcares não fermentados. Como curiosidade, se diz que os fabricantes tradicionais destas cervejas não gostam de tocar nem nos fungos ou teias de aranhas que se instalam em suas câmaras de fermentação, pois dizem mudar o gosto da cerveja final se mudarem o ambiente de fermentação.(ARNOLD, 2005).

Tipos de Lambic:

- *Gueuze*: uma mistura de diferentes Lambics de diferentes idades.
- *Kriek*: ao final de Julho, cerejas são maceradas em Lambic. Esta maceração dura de 5 a 6 meses para permitir que as cerejas se dissolvam completamente.
- *Faro*: feita por adição de açúcar e caramelo na Lambic.
- *Framboise*: obtida pela mistura de framboesa com Lambic, seguindo ao mesmo processo de maceração usado para fazer Kriek.

2.2. O TRANSPORTE DE CALOR

Na física, o fenômeno da transferência de calor define a troca de energia térmica entre corpos, onde um corpo recebe energia (tornando-se mais quente) enquanto o outro corpo cede energia (tornando-se mais frio), esses corpos podem estar no estado gasoso, líquido ou sólido. O calor é a energia transferida de um sistema para outro em virtude da diferença de temperatura. (TIPLER, 2000).

A transferência de calor pode ser dada de 3 maneiras distintas, sendo elas:

- Condução - a transferência de calor por condução ocorre a partir de um gradiente de temperatura em nível microscópico, essa transferência ocorre com a colisão de átomos, moléculas e elétrons sem que haja movimento macroscópico do corpo em que ocorre a transferência.

A equação fundamental que descreve esse fenômeno é:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

onde:

- Q é carga térmica condutiva em W (watt);
- k é condutividade térmica do material (w/m °C);
- A é área de seção transversal do material em m²;
- L é comprimento do trajeto de calor em m;
- Δx é diferença de temperatura no trajeto de calor em °C.

A equação possui um sinal negativo, pois vem da segunda lei da termodinâmica, onde a relação $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ é uma relação negativa visto que o gradiente de temperatura estabelece que o fluxo de transferência de energia ocorre das regiões de temperaturas mais elevadas para as regiões de temperaturas menos elevadas. (ALMEIDA, 2013 apud BENNETT, 2008; TIPLER, 2009).

- Convecção - a transferência de calor por convecção ocorre pelo movimento de matéria dentro de um fluido, onde a diferença de

densidade causada pela diferença de temperatura em um líquido resulta na movimentação do mesmo, realizando a troca de calor. Como um sólido não tem matéria livre para poder se movimentar, o fenômeno da convecção não ocorre nele.

A equação fundamental para convecção é:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{ar} - T_c) \quad (2.2)$$

- Q é carga térmica de convecção em W (watt);
 - h é coeficiente de transferência de calor convectivo ($w/m^2 \cdot ^\circ C$);
 - A é área exposta em m^2 ;
 - T_{ar} é temperatura do ar ambiente em $^\circ C$;
 - T_c é temperatura da área fria em $^\circ C$.
- Radiação - A radiação ou irradiação é uma forma de transferência de calor que ocorre através da propagação, na velocidade da luz, de ondas eletromagnéticas. Para que ocorra a radiação não é necessária a existência de matéria no meio de propagação, podendo esta ser o único tipo de transmissão de calor que pode ocorrer em um espaço vazio. (ALMEIDA, 2013).

A equação fundamental para cargas térmicas de radiação é:

$$Q_{rad} = F \cdot s \cdot A \cdot (T^{4amb} - T^{4c}) \quad (2.3)$$

- Q é a carga térmica de radiação em W (watt);
- F é o fator de forma;
- s é a constante de Stefan-Boltzman ($5.667 \times 10^{-8} w/m^2 K^4$);
- A é a área resfriada em m^2 ;
- T_{amb} é a temperatura ambiente em kelvin;

- T_c é a temperatura ambiente em kelvin.

2.2.1 Calorimetria

Calorimetria é a parte da física que estuda os fenômenos relacionados ao calor.

Um sistema isolado em que existem dois corpos distintos e com temperaturas diferentes é facilmente verificável que ocorrerá a passagem de energia térmica de um corpo (corpo mais quente) para o outro (corpo mais frio) até que os dois corpos se encontrem com a mesma temperatura, atingindo o equilíbrio térmico. De acordo com o princípio das trocas de calor (equação 2.4), a soma algébrica de todas as quantidades de calor Q de um sistema (calor recebido mais calor cedido) tem que se igualar. (ALMEIDA, 2013 apud TIPLER, 2009; RAMALHO, 2007).

$$\sum Q = 0 \quad (2.4)$$

2.2.2 Calor sensível

Em geral, de acordo com Tipler (2000) quando um corpo recebe calor, a sua temperatura se eleva. A quantidade de energia térmica Q necessária para elevar a temperatura de um corpo é proporcional a variação de temperatura e à massa do corpo:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

onde:

- Q é a energia térmica, dado em J (joule);
- m é a massa do corpo, dado em g (grama);
- c é o calor específico, a capacidade calorífica da unidade de massa da substância do corpo, dado em cal/g.°C;
- ΔT é a diferença de temperatura, dado em °C.

2.3. FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS

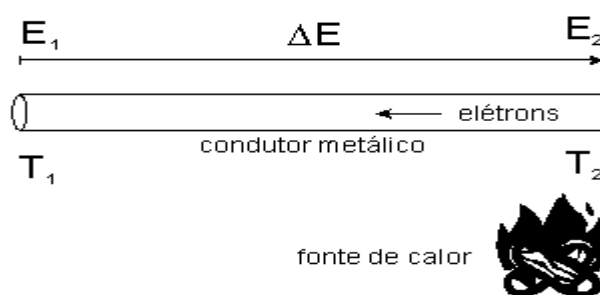
A termoeletricidade é o ramo da física que estuda a transformação direta de energia térmica em energia elétrica e vice-versa. As bases dessa ciência foram lançadas no início do século XIX quando o físico alemão Thomas Johann Seebeck observou em seu laboratório em Berlim, a conversão de energia térmica em energia elétrica. (KOURY et al., 2010).

Existem três tipos de efeitos termoeletricos: efeito seebeck, efeito peltier e efeito thomson.

2.3.1 Efeito Seebeck

O efeito seebeck foi descoberto pelo físico Thomas Johann Seebeck em 1821, verificando que ao se aplicar um gradiente de temperatura em dois condutores (ou semicondutores) diferentes unidos em suas pontas uma tensão elétrica era gerada proporcional a essa diferença de temperatura, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Demonstrativo efeito Seebeck



Fonte: SOUZA (2011)

O valor da tensão produzida utilizando o efeito seebeck pode ser encontrada utilizando a equação 2.6. O coeficiente de seebeck é conhecido como potência termoeletrica e depende dos materiais e das diferenças de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria. (ALMEIDA, 2013).

$$V = (S_b - S_a) \cdot (T_q - T_f) \quad (2.6)$$

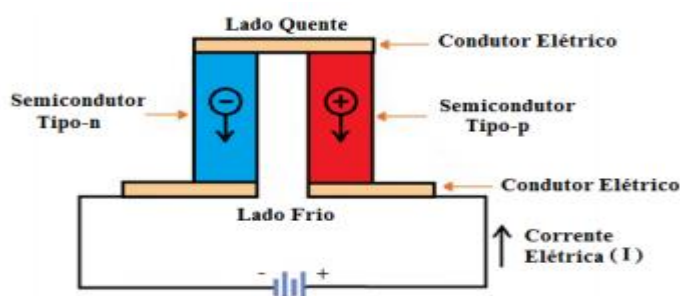
Onde:

- V é a tensão elétrica em V (volt);
- S_a e S_b são os coeficientes de Seebeck para os materiais A e B em V/K (volt/kelvin);
- T_q e T_f são as temperaturas da fonte quente e da fonte fria, respectivamente em K (kelvin).

2.3.2. Efeito Peltier

O efeito Peltier (descoberto em 1834 pelo físico francês Charles Athanase Peltier) ao contrário do efeito seebeck, tem-se um gradiente de temperatura na junção de dois condutores distintos a partir de uma diferença de tensão aplicada no mesmo, em que dependendo do sentido da corrente, uma das partes da junção absorve calor e a outra libera calor.

Figura 2 - Demonstrativo efeito Peltier



Fonte: ANDO JUNIOR (2014)

Como mostrado na Figura 2 a junção consiste de dois materiais semicondutores do tipo P e do tipo N que através do método de dopagem altera-se a quantidade de elétrons da camada de valência desses semicondutores, o tipo P possui falta de elétrons (elemento positivo), enquanto o tipo N possui excesso de elétrons(elemento negativo). (ALMEIDA, 2013).

A partir da equação 2.7 é possível encontrar o calor de Peltier gerado pelas junções:

$$Q = (\pi_A - \pi_B) \cdot I \quad (2.7)$$

Onde:

- Q é a taxa de transferência de calor em W (watts);
- π_A e π_B são os coeficientes de Peltier para os materiais A e B em V (volt);
- I é a corrente aplicada ao circuito em A (ampères).

2.3.3 Efeito Thomson

Em 1851 William Thomson explicou como os efeitos Seebeck e Peltier se relacionavam, Thomson observou que qualquer metal submetido a uma corrente elétrica com uma diferença de temperatura entre as suas duas fases pode produzir calor ou frio dependendo somente da direção da corrente e de sua intensidade (SOUZA, 2011 apud BENNET, 2008).

Com isso Thomson formulou a equação fundamental da termoeletricidade, que mostra a relação entre a quantidade de energia absorvida ou fornecida por um metal e a respectiva corrente elétrica que passa por esse metal. (ALMEIDA, 2010). A equação descrita por Thomson é dada pela equação 2.8.

$$Q = \rho \cdot J^2 - \mu \cdot J \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8)$$

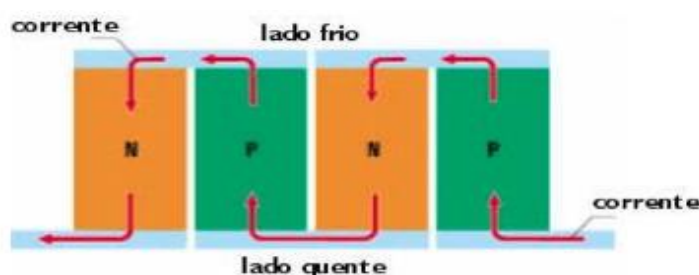
Onde:

- Q é a taxa de transferência de calor em W (watts);
- ρ é a resistividade do material em $\Omega \cdot m$;
- J é a densidade de corrente elétrica em A/m^2 ;
- μ é o coeficiente de Thomson que depende do material;
- $\frac{\partial T}{\partial x}$ é o gradiente de temperatura ao longo do metal em $^{\circ}C$;

2.4. MÓDULO PELTIER

Os módulos Peltier ou células Peltier são compostos de várias junções termoeletricas do tipo-n e tipo-p que são ligadas eletricamente em série e termicamente em paralelo, as junções termoeletrica são soldadas entre duas placas de cerâmica, como mostrado na Figura 3 .

Figura 3 - Demonstrativo módulo Peltier



Fonte: ALMEIDA (2013)

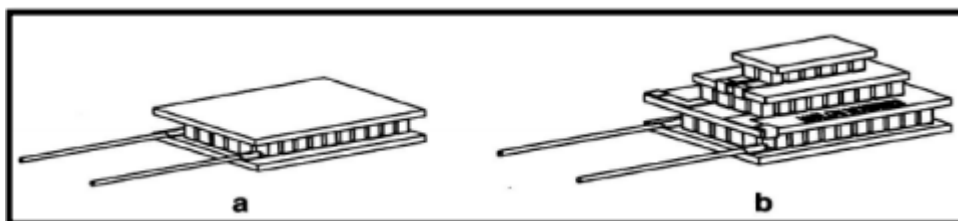
Na superfície de cerâmica é onde ocorre a transferência de calor para o meio que se deseja aquecer ou resfriar, o material é feito de cerâmica pois possui alta condutibilidade térmica e isolamento elétrico.

2.4.1 Estágio do Módulo Peltier

As células Peltier podem ser utilizadas em módulo simples, onde só há uma única célula aquecendo ou resfriando e em módulo multiestágio, onde uma célula é sobreposta a outra a fim de aumentar a transferência de calor. Quando a temperatura entre o lado frio e o lado quente não precisa ser mais de 60°C, pastilhas simples são mais recomendadas. Quando esta diferença tem que ser maior de 60°C, módulos multiestágios devem ser utilizados. (DANVIC, 2017b)

A montagem dos dois tipos de módulo pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Módulo simples (a), módulo multiestágio (b)



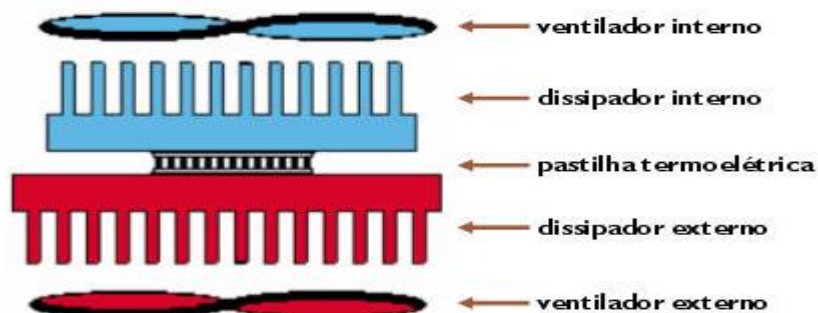
Fonte: SOUZA (2011)

2.4.2 Cuidados na Utilização

Alguns cuidados devem ser tomados na utilização das células Peltier. Por ser um equipamento que fornece um gradiente de temperatura quando aplicado uma tensão sobre seus terminais é possível que a célula aqueça ao ponto de saturação e ocorra a queima do componente, para evitar que isso aconteça é aconselhável a utilização de dissipadores de calor e, dependendo do uso, ventiladores.

Na Figura 5 é possível observar um esquema de montagem do módulo Peltier com dissipadores e ventiladores.

Figura 5 - Módulo Peltier com dissipador e ventilador



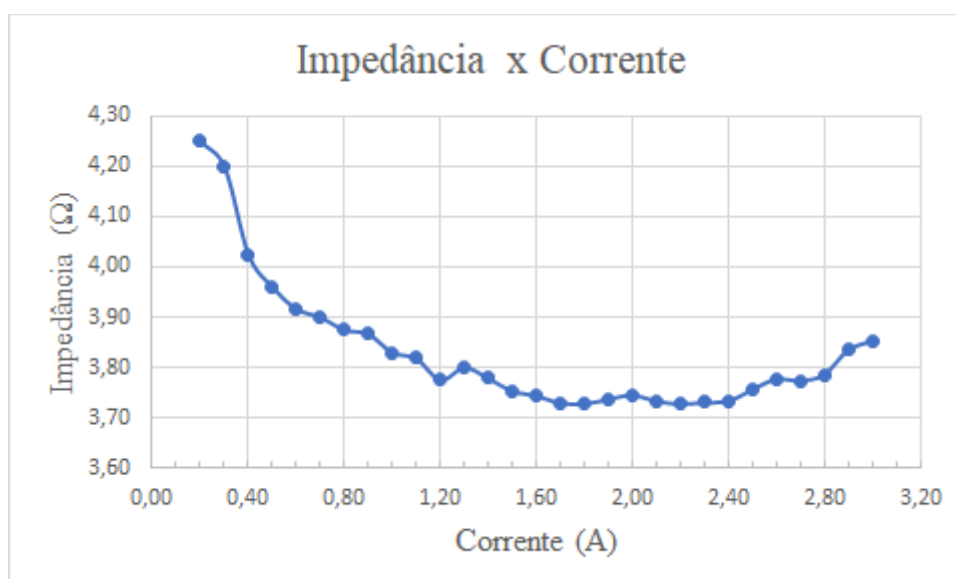
Fonte: DANVIC, 2017b.

3. PROTÓTIPO PARA TESTE DAS CÉLULAS

3.1 PARÂMETROS DA CÉLULA PELTIER

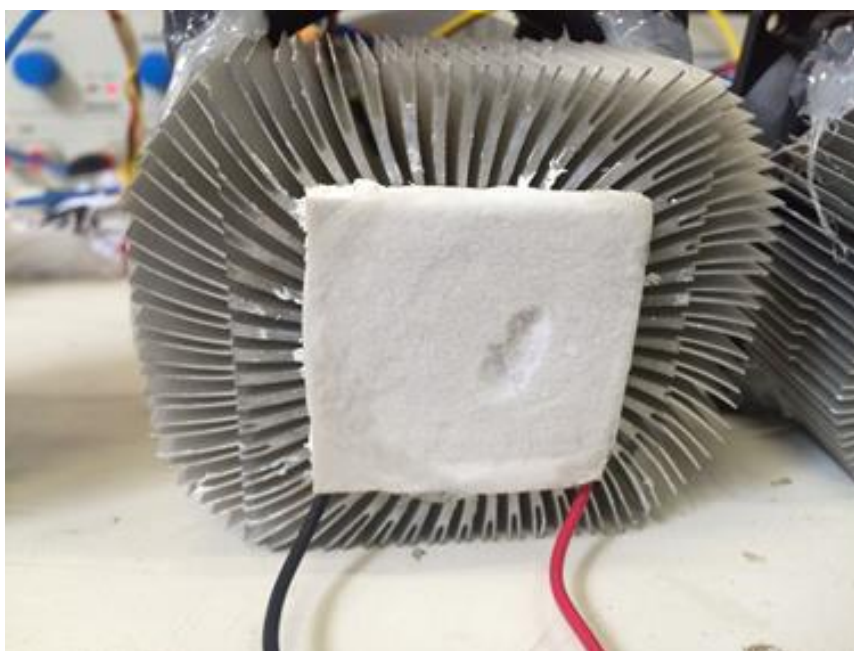
Talvez por ser um componente relativamente novo no mercado e seu uso ainda não ser tão vasto, os dados no *datasheet* da célula peltier não coincidem com os testes feitos em laboratório. Para verificar as informações do fabricante realizou-se alguns testes controlados das células. Segundo o fabricante, a condição nominal de operação das células são de 12V e 6A. Através dos testes notou-se que as mesmas não ultrapassaram 3A e a partir desta corrente começavam a apresentar sinais de saturação. A Figura 6 mostra que os dados do fabricante não são verdadeiros, pois quando a corrente passa de 2.8A a resistência da célula começa a aumentar e após isso começam os sinais de saturação como mostra a Figura 7, o gelo resultado da condensação, começa a derreter nas bordas. Por precaução e para não saturar nenhuma célula, resolveu-se não ultrapassar os 11,5V e conseqüentemente 2.8A na alimentação.

