

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RODRIGO DO CARMO OLIVEIRA

CONVERSOR BUCK CC-CC APLICADO À TERMOCICLADORES

Alegrete-RS

2018

RODRIGO DO CARMO OLIVEIRA

CONVERSOR BUCK CC-CC APLICADO À TERMOCICLADORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jumar Luís Russi

Alegrete-RS

2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo autor através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

O48c Oliveira, Rodrigo do Carmo

Conversor Buck CC-CC Aplicado à Termocicladores /
Rodrigo do Carmo Oliveira.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,
2018.

"Orientação: Jumar Luís Russi".

1. Termociclador. 2. PCR. 3. Conversores CC-CC.
4. Buck. I. Título.

RODRIGO DO CARMO OLIVEIRA

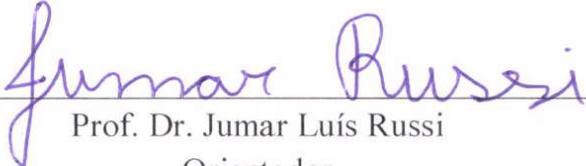
CONVERSOR CC-CC DE TOPOLOGIA BUCK APLICADO À TERMOCICLADORES

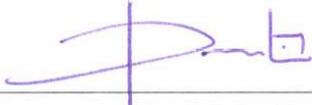
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

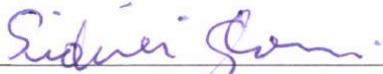
Area de Concentração: Circuitos Eletrônicos

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 4 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:


Prof. Dr. Jumar Luís Russi
Orientador


Prof. Me. Daniel Lima Lemes
UNIPAMPA


Prof. Dr. Sidinei Ghisoni
UNIPAMPA

*Aos meus pais, Adelmo Júnior e Khênya,
Por todo o amor, incentivo e compreensão,
tão essenciais para esta conquista.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Adelmo Júnior e Khênya, por todo seu amor, incentivo e por seus ensinamentos. Muito obrigado por todo seu apoio, e pela paciência que tiveram, tão fundamentais para que este sonho se tornasse realidade.

Á toda a minha família, meu alicerce, que sempre me apoia em tudo.

Á todos os amigos que fiz durante esta estada no Rio Grande do Sul, que trouxeram tantos momentos felizes, principalmente aos meus queridos amigos Andryan e Juliano, e as suas famílias, que me acolheram durante minhas situações difíceis, e compartilharam comigo diversos momentos de grande felicidade.

Ao Prof. Jumar e ao Prof. Guilherme, por todo o seu ensinamento durante a pesquisa e a realização este trabalho, que muito atenciosos e acessíveis, sempre procuravam esclarecer todas as dificuldades encontradas e suas possíveis melhorias.

A UNIPAMPA e todo os seus integrantes, que tanto contribuíram para o meu crescimento intelectual e pessoal.

Por fim, agradeço a Deus, sempre justo e bondoso, por me dar saúde e força para superar todas as dificuldades.

Obrigado!

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo”.

Winston Churchill

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é desenvolver um sistema conversor de energia para a construção de um aparelho termociclador automático, utilizado para a aplicação da técnica PCR, usada em exames de DNA. Inicialmente, será apresentado um estudo sobre a técnica PCR e sobre o funcionamento do aparelho termociclador. São apresentadas suas funções, características e seus componentes e por último, os critérios e os parâmetros de escolha do sistema eletrônico que é desenvolvido. Todos os circuitos do sistema conversor proposto são explicados teoricamente e são apresentados seus respectivos projetos, bem como a escolha dos parâmetros dos componentes utilizados. Este trabalho consta de um circuito retificador de onda completa com filtro capacitivo, um conversor buck, e um circuito de reversão de corrente (ponte H). Após o projeto dos circuitos, esses são implementados e então é construído um protótipo, com um sistema térmico semelhante aos termocicladores comerciais. São coletados dados de temperatura durante seu funcionamento que são comparados com a performance dos termocicladores comerciais.

Palavras-chave: Termociclador, PCR, conversores, buck, célula peltier.

ABSTRACT

The main goal of this undergraduate thesis is to develop a power converter system in order to build an automatic thermocycler, used for applying the PCR technique in DNA exams. Initially, a study about the PCR technique is presented, as well as the thermocycler operation. Its functions, features, components, and, lastly, the criteria and the parameters of choice of the electronic system are developed. All the circuits of the purposed converter are presented, together with the respective calculus and/or other parameter of components. The system is comprised of a full-wave rectifier circuit with capacitive filter, a buck converter and a current reverse circuit (H-bridge). After the design of the circuits, they are assembled and a prototype is constructed, with a thermal system similar to the commercial thermal cyclers. The temperature data is collected during its operation to be compared to the performance of commercial units.

Keywords: switched power supply, step-down converter, thermocycler, peltier cell

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Descrição do comportamento da molécula alvo de DNA, durante os ciclos da PCR.....	21
Figura 2 – Resultado da replicação ao final de cada ciclo da PCR.....	21
Figura 3 – Aparelho Termociclador.....	22
Figura 4 – Bloco térmico onde são dispostas as amostras.....	23
Figura 5 – Ciclos de Calor, com as temperaturas às quais as amostras são expostas.....	23
Figura 6 – Demonstração Efeito Peltier.....	24
Figura 7 – Constituição interna de uma célula Peltier típica.....	24
Figura 8 – Alteração do valor da tensão causada pelo chaveamento.....	26
Figura 9 – Topologia buck.....	27
Figura 10 – Etapa 1: chave fechada.....	27
Figura 11 – Etapa 2: chave aberta.....	28
Figura 12 – Gráficos de tensões/correntes em cada componente da topologia buck.....	29
Figura 13 – Limites de operação do conversor projetado.....	30
Figura 14 – Circuito de potência desenvolvido.....	31
Figura 15 – Transformador de núcleo toroidal utilizado.....	33
Figura 16 – Ponte Retificadora modelo GBPC3506W.....	33
Figura 17 – Demonstração do efeito pelicular, e sua redução com utilização de condutores em paralelo.....	36
Figura 18 – Indutor toroidal fabricado, comparado ao tamanho de uma moeda.....	41
Figura 19 – Resultado das medições do indutor construído.....	41
Figura 20 – Circuito térmico equivalente de um componente eletrônico.....	43
Figura 21 – Gráfico de perdas/corrente do diodo 30ETH06.....	45
Figura 22 – MOSFET IRF540.....	46
Figura 23 – Dissipador de calor modelo HS 2053 com 20mm de comprimento.....	47
Figura 24 – Circuito <i>snubber</i> RCD a ser aplicado.....	48
Figura 25 – Topologia de ponte H desenvolvida.....	49
Figura 26 – Circuito retificador para alimentação dos relés.....	50
Figura 27 – Circuito de acionamento dos relés.....	51

Figura 28 – Componentes do protótipo: Transformador (A), Microcontrolador (B), Circuito driver para MOSFET (C), Retificador e Conversor buck (D) e Ponte H (E)	53
Figura 29 – Componentes do sistema térmico do protótipo: Tampa (A), Bloco (B), Célula peltier (C), Dissipador de calor (D) e Ventoinhas (E)	54
Figura 30 – Termopar colocado no local das amostras (lado esquerdo) e no dissipador (lado direito)	55
Figura 31 – Gráfico com rampa de aquecimento do bloco	56
Figura 32 – Gráfico com rampa de resfriamento do bloco	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros Elétricos do módulo Peltier TEC1-12715.	31
Tabela 2 – Parâmetros do transformador encomendado	32
Tabela 3 – Parâmetros de projeto do conversor buck.....	34
Tabela 4 – Tabela de condutores de cobre esmaltado	37
Tabela 5 – Tabela de análise dos núcleos para indutor toroidal.	39
Tabela 6 – Parâmetros elétricos do diodo 30ETH06.....	41
Tabela 7 – Parâmetros térmicos do diodo 30ETH06.....	43
Tabela 8 – Parâmetros elétricos do MOSFET IRF540.	44
Tabela 9 – Parâmetros térmicos do MOSFET IRF540.....	45
Tabela 10 – Parâmetros de acionamento do MOSFET IRF540.....	47
Tabela 11 – Parâmetros dos relés AY1RC2.....	48
Tabela 12 – Componentes utilizados no retificador para os relés.....	49
Tabela 13 – Componentes utilizados no circuito de acionamento dos relés.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNA – Ácido Desoxirribonucleico

PCR – Reação em Cadeia da DNA Polimerase

CC – Corrente Contínua

SMPS – Switchet Mode Power Supply

MDF – Medium Density Fiberboard

LTK – Lei de Tensão de Kirchoff

PWM – Pulse Wave Modulation

AWG – American Wire Gauge

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Objetivos do Trabalho.....	17
1.2. Organização do Trabalho.....	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. A Técnica PCR.....	19
2.2. Aparelho Termociclador.....	21
2.3. Célula Peltier.....	23
2.4. Conversores Estáticos.....	24
2.4.1. Conversor Buck.....	25
3. PROJETO DO CONVERSOR.....	29
3.1. Introdução.....	29
3.2. Transformador.....	31
3.3. Retificador de Onda Completa.....	32
3.4. Conversor buck.....	34
3.4.1 Projeto dos Parâmetros do Indutor.....	34
3.4.2 Projeto Físico do Indutor.....	35
3.4.3 Projeto do Capacitor.....	41
3.4.4 Escolha do Diodo.....	41
3.4.4.1 Cálculo do Dissipador para o Diodo.....	42
3.4.5 Escolha da Chave Semicondutora.....	44
3.4.5.1 Cálculo Dissipador da Chave Semicondutora.....	45
3.4.6 Escolha dos Dissipadores.....	46
3.4.7 Circuito <i>Snubber</i>	47
3.5. Ponte H.....	48
3.5.1 Alimentação dos Relés.....	49
3.5.2 Acionamento dos Relés.....	50
3.6. Montagem do Protótipo.....	52
4. RESULTADOS.....	55

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ANEXO 1.....	61
ANEXO 2.....	62

1. INTRODUÇÃO

Uma revolução científica admirável nos estudos de Genética aconteceu em 1950, com a descoberta de que uma molécula presente no núcleo das células de todos os seres vivos, o Ácido Desoxirribonucleico (DNA, *Desoxyribinucleic Acid*), seria a estrutura chave que carrega toda a informação genética de um organismo, com destaque aos pesquisadores Watson, Crick, Wilkins e Franklin, que em 1953, demonstraram a estrutura de dupla hélice do DNA. Aparentemente simples dentro dos conhecimentos atuais, essa descoberta criou um ramo totalmente novo na ciência, a Biologia Molecular.

Outra grande revolução acontece nos anos de 1980, com o desenvolvimento da Reação em Cadeia do DNA Polimerase (PCR, *Polymerase Chain Reaction*), pelo bioquímico americano Kary Mullis, o que rendeu ao mesmo o prêmio Nobel de Química, aproximadamente 10 anos depois de sua invenção.

Antes do trabalho de Kary, os métodos utilizados para amplificar e gerar cópias de fragmentos de DNA eram demorados e trabalhosos, o que foi logo superado pela PCR, por ser uma técnica que permite realizar várias cópias de um segmento específico de DNA, com precisão e em um tempo muito menor.

Este avanço da tecnologia do DNA permitiu o diagnóstico mais rápido e seguro de algumas doenças. Exames tradicionais para detectar a tuberculose, por exemplo, que antes levavam cerca de três semanas, passaram a levar apenas dois dias. Testes com respostas negativas passaram a apresentar resultados positivos. A sensibilidade desta técnica é alta: ela é capaz de identificar a presença de material genético em pequena quantidade e permitir a quantificação de parasitos em amostras, ainda que estas sejam muito escassas (MUSEU DA VIDA, 2015).

Essa nova técnica trouxe benefícios para as mais diversas áreas, além da citada Biologia Molecular e a Patologia, Farmácia, Botânica, Medicina Forense, entre outras.