Figura 6 - Impedância x Corrente da célula peltier.



Fonte: Os autores.

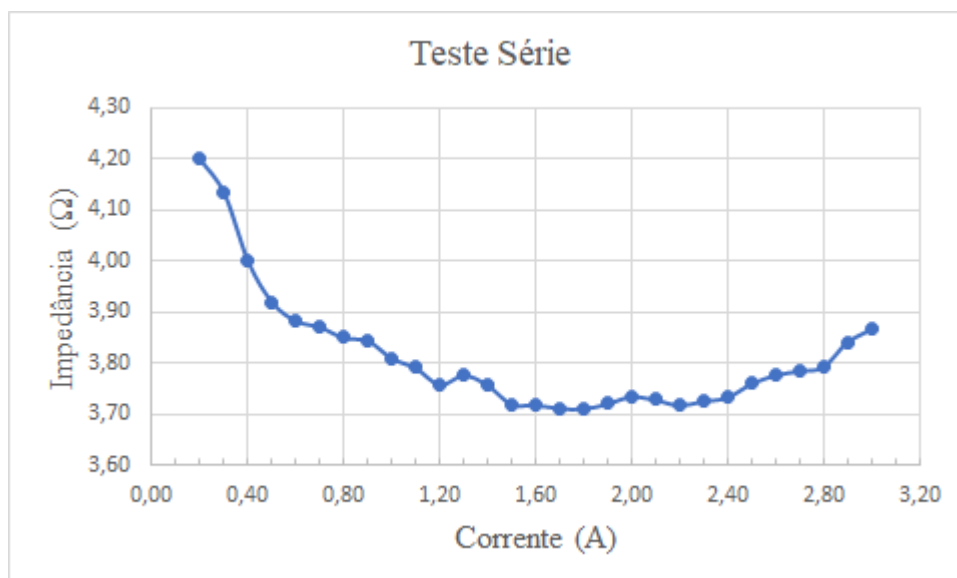
Figura 7 - Ilustração dos sinais de saturação da célula.



Fonte: Os autores.

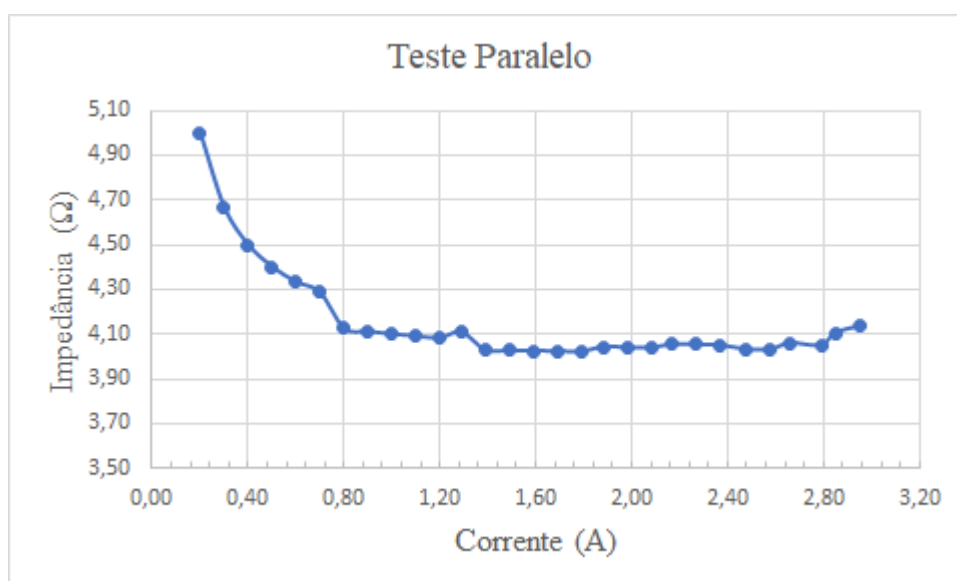
Para decidir qual conversor iria ser utilizado, foi necessário fazer testes nas células com ligação elétrica em série e em paralelo, a fim de descobrir qual ligação seria mais eficiente. A ligação em série mostrou-se melhor, já que a impedância da célula ficou menor no comparativo das Figuras 8 e 9, onde foi realizado o teste com 3 células, respectivamente, em série e em paralelo.

Figura 8 - Teste em série de 3 células.



Fonte: Os autores.

Figura 9 - Teste em paralelo de 3 células.



Fonte: Os autores.

3.2 O PROTÓTIPO

A fim de obter os parâmetros reais das células de efeito peltier foi necessário a montagem de um protótipo para realização de testes dos módulos com carga.

3.2.1 Cálculo da Quantidade de Células

Com o objetivo de calcular a quantidade de células a serem utilizadas, fez-se

os cálculos por calorimetria. Utilizando a equação (2.4) do princípio das trocas de calor, temos:

$$\begin{aligned}\sum Q &= 0 \\ Q_{frio} + Q_{quente} &= 0 \\ Q_{frio} &= -Q_{quente} \\ Q_{peltier} &= -Q_{cerveja} \\ Q_{peltier} &= -(m_{cerveja} \cdot c_{cerveja} \cdot \Delta T)\end{aligned}$$

Adotou-se os parâmetros da cerveja como se fossem os da água, pois os valores são bem próximos, e os da cerveja podem mudar de acordo com o tipo a ser fabricado, então utilizar o parâmetro da água pode ser uma boa aproximação para qualquer tipo de cerveja. Foi utilizado no protótipo um barril com capacidade de 6,5 litros mas apenas 5 litros de água para a fermentação e a variação de temperatura se dará de 30°C (um valor alto para Curitiba, mas para efeito de cálculo, utilizaremos uma grande diferença de temperatura) para 5°C (nesta faixa de temperatura é possível fermentar a maioria dos tipos de cerveja).

- $m = 5\text{kg}$;
- $c = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$;
- $T_f = 5^\circ\text{C}$;
- $T_i = 30^\circ\text{C}$.

Portanto, a equação (2.4) fica:

$$\begin{aligned}Q_{peltier} &= -(5 \cdot 1 \cdot (30 - 5)) \\ Q_{peltier} &= -125\text{kcal}\end{aligned}$$

Transformando a unidade de kcal para joule, temos:

$$Q_{peltier} = -125 \cdot 4,18\text{kcal}$$

$$Q_{peltier} = -522,5\text{kJ}$$

Calculando a potência da célula, temos:

$$P = \frac{\text{Trabalho}}{\text{Tempo}}$$

Considerando que o sistema de resfriamento irá gelar em 1 hora o sistema por completa, temos:

$$P = \frac{522,5 \cdot 10^3}{3600} \text{W}$$

$$P = 146 \text{W}$$

Para o protótipo foi escolhido a célula Peltier TEC1-12706, que conforme catálogo do fabricante com alimentação de 12V apresenta corrente de 6A, calculando a potência da célula:

$$P = V \cdot I$$

$$P = 12 \cdot 6 \text{W}$$

$$P = 72 \text{W}$$

Calculando o número de células, temos:

$$n = \frac{P_{total}}{P_{ind}}$$

$$n = \frac{146 \text{W}}{72 \text{W}}$$

$$n = 2,02$$

Para um sistema ideal e sem perdas, seria necessário a utilização de apenas 3 células para o resfriamento desejado. No entanto, como foi observado nos testes das células, aplicando-se 12V de tensão, a corrente permanecia em 3A. Portanto, o catálogo não apresenta corretamente os dados, então refazendo o cálculo da

potência da célula, utilizando esses valores encontrados nos testes, temos:

$$P = V \cdot I$$

$$P = 12 \cdot 3W$$

$$P = 36W$$

Calculando o número de células, temos:

$$n = \frac{P_{total}}{P_{ind}}$$

$$n = \frac{146W}{36W}$$

$$n = 4,05$$

A partir dos cálculos, com 5 células o resfriamento poderia ser realizado com certa folga, no entanto, devido às perdas não consideradas, optou-se pela utilização de 6 células para o resfriamento.

3.2.2 Cálculo dos Coolers

Foi necessário o uso de 1 cooler para cada célula Peltier para dissipar o calor e evitar o sobreaquecimento. Portanto será necessário a construção de um conversor somente para a alimentação dos coolers.

Para a construção do conversor dos coolers foi necessário levantar os parâmetros do mesmo, que apresentavam tensão nominal de 12V e potência nominal de 2W, fazendo o cálculo da corrente, temos:

$$P = V \cdot I$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{2}{12}A$$

$$I = 166mA$$

Utilizou-se 6 células peltier, portanto foram utilizados 6 coolers, eles foram ligados eletricamente em paralelo, pois apresentam baixa corrente (na ordem de miliampère), então calculando a corrente para os 6 coolers, temos:

$$I = 166 \cdot 6A$$

$$I = 996mA$$

A alimentação dos coolers foi feita através de uma fonte externa com saída em 12V e 1.5A, por disponibilidade.

3.2.3 Montagem do Protótipo

Foi necessário fazer um protótipo que suportasse o peso do módulo peltier, composto pela célula, o dissipador e o ventilador como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Imagem do módulo peltier



Fonte: Os autores

Projetou-se o protótipo de forma a obter a maior distribuição de calor possível, desta forma distribui-se as 6 células de forma igual sobre a superfície lateral do fermentador, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Imagem da base de sustentação



Fonte: Os autores

Os módulos foram colocados levemente acima do meio do fermentador levando em consideração a convecção térmica que ocorrerá dentro do mosto. Para obter a maior área de contato entre a célula e o fermentador foi necessário amassar a superfície do fermentador de forma que a mesma ficasse plana, tendo assim maior contato e transferência de calor, utilizou-se pasta térmica em todos os contatos. Os módulos foram fixados por pressão e uma fita para garantir o contato. A Figura 12 ilustra o protótipo parcial.

Figura 12 - Imagem do protótipo parcial.

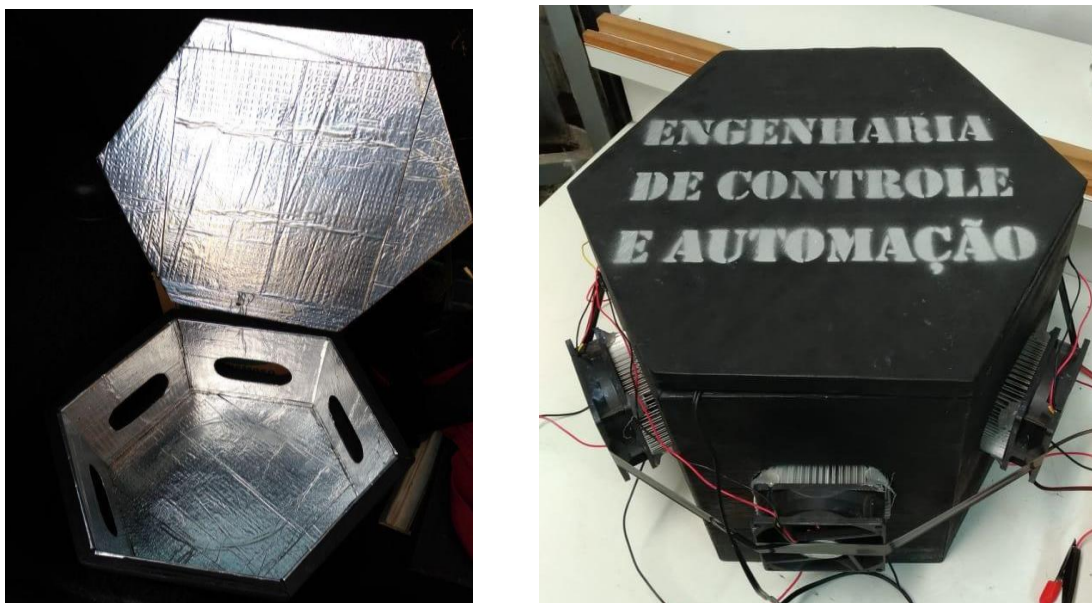


Fonte: Os autores.

3.2.4 Protótipo Final.

Com o objetivo de aumentar a eficiência do protótipo e também a contenção do calor dentro do fermentador decidiu-se, para os testes finais, revestir a parte de dentro do protótipo com manta térmica asfáltica, como mostra a Figura 13

Figura 13 - Protótipo Final.

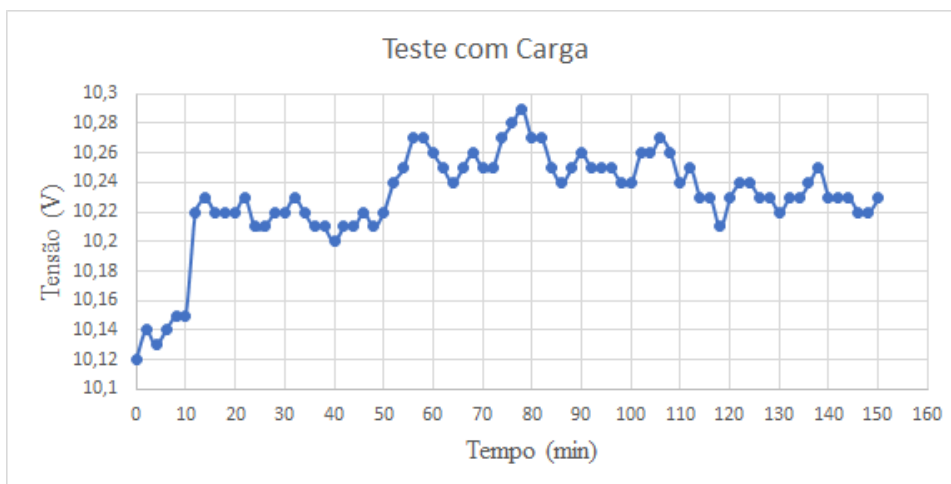


Fonte: Os autores.

3.3. RESULTADOS COM CARGA

Com o protótipo, foi possível realizar os testes das células com carga, e verificar o comportamento das mesmas. Utilizou-se água para realização do teste, tendo em vista que as características como densidade e calor específico do mosto são muito semelhantes a da água. Neste teste a variável controlada foi a corrente, que foi limitada a 2.8A e a tensão ficou em 66.5V sobre o circuito série, anotou-se a temperatura da água e tensão sobre as células a cada 2 minutos. Verificou-se que o comportamento das células com carga não era o mesmo que a vazio, porém essa variação estava dentro do esperado e não se teve problemas no regime permanente. A Figura 14 demonstra o resultado de uma célula.

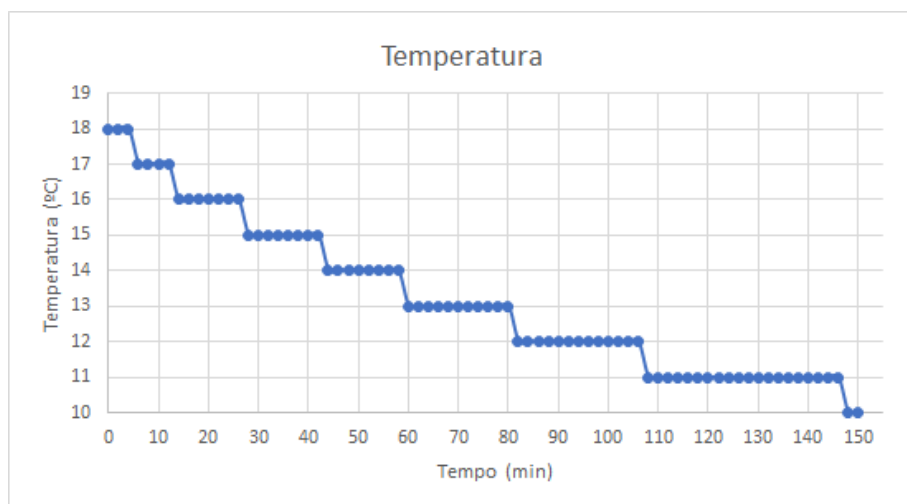
Figura 14 - Variação da tensão de uma célula, com carga.



Fonte: Os autores.