Hoje, a PCR é uma das técnicas mais comuns utilizadas em laboratórios de pesquisas que realizam análises genéticas, visto que esta técnica é utilizada em diversos exames, como:

- Sequenciamento de genes;
- Diagnóstico de doenças hereditárias;

- Identificação de impressão digital genética (usado em testes de paternidade e na medicina forense);
- Detecção de diagnóstico de doenças infecciosas;
- Criação de organismos transgênicos;
- Tipagem de tecidos;
- Clonagem;
- Controle de qualidade industrial;

Para utilizar a técnica PCR, utiliza-se um aparelho chamado termociclador automático, que realiza ciclos programados de calor, que aquece e resfria os microtubos contendo as amostras de DNA e reagentes necessários, o que faz a replicação da parte desejada da amostra.

No Brasil, os aparelhos termocicladores apresentam um preço alto (cerca de R\$ 30.000,00) por serem, em sua grande maioria, importados, o que também dificulta a manutenção dos mesmos.

A fabricação nacional deste aparelho, com um menor custo, facilitaria a aquisição e a manutenção do mesmo pelas instituições que o utilizam (Universidades, hospitais, laboratórios), além de reduzir o custo dos exames que utilizam o termociclador, trazendo benefícios também para a sociedade.

1.1. Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um conversor que possa ser utilizado na construção de um aparelho termociclador, mostrando passo a passo cada etapa do projeto do conversor.

Após a fabricação do conversor, verificar seu desempenho em um protótipo de aparelho termociclador.

E por último, este trabalho também apresenta a construção e análise de um conversor buck, ligado a uma ponte H.

1.2. Organização do Trabalho

Este trabalho está distribuído em cinco capítulos. No primeiro é exposta uma breve abordagem sobre a técnica PCR e os aparelhos termocicladores e são apresentados os objetivos do trabalho e sua organização.

No segundo capítulo, é feita uma revisão de literatura sobre a técnica PCR, abordando suas etapas de aplicação, e então apresentado as funcionalidades e especificações dos aparelhos termocicladores. É apresentada também uma revisão teórica à respeito das células peltier, e então, a teoria sobre conversores estáticos é brevemente abordada. Por fim, a topologia de conversor CC-CC buck é apresentada, apresentando suas etapas de funcionamento, seus componentes e seus respectivos comportamentos durante a operação deste conversor.

O capítulo três apresenta os parâmetros utilizados para a formulação do circuito proposto, onde é apresentada a topologia desenvolvida. Todas as etapas de projeto são detalhadas e são apresentados os resultados individuais de cada componente, e por fim, todo o sistema é alocado em um protótipo, junto de um sistema térmico semelhante aos termocicladores comerciais.

No quarto capítulo, os resultados de desempenho do protótipo são apresentados, avaliando sua performance em relação aos aparelhos disponíveis no mercado.

Por fim, no quinto e último capítulo, são feitas as considerações finais do trabalho, onde são avaliados os resultados obtidos e feitas sugestões para trabalhos futuros.

Este trabalho possui 2 anexos, o primeiro, o catálogo dos núcleos analisados para a fabricação do indutor do conversor buck e o segundo, o catálogo do dissipador de calor utilizado nos componentes deste mesmo conversor.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A Técnica PCR

A PCR é utilizada para se obter a amplificação seletiva de determinada região de uma molécula de DNA, na qual apenas uma única molécula de DNA pode servir de molde para amplificação, produzindo milhares de cópias da molécula-alvo, ou seja, é uma metodologia que se baseia na amplificação exponencial seletiva de uma quantidade reduzida de DNA de uma única célula.

Se trata de uma reação repetida ciclicamente, *in vitro* (em um tubo de ensaio), através de uma série de alterações de temperatura, o que possibilita a produção de muito cópias da região de interesse.

Os principais ingredientes de uma reação PCR são a Taq Polimerase (enzima DNA polimerase tipicamente usada na PCR), primers (sequência curta de nucleotídeos que fornece um ponto de partida para a síntese de DNA, e que determina a região do DNA que será copiada), a amostra DNA molde e nucleotídeos (blocos que compõem o DNA).

Segundo Wilkin (2014), estes ingredientes são inseridos em um tubo, juntamente com cofatores de que a enzima precisa, e passam por repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento que permitem que o DNA seja sintetizado.

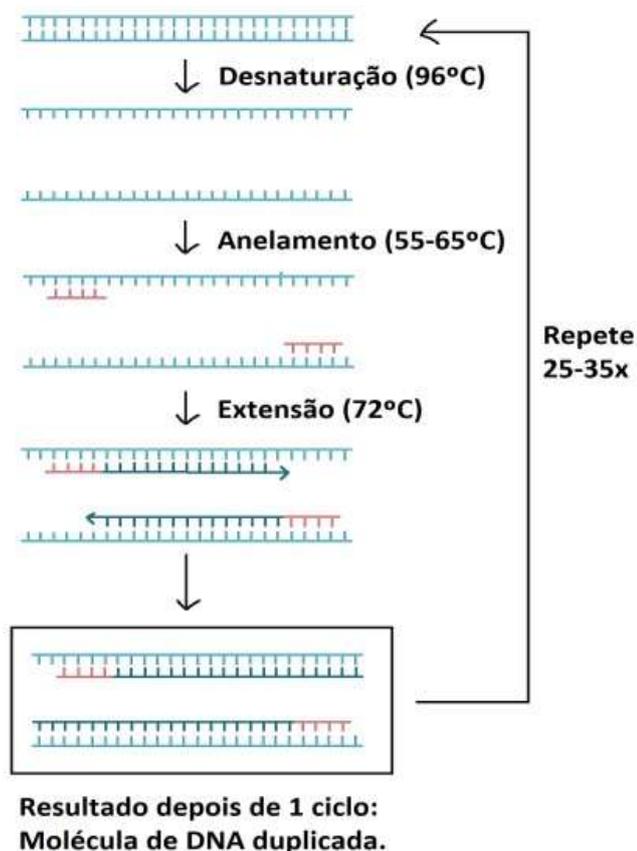
As etapas básicas são:

Desnaturação (96 °C): Aquece-se a reação intensamente para desnaturar (separar) as fitas de DNA. Isso proporciona um molde de fita simples para a próxima etapa.

Anelamento (55-65 °C): Resfria-se a reação para que os primers possam se ligar às suas sequências complementares no DNA molde de fita simples.

Extensão (72 °C): Eleva-se a temperatura da reação para que a Taq polimerase estenda os primers, sintetizando novas fitas de DNA.

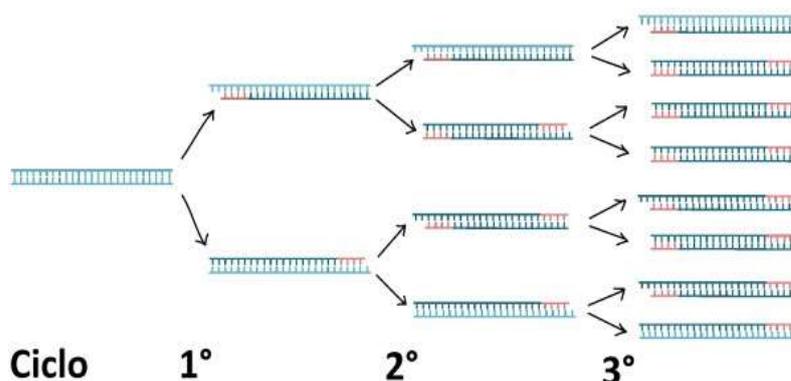
Figura 1 - Descrição do comportamento da molécula alvo de DNA, durante os ciclos da PCR.



Fonte: Adaptado de Khan Academy.

Ainda segundo Wilkin (2014), este ciclo se repete de 25 à 35 vezes em uma reação típica de PCR, que geralmente ocorre em 2 a 4 horas, dependendo do comprimento da região de DNA a ser copiada, gerando de poucas até bilhões de cópias.

Figura 2 - Resultado da replicação ao final de cada ciclo da PCR.



Fonte: Adaptado de Khan Academy.

Para que seja possível utilizar esta técnica, é necessário um equipamento eletrônico denominado termociclador, que faz ciclos de calor, mantendo a amostra a determinadas temperaturas por um período de tempo pré-estabelecido em cada fase do ciclo, o que faz com que as moléculas de DNA se repliquem.

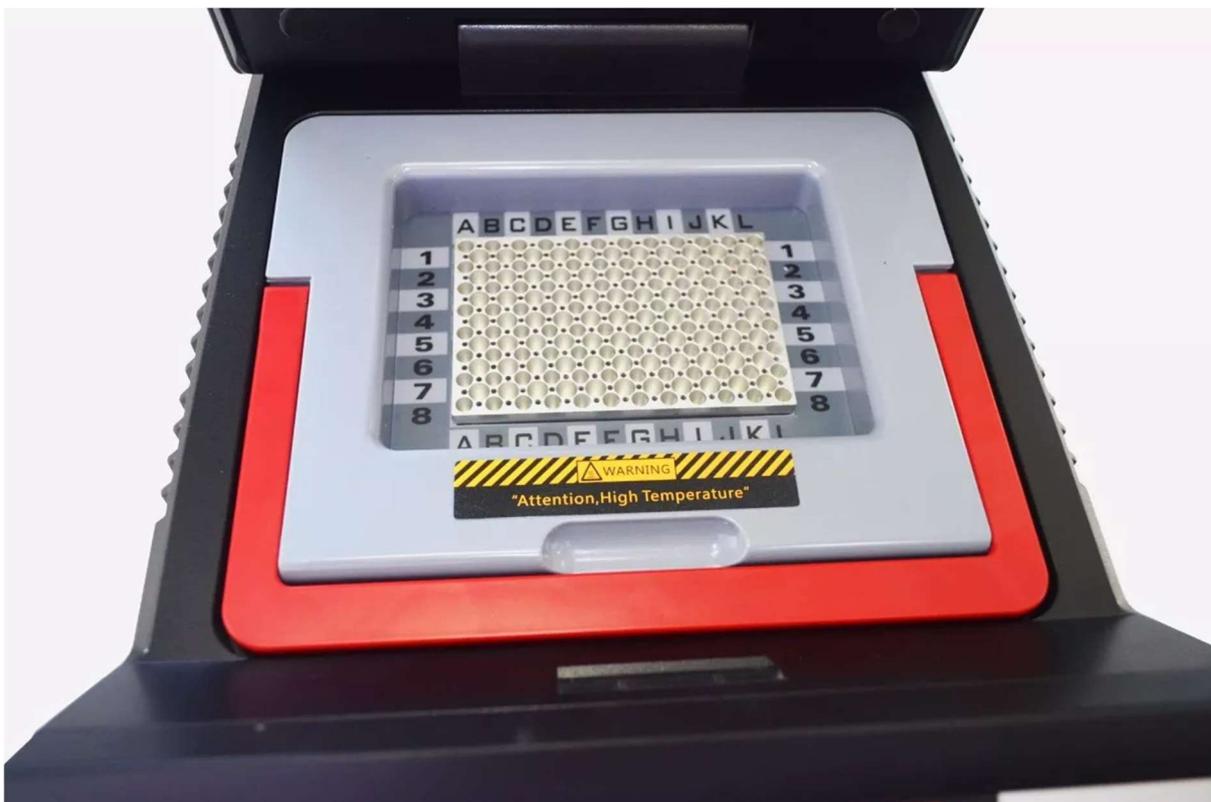
2.2. Aparelho Termociclador

Termociclador, ou máquina de PCR, é um equipamento que automatiza o processo de amplificação de uma sequência específica de DNA a partir de uma pequena amostra. Este equipamento possui um bloco térmico com orifícios onde tubos com as amostras e reagentes são inseridos, e então isolados por uma caixa térmica.