O teste foi realizado durante 2 horas e 30 minutos e a temperatura foi de 18°C a 10°C, como mostra a Figura 15. Nota-se que o resfriamento da água ocorre de forma exponencial, resfriando mais rápido no começo e depois levando mais tempo para retirar o calor.

Figura 15 - Decaimento da temperatura da água.



Fonte: Os autores.

Apesar da temperatura não ter atingido os 5°C propostos acredita-se que o circuito tem capacidade de chegar a esta temperatura, pois o teste foi realizado sem a tampa (de madeira) do protótipo e sem um devido isolamento térmico, com a tampa e melhorando a isolação o circuito chegará a temperatura proposta, pois teve elevada troca de calor com o ar por convecção.

4. CONVERSOR CA-CC

4.1 ESCOLHA DO MODO DE OPERAÇÃO E DO CONVERSOR

Após constatar o real funcionamento das células peltier, através de testes de bancada, pôde-se discutir sobre qual conversor utilizar para alimentá-las, sabendo que pretende-se alimentar cada célula com 11V a 11,5V, com 3A e que serão utilizadas 6 células peltier no circuito.

Analisando os resultados obtidos decidiu-se alimentar as células peltier em série, pois não houve diferença significativa de eficiência entre os testes em série e em paralelo e seria mais fácil a construção do conversor, já que em série todas as 6 células utilizadas estariam na mesma malha do circuito elétrico. E, pela lei de Kirchhoff sabe-se que dentro de uma mesma malha todos os elementos estão sujeitos à mesma corrente elétrica. Portanto, garante-se a mesma corrente em todas as células. Já na configuração em paralelo, haveriam 6 malhas e cada célula precisaria de 3A de corrente, no total o conversor seria projetado para fornecer até 18A. Tornando os componentes utilizados mais caros do que os utilizados em série (que devem aguentar somente 3A, isto é, um sexto do que em paralelo).

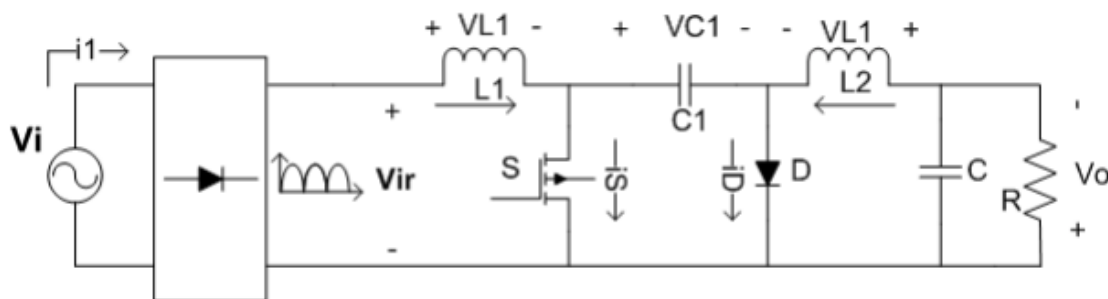
Depois de escolher o modo de ligação das células no circuito, partiu-se então para a determinação de qual tipo de conversor iria ser utilizado. Primeiramente, pensou-se num conversor Buck, pois ele funciona como abaixador, tendo em vista que a saída desejada é uma tensão em torno de 11V contínua e que a rede elétrica fornece 127V alternada e é extremamente simples de construir e operar. Entretanto, após uma análise mais profunda do sistema, elegeu-se como mais apropriado o conversor Ćuk, pois este também pode operar como abaixador de tensão, possui elevado fator de potência (aproximadamente 1), o que com o Buck não seria possível sem o desenvolvimento de uma malha de controle, e possui característica de fonte de corrente tanto na entrada quanto na saída. Portanto, mesmo o conversor

Ćuk sendo um pouco mais complicado de ser construído, foi escolhido por trazer benefícios à operação do sistema, especialmente o alto fator de potência.

4.2 FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR ĆUK

Com a escolha do conversor a ser utilizado, deve-se entender o seu funcionamento. Para tanto, a seguir será explicitado brevemente o modo de operação do conversor Ćuk. A Figura 16 mostra um esquema básico do conversor Ćuk.

Figura 16 - Esquema básico do conversor tipo Ćuk.



Fonte:

BARBI, 2015.

Para explicar as etapas de funcionamento do conversor Ćuk, foram consideradas as seguintes condições:

- Modo de condução descontínua (MCD).
- Frequência de chaveamento f_s muito maior que a da rede frede.
- Capacitor de saída C grande o suficiente para manter sua tensão constante durante um período de chaveamento.
- Indutor de entrada L1 muito maior que o indutor de saída L2.
- Carga R constante.

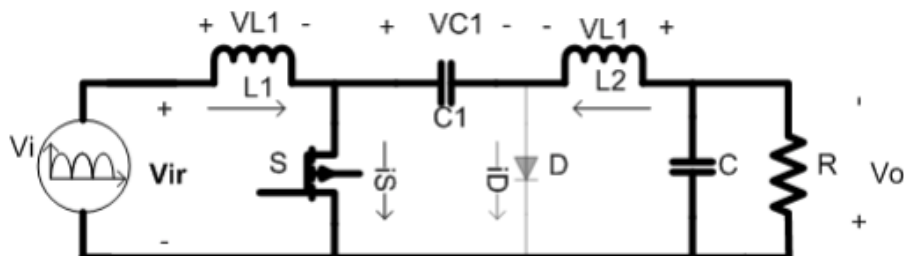
A operação do conversor divide-se em 3 etapas que serão descritas a seguir:

1ª Etapa: Ilustrada na Figura 17.

Nesta etapa, a chave está fechada, o diodo está bloqueado, o indutor L1 está armazenando energia da rede e o capacitor de acoplamento C1 transfere a sua

energia para o indutor L2, portanto as correntes nos indutores estão crescendo

Figura 17 - 1ª Etapa de funcionamento do conversor Ćuk.

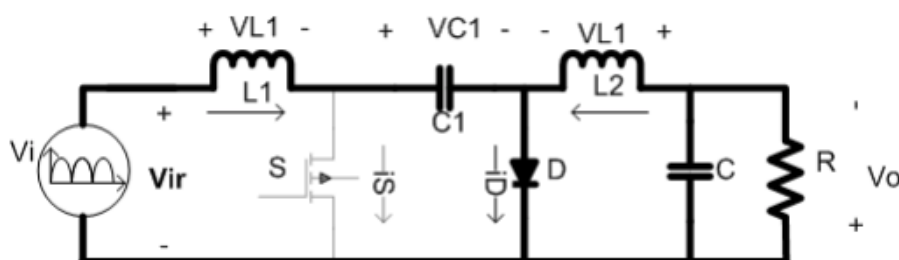


Fonte: BARBI, 2015.

2ª Etapa: Ilustrado na Figura 18.

Nesta etapa, a chave está aberta e o diodo conduzindo. Portanto, o indutor L1 transfere energia para o capacitor C1 e o indutor L2 para a carga. Então, as correntes decrescem nos indutores nessa etapa.

Figura 18 - 2ª Etapa de funcionamento do conversor Ćuk.

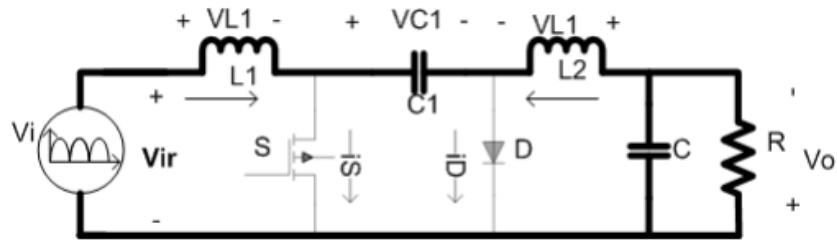


Fonte: BARBI, 2015.

3ª Etapa: Ilustrado na Figura 19.

Esta última etapa é a que caracteriza a condução descontínua, pois a chave está aberta e o diodo bloqueado. Portanto, os indutores entram em roda livre com corrente constante e o capacitor de saída C mantém a energia na carga.

Figura 19 - 3ª Etapa de funcionamento do conversor Ćuk.



Fonte: BARBI, 2015.

4.3 PROJETO DO CONVERSOR ĆUK

Sabendo-se o funcionamento do conversor a ser utilizado, pôde-se começar o projeto do mesmo. Como cada célula deve ser alimentada com até 11V e 3A, 6 células em série consumiriam cerca de 66V e 3A, para tanto, no trabalho será construído um conversor Ćuk de 250W de potência e 80V e Modo de Condução Descontínua (MCD).

Para fazer os cálculos do projeto, antes precisam ser definidos alguns parâmetros de entrada e saída, que serão mostrados a seguir.

- Tensão de entrada: $V_i = 127V_{rms}$.
- Tensão de saída: $V_o = 80V$.
- Potência de saída: $P_o = 250W$.
- Frequência de operação: $f_s = 50kHz$.
- Frequência da rede: $f_{rede} = 60Hz$.
- Ondulação máxima na corrente de entrada: $\Delta I_{in}\% = 40\%$.
- Ondulação máxima na tensão de saída: $\Delta V_o\% = 5\%$.

4.3.1 Determinação dos Parâmetros

A partir da determinação dos parâmetros acima, pode-se calcular os componentes necessários para a construção do conversor Ćuk, para isso, seguiu-se a metodologia de projeto aplicada em (BARBI, 2015).

- Tensão de pico de entrada, considerando uma variação de até 15% na tensão da rede: $V_{ip} = V_i \cdot \sqrt{2} \cdot 0,85 = 152,66V$.
- Parâmetro para identificar o máximo valor da razão cíclica para o MCD: $\alpha = \frac{V_o}{V_{ip}} = 0,524$.
- Resistência de saída ou carga: $R_o = \frac{V_o^2}{P_o} = 25,6\Omega$.

- Corrente de pico de entrada: $I_{ip} = \frac{2.P_o}{V_{ip}} = 3,275A$.
- Corrente de entrada: $I_{i\ rms} = \frac{I_{ip}}{\sqrt{2}} = 2,316A$.
- Variação máxima na corrente de entrada; $\Delta I_i = I_{i\ rms} \cdot \Delta I_{in}\% = 0,926A$.
- Variação máxima na tensão de saída: $\Delta V_o = V_o \cdot \Delta V_o\% = 4V$.
- Razão cíclica crítica para MCD: $dc = \frac{\alpha}{\alpha+1} = 0,343$.

4.3.2 Cálculo das Indutâncias

- Indutância equivalente: $L_{eq} = \frac{dc^2 \cdot V_{ip}}{2fs \cdot I_{ip}} = 55,109\mu H$.
- Indutância de entrada: $L_1 = \frac{V_{ip} \cdot dc}{\Delta I_i \cdot fs} = 1,133\ mH$.
- Indutância de saída: $L_2 = \frac{L_1 \cdot L_{eq}}{L_1 - L_{eq}} = 57,926\mu H$.

4.3.3 Cálculo dos Capacitores

Para o cálculo do capacitor de entrada ou de acoplamento C1, não há uma equação analítica exata para a determinação do mesmo. Entretanto, o capacitor C1 é escolhido de modo a ter baixa ondulação de tensão em alta frequência e seguir a tensão de entrada em baixa frequência. Simplificadamente, procura-se evitar a ressonância nas frequências de interesse, portanto ,para frequência de ressonância escolhe-se algo entre um décimo da frequência de operação (f_s) e dez vezes a frequência da rede (f_{rede}). Adotando-se uma frequência de ressonância $f_r = 5kHz$.

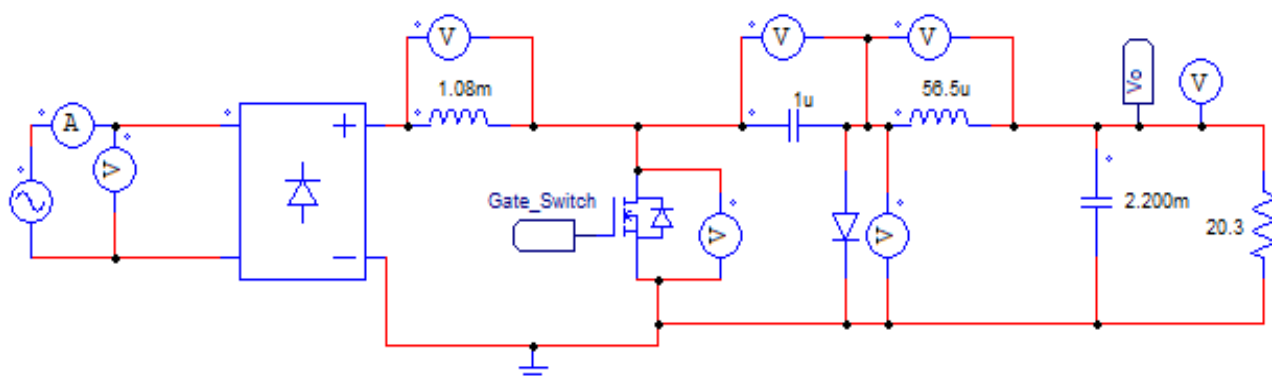
- Capacitor de entrada : $C_1 = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \cdot (L_1 + L_2)} = 850,551\eta F$.
- Capacitor de saída : $C = \frac{P_o}{2 \cdot f_{rede} \cdot \pi \Delta V_o \cdot V_o} = 2,072\ mF$.

Para limitar a corrente de carga inicial do capacitor de saída C, utilizou-se um NTC na entrada, que a medida que o circuito começa a funcionar ele aquece e vira um curto-circuito, não sendo mais 'enxergado' pelo sistema.

4.4 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR CUK

A partir do cálculo dos componentes foi possível fazer a simulação do conversor e obter alguns parâmetros para a montagem, que puderam ser comparados com os calculados e posteriormente com os aferidos. A simulação do conversor e os demais circuitos foram realizada no *software* PSIM, o conversor simulado é descrito na Figura 20.

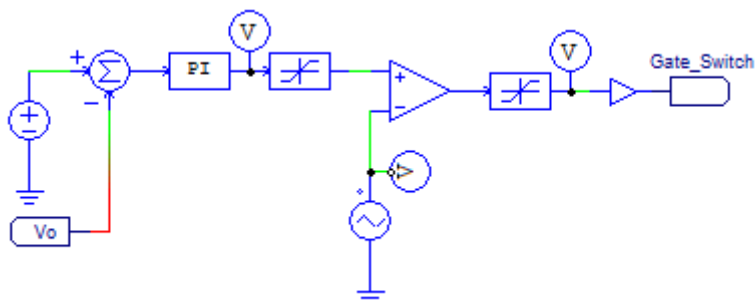
Figura 20 - Topologia de simulação do conversor Cuk.



Fonte: Os autores.

O circuito de comando da chave realizado na simulação é descrito na Figura 21. Apesar do comando ter sido realizado digitalmente, optou-se por fazer a simulação de um circuito analógico com controlador PI. Ajustou-se os ganhos, empiricamente, para garantir uma ação do controle lenta, visto que esta é a característica do sistema de fermentação. O controle da chave foi realizado digitalmente através do microcontrolador Tiva C.

Figura 21 - Controle PI analógico para simulação.

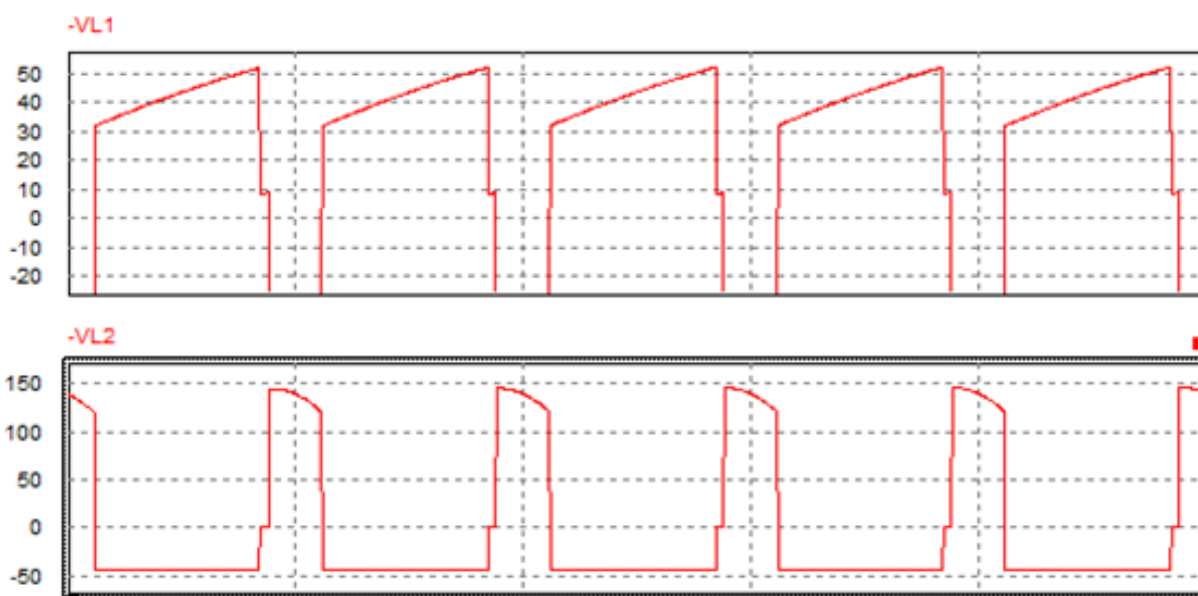


Fonte: Os autores.