Figura 3 – Aparelho Termociclador



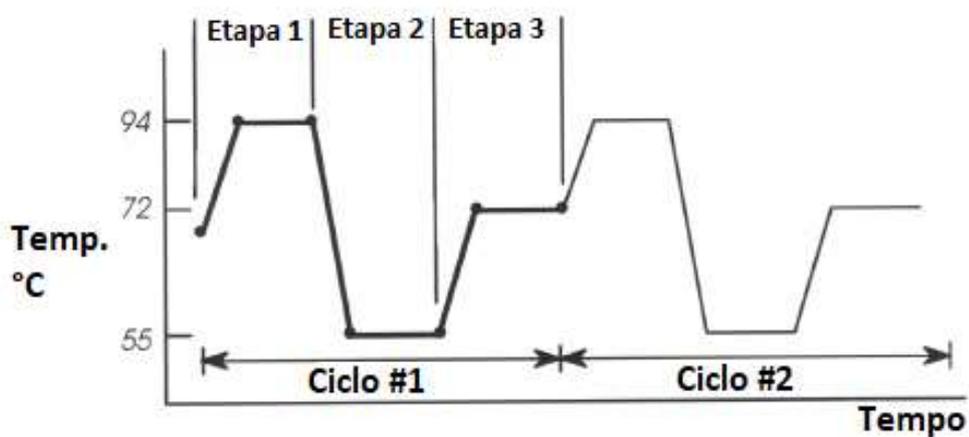
Figura 4 - Bloco Térmico onde são dispostas as amostras.



Fonte: Mercado Livre

O termociclador eleva e reduz a temperatura do bloco nos ciclos de calor com tempo e temperaturas pré-programados, realizando os ciclos da PCR.

Figura 5 - Ciclos de Calor, com as temperaturas às quais as amostras são expostas.

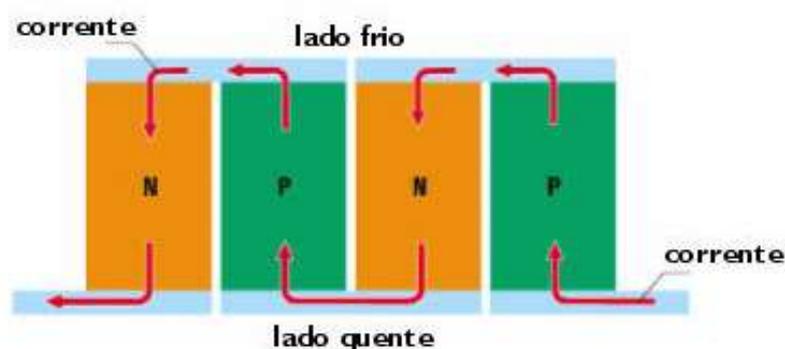


Fonte: Adaptado de GeneAmp® PCR System 9600 User's Manual, p. 81.

2.3. Célula Peltier

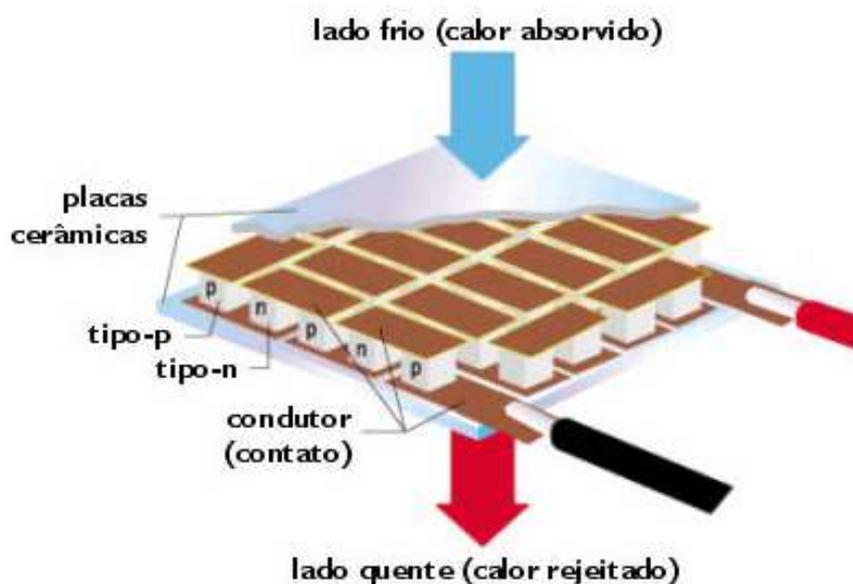
Os aparelhos termocicladores tem como atuador os módulos ou células Peltier (também conhecidas como pastilhas termoelétricas), que, de acordo com Equipamentos Danvic (2018), são pequenas unidades que operam como bombas de calor. Sua operação é baseada no “Efeito Peltier”, onde há um efeito aquecedor ou resfriador quando uma corrente elétrica (corrente contínua) passa através de dois condutores de materiais distintos. As pastilhas Peltier contêm uma série de elementos do tipo-p ou tipo-n, agrupados em pares que agem como os condutores dissimilares.

Figura 6 - Demonstração Efeito Peltier.



Fonte: Equipamentos Danvic

Figura 7 - Constituição interna de uma célula Peltier típica.



Fonte: Equipamentos Danvic.

Esta série de elementos é soldada entre duas placas cerâmicas resultando em uma ligação eletricamente em série, e termicamente em paralelo, conforme a figura 7, acima.

Nela, quando uma tensão elétrica é aplicada, o calor se move de um lado para o outro e caso os polos elétricos sejam invertidos, a mesma também inverte o fluxo de calor, podendo resfriar ou aquecedor algum objeto pretendido.

Segundo Moura (2010), em sua tese de doutorado, o uso da tecnologia peltier disponível nos módulos tem um grande número de vantagens, como as descritas abaixo:

- Não utiliza partes mecânicas móveis para refrigeração
- Aquece ou resfria dependendo apenas da polaridade da alimentação, ideal para aplicações que exigem o controle eletrônico preciso da temperatura como lasers de diodo utilizados em telecomunicações.
- Dispensa o uso de gases refrigerantes, tecnologia 100% estado sólido no que implica alta confiabilidade e baixos níveis de ruído.
- Permite a refrigeração pontual (localizada).
- Funcionam em qualquer orientação com/sem gravidade diferentemente dos refrigeradores baseados em compressores.

Devido a essas vantagens, a tecnologia peltier se apresenta como a melhor opção para os termocicladores, pois atende às necessidades dos ciclos de calor que a técnica PCR necessita.

Tendo em vista que o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um conversor para um aparelho termociclador, deve-se considerar as características elétricas da célula Peltier para escolher a topologia de conversor a ser desenvolvido.

Ressalta-se que as pastilhas termoelétricas funcionam com corrente contínua (CC), que permitem variações (*ripple*) limitadas a $\pm 10\%$, geralmente possuem uma baixa resistência e trabalham com baixa tensão e alta corrente.

2.4. Conversores Estáticos

De acordo com Petry (2001), os conversores CC-CC são circuitos formados por chaves semicondutoras, que atuam como interruptores e elementos passivos, como indutores e capacitores, que controlam o fluxo de potência da entrada para saída da fonte.

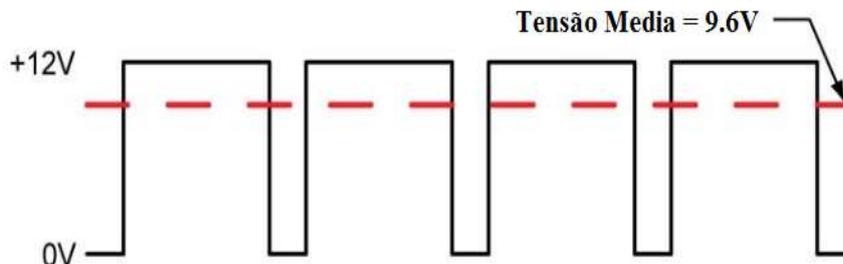
Segundo Braga (2010), as fontes chaveadas, comutadas ou do inglês SMPS (*Switched Mode Power Supply*), são fontes que controlam a tensão sobre uma carga abrindo e fechando um circuito comutador de modo a regular a tensão desejada em função da relação entre os períodos que a chave conduz e bloqueia.

Além disso, essas fontes consistem na solução ideal para os casos em que se necessita alto rendimento e tamanho reduzido, substituindo as tradicionais fontes lineares, pois, uma fonte linear típica tem um rendimento inferior a 50%. Por outro lado, as fontes chaveadas chegam a alcançar 98% de eficiência.

O conceito básico que envolve a operação de uma fonte chaveada, como seu próprio nome indica, é comutar uma tensão, ou seja, ligar e desligar um circuito de modo que a média do valor comutado corresponda ao valor de tensão desejado.

A figura 8 demonstra esse princípio de funcionamento. A linha em preto mostra a tensão de entrada sendo recortada, e em vermelho a tensão de saída, com valor diferente da tensão de entrada.

Figura 8 - Alteração do valor da tensão causada pelo chaveamento.



Fonte: adaptado de mecaweb.com

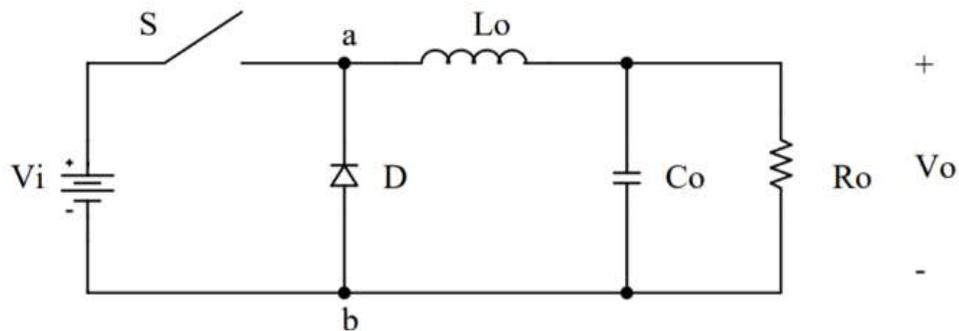
2.4.1. Conversor Buck

O conversor *buck* (conversor abaixador ou *step-down*) é um circuito eletrônico utilizado para converter uma tensão CC em outra tensão CC de valor mais baixo, ou seja, é caracterizado por ter a tensão de saída menor que a tensão de entrada.

Estes conversores são amplamente utilizados, por exemplo, para reduzir a tensão das baterias de laptops, (12-24V) fornecendo a tensão necessária para o funcionamento dos processadores.

A figura 9 demonstra a topologia *buck*.

Figura 9 - Topologia buck.

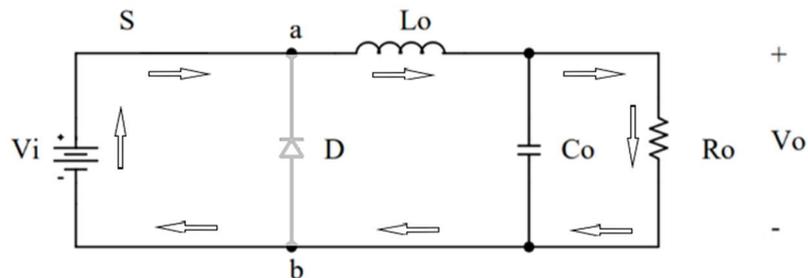


Fonte: Petry (2001, p. 5).

Segundo Petry, (2001), esse conversor opera em duas etapas diferentes:

1ª Etapa ($0, T_{on}$): S está conduzindo a corrente que circula por L_o e pela saída. Nesta etapa, V_i fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o . Esta etapa é demonstrada na figura 10.

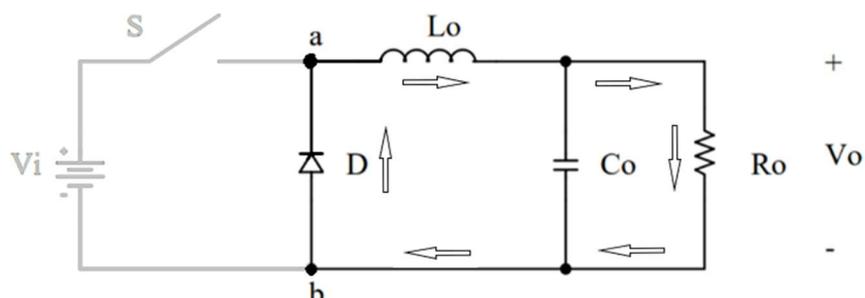
Figura 10 - Etapa 1: chave fechada.



Fonte: Adaptado de Petry (2001, p. 5).

2ª Etapa (T_{on}, T_S): S está bloqueado. No instante de abertura de S o diodo D entra em condução. A energia do indutor é transferida para a carga, isto é, o indutor é desmagnetizado. A figura 11 apresenta o funcionamento nesta etapa.