4.4.1 Simulação em Alta Frequência

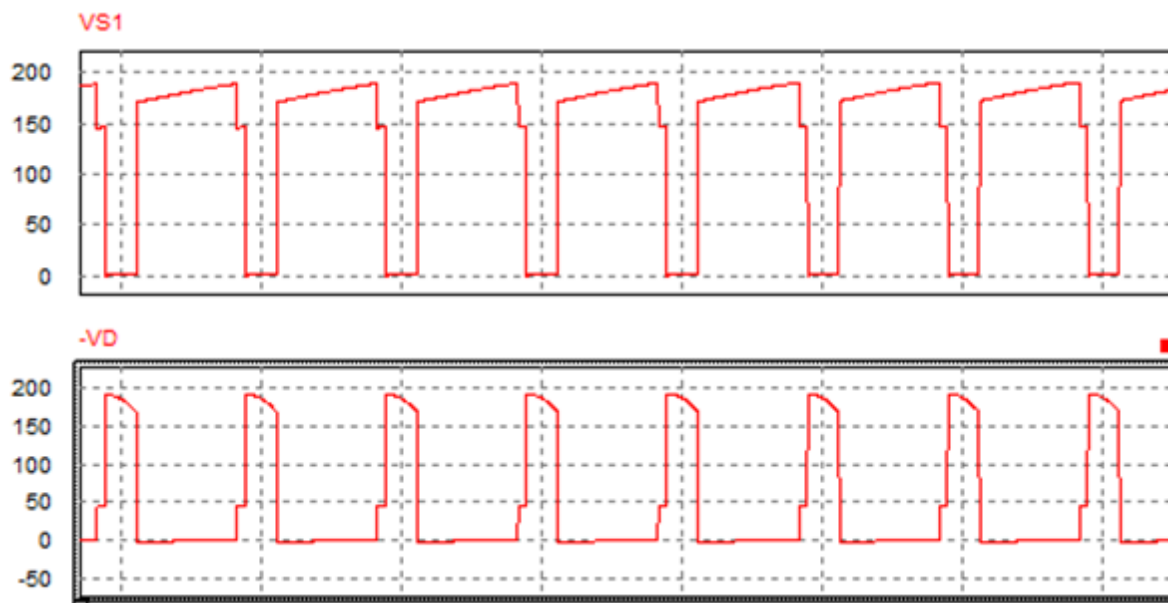
Os dados obtidos por simulação são mostrados nas figuras abaixo, assim como as formas em, alta frequência, da tensão sobre componentes.

Figura 22: - Forma de onda simulada, em alta frequência, sobre L1 e L2.



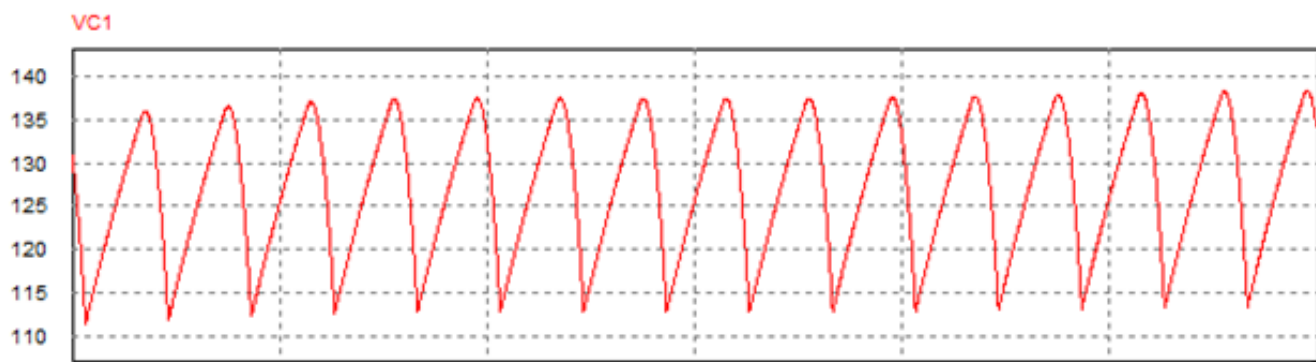
Fonte: Os autores.

Figura 23 - Forma de onda simulada sobre a Chave(VS1) e no Diodo(VD).



Fonte: Os autores.

Figura 24 - Forma de onda simulada, em alta frequência sobre o Capacitor de acoplamento.

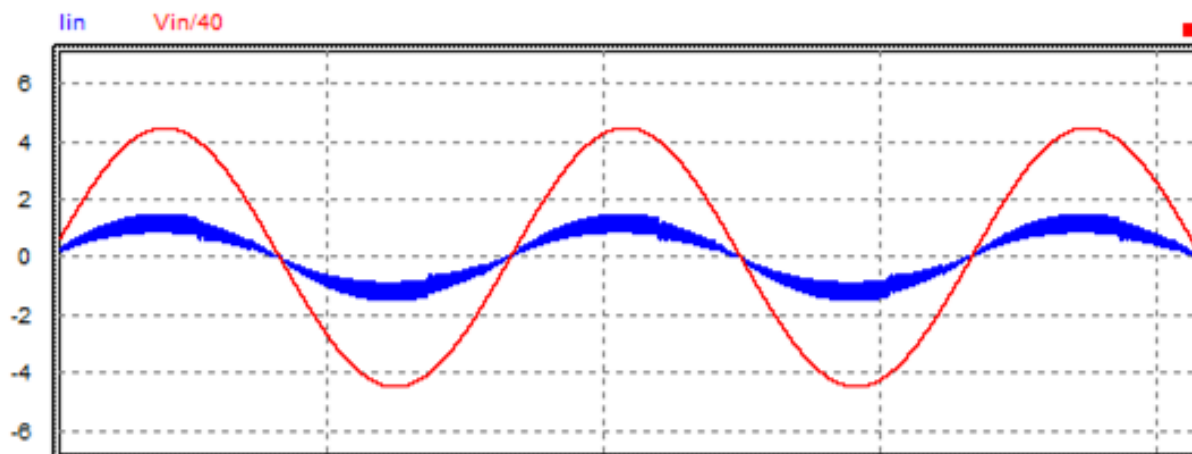


Fonte: Os autores.

4.4.2 Simulação em Baixa Frequência

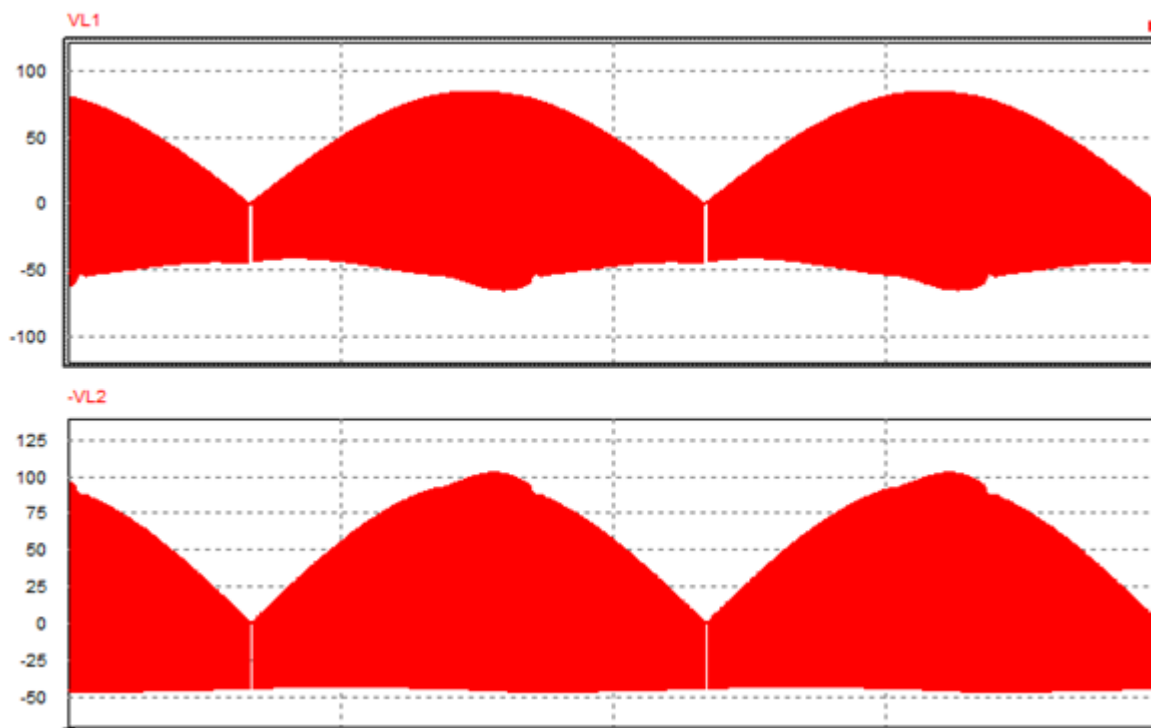
As formas de onda da tensão e os dados obtidos por simulação, em baixa frequência, estão descritos neste tópico e nas figuras abaixo.

Figura 25 - Forma de onda simulada, da tensão e corrente de entrada.



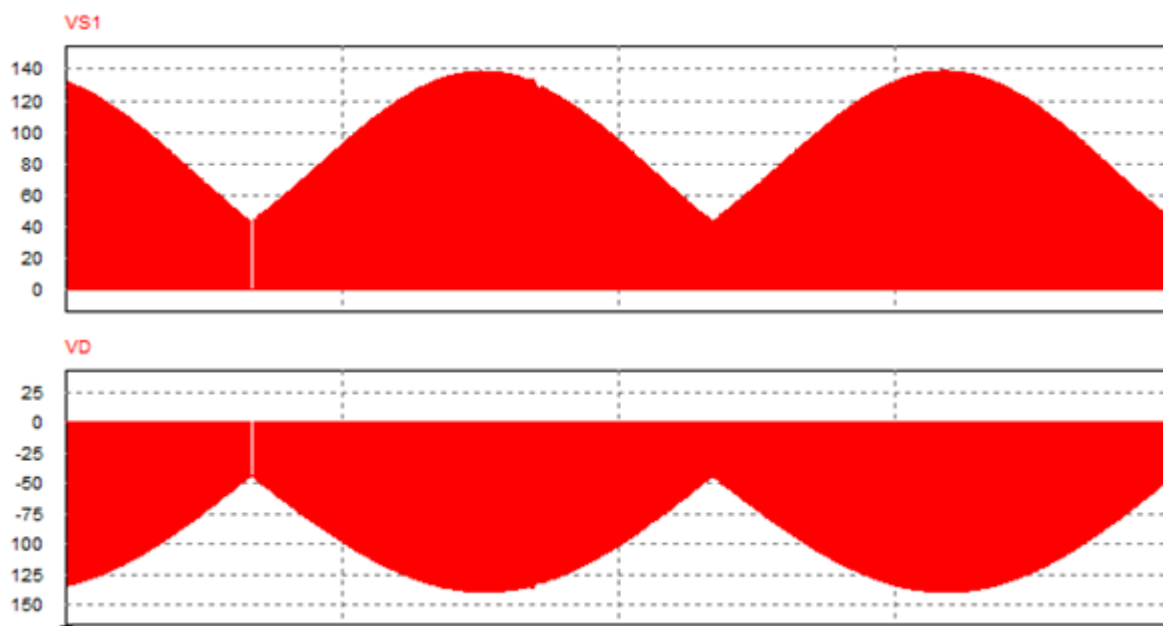
Fonte: Os autores.

Figura 26 - Forma de onda simulada, em baixa frequência, sobre L1 e L2.



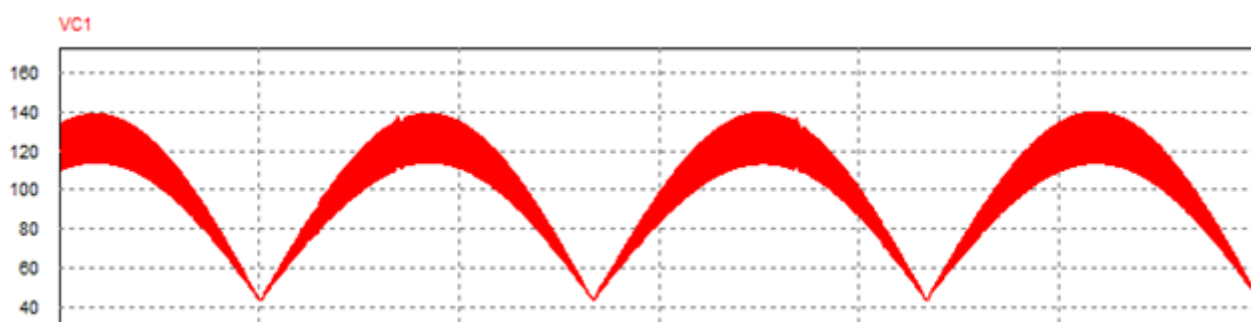
Fonte: Os autores.

Figura 27 - Forma de onda simulada, baixa frequência, sobre a Chave(VS1) e o Diodo(VD).



Fonte: Os autores.

Figura 28 - Forma de onda simulada, baixa frequência, sobre o Capacitor de acoplamento.



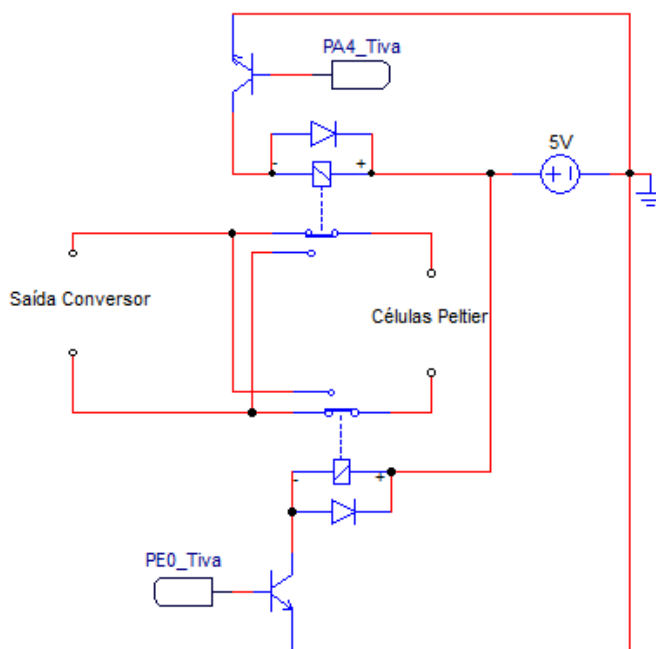
Fonte: Os autores.

4.5 CIRCUITO DE INVERSÃO DA TENSÃO DE SAÍDA

Devido a flexibilidade das células de efeito peltier de esquentar e esfriar apenas invertendo o sentido da corrente, foi necessário um circuito que inverte-se a tensão de saída. Como isso não poderia ser feito apenas pelo controle do Cúk, pois suas características construtivas e de funcionamento não permitem. Pensou-se primeiramente em um circuito Ponte H composto por transistores, mas teve-se problemas no acionamento dos mesmos, pois precisava-se de um circuito isolado e com a mesma referência do Tiva C. Optou-se, então, por utilizar a Ponte H formada

por relés, Figura 29, em que o circuito de comando e de potência são, naturalmente, isolados. Tendo em vista que a comutação da ponte se dará esporadicamente o uso dos relés foi uma boa solução.

Figura 29 - Circuito Ponte H.

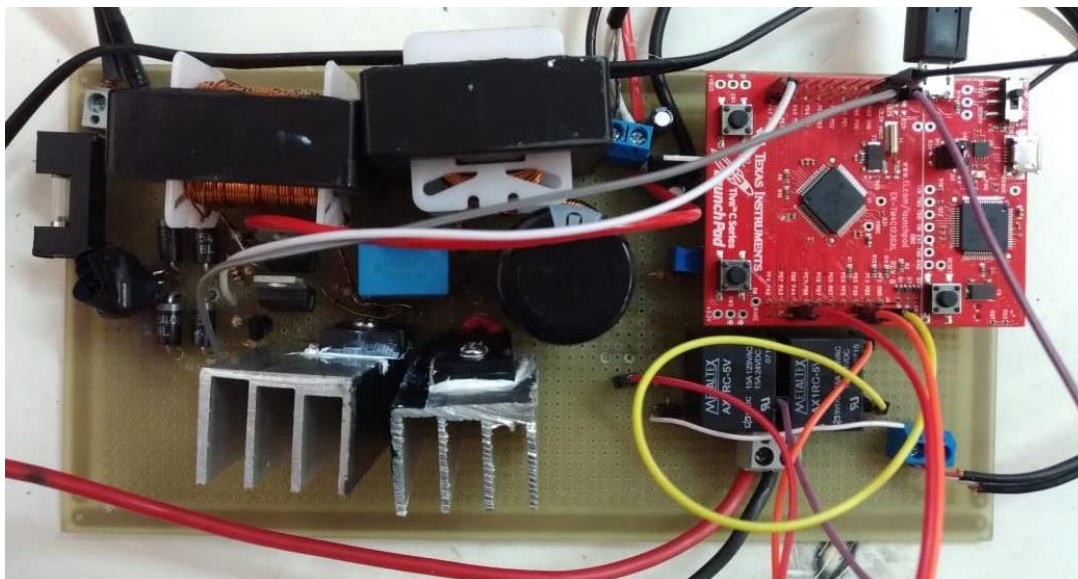


Fonte: Os autores.

4.6 MONTAGEM DO CIRCUITO

A montagem do circuito completo foi realizada em placa padrão furada, devido a facilidade em manutenção de eventuais mudanças que possam vir a ser necessárias. Isso nos possibilitou fazer facilmente a inserção, mudança *layout* e de componentes. A Figura 30 demonstra do circuito montado

Figura 30 – Conversor Implementado Experimentalmente.

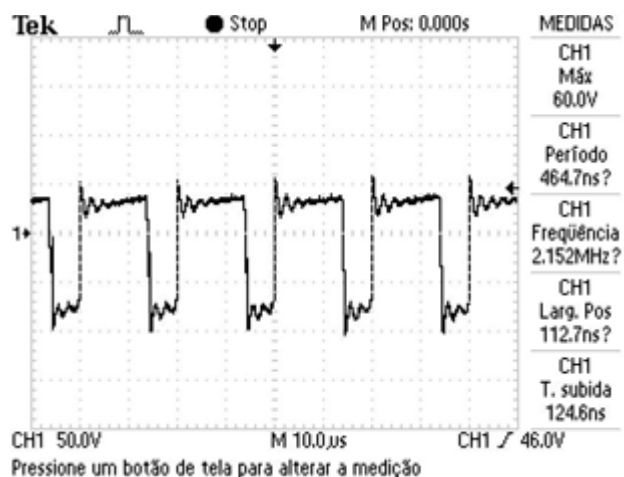


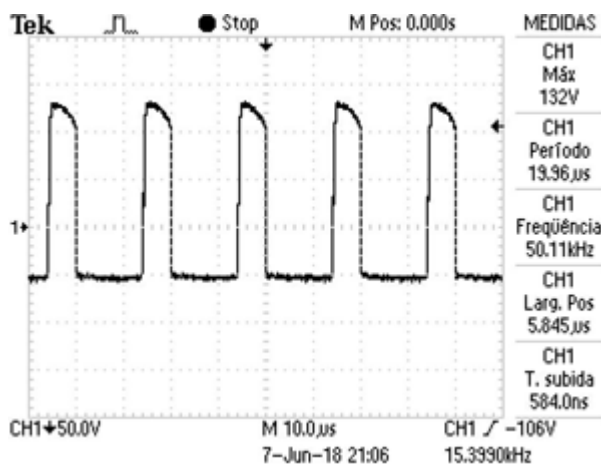
Fonte: Os autores.

4.6.1 Aferições Experimentais em Alta Frequência

Os dados e forma de onda da tensão aferidos experimentalmente, em alta frequência, são descritos neste tópico, nas figuras abaixo.

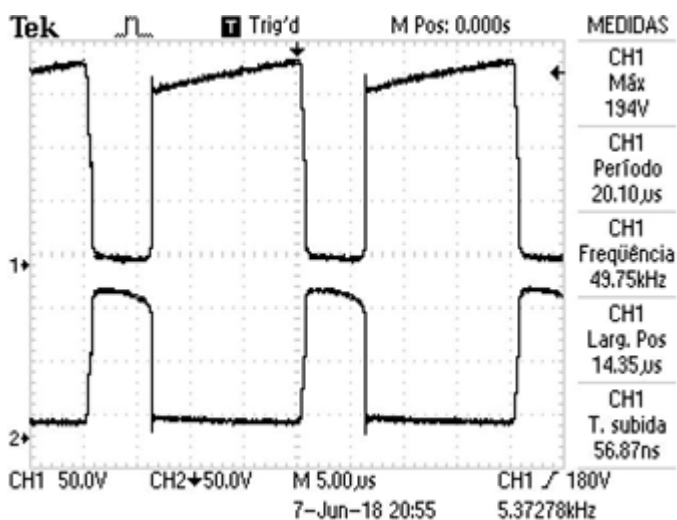
Figura 31 - Forma de onda, alta frequência, sobre os indutores L1 e L2, respectivamente.





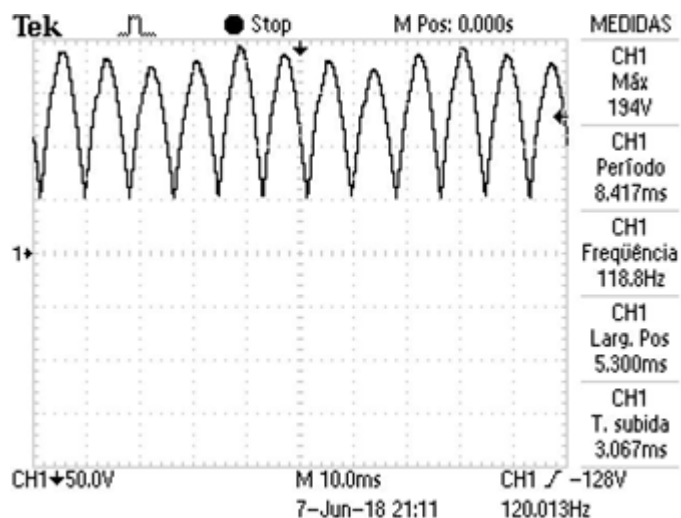
Fonte: Os autores.

Figura 32 - Forma de onda da tensão, em alta frequência, na Chave(1) e no Diodo(2).



Fonte: Os autores.

Figura 33 - Forma de onda da tensão, em alta frequência, no Capacitor de Acoplamento C1.

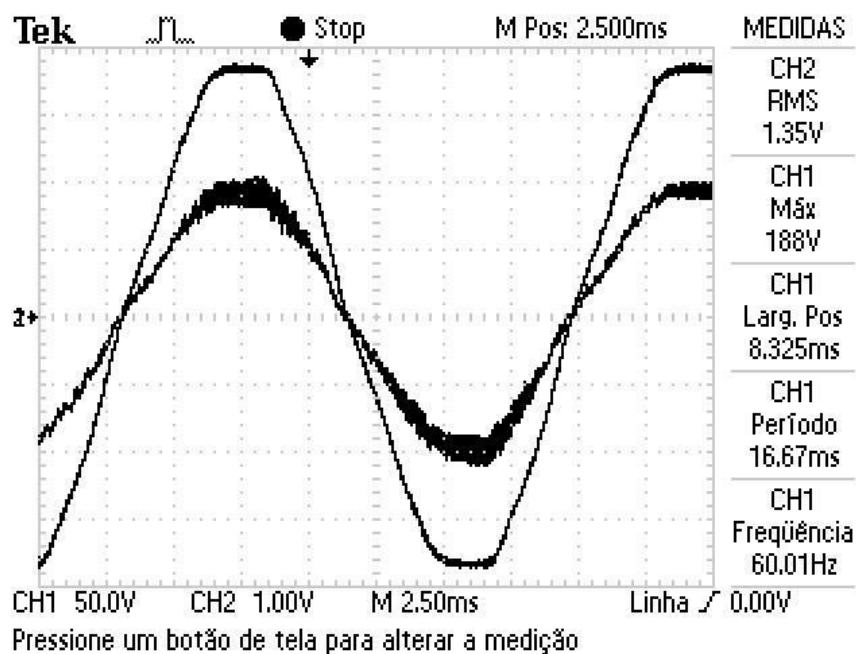


Fonte: Os autores.

5.2.2 Aferições Experimentais em Baixa Frequência

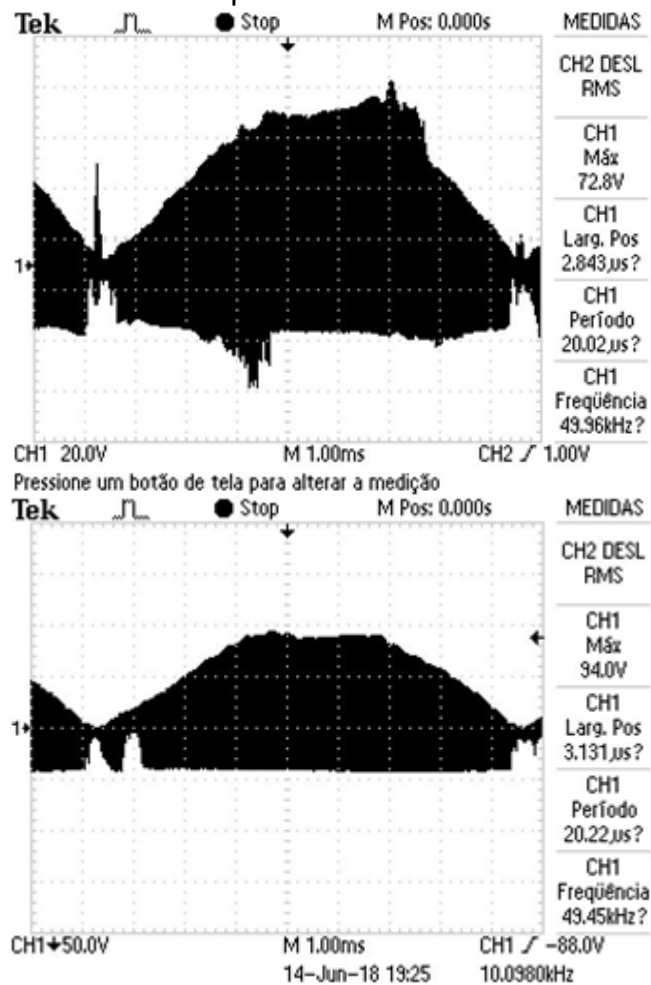
Os dados e formas de onda da tensão obtidos experimentalmente e em baixa frequência são descritos neste tópico, pelas figuras abaixo.

Figura 34 - Forma de onda da tensão e corrente de entrada, obtido empiricamente.



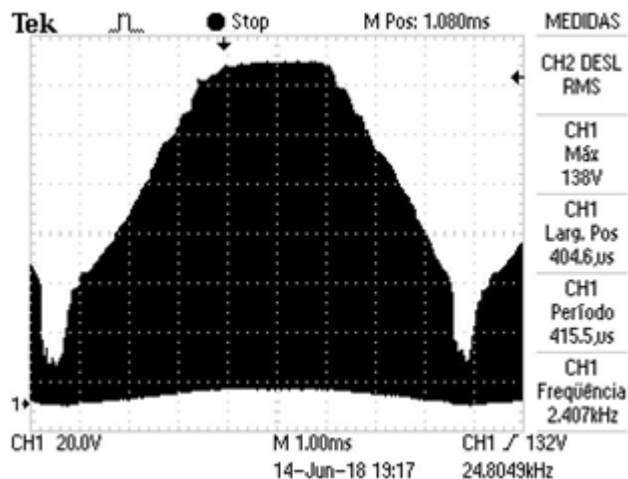
Fonte: Os autores.

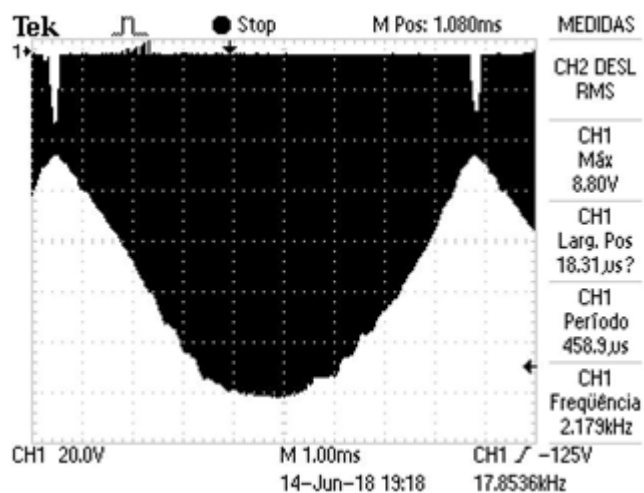
Figura 35 - Forma de onda da tensão, sobre os indutores L1 e L2, respectivamente, experimentalmente.



Fonte: Os autores.

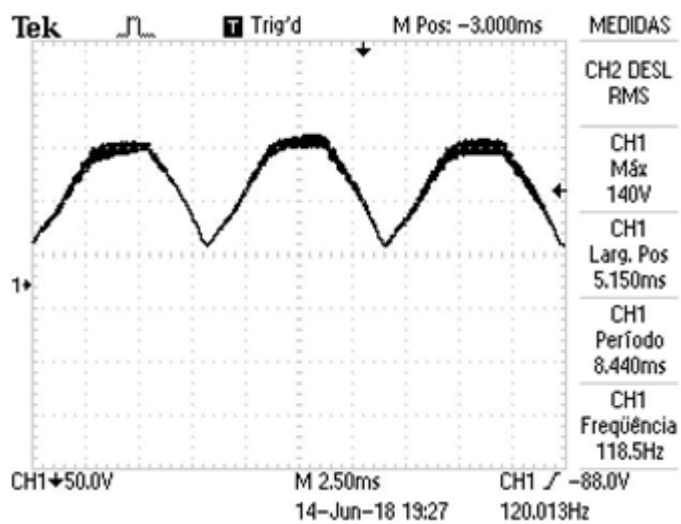
Figura 36 - Forma de onda da tensão na Chave(1) e no Diodo(2), obtido experimentalmente.





Fonte: Os autores.

Figura 37 - Forma de onda da tensão no Capacitor de Acoplamento C1, obtido experimentalmente.



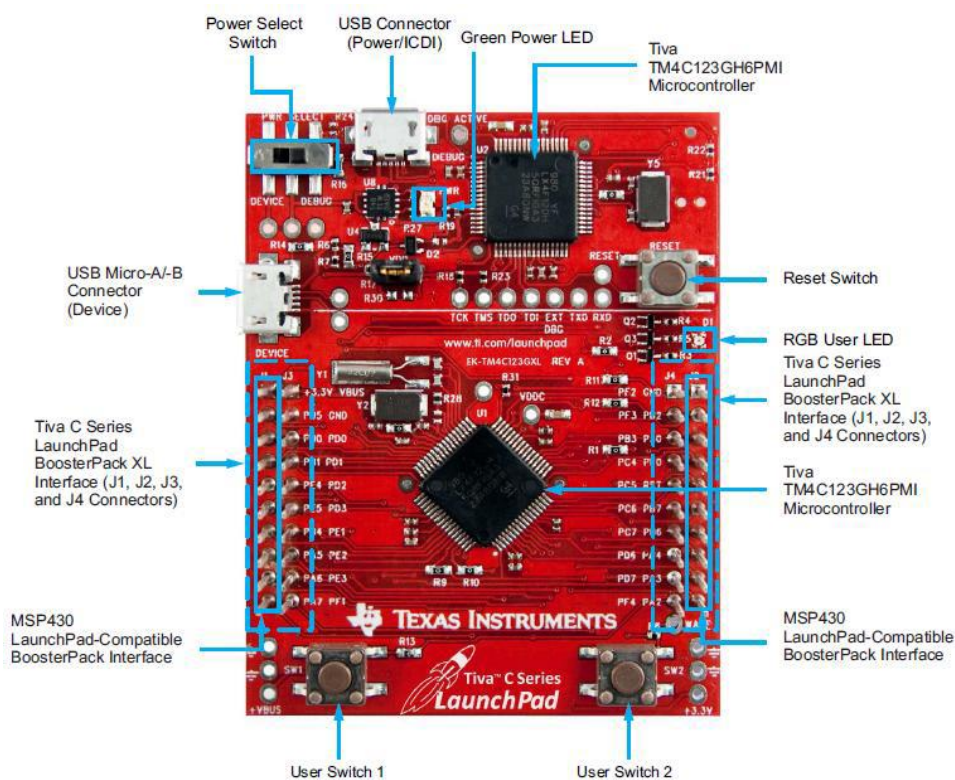
Fonte: Os autores.

5. CONTROLE DO CONVERSOR

5.1 MICROCONTROLADOR TIVA C

Para o controle de temperatura foi utilizado o microcontrolador digital da *Texas Instruments*, o *Tiva C Series LaunchPad Evaluation Kit* (EK-TM4C123GXL), Figura 38. O circuito é composto por dois microcontroladores TM4C123G, duas entradas USB, apenas uma delas utilizada para programação, dois módulos PWM capazes de gerar 16 saídas PWM e 12 canais de conversão analógico-digital (TI, 2018).

Figura 38 - Tiva C LaunchPad.



Tiva C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board

Fonte: TI, 2018.

Utilizou-se três saídas digitais e duas entradas analógicas, sendo as saídas, PF1(saída do PWM), PE0(saída para o acionamento da bobina 1) e PA4(saída para a bobina 2), e as entradas são, PD1(tensão de saída do conversor) e PD3(tensão de

saída do sensor de temperatura).

5.1.2 Utilização do Tiva C

A utilização do microcontrolador Tiva C se deve ao fato de ele possui rápido poder de processamento de cálculo para a implantação de um controle PID(*Proporcional Integrativo e Derivativo*), sendo melhor que o microcontrolador arduino, mesmo tendo o preço parecido, o Tiva possui melhor hardware e capacidade de processamento que o arduino.