Figura 11 - Etapa 2: chave aberta.



Fonte: Petry (2001, p. 5).

A chave eletrônica opera ligando e desligando dentro de um determinado período de tempo dado pelo inverso da frequência de chaveamento.

$$T_s = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

A razão entre o intervalo de comutação (T_s) e o intervalo em que a chave permanece ligada (T_{on}) é chamada de razão cíclica (D).

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.2)$$

O conversor buck apresenta, após a chave eletrônica, filtros compostos por um diodo, capacitor e indutor, que filtram a forma de onda recortada, apresentando uma onda CC aproximadamente constante na saída do mesmo.

Após a filtragem realizada pelo indutor e capacitor, a tensão na saída deste conversor será proporcional à Razão Cíclica. Por exemplo, caso a razão cíclica seja 80%, a tensão de saída deverá ser idealmente 80% do valor da tensão de entrada, como apresentado na figura 8.

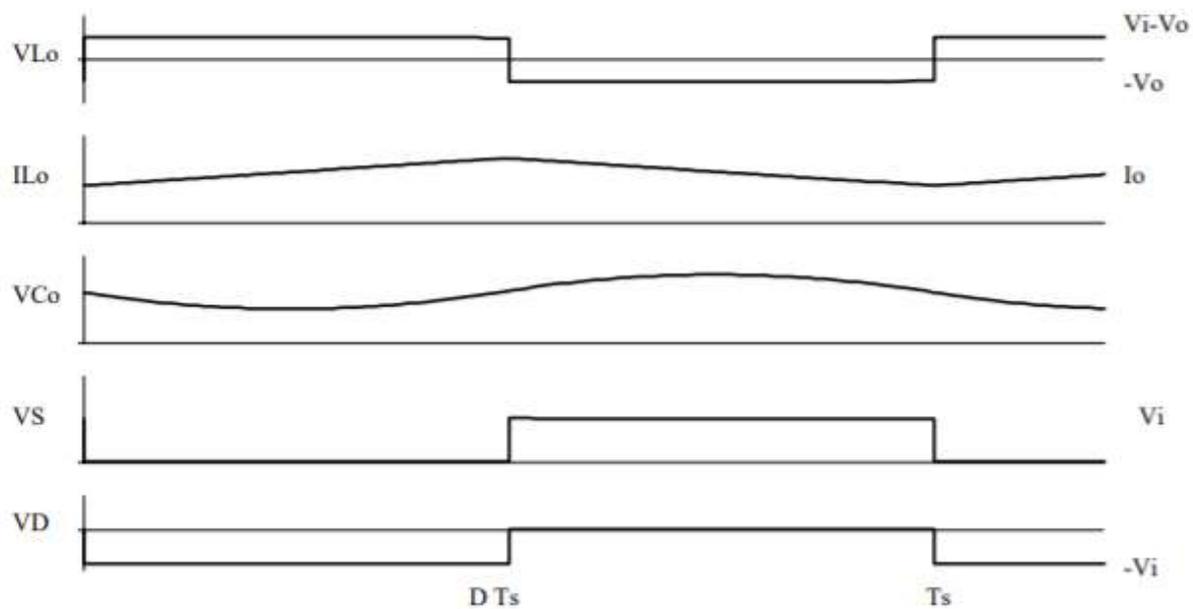
$$V_o = D \cdot V_i \quad (2.3)$$

A figura 12 demonstra os gráficos das tensões em cada componente da topologia buck.

A escolha dessa topologia deu-se ao fato de o controle do mesmo ser linear, e de ser um dos conversores mais simples e eficientes para o rebaixamento de uma tensão CC.

Neste trabalho, assume-se que o conversor trabalhará apenas no modo de condução contínua, em que a corrente do indutor não chega à zero durante o funcionamento do conversor.

Figura 12 - Gráficos das tensões/correntes em cada componente da topologia buck.



Fonte: Petry (2001, p. 6).

3. PROJETO DO CONVERSOR

3.1. Introdução

Conforme foi visto na equação 2.3, verifica-se que a tensão de saída é proporcional à razão cíclica.

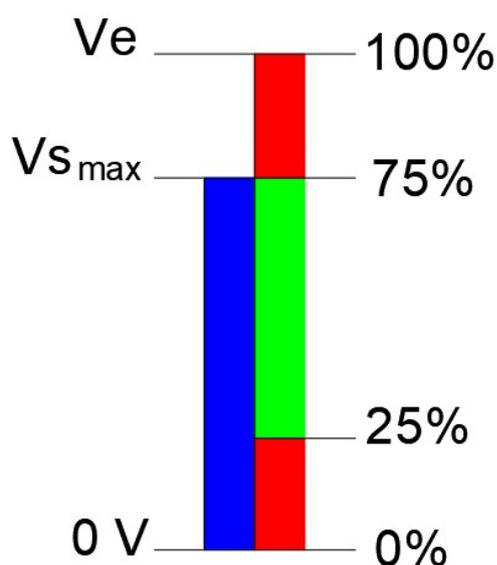
Para realizar o controle da tensão de saída, futuramente, será utilizado um microcontrolador. A resolução da razão cíclica dependerá da quantidade de bits dos registradores PWM (*Pulse Wave Modulation*) desse.

Por exemplo, caso seja utilizado um microcontrolador com um registrador PWM de 8 bits, teremos a possibilidade de dividir a razão cíclica em 256 partes, indo de 0 a 255, passos inteiros.

Assim, o valor do acréscimo de tensão causado será dado pelo valor da tensão de entrada dividido por 255. Logo, quanto menor a tensão de entrada for, mais preciso será o ajuste da tensão de saída deste conversor.

Com o intuito de evitar que o conversor trabalhe no modo descontínuo, quando a corrente no indutor chega à zero, limita-se a razão cíclica mínima em 25%, e, como as perdas ôhmicas aumentam com a tensão, limita-se a razão cíclica máxima em 75%.

Figura 13 - Limites de operação do conversor projetado.



Fonte: autoria própria.

Assim, os parâmetros do conversor foram baseados na figura 13, onde a tensão V_e é a tensão de entrada no conversor, e $V_{s_{max}}$ é a tensão de saída máxima do mesmo. A parte verde representa a faixa de variação de tensões que o conversor irá operar.

Como o intuito deste conversor é alimentar o atuador de um protótipo de aparelho termociclador, ou seja, a célula Peltier, tem-se por base os parâmetros elétricos do módulo Peltier TEC1-12715, para desenvolver o circuito de potência.

Os parâmetros elétricos deste módulo estão na tabela 1 abaixo.

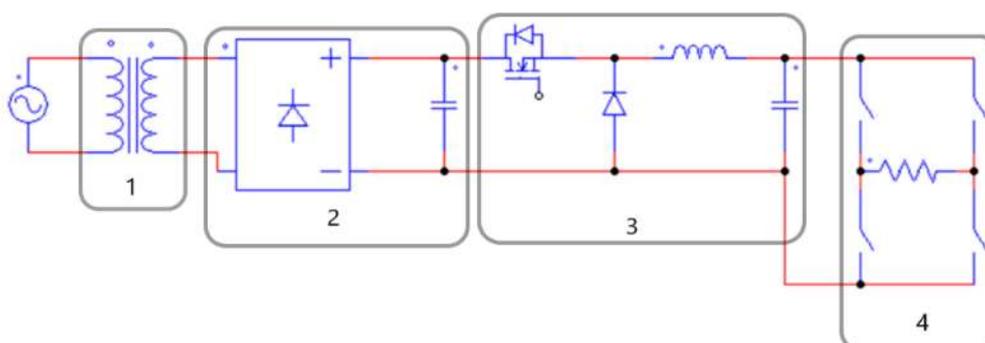
Tabela 1 - Parâmetros Elétricos do módulo Peltier TEC1-12715.

Parâmetro	Valor	Valor
Temperatura da Face Quente	27 °C	50 °C
Diferença de Temperatura Máxima entre as faces da célula Peltier	70 °C	79°C
Tensão Máxima	16 V	17.2 V
Corrente Máxima	15 A	15 A
Potência Máxima	150,2 W	164,2 W
Resistência	0.80 Ω	0.88 Ω
Oscilação Máxima		$\pm 10\%$

Fonte: autoria própria.

O circuito de potência será composto pelos componentes numerados na figura 14.

Figura 14 - Circuito de potência desenvolvido.



Fonte: autoria própria.

A figura 14 mostra o circuito que este trabalho propõe desenvolver, sendo:

- 1- Transformador;
- 2- Retificador de Onda Completa;
- 3- Conversor *buck*;
- 4- Ponte H;

3.2. Transformador

São necessários 3 níveis de tensão para a operação do protótipo, sendo:

- 5 V para a alimentação do circuito ponte H;
- 12 V para o acionamento do MOSFET do conversor buck;
- 20 V para a entrada do conversor, necessários para a operação dentro dos limites demonstrados na figura 13.

Por isso, foi encomendado da empresa “Hortrafo Hortec Transformadores”, a fabricação de um transformador com núcleo Toroidal, conforme os parâmetros especificados na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Parâmetros do transformador encomendado.

Parâmetro	Valor
Tensão Primário	220 V
Tensão Secundário 1	20 V, 15 A
Tensão Secundário 2	12 V, 1 A
Tensão Secundário 3	5 V, 1 A
Frequência de Operação	60 Hz

Fonte: autoria própria.

A saída principal deste transformador apresentou o valor de 22 V_{CA}.

Figura 15 - Transformador de núcleo toroidal utilizado.



Fonte: autoria própria.

3.3. Retificador de Onda Completa

Os retificadores, são circuitos elétricos elaborados para converter a corrente alternada em corrente contínua, e, nesta aplicação, utilizou-se um retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo, para converter a tensão alternada na saída do transformador, para uma tensão contínua, que irá alimentar o conversor.

Para a fabricação do retificador, foi utilizada uma ponte de diodos, modelo GBPC3506W, com capacidade de conduzir correntes de até 35 A, e tensão reversa de 600 V, que apresenta capacidade superior às necessidades deste projeto.

Figura 16 - Ponte retificadora modelo GBPC3506W.



Fonte: Google.

Para o cálculo do capacitor deste retificador, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$C = \frac{P_{out}}{f(V_{pk}^2 - V_{c_{min}}^2)n} \quad (3.1)$$

A potência de saída P_{out} é de 150,2 W, conforme a tabela 1. A frequência f é de 60 Hz e o rendimento n é igual a 95%.

O filtro foi projetado para ser o mais linear possível, com uma variação de tensão (ripple) de 5%.

Logo:

$$V_{pk} = 22\sqrt{2} = 31,1 \text{ V} \quad (3.2)$$

$$V_{c_{min}} = 0,95 \cdot V_{pk} = 29,5 \text{ V} \quad (3.3)$$

Onde, V_{pk} é o valor da tensão de pico do capacitor, e $V_{c_{min}}$ o menor valor da tensão no capacitor.

Substituindo os valores das equações 3.2 e 3.3 na equação 3.1, foi obtido o valor de um capacitor de 27.924,23 μF , o que apresenta um valor muito elevado, pois o maior capacitor disponível comercialmente é de 4700 μF , logo, foi utilizado apenas um capacitor eletrolítico de 4700 μF , 35 V, e foi realizada uma compensação da variação da tensão de entrada com o sistema de controle do protótipo, monitorando o seu valor e aumentando a razão cíclica do conversor para atingir a tensão de saída desejada.

Após o processo de retificação, a tensão CC obtida na saída do retificador foi de 30,5 V.

3.4. Conversor buck

Tabela 3 - Parâmetros de projeto do conversor buck.

Parâmetro	Valor
Tensão de Entrada	30,5 V
Tensão de Saída Máxima	20 V
Frequência de Operação	31.372,55 Hz
Corrente Máxima	15 A
Razão Cíclica Máxima	0,65

Fonte: autoria própria.

A tabela 3 mostra os parâmetros para o projeto do conversor buck.

A tensão na entrada do conversor está acima dos 20 V desejados. Logo, como a tensão máxima da célula peltier é 15V, a razão cíclica é limitada no máximo em 0,5.

Esta limitação na razão cíclica de operação irá reduzir a precisão do controle da tensão de saída do conversor.

O conversor poderá variar a tensão de saída em passos de $30,5/255 = 0,12$ V, o que, para esta aplicação, ainda representa um valor adequado.

3.4.1 Projeto dos Parâmetros do Indutor

Segundo Barbi (2001), o valor do indutor (L) do conversor buck é calculado pela equação:

$$L = \frac{V_{in}}{4f\Delta i_{Lmax}} \quad (3.4)$$

Onde:

V_{in} – Tensão de entrada do Conversor (30,5 V);

f – Frequência de chaveamento do conversor (31.372,55 Hz);

Δi_{Lmax} – Máxima variação de corrente admissível (A);

Segundo Barbi (2001), temos que:

$$\Delta i_{Lmax} = 0,4 \cdot I_{med} \quad (3.5)$$

Assumindo como I_{med} metade da corrente máxima, tem-se que:

$$\Delta i_{Lmax} = 3 A \quad (3.6)$$

$$L = 81 \mu H \quad (3.7)$$

3.4.2 Projeto Físico do Indutor

O projeto do indutor requer atenção especial nos projetos de conversores, pois o mesmo tem fundamental importância no funcionamento destes.

Segundo Barbi (2002), os problemas estão normalmente relacionados à operação em elevadas frequências de chaveamento, o que pode resultar na inserção de uma série de elementos parasitas, como: efeito pelicular, indutâncias de dispersão, capacitâncias parasitas entre os enrolamentos e espiras, entre outros.

Para a construção do indutor deste conversor, será utilizado um núcleo Toroidal, pois estes apresentam maior eficiência se comparado com os demais formatos.

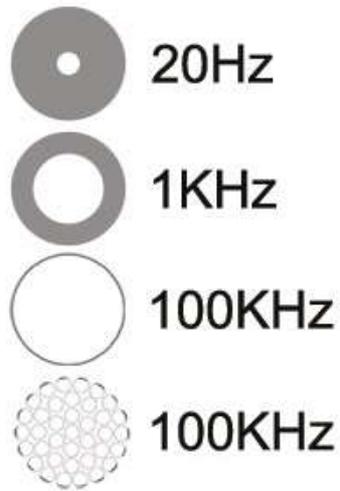
Como a corrente de trabalho deste conversor é relativamente elevada, houve uma preocupação com o tamanho do núcleo adequado, pois os condutores que serão enrolados no mesmo, apresentarão bitola elevada.

A alta frequência utilizada no chaveamento do conversor faz com que a corrente flua com maior densidade nas extremidades do condutor, fenômeno este conhecido como efeito pelicular ou efeito *skin*.

Para a redução deste efeito, utiliza-se uma disposição de condutores em paralelo, conforme ilustrado na figura 17.

Devido a esses fatos, o método para a fabricação deste indutor baseia-se na seleção de um núcleo com área interna suficiente para as espiras.

Figura 17 - Demonstração do efeito pelicular, e sua redução com utilização de condutores em paralelo.



Fonte: BD Loops (2016).

Assim, são seguidos os seguintes passos:

a) Cálculo da área total ocupada pelos condutores:

A área total ocupada pelos condutores (S_T) depende da densidade de corrente máxima permitida pelo condutor e da corrente eficaz da entrada, sendo expressa por:

$$S_T = \frac{I}{J_{max}} = \frac{15}{450} = 0,0333 \text{ cm} \quad (3.8)$$

Onde:

I – Corrente máxima de operação do conversor (A);

J_{max} – Densidade máxima de corrente (A/cm²);

O valor de J_{max} é padronizado, pois é o valor dado na tabela AWG (*American Wire Gauge*), mostrado na tabela 4.

b) Cálculo do diâmetro máximo do cobre do condutor:

O diâmetro máximo do condutor (d_m), é dado por:

$$d_m = 2 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}} = 0,0745 \text{ cm} \quad (3.9)$$

Onde:

ρ – Resistividade do condutor de cobre ($1,72 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2/\text{m}$);

μ_0 – permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$);

μ_r – permeabilidade magnética relativa do condutor (1);

f – Frequência de chaveamento do conversor (31.372,55 Hz);

c) Seleção do condutor na tabela AWG:

Seleciona-se na tabela AWG, a tabela 4, um valor inferior ao valor encontrado para diâmetro máximo do cobre do condutor, que, segundo a segunda coluna da tabela, é o AWG 21.

Tabela 4 – Tabela de condutores de cobre esmaltado.

AWG	Diâmetro do Cobre (cm)	Área do Cobre (cm ²)	Diâmetro com Isolamento (cm)	Área com Isolamento (cm ²)	Ω/cm (20 °C)	Ω/cm (100 °C)	Corrente para $J = 450 \text{ A}/\text{cm}^2$ (A)
10	0,259	0,05262	0,273	0,058572	0,000033	0,000044	23,679
11	0,231	0,041729	0,244	0,046738	0,000041	0,000055	18,778
12	0,205	0,033092	0,218	0,037309	0,000052	0,00007	14,892
13	0,183	0,026243	0,195	0,029793	0,000066	0,00008	11,809
14	0,163	0,020811	0,174	0,0238	0,000083	0,000111	9,365
15	0,145	0,016504	0,156	0,019021	0,000104	0,00014	7,427
16	0,129	0,013088	0,139	0,015207	0,000132	0,000176	5,89
17	0,115	0,010379	0,124	0,012164	0,000166	0,000222	4,671
18	0,102	0,008231	0,111	0,009735	0,000209	0,00028	3,704
19	0,091	0,006527	0,1	0,007794	0,000264	0,000353	2,937
20	0,081	0,005176	0,089	0,006244	0,000333	0,000445	2,329
21	0,072	0,004105	0,08	0,005004	0,00042	0,000561	1,847
22	0,064	0,003255	0,071	0,004013	0,00053	0,000708	1,465
23	0,057	0,002582	0,064	0,003221	0,000668	0,000892	1,162
24	0,051	0,002047	0,057	0,002586	0,000842	0,001125	0,921
25	0,045	0,001624	0,051	0,002078	0,001062	0,001419	0,731
26	0,04	0,001287	0,046	0,001671	0,001339	0,001789	0,579
27	0,036	0,001021	0,041	0,001344	0,001689	0,002256	0,459
28	0,032	0,00081	0,037	0,001083	0,002129	0,002845	0,364
29	0,029	0,000642	0,033	0,000872	0,002685	0,003587	0,289
30	0,025	0,000509	0,03	0,000704	0,003386	0,004523	0,229
31	0,023	0,000404	0,027	0,000568	0,004269	0,005704	0,182
32	0,02	0,00032	0,024	0,000459	0,005384	0,007192	0,144
33	0,018	0,000254	0,022	0,000371	0,006789	0,00907	0,114
34	0,016	0,000201	0,02	0,0003	0,00856	0,011437	0,091
35	0,014	0,00016	0,018	0,000243	0,010795	0,014422	0,072
36	0,013	0,000127	0,016	0,000197	0,013612	0,018186	0,057
37	0,011	0,0001	0,014	0,00016	0,017165	0,022932	0,045

d) Cálculo do número de condutores em paralelo:

Com a definição do condutor a ser utilizado e da seção total de condutor é possível determinar o número de condutores (n_c) em paralelo para reduzir o efeito pelicular, assim, tem-se:

$$n_c = \frac{S_T}{S_C} = \frac{0,03333}{0,006244} = 5,34 \quad (3.10)$$

Sendo S_C a área do condutor com isolamento.

Sendo assim, utilizou-se 6 condutores dispostos em paralelo.

e) Seleção do Núcleo:

De posse do conjunto de parâmetros calculados anteriormente, compara-se o número de espiras e a área que elas ocuparam em cada modelo de núcleo para selecionar o tamanho de núcleo mais adequado.

Foram analisados os núcleos Toroidais de Pó de Ferro 026, da Magmattec, que suportam grande fluxo magnético (1,38T) e que são indicador para operações em filtros CC para frequência até 50 kHz, sendo adequados para a aplicação no conversor desenvolvido neste trabalho. O catálogo encontra-se no Anexo 1.

Todos os modelos foram comparados com o número de espiras, e a área que estas ocupariam no interior do núcleo, para poder-se escolher o tamanho do núcleo adequado.

O número de espiras é calculado por:

$$n = \sqrt{\frac{L}{Al}} \quad (3.11)$$

Onde:

n – Número de espiras.

Al – Indutância Efetiva (dado adquirido no catálogo).

A tabela 5 mostra o comparativo das áreas internas disponíveis e o número de espiras necessárias para cada núcleo, para alcançar o valor desejado de $81 \mu H$.

A coluna teste lógico apresenta o valor 1 para os núcleos que possuem área interna (área de janela) com o dobro do tamanho ocupado na parte interna do núcleo pelas espiras, pois como tem-se 6 fios em paralelo, será mais difícil acomodar as espiras uniformemente.

Tabela 5 – Tabela de análise dos núcleos para indutor toroidal.

Nº de Voltas	PRODUTO	AL	ÁREA FIOS (cm ²)	Diâm. Int.(mm)	ÁREA DISP. (cm ²)	TESTE LOGICO
50	MMT026T1305	33	1,56	7,7	0,47	0
41	MMT026T1506	50	1,28	8,53	0,57	0
42	MMT026T2006	46	1,31	12,6	1,25	0
30	MMT026T2711	93	0,94	14,5	1,65	0
32	MMT026T3311	81	1,00	19,8	3,08	1
30	MMT026T3811	96	0,94	21,5	3,63	1
29	MMT026T4015	100	0,91	24,1	4,56	1
22	MMT026T4718	169	0,69	24,1	4,56	1
32	MMT026T7713	80	1,00	49	18,86	1
23	MMT026T7725	160	0,72	49	18,86	1
25	MMT026T10216	131	0,78	57,2	25,70	1
18	MMT026T10233	262	0,56	57,2	25,70	1
24	MMT026T13220	149	0,75	78,2	48,03	1
17	MMT026T13240	298	0,53	78,2	48,03	1
14	MMT026T16551	434	0,44	88,9	62,07	1

Fonte: autoria própria.

O núcleo foi selecionado comparando o menor número de espiras necessário, a maior área interna disponível e o custo de cada núcleo. Assim, foi escolhido o núcleo MMT026T4015.

f) Teste de Saturação do Núcleo.

Para verificar se este núcleo não irá saturar, realizou-se o cálculo da densidade de fluxo magnético:

$$B = \frac{n \cdot i \cdot Al \cdot 10^{-4}}{A \cdot 10^{-4}} \quad (3.12)$$

Onde A é a área da seção reta deste núcleo, valor obtido do catálogo.

Os valores A e Al , são retirados direto da tabela, não sendo realizada nenhuma conversão de unidade ou multiplicados pelos prefixos do SI.

Substituindo os valores, encontra-se o valor de 0,4 T, ou seja, o núcleo não é saturado, pois segundo o catálogo, estes núcleos suportam até 1,38 T.

g) Fabricação do indutor:

Os condutores foram trançados entre si, e então, o número de espiras calculadas foi enroladas.

Figura 18 - Indutor toroidal fabricado, comparado ao tamanho de uma moeda.



Fonte: autoria própria.

h) Medição do Valor do Indutor:

Figura 19 - Resultado das medições do indutor construído.



Fonte: autoria própria.

O valor de L_s indica o valor da indutância medido, e o de R_s , o valor da resistência do mesmo.

3.4.3 Projeto do Capacitor

Segundo Barbi (2001), o capacitor de saída do conversor buck é calculado por:

$$C = \frac{\Delta i L}{4\pi f \Delta V_c} \quad (3.13)$$

Assume-se que a variação de tensão (*ripple*) no capacitor será de 1%. Substituindo na equação, tem-se que:

$$C = 19 \mu F \quad (3.14)$$

Por disponibilidade do laboratório, utilizou-se um capacitor eletrolítico de 440 μF , que pode operar até 35 V.

3.4.4 Escolha do Diodo

Quando a chave semicondutora está bloqueada, o diodo conduz a corrente que passa pelo indutor, que é decrescente.

Assim, o diodo escolhido deverá possuir capacidade de conduzir a corrente nominal do conversor, resistir à tensão de pico reversa e ter tempo de disparo compatível com a frequência de chaveamento.