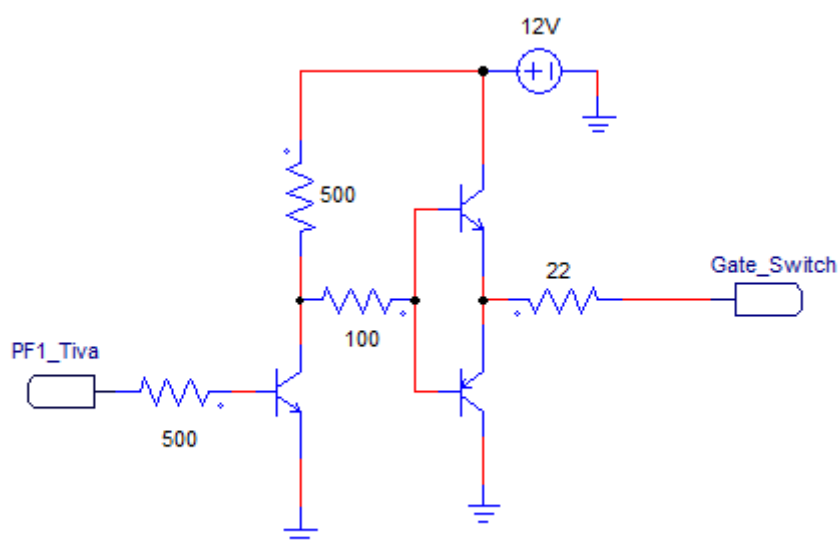
Os dois microcontroladores são parecidos, no entanto o Tiva possui melhor resolução em PWM e entradas analógicas, proporcionando medidas mais precisas.

O Tiva pode ser programado através de dois softwares diferentes disponibilizados pela *Texas Instruments*, o *Code Composer Studio*(CCS) e o *Energia*, para este trabalho foi escolhido o Energia por se tratar de um programa mais simples, mas que mesmo assim pode atender aos requisitos deste projeto.

5.2 MODULAÇÃO PWM

O circuito de controle tem o sinal de saída em modulação PWM (Pulse Width Modulation) esta modulação é amplamente utilizada para controle. Este é o sinal responsável por chavear o mosfet em 50kHz, porém o microcontrolador não entrega o sinal com potência suficiente para acionar o gatilho da chave. Foi necessário a presença de um driver, Figura 39, para elevar a potência do sinal e conseguir acionar a chave sem problemas.

Figura 39 - Driver de acionamento da chave.



Fonte: Os autores.

A primeira etapa deste drive, composta pelo transistor que é acionado pelo Tiva C, serve como *boost* de tensão elevando a tensão do sinal para 12V e a segunda etapa, um *push-pull* composta pelos dois transistores interligados, serve como *boost* de corrente que fornece a corrente necessária para o acionamento da chave. Os resistores servem, basicamente, para limitar a corrente e podem ser de valores relativamente baixos.

A utilização deste drive, principalmente da primeira etapa, inverte o sinal de entrada, ou seja, quando na saída do microcontrolador o sinal do PWM está na razão cíclica máxima, no terminal Gate do mosfet a razão cíclica aparece como zero e vice versa. Este problema foi resolvido facilmente no código do controlador.

5.3 SENSOR DE TEMPERATURA

A medida da temperatura foi feita a partir de um termistor NTC (*negative temperature coefficient*) de $10\text{k}\Omega$ à 25°C . Foi feito um circuito divisor de tensão com o NTC e um resistor de $10\text{k}\Omega$.

Após o projeto do circuito para a medição da temperatura, percebeu-se que a leitura dos dados do NTC sofreriam muita interferência quando ligado juntamente ao conversor, pois o mesmo opera na frequência de 50kHz . Portanto, fez-se necessário montar um filtro anti-aliasing para atenuar esse ruído e assim ter uma medição mais

precisa da temperatura do tonel de fermentação.

5.3.1 Filtro Anti-Aliasing

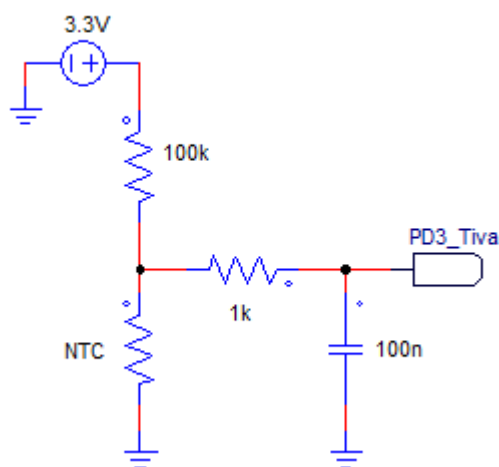
O filtro anti-aliasing em questão é um filtro passa baixa, isto é, um circuito que permite a passagem dos sinais em baixa frequência e atenua os que possuem frequências mais elevadas, que é o caso da frequência de chaveamento do circuito do conversor.

A forma mais simples de se montar esse tipo de filtro é com um circuito RC, ou seja, um circuito com um resistor e um capacitor. Para a escolha do resistor e capacitor corretos, tem-se a seguinte equação segundo Mussoi(2004):

$$\omega c = \frac{1}{RC} \quad (5.1)$$

Onde ωc é a frequência de corte, frequência a partir da qual o filtro começa a atenuar o sinal, em rad/s, R é o resistor e C o capacitor. Para descobrir a frequência de corte em Hertz faz-se $\omega c = 2\pi f_c$. No projeto utilizou-se um capacitor de 100nF e um resistor de 1kΩ. Portanto, a frequência de corte em Hertz é $f_c = 1,6\text{kHz}$ aproximadamente. Como o chaveamento do circuito ocorre em 50kHz, esse filtro já atenua bastante a interferência causada durante a leitura da medição da temperatura. Abaixo é possível ver um esquemático do circuito montado para a medição da temperatura do tonel de fermentação já com o filtro anti-aliasing. A Figura 40 mostra o filtro.

Figura 40 - Leitura da temperatura.



Fonte: Os autores.

5.3.2 Leitura da Temperatura

Como dito anteriormente, o circuito para a medição da temperatura é um divisor de tensão entre um resistor de 10kΩ e o NTC. A partir desse circuito, lia-se a tensão sobre o termistor através da entrada analógica PD3. As entradas analógicas do Tiva são A/D's (conversores analógicos digitais) de 12 bits (0 a 4095), onde o valor 4095 corresponde a 3.3V, portanto através de uma conversão simples era possível saber a tensão sobre o NTC.

Após saber a tensão sobre o termistor, restava usar esta informação para descobrir a temperatura correspondente. Para tal, utiliza-se a seguinte equação segundo Laudaes (apud GALANA, 2017):

$$T = \frac{1}{a + b \cdot \ln(R_{ntc}) + c \cdot \ln^3(R_{ntc})} \quad (5.2)$$

Onde R_{ntc} é a resistência do termistor e a , b e c são coeficientes que relacionam a resistência do NTC com a temperatura correspondente e são conhecidos como coeficientes de Steinhart-Hart. Esses coeficientes são fornecidos nos datasheets dos fabricantes e no caso do NTC de 10kΩ utilizado os mesmos valem (EPCOS, 2006, apud GALANA, 2017):

- $a = 0,0011303$

- $b = 0,0002339$
- $c = 0,00000008863$

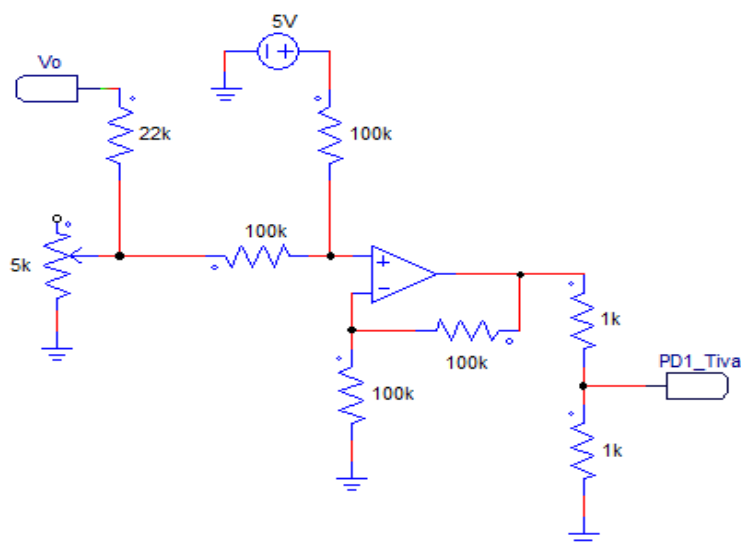
A conversão passo a passo da tensão lida na entrada PD3 do microcontrolador para a temperatura correspondente pode ser vista no código desenvolvido, disponível no Anexo I.

5.4 LEITURA DA TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR

Para a leitura da tensão de saída foi necessário a montagem de um circuito que diminuísse essa tensão. A tensão máxima que o microcontrolador consegue ler é de 3,3V, portanto o circuito teria que ser capaz de abaixar a tensão de saída para até este valor. Escolheu-se que a variação da leitura seria de 1,2V à 2,5V, sendo 1,2V o máximo e equivalente a 69V na saída do Ćuk e 2,5V o mínimo e equivalente a 0V no Ćuk.

Utilizou-se um trimpot para fazer o ajuste da resistência no divisor de tensão e um circuito somador, usando um AmpOp, para fazer a inversão da tensão de saída Ćuk e por fim, novamente um divisor de tensão que varia de 2,5V a 1,2V. A Figura 41 ilustra o circuito, onde os valores de resistores utilizados foram escolhidos para o ganho ser unitário.

Figura 41 - Leitura da tensão de saída.



Fonte: Os autores.

5.5 CONTROLADOR PID

Conforme supracitado, o tipo de controlador escolhido para este projeto foi o PID. Mesmo este sendo um controlador relativamente simples, foi o adotado pois, o conversor Ćuk tem como característica (até por questões de projeto) ter na saída uma ondulação em 120Hz e se o controle tiver uma atuação muito rápida, o mesmo tenderá a tentar corrigir esta ondulação. Provocando assim um grande esforço de controle e acaba por distorcer a forma de onda da corrente na entrada, ou seja, diminui o fator de potência que é praticamente unitário para o conversor Ćuk. Portanto, decidiu-se utilizar um controlador mais simples, tendo uma ação de controle mais lenta e mantendo um alto fator de potência.

Para implementar o controlador no Tiva C, deve-se primeiro ter a equação discreta de um controlador PID em função da transformada Z, pois a partir dela é possível chegar numa equação a diferenças o que torna a implementação bastante simples em programação de microcontroladores. Segundo Moritz(2013), um controlador PID pode ser descrito da seguinte forma no domínio discreto:

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = Kp + Ki \frac{Tz+1}{2z-1} + Kd \frac{z-1}{Tz} \quad (5.3)$$

Onde U(Z) é a saída do sistema, E(Z) o erro, T o tempo de amostragem e Kp, Ki e Kd os ganhos proporcional, integrativo e derivativo respectivamente. Assim, juntando todas as parcelas em um único denominador chega-se a:

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{(KiT^2 + 2KpT + 2Kd)z^2 + (KiT^2 - 2KpT - 4Kd)z + 2Kd}{2Tz(z-1)} \quad (5.4)$$

A partir dessa equação, é possível utilizar as propriedades da transformada Z e chegar na seguinte equação a diferenças:

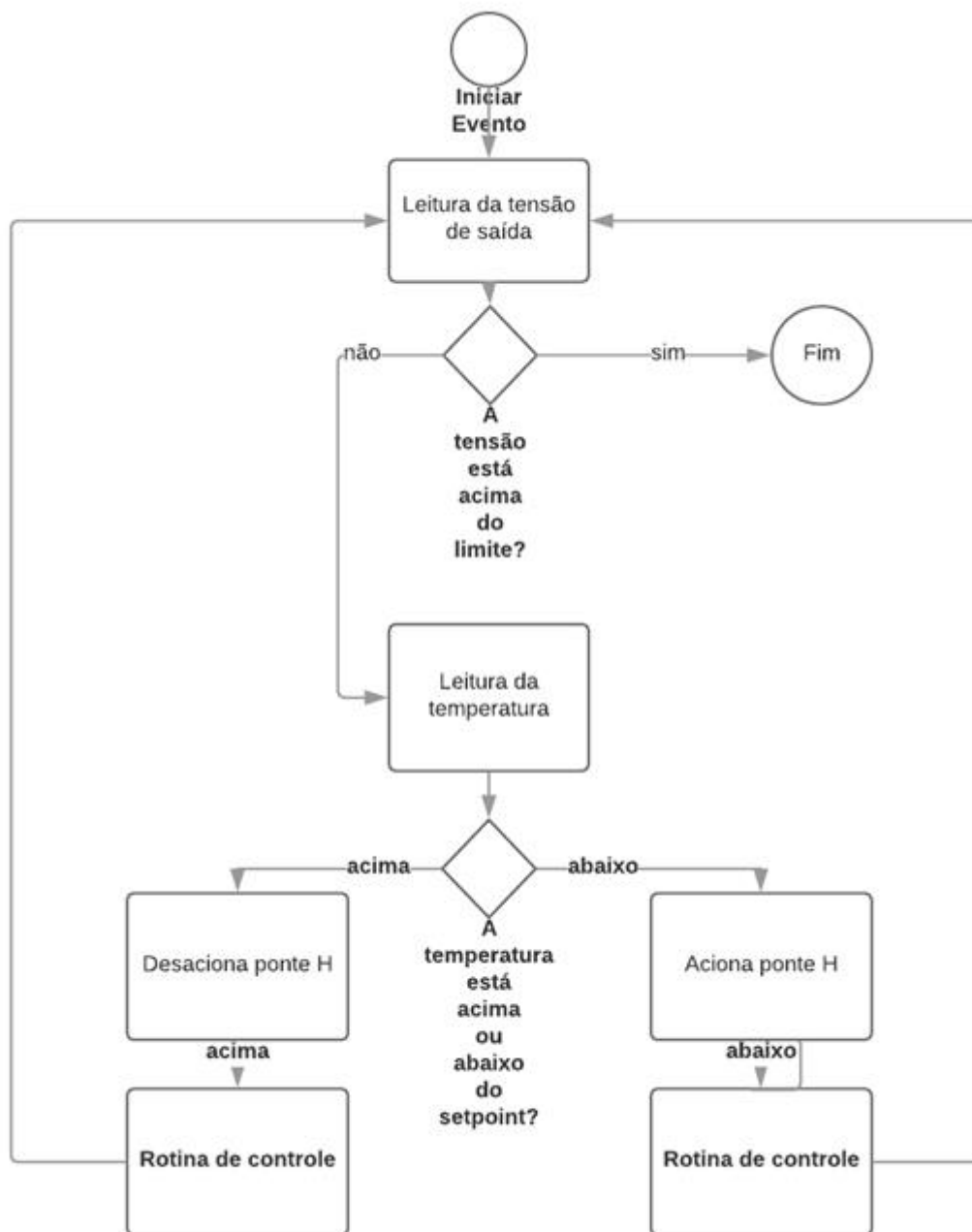
$$u[n] = \frac{e[n](KiT^2 + 2KpT + 2Kd) + e[n-1](KiT^2 - 2KpT - 4Kd) + e[n-2]2Kd}{2T} + u[n - 1] \quad (5.5)$$

Onde n é a n -ésima iteração do sistema. Nota-se que o cálculo para ação de controle leva em conta os dados da saída e erro anteriores a iteração atual, no caso do erro, até duas iterações anteriores.

Com a equação 5.5, fica simples implementar o controle PID no microcontrolador, a implementação do controle pode ser vista no Anexo I. Com isso, foi possível implementar todo o sistema proposto no microcontrolador Tiva C.

Um fluxograma demonstrando a lógica utilizada para o desenvolvimento do código no microcontrolador está representado na Figura 42.

Figura 42 - Fluxograma do código.



Fonte: Os autores.

Primeiramente, é verificada a tensão de saída no conversor, como dito anteriormente, a tensão máxima estabelecida na carga foi de 69V; neste caso o microcontrolador, através circuito de leitura da tensão (Figura 41), registra cerca de 1,2V em sua leitura. E, para 0V na saída do conversor, tem-se 2,5V no circuito de leitura da tensão. Portanto, no código foi colocado uma condição para que quando a tensão lida for abaixo de 1,2V, ou seja, para quando a tensão na saída do conversor

estiver acima de 69V, o microcontrolador, por segurança, desliga a rotina de funcionamento, voltando a operar apenas se for resetado.

Se o sistema estiver operando de forma normal, lê-se a temperatura do mosto no tonel através do circuito com o NTC (Figura 40). Caso esta esteja abaixo da temperatura desejada, são acionados os relés da ponte H e há início na rotina de controle. O mesmo processo é feito para o caso da temperatura estar acima do desejado, mas não havendo o acionamento da ponte H.

6. RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1 RESULTADOS DO CONVERSOR

Apesar do circuito ter sido projetado para 80V e 3A, esta potência não foi utilizada pela carga e a tensão de saída ficou em 45V e conseqüentemente 2.2A, para 127V na entrada.

6.1.1 Operação em potência nominal..

A Figura 43 demonstra o comparativo entre os valores de correntes e tensões de entrada e saída, obtidas experimentalmente e na simulação. Nota-se que a corrente da simulação é menor do que a experimental, isto se dá devido às perdas dos componentes e aos erros de medição, que não foram levados em conta na simulação, mas estão próximos comprovando o funcionamento do conversor.

Figura 43 - Comparativo valores eficazes.

	Experimental		Simulado	
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
Entrada	126,7V	1,08A	127V	0,823A
Saída	44,8V	2,20A	45,0V	2,21A

Fonte: Os autores.

As formas de onda da Figura 25 mostram, a tensão e corrente de entrada adquiridas por simulação e a Figura 43 mostra as mesmas adquiridas experimentalmente. Nota-se o fator de potência elevado, comprovando as características do conversor utilizado.

6.2 RESULTADOS DO PROTÓTIPO

Com o protótipo concluído, foram realizados testes a fim de observar a malha de controle. Nos testes foram observados a temperatura do tonel se estabilizando na referência, tanto para resfriar quanto para esquentar, e também o sistema chegando

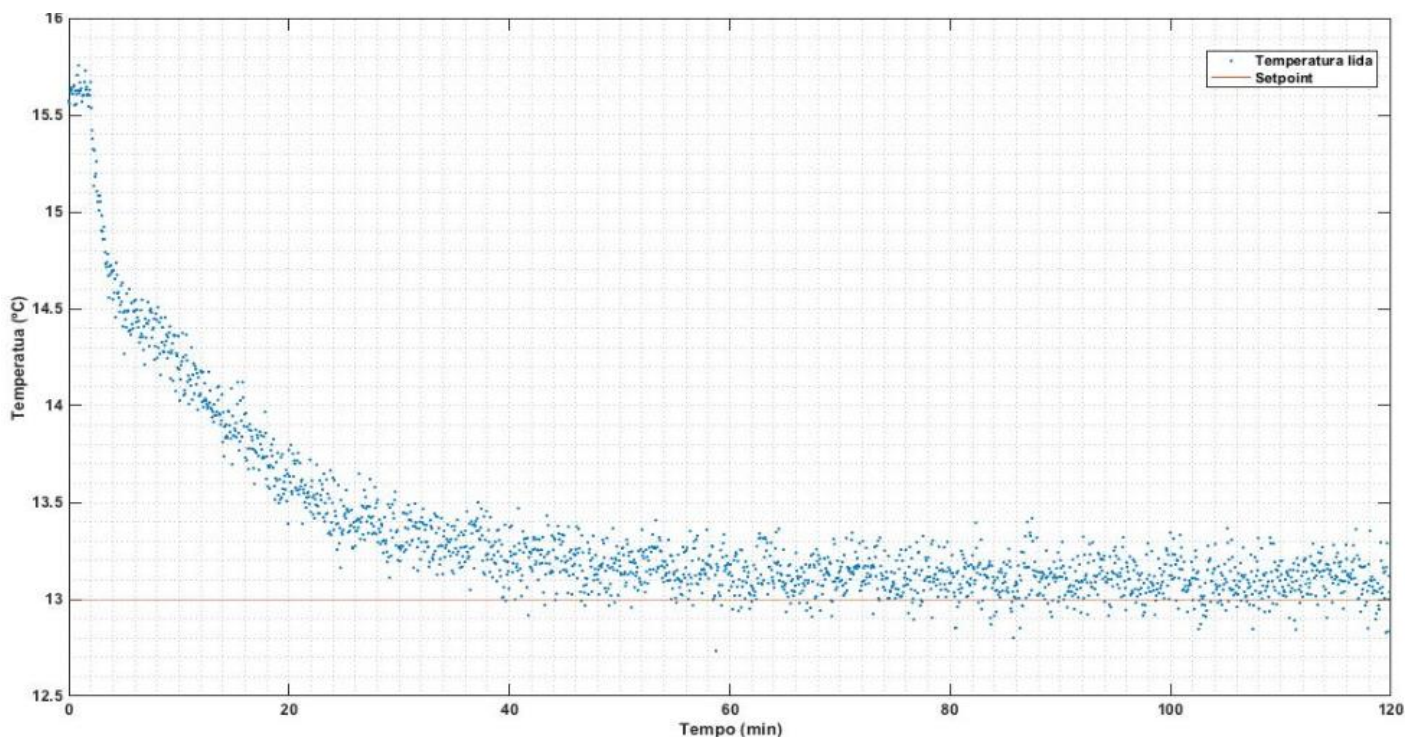
em temperaturas nos extremos determinados, 25°C para esquentar e 5°C para resfriar. Em um dos testes também foi verificado o comportamento do PWM.

Nos testes para aquecimento, a tensão de entrada foi 127Vrms, e a corrente 0,2Arms. A tensão máxima de saída foi 18,6V e a corrente 0,99A. A razão cíclica limite do PWM foi fixada em 14%, isto se deu pelo fato de que acima disso a corrente nas células seria alta demais para aquecer, pois o lado quente da célula fica em contato com o tonel diretamente e não com o dissipador.

Para os testes de resfriamento, a tensão de entrada também foi 127Vrms e a corrente máxima foi 1,08Arms. A tensão máxima de saída foi 45V, e a corrente 2,20A. A razão cíclica limite do PWM utilizada foi de 27%, para garantir a condução descontínua do conversor e para não operar no limite da carga, haja visto que empiricamente viu-se que as células peltier começam a saturar com corrente perto de 3A.

Na Figura 44 é possível observar o controle para resfriar, onde a temperatura variou de aproximadamente 15,5°C para 13°C, que era a referência.

Figura 44 - Teste do protótipo resfriando.

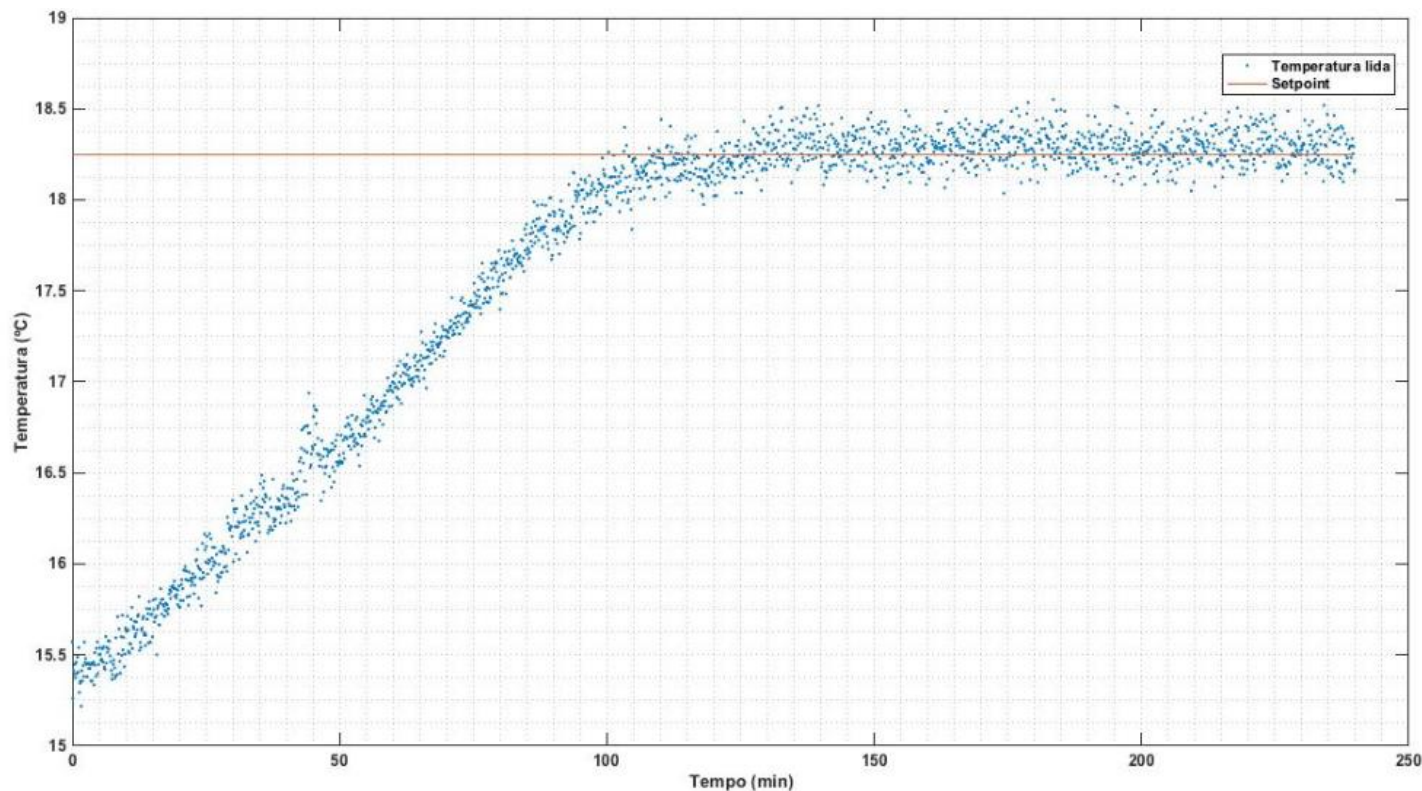


Fonte: Os autores.

O teste seguinte feito foi o controle para esquentar, como mostrado na Figura 45, é possível observar que a temperatura começa em aproximadamente 15,5°C e

estabiliza na referência de 18,25°C.

Figura 45 - Teste do protótipo esquentando.



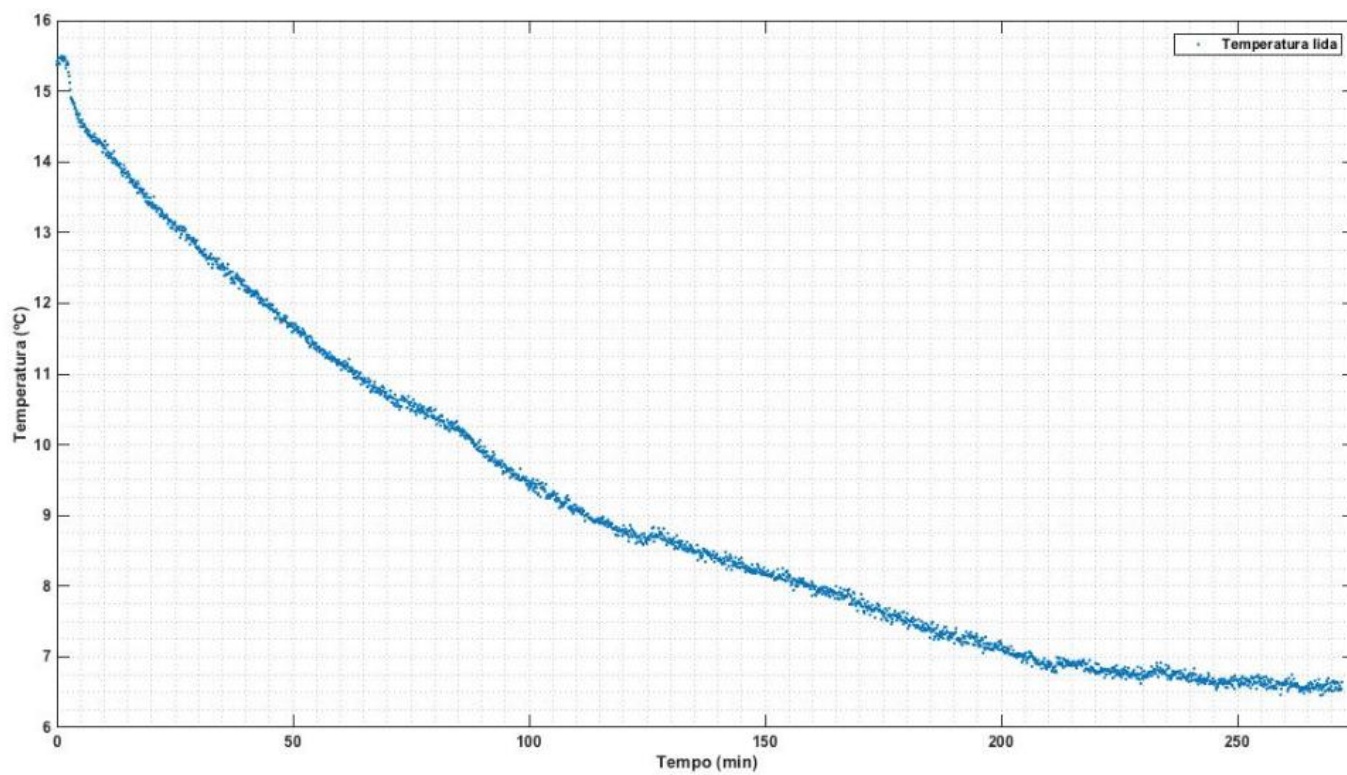
Fonte: Os autores.

Os dois testes foram feitos com pouca variação de temperatura para que esta chegasse mais rápido na referência, permanecendo estável. Cada teste foi realizado em cerca de 2 horas, tempo suficiente para observar o controle atuando e a temperatura estabilizando no valor desejado. Com algumas pequenas variações que são causadas por erro de leitura do sensor. Tal variação não atrapalha o controle, visto que ele estabiliza na temperatura determinada, e também não prejudica a produção de cerveja, uma vez que a temperatura não tem efetivamente essa variação.

Os próximos testes apresentados foram realizados para demonstrar que o protótipo consegue efetivamente alcançar as temperaturas em toda a faixa de fermentação das cervejas, entre 9°C e 24°C.

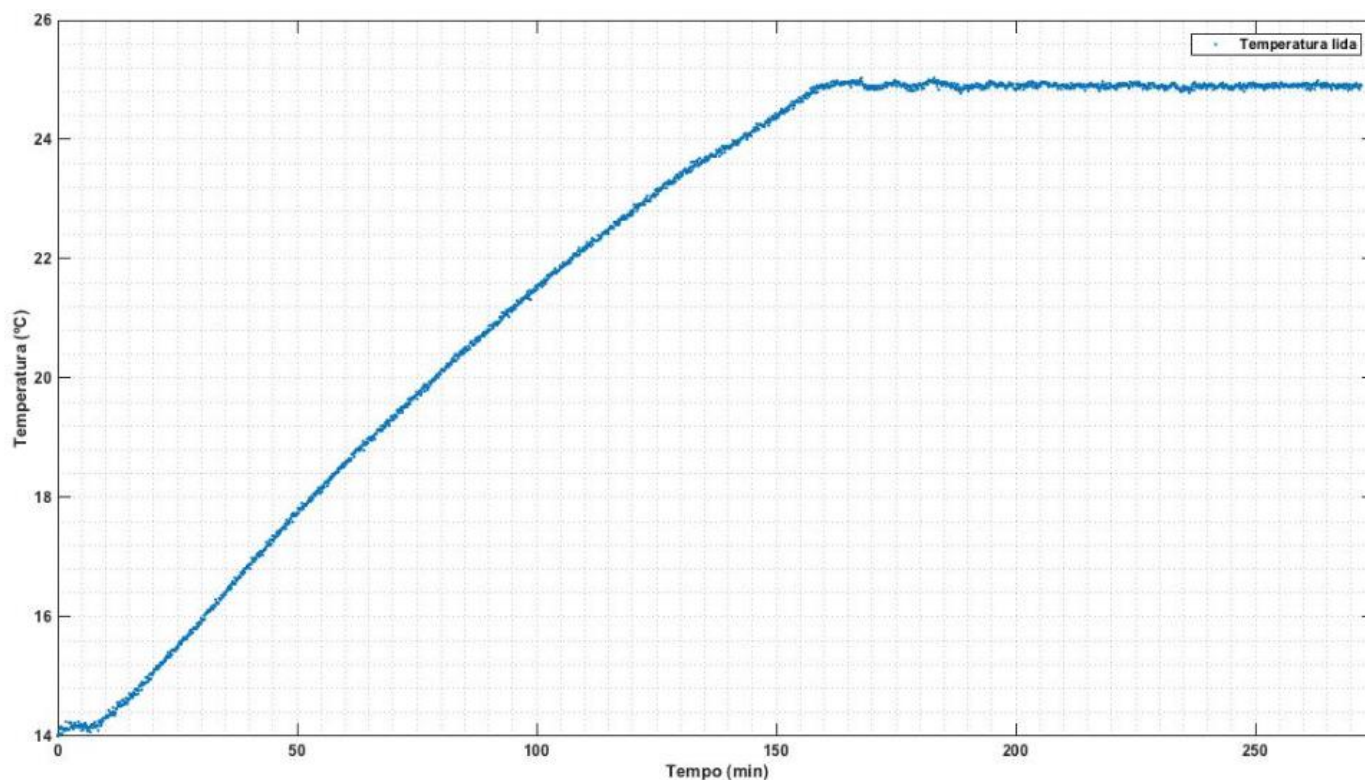
Na Figura 46 demonstra o limite para esquentar, e na Figura 47 o limite para resfriar.

Figura 46 - Teste do limite resfriando.



Fonte: Os autores.

Figura 47 - Teste do limite esquentando.



Fonte: Os autores.