Assim, escolhe-se o diodo retificador de recuperação rápida modelo 30ETH06, com parâmetros elétricos descritos na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros elétricos do diodo 30ETH06.

Parâmetro	Valor
Tensão de pico reversa máxima	600 V
Corrente máxima	30 A
Tempo de recuperação	28 ns

Fonte: autoria própria.

3.4.4.1 Cálculo do Dissipador para o Diodo

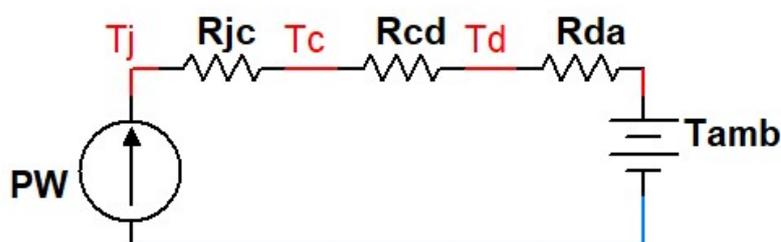
A corrente que circula em um componente eletrônico produz calor. Nos diodos e tiristores o calor é gerado tanto durante o período de condução quanto na comutação. Esse calor gerado deve ser dissipado para o ambiente, pois, caso a temperatura do componente exceda os limites máximos permitidos, pode ocorrer a queima do mesmo.

Também, a máxima corrente de operação possível é limitada apenas pela temperatura da junção do mesmo.

Assim, a escolha do dissipador é de importância prática fundamental.

Para realizar o cálculo térmico, faz-se um circuito elétrico equivalente, representado na figura 20 abaixo.

Figura 20 – Circuito térmico equivalente de um componente eletrônico.



Fonte: autoria própria.

sendo as suas grandezas:

PW – Potência térmica produzida pela corrente que circula no componente sendo transferida ao ambiente (W).

Rjc – resistência térmica entre a junção do componente e sua capsula ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

Rcd – resistência térmica entre o componente e o dissipador ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

Rda – resistência térmica entre o dissipador e o ambiente ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

Tj – Temperatura da junção ($^{\circ}\text{C}$).

Tc – Temperatura da cápsula ($^{\circ}\text{C}$).

Td – Temperatura do dissipador ($^{\circ}\text{C}$).

Tamb – Temperatura Ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

A resistência térmica do dissipador (R_{da}) que se deve utilizar é dada pela equação:

$$R_{da} = \frac{T_j - T_a}{PW} - R_{jc} - R_{cd} \quad (3.15)$$

Os valores das resistências térmicas R_{jc} e R_{cd} são fornecidas no catálogo do fabricante e os valores de T_j e PW são retirados dos gráficos também contidos no catálogo. O valor da temperatura ambiente é escolhido pelo projetista.

Com o valor de R_{da} , escolhe-se um dissipador com a resistência menor mais próxima.

Para o diodo, obtêm-se do catálogo os seguintes parâmetros:

Tabela 7 - Parâmetros térmicos do diodo 30ETH06.

Parâmetro	Valor
T_a	25 °C
R_{jc}	0,7 °C/W
R_{cd}	0,2 °C/W
T_j	175 °C
PW	5 W

Fonte: autoria própria.

Para a escolha do valor de PW , primeiro calcula-se a corrente que passa pelo diodo.

Segundo Batschauer (2014), a corrente média no diodo é dado por:

$$i_d = (1 - D)i \quad (3.16)$$

Onde:

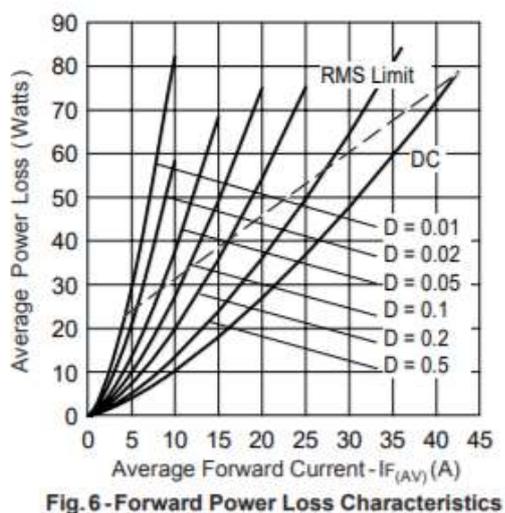
D – Razão Cíclica de operação do diodo.

i – Corrente no diodo (mesma do conversor).

E então o valor de PW pode ser retirado do gráfico da figura 21, que compara o valor de corrente em condução do diodo (Eixo X) com a Perdas (Eixo Y).

A curva com razão cíclica $D = 0,02$ foi escolhida, pois esta curva representa um dos piores casos.

Figura 21– Gráfico de perdas/corrente do diodo 30ETH06



Fonte: Catálogo International Rectifier diodo 30ETH06.

Como para $D=0,75$ tem-se uma corrente de 15 A, a equação 3.13 mostra que a corrente média no diodo será de 3,75.

Substituindo os valores da tabela 7 na equação 3.15, tem-se que é necessário um dissipador com $14,1 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

3.4.5 Escolha da Chave Semicondutora

Segundo Pomílio (2013), para a seleção da chave semicondutora escolhida, utiliza-se como regra básica, em baixa tensão: MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*) e nos outros casos: IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

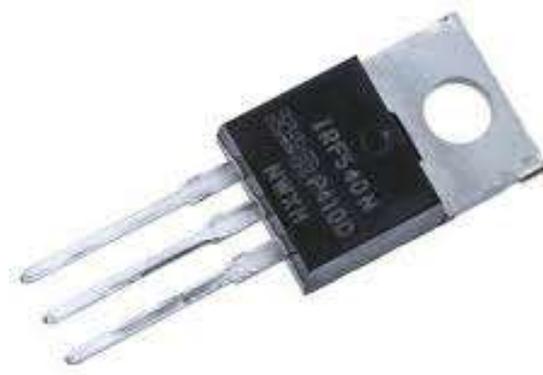
Assim, por disponibilidade em laboratório, foi escolhido para a chave semicondutora do conversor o MOSFET IFR540, com especificações mostradas na tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros elétricos do MOSFET IRF540.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão entre dreno e fonte	V_{DS}	100 V
Corrente contínua no dreno	I_D	20 A

Fonte: autoria própria.

Figura 22 – MOSFET IRF540.



Fonte: Google.

3.4.5.1 Cálculo Dissipador da Chave Semicondutora

Utilizando o mesmo procedimento realizado para cálculo do dissipador para o diodo, substituem-se os parâmetros térmicos do MOSFET, dispostos na tabela 9, na equação 3.15.

Tabela 9 - Parâmetros térmicos do MOSFET IRF540.

Parâmetro	Valor
T_a	25 °C
R_{jc}	1 °C/W
R_{cd}	0,5 °C/W
T_j	175 °C
R_{ds}	0,044 Ω

Fonte: autoria própria.

Diferente do catálogo do diodo, o catálogo do MOSFET IRL540N não apresenta o valor da potência dissipada, mas, encontra-se nele o valor da resistência interna do mesmo, descrito na tabela 9 como R_{ds} , sendo assim, pode-se calcular a potência por:

$$PW = I_{max}^2 \cdot R_{ds} \quad (3.17)$$

$$PW = 15^2 \cdot 0,044 \quad (3.18)$$

$$PW = 9,9 \text{ W} \quad (3.19)$$

Substituindo os valores na equação 3.15, tem-se o resultado igual a 13,65 °C/W.

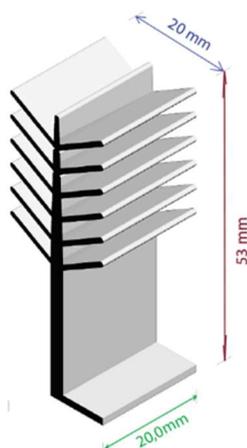
3.4.6 Escolha dos Dissipadores

Foi escolhido o modelo HS 2053, do fabricante HS dissipadores, para o uso nos componentes. O catálogo do mesmo encontra-se no anexo 2 deste trabalho.

Este modelo de dissipador apresenta resistência térmica de 4,22 °C/W para cada 4 polegadas.

Assim, instala-se tanto no diodo quanto no MOSFET, dois dissipadores deste modelo com 20 mm de comprimento que possuem resistência térmica de aproximadamente 9,5 °C/W.

Figura 23 – Dissipador de calor modelo HS 2053 com 20mm de comprimento.



Fonte: Rei dos Dissipadores.

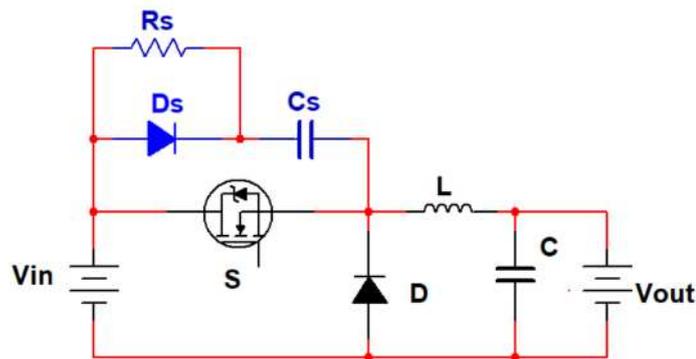
3.4.7 Circuito *Snubber*

Snubbers são pequenos circuitos inseridos em conversores estáticos de potência, em paralelo ou em série com a chave semicondutora, para controlar os efeitos produzidos pelas reatâncias intrínsecas do circuito.

Com o projeto adequado do *snubber*, o MOSFET apresentará uma menor dissipação de potência média e picos menores de tensão, além de impedir que o limite de variação de tensão seja ultrapassado.

Utiliza-se um *snubber* RC em paralelo ao MOSFET do conversor, conforme apresentado na figura 24.

Figura 24 - Circuito *snubber* RCD a ser aplicado.



Fonte: autoria própria.

Segundo Barbi (2001), tem-se que:

$$C_s = \frac{I_{max} \cdot (t_r + t_f)}{V_{in}} \quad (3.20)$$

Onde:

C_s – Capacitor para *snubber* (F);

I_{max} – Corrente máxima de operação do conversor (15 A);

V_{in} – Tensão de entrada no conversor (30,5 V);

$$R_s < \frac{t_{on}}{3C_s} \quad (3.21)$$

Onde:

R_s – Resistor para *snubber* (Ω);

A tabela 10 abaixo mostra os parâmetros do MOSFET IRL540, utilizados para o dimensionamento do *snubber*.

. Tabela 10 –Parâmetros de acionamento do MOSFET IRL540.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tempo de crescimento da corrente de coletor (<i>rise-time</i>)	t_r	35 ns
Tempo de decrescimento da corrente de coletor (<i>fall-time</i>)	t_f	35 ns
Tempo de entrada em condução	t_{on}	11 ns

Fonte: autoria própria.

Substituindo os valores da tabela 10 nas equações 3.20 e 3.21, tem-se que,

$$C_s = 35 \text{ nF} \text{ e } R_s < 0,314 \Omega \quad (3.22)$$

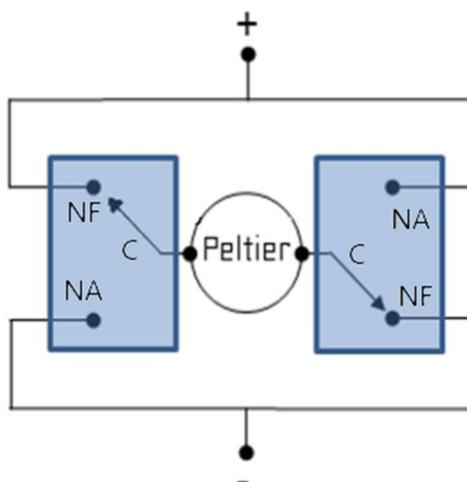
Foi utilizado o diodo 1N4148, com tempo de recuperação reversa de 4 ns.

3.5. Ponte H

Para o desenvolvimento do circuito ponte H foram utilizados dois relés, do modelo AY1RC2, conforme ilustrado na figura 25 abaixo. Os símbolos de + e – representam a tensão de saída do conversor buck.