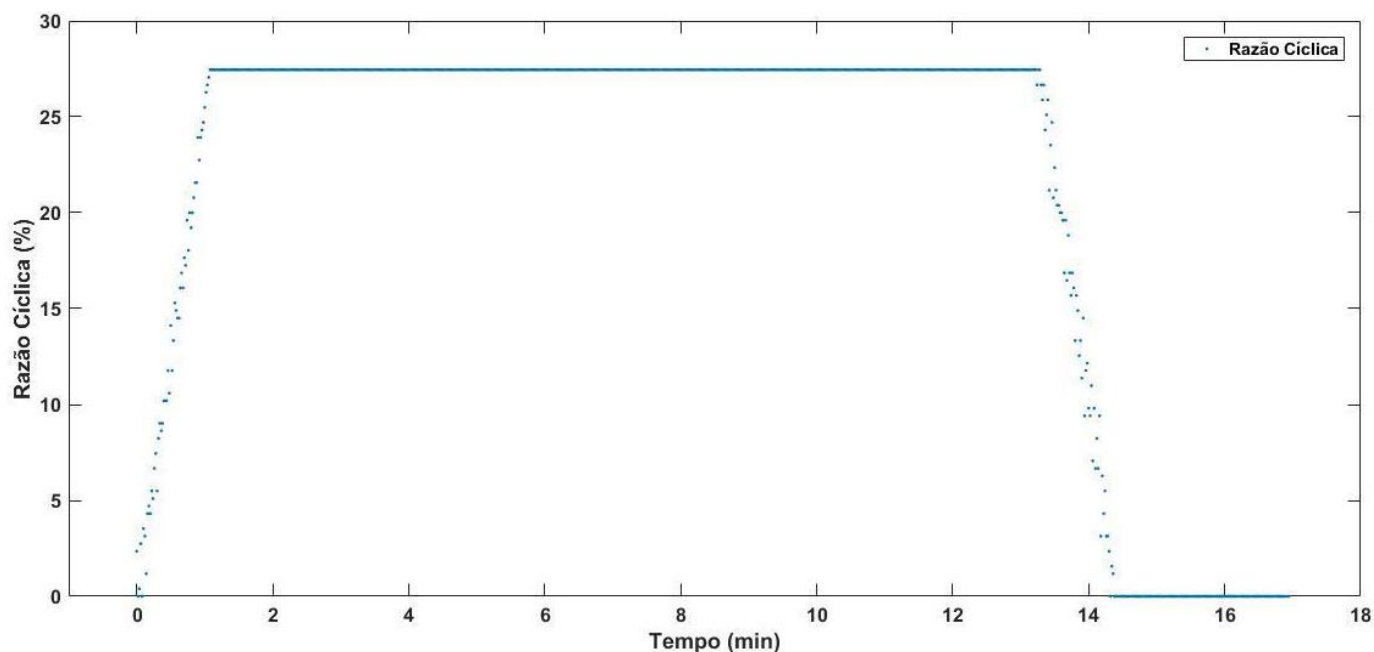
Para o teste de aquecimento, a referência escolhida foi de 25°C, diferente do estipulado no projeto, isso se deve ao fato de que não é necessário ter 30°C para a fermentação de cerveja e como foi falado anteriormente no projeto das células, 30°C é um valor para ser considerado nos cálculos com o propósito de se ter potência sobrando com o projeto concluído, e 25°C é um valor condizente com a fermentação de cervejas.

Para o teste de resfriamento, a temperatura de referência foi de 5°C. No gráfico é possível observar que a temperatura chega a 6,5°C, isto é, não chegou na referência, mas é suficiente para fermentar praticamente qualquer cerveja. Visto que, como dito anteriormente a temperatura mínima de fermentação das cervejas é de 9°C.

Mesmo com potência menor para o caso do aquecimento, as células foram capazes de realizar a variação de temperatura sem problemas.

Por último o teste do comportamento do PWM realizando o controle, como mostrado na Figura 48.

Figura 48 - Atuação do controle PWM.



Fonte: Os autores.

O teste foi realizado para a condição de resfriamento do tonel, portanto a razão cíclica variou de 27% a 0%. Neste caso, a variação de temperatura foi pequena para poder verificar o comportamento da razão cíclica do PWM mais rapidamente. Observou-se que a razão cíclica variou linearmente, até chegar em zero, após a temperatura atingir a referência.

6.3 CONCLUSÕES

Após o protótipo concluído e a realização dos testes, verificou-se que o projeto realizado é funcional e viável de ser implementado, pois os objetivos citados no início do trabalho foram atingidos, as células peltier dimensionadas mostraram-se capazes de realizar o trabalho proposto, podendo controlar a temperatura em toda a faixa de fermentação de cervejas, entre 9°C e 24°C.

O controle proposto realiza a função destinada a ele, controlando a temperatura em uma referência determinada, sem que haja prejuízo para o processo de fermentação.

Para valores máximos de tensão de entrada no sistema (127Vrms), a corrente

para esse valor de entrada foi de 0,82A, e PWM (27%), foi verificado valores de tensão e corrente de saída de 44,8V e 2,20A, respectivamente; esses valores se tornam coerentes quando comparados com a simulação, que foi de 45,0V para a tensão e 2,21A para a corrente, levando isso em consideração, e comparando as formas de onda de entrada simulada e experimental, o conversor funciona da forma projetada.

Além disso, o protótipo construído atendeu as especificações, controlando a temperatura do tonel e possuindo isolamento térmico para aumentar a eficiência do sistema.

6.3.1 Dificuldades encontradas.

Encontraram-se algumas dificuldades durante o decorrer do trabalho, de início no desenvolvimento do código para ser implementado no microcontrolador, em que o chaveamento é realizado em frequência de 50kHz, a frequência padrão de saída PWM do microcontrolador é abaixo do valor necessitado, para tanto pesquisou-se como resolver o problema e foi encontrado uma biblioteca (`wiring_analog.c`) que possibilita escolher a frequência da saída PWM desejada.

Posteriormente encontrou-se dificuldades para realizar a inversão de tensão de saída do conversor, primeiramente pensou-se em fazer uma ponte H utilizando transistores, mas observou-se que teria problemas principalmente com a referência do circuito, então chegou-se na solução de utilizar um circuito ponte H com relés, pois o circuito de acionamento das bobinas é, por características construtivas, isolado dos contatos dos mesmos.

Por fim, para a alimentação dos coolers de resfriamento do dissipador nas células peltier pensou-se, primeiramente, em utilizar um conversor Buck na saída do $\hat{C}uk$. Entretanto, devido a necessidade de se utilizar uma fonte externa para alimentar o driver de acionamento do PWM, também em 12V, optou-se por utilizar esta mesma fonte para alimentar os coolers por ser uma solução mais conveniente.

6.3.2 Projetos futuros.

Para projetos futuros pode ser feita uma otimização dos ganhos do controle ou mesmo mudar o tipo de controle, melhorar o isolamento térmico do sistema, para

o aumento da eficiência, outra possibilidade é testar usando mais potência, aumentando a quantidade de células para controlar um volume maior de mosto.

Pode-se também projetar alguns circuitos que elimine a fonte de alimentação externa, que está sendo utilizada para alimentar o Tiva, o driver assim como os coolers, tornando assim o projeto com apenas um fonte de alimentação alternada, ligando-o à rede.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ayrton Gissoni. **Adega Climatizada para Vinhos Utilizando a Célula de Peltier.** UniCEUB, Brasília, 2013. Disponível em: <http://repositorio.uniceub.br/bitstream/235/3855/1/Ayrton%20Gissoni%20Almeida%20%20Monografia%201_2013.pdf>. Acesso 03 maio 2017.

ANDO JUNIOR, Oswaldo Hideo. **Protótipo de um Microgerador Termoelétrico para Captação de Energias Residuais no Efeito Seebeck com Sistema de Transferência de Calor Intercambiável.** 2014. 166 p. tese (Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgia e Materiais). UFRGS, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/103721>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

ARNOLD, John P. **Origin and History of Beer and Brewing: From Prehistoric Times to the Beginning of Brewing Science and Technology.** Cleveland, Ohio: Reprint Edition by BeerBooks.2005. ISBN 0-9662084-1-2.

BARBI, Ivo. **Correção Ativa do Fator de Potência Retificadores Monofásicos Operando em Condução Descontínua.** UFSC, 2015. Disponível em: <<http://ivobarbi.com/novo/wp-content/uploads/downloads/2015/08/Apostila-PFC-DCM.pdf>>. Acesso 25 novembro 2017.

CRUZ, Iara et al. **Produção de Cerveja.** Disponível em: <<https://www.trabalhosgratuitos.com/Exatas/Engenharia/Cerveja-411851.html>>. Acesso 10 novembro 2017.

DANVIC, **Célula Peltier.** Página 1: Disponível em: <<http://www.peltier.com.br>>. Acesso 10 novembro 2017a. Página 2: Disponível em: <<http://www.peltier.com.br/index.php?url=faq>>. Acesso 10 novembro 2017b.

FACCINI, Flavio. **O malte brasileiro.** Disponível em: <<http://wp.me/p3o5Ky-3U>>. Acesso em 14 maio 2017.

FRANZEN, Tiago Alexandre. **Automação e Controle em uma Micro Cervejaria Artesanal.** Disponível em:

<<http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos11/13214143.pdf>>. Acesso 01 maio 2017.
GALANA, Guilherme Minholi. **Sistema embarcado de aquisição e gestão da informação para controle operacional de uma usina sucroalcooleira**. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8311>>. Acesso: 16 junho 2018.

KALNIN, Joanir Luís; CASAROTTO FILHO, Nelson; CASTRO, João Ernesto E. **Análise Estratégica para Implantação de Empresas de Pequeno Porte: Cervejarias Artesanais**. Disponível em: <<https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/600/639>>. Acesso: 01 maio 2017.

KOURY, Ricardo Nicolau Nassar et al. **Contribuição ao Estudo Sobre a Viabilidade Técnica da Utilização de Aquecedores e Refrigeradores Termoelétricos**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2010. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-0331.pdf>> Acesso: novembro de 2017.

MORITZ, Guilherme Luiz. **Controladores PID**. UTFPR, Curitiba, 2013. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/moritz/disciplinas-antiores/et77h-sistemas-de-controle-2/aulas/10_ControladoresPIDeDeadbeat.pdf/view>. Acesso: 18 junho 2018.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Resposta em Frequência: Filtros Passivos**. CEFET/SC, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Apostilas/filtropassivo.pdf>>. Acesso: 16 junho 2018.

NACHEL, Marty et al. **Cerveja para Leigos**. 2ª Ed., Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/353422681/325347143-Cerveja-Para-Leigos-pdf>>. Acesso 03 maio 2017.

ROCHA, Jéssica Pederneiras Moraes et al. **Um exemplo do uso da ABP na**

disciplina de instrumentação eletrônica do IFBP - mini geladeira Peltier controlada por arduino. Disponível em: <http://www.fadep.br/engenharia-eletrica/congresso/pdf/117832_1.pdf>. Acesso 03 maio 2017.

SEBRAE, **Micro Cervejaria no Brasil, Características e Oportunidade** Disponível em:<[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/\\$File/7503.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/$File/7503.pdf) >. Acesso 14 maio 2017.

SINDICERV. **A Cerveja - Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja.** Disponível em:<<http://www.sindicerv.com.br/acerveja.php>>. Acesso 10 novembro 2017.

SOUZA, Daniel de Oliveira . **Condicionador de Ar para Cabine de Caminhão, Utilizando Células de Peltier.** 2011. 62 p. Monografia (Bacharel em Engenharia de Computação)- UniCEUB, Brasília, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.uniceub.br/handle/123456789/3312>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

TIPLER, Paul Allen. **Física para Cientistas e Engenheiros: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica** 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.651 p.v. 1.

VENTURINI FILHO, Waldemar Gastoni. **Tecnologias de Bebidas.** 1 ed. São Paulo: Blucher, 2005.

ANEXO I - Código Desenvolvido

```
#include "wiring_analog.c"
#include "wiring_private.h"

const int pushButton1 = 31;
const int pushButton2 = 17;
const int ledPin = 30; //PWM
const int bobina1 = 18;
const int bobina2 = 13;
const int sinal = 0;
const int saida_cuk = 24;
int sensorPin = 26;
int seguranca = 1;

float ek0=0,ek1=0,ek2=0,cz1=0,czt=0;
float T = 1.200;

float PID_control(float temp, float setpoint, int bobina)
{

    //a equação do pid é
    float P=0.01,I=0.09,D=0.10,pwm;

    ek2=ek1;// erro anterior anterior
    ek1=ek0;//erro anterior

    if(bobina == 1){
        ek0 = setpoint - temp; //erro atual
    }

    if(bobina == 0){
        ek0 = temp - setpoint; //erro atual
    }
    Serial.print(czt);
    Serial.print(" ");
```

```

/*Serial.print(ek0);
Serial.print(" ");
Serial.print(ek1);
Serial.print(" ");*/

//PID
czt=(ek0*(I*T*T+2*P*T*2*D)+ek1*(I*T*T-2*P*T-4*D)+ek2*2*D)/(2*T) + cz1;
cz1=czt;//ação controle anterior
pwm=round(czt*255);
if(pwm<0)
{
pwm=0;
}
if(pwm>70&& bobina == 0)
{
pwm=70;
}
if(pwm>35 && bobina == 1)
{
pwm=35;
}

return pwm;
}

void setup() {

Serial.begin(115200);
pinMode(pushButton1, INPUT_PULLUP);
pinMode(pushButton2, INPUT_PULLUP);
pinMode(bobina1, OUTPUT);
pinMode(bobina2, OUTPUT);
}

```

```

pinMode(sinal, INPUT);
pinMode(saida_cuk, INPUT);
pinMode(sensorPin, INPUT);
//Setar posição inicial do sentido da corrente
digitalWrite(bobina1, LOW);
digitalWrite(bobina2, LOW);
//Setar PWM com razão cíclica 0 e 50kHz no início
PWMWrite(ledPin,255,255,50000);
}

void loop() {
int increment = 2, pwmNow = 255,aux=0;
float TempSP= 20,tempo=0;
  while(seguranca!=0){
//Variáveis para ler a tensão de saída
int j=0, amostra_cuk, numsamples=10;
float media_cuk=0;
//-----

//Variáveis para leitura da temperatura
int amostra,i=0,namostras=100;
float leitura_ntc,media=0;
float Rt, temperatura_ntc;
//Variáveis Steinhart
float A = 0.001125308852122, B = 0.000234711863267, C = 0.000000085663516;
//-----

//Leitura da tensão de saída
for (j=0; j< numsamples; j++) {
  amostra_cuk = analogRead(saida_cuk);
  media_cuk+= amostra_cuk;
  delay(10);
}
media_cuk=media_cuk/numsamples;

```

```

float tensao_saida = 3.3*(media_cuk/4095);

if(tensao_saida<1.2){goto seg;}//segurança

for (i=0; i< namostras; i++) {
  amostra = analogRead(sensorPin);
  media+= amostra;
  delay(10);
}
media=media/namostras;
leitura_ntc = 3.3*(media/4095);

Rt = (10000)*leitura_ntc/(3.3 - leitura_ntc);
Rt = log(Rt);
temperatura_ntc = 1/(A + B*Rt + C*(Rt*Rt*Rt)) - 273.15;

//Leitura das variáveis para utilizar a ponte H
int buttonState = digitalRead(sinal);
int estado = digitalRead(bobina1);

float esfria = TempSP - temperatura_ntc;
if(esfria <= -2) {
  digitalWrite(bobina1, LOW);
  digitalWrite(bobina2, LOW);

}

if (esfria >= 2){
  digitalWrite(bobina1, HIGH);
  digitalWrite(bobina2, HIGH);

}

/* //Ler botões para ajustar razão cíclica do PWM

```



```

int buttonState1 = digitalRead(pushButton1);
int buttonState2 = digitalRead(pushButton2);

//Mudar razão cíclica malha aberta
if (buttonState1 == 0) {
    aux += increment;
    if(aux>100){aux=100;}
    if(aux<0){aux=0;}
    pwmNow = 255-aux;
}
if (buttonState2 == 0) {
    aux -= increment;
    if(aux>100){aux=100;}
    if(aux<0){aux=0;}
    pwmNow = 255-aux;
} */

aux = PID_control(temperatura_ntc,TempSP, estado);//malha fechada
pwmNow = 255-aux;
PWMWrite(ledPin,255,pwmNow,50000);

//Alterar estado da ponte H
if (buttonState == HIGH ) {

    if(estado == LOW){
        digitalWrite(bobina1, HIGH);
        digitalWrite(bobina2, HIGH);
    }
    else{
        digitalWrite(bobina1, LOW);
        digitalWrite(bobina2, LOW);
    }
}
}

```

```
/*Serial.print("Sinal de comando para inverter: ");
Serial.println(buttonState);
Serial.print("Sinal na bobina: ");
Serial.println(estado);
Serial.print("Valor pwm: ");
Serial.println(aux);
Serial.print("Valor pwm invertido: ");
Serial.println(pwmNow);
Serial.print("Tensao de saida: ");
Serial.println(tensao_saida);
Serial.print("A temperatura e: ");
Serial.println(temperatura_ntc);
Serial.print("Seguranca: ");
Serial.println(seguranca);
Serial.println(" ");*/
Serial.print(temperatura_ntc);
Serial.print(" ");
Serial.println(aux);
delay(100);
}
seg:
PWMWrite(ledPin,255,255,50000);
//Serial.println(seguranca);
seguranca=0;
delay(100);
}
```

ANEXO II - Quadro de componentes

Componentes							
Conversor Ćuk		Ponte H		Driver acionamento chave		Leitura de tensão	
C1	1 μ F - 400V	Relé	Bobina 5V - Contato 250V - 15A	Resistores	22 Ω , 100 Ω , 500 Ω	Ampop	LM324M
C	2200 μ F - 100V	Transistor	BC548	Transistor	TIP31C	Resistores	1k Ω , 22 Ω , 100k Ω
L1	1,08mH	Transistor	BC546	Transistor	TIP32C	Trimpot	5k Ω
L2	56,5 μ H	Resistores	2,2k Ω	Transistor	BC548		
Mosfet	IPW65R019C7						
Diodo	CSD10120						