A tabela 11 mostra os parâmetros dos relés utilizados.

Figura 25 – Topologia de ponte H desenvolvida.



Fonte: adaptado de TecnoMelque.

Tabela 11 – Parâmetros dos relés AY1RC2.

Parâmetro	Valor
Tensão Nominal da Bobina	12 V
Corrente Nominal da Bobina	30 mA
Resistência da bobina	400 Ω
Tensão Nominal do Contato	24 Vcc
Corrente Nominal do Contato	15 A

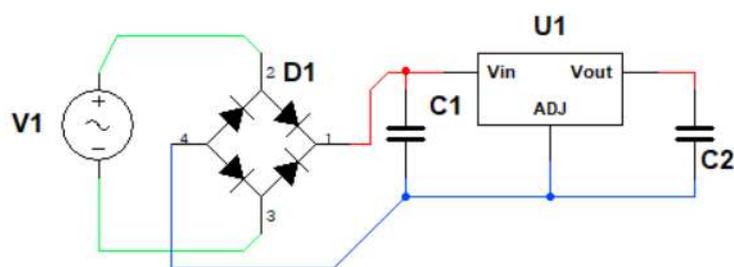
Fonte: autoria própria.

O valor da resistência dos contatos é desprezível.

3.5.1 Alimentação dos Relés

Para realizar a alimentação do circuito de acionamento das bobinas dos relés, foi desenvolvido o circuito da figura 26.

Figura 26 - Circuito retificador para alimentação dos relés.



Fonte: autoria própria.

Os retificadores de onda completa monofásicos com filtro capacitivo, como o da figura 26, realizam a conversão de corrente alternada, vinda do transformador, para corrente contínua.

A tensão V_1 tem o valor de 12 V_{CA} e como o processo de retificação tem como saída o valor de pico, além de uma queda de 1,4 V, causada pelos dois diodos de silício em série na ponte retificadora, estima-se o valor de tensão no capacitor C_1 de:

$$V_{c1} = (12 * \sqrt{2}) - 1,4 \quad (3.23)$$

Logo, a tensão estimada no capacitor C_1 é de 15,57 V e como foi preciso 12 V, foi colocado um regulador de tensão.

Os componentes deste circuito estão dispostos na tabela 12.

Tabela 12 – Componentes utilizados no retificador para os relés.

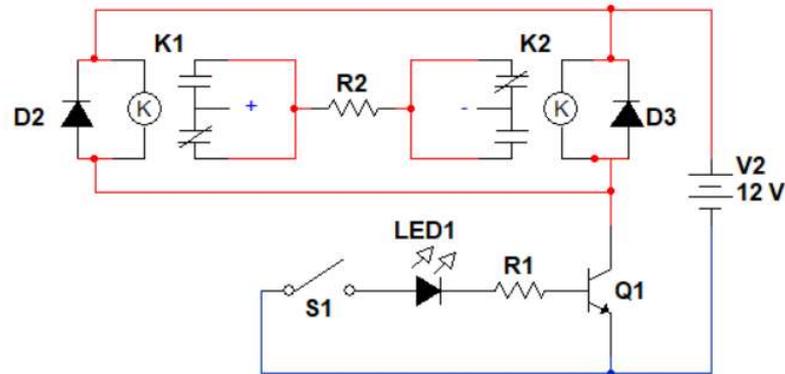
Componente	Descrição	Valor
V1	Saída do Transformador Toroidal	12 V
D1	Ponte Retificadora DF08M	1 A
C1	Capacitor Eletrolítico	220 μ F
U1	Regulador de Tensão L7812	12 V
C2	Capacitor Eletrolítico	220 μ F

Fonte: autoria própria.

3.5.2 Acionamento dos Relés

Para o acionamento dos relés, foi desenvolvido o circuito ilustrado na figura 27.

Figura 27 - Circuito de acionamento dos relés.



Fonte: autoria própria.

A chave S1 representa a porta digital de um microcontrolador, com saída de 5 V, o LED1 foi colocado para mostrar o sentido que a corrente está percorrendo. Se a ponte H está acionada, o LED estará acesso.

O componente R2 representa a célula Peltier.

Como a resistência da bobina limita a corrente que circula pelo coletor do transistor, foi calculado R1 para que o mesmo permitisse que o LED1 acendesse, e depois, verificado se tal corrente na base do transistor ainda seria capaz de acioná-lo, alimentando as bobinas do relé.

Assim, foi feito o seguinte cálculo, conforme a LTK:

$$V_{s1} - V_{led1} - R_1 * I_{led1} - V_{BE} = 0 \quad (3.24)$$

Onde:

V_{s1} – Tensão da porta do microcontrolador (5 V);

R_1 – Resistor na base do transistor;

Os componentes utilizados, com os dados retirados de seus catálogos, estão dispostos na tabela 13.

Tabela 13 – Componentes utilizados no circuito de acionamento dos relés.

Componente	Descrição	Valor	
LED1	LED Azul Fosco	V_{led1}	2,76 V
	5mm	I_{led1}	20 mA
Q1	Transistor NPN	V_{BE}	0,77 V
	BD135	h_{fe}	92

Fonte: autoria própria.

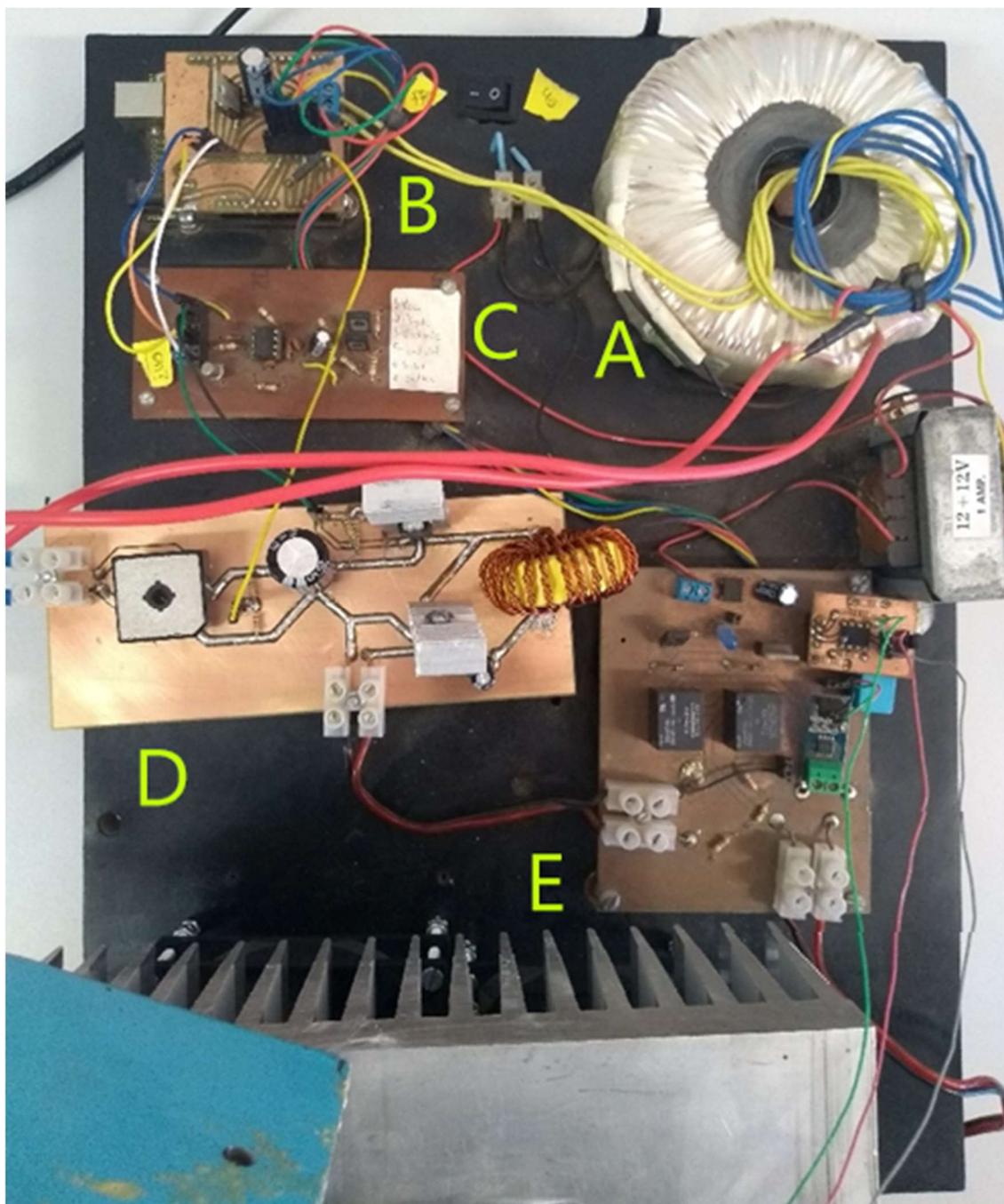
Substituindo os valores da tabela 13 na equação 3.20, encontra-se o valor de 73,5 Ω . Por disponibilidade no laboratório, foi utilizado um resistor de 80 Ω .

3.6. Montagem do Protótipo

Na construção do protótipo, todas as placas de circuito impresso e demais componentes foram colocados sobre uma peça retangular de MDF (*Medium-Density Fiberboard*), coberta com manta de borracha de 10 mm de espessura, conforme demonstrado na figura 28.

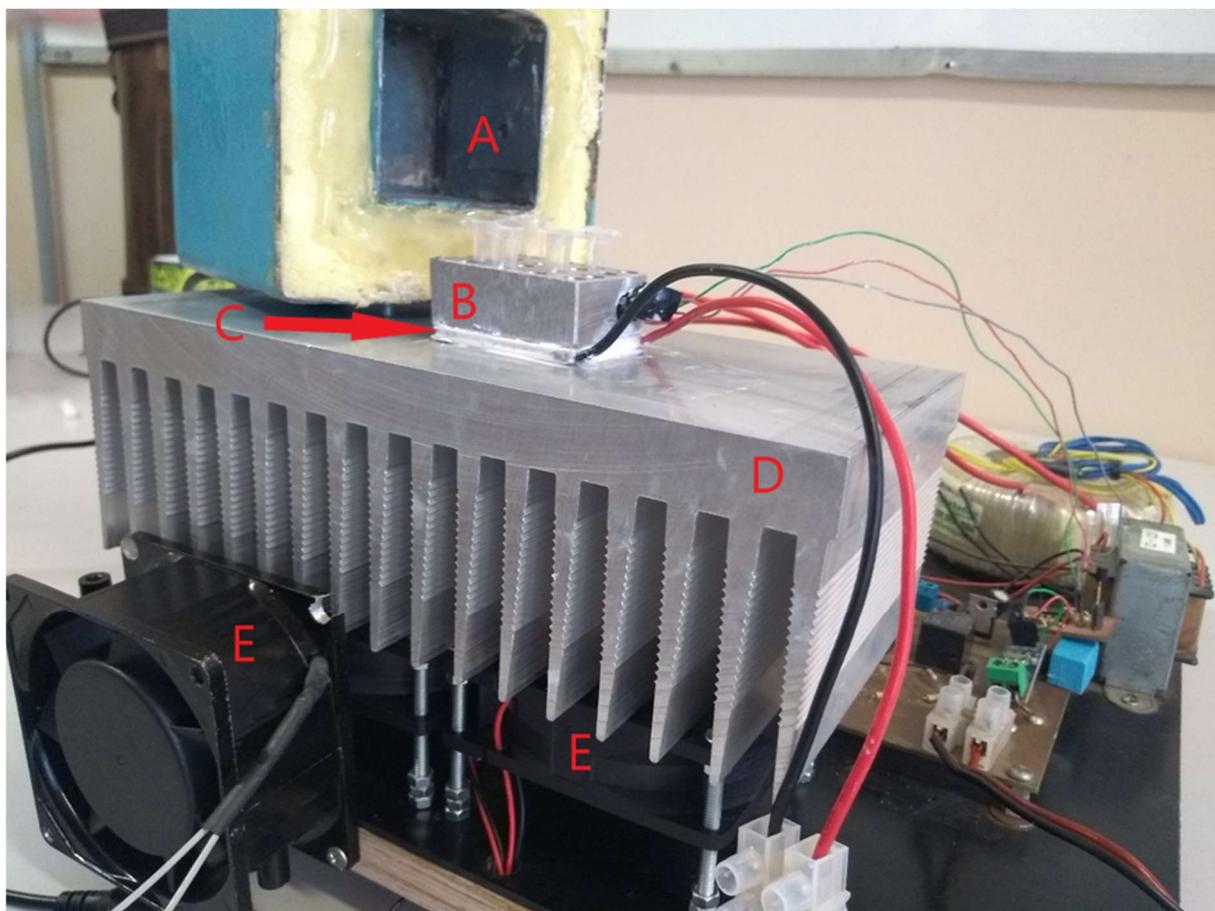
Fabricou-se um bloco de alumínio, com furações para alocar 25 amostras de 0,25 ml, colocados sobre a célula peltier e ambas colocadas em cima de um dissipador de calor, modelo HS 21575, com 110 mm de comprimento. Colocou-se também três ventoinhas, para refrigerar esse e, por fim, colocou-se uma tampa com isolamento térmica, para evitar a perda de calor do bloco de alumínio para o ambiente.

Figura 28 – Componentes do protótipo: Transformador (A), Microcontrolador (B), Circuito driver para MOSFET (C), Retificador e Conversor buck (D) e Ponte H (E).



Fonte: autoria própria.

Figura 29 – Componentes do sistema térmico do protótipo: Tampa (A), Bloco (B), Célula peltier (C), Dissipador de calor (D) e Ventoinhas (E).

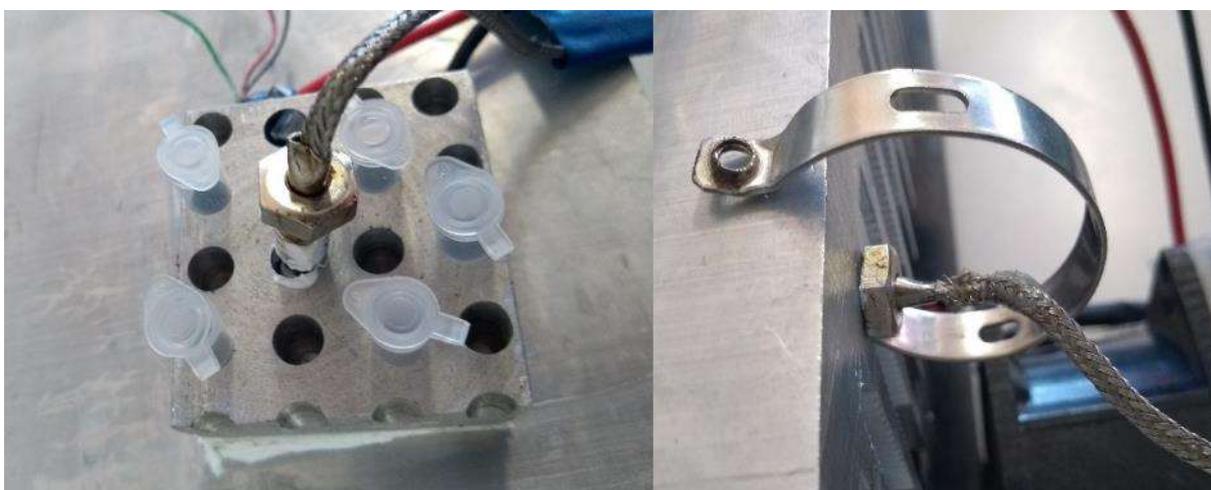


Fonte: autoria própria.

4. RESULTADOS

Para monitorar o desempenho deste protótipo, colocaram-se dois termopares do tipo K, sendo o primeiro dentro do bloco térmico, para verificar se este sistema conseguiria alcançar as temperaturas necessárias aos ciclos da PCR, e o segundo, no dissipador, para verificar seu desempenho durante o funcionamento do protótipo.

Figura 30 – Termopar colocado no local das amostras (lado esquerdo) e no dissipador (lado direito).

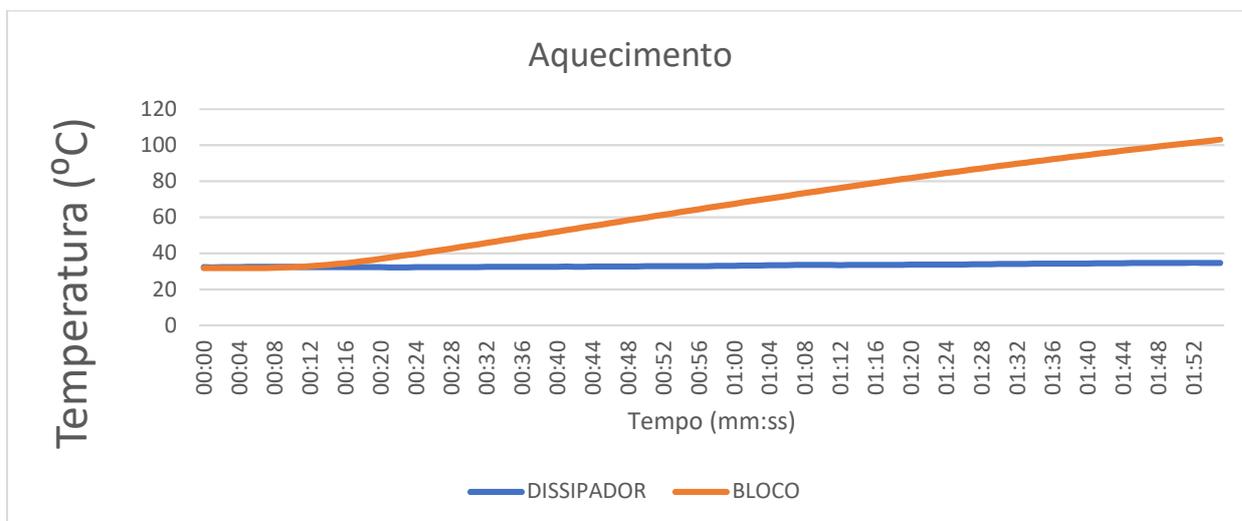


Fonte: autoria própria.

Realizou-se então um teste de aquecimento, mantendo-se a tensão de alimentação da célula peltier em seu limite, de 15 V, para a verificação da maior velocidade de aquecimento possível.

A figura 31 mostra o gráfico com os dados obtidos.

Figura 31 – Gráfico com rampa de aquecimento do bloco.



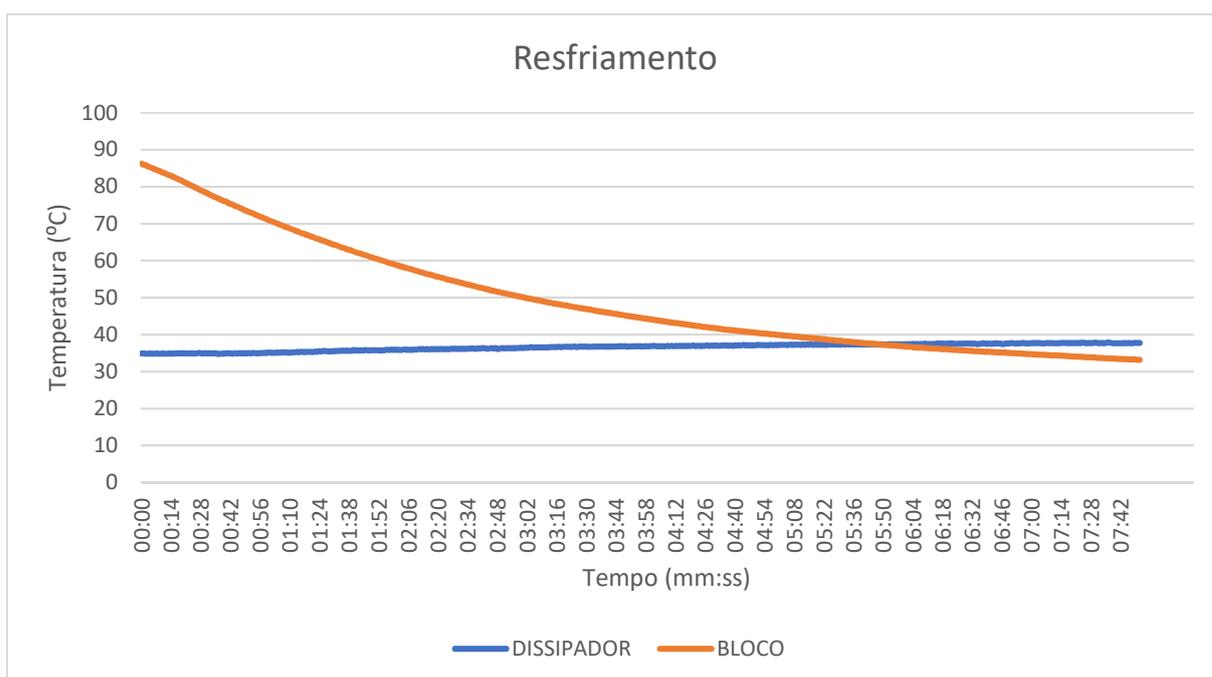
Fonte: autoria própria.

Observou-se que o protótipo alcança a temperatura suficiente para os ciclos da PCR, com uma velocidade de aquecimento máxima de $0,62 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$, e que o dissipador se manteve em temperatura ambiente.

Após o aquecimento, o circuito ponte H foi acionado para o sentido oposto de corrente, e manteve-se a tensão em 15 V.

A figura 32 mostra o gráfico com os dados da rampa de resfriamento obtida.

Figura 32 – Gráfico com rampa de resfriamento do bloco.



Fonte: autoria própria.

Com a análise dos dados da figura 32, verificou-se uma velocidade de resfriamento de 0,11 °C/s.

Além disso, foi verificado que há uma pequena variação da temperatura no dissipador de calor.

O protótipo alcança os níveis de temperatura para a aplicação da técnica PCR, logo, os circuitos desenvolvidos atenderam seu objetivo.

Porém, está abaixo do desempenho dos termocicladores comerciais, que possuem taxa de aquecimento e resfriamento em média de 2 °C/s.

Verificou-se também que o sistema térmico do protótipo funcionou de forma satisfatória, visto que não aqueceu, durante as rampas de aquecimento e resfriamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, houve um erro no dimensionamento do transformador, pois não foi previsto o aumento do valor eficaz de tensão após a retificação. Contudo, tal erro foi contornado, reduzindo os intervalos de razão cíclica no qual o conversor irá operar.

Além disso, o nível de capacitância calculado para o retificador de onda completa apresentou um valor muito alto, tornando difícil a fabricação de uma placa de circuito impresso com tais valores, devido ao grande tamanho e número de capacitores a serem utilizados. Para contornar este problema, a tensão na entrada do conversor é monitorada, e então realizada a compensação na razão cíclica para uma possível diferença do valor requerido na saída.

Os resultados obtidos demonstraram que os circuitos desenvolvidos, mesmo com mudanças de parâmetros dos projeto iniciais, funcionaram conforme o esperado e assim, o protótipo alcança as temperaturas necessárias para a aplicação da técnica PCR, mas de forma ineficiente, pois a baixa taxa de aquecimento e resfriamento torna a técnica significativamente mais lenta que dos termocicladores disponíveis no mercado.

O protótipo aqui construído apresentou taxas de aquecimento e de resfriamento muito abaixo dos 3° C/s dos aparelhos disponíveis no mercado. Tal diferença deve-se ao fato da escolha da célula peltier utilizada no protótipo, bem como a construção de todo conjunto térmico (caixa térmica, bloco onde ficam as amostras) não ter sido projetado adequadamente.

Como sugestões para continuidade do trabalho, sugerem-se os seguintes itens:

- O aumento da potência da célula peltier, ou a colocação de células em paralelo, para aumentar a taxa de variação de temperatura das amostras;
- O desenvolvimento de um sistema de controle para manter as temperaturas dos ciclos da PCR no bloco térmico;
- Desenvolver uma interface humano-máquina para facilitar a operação do operador do protótipo;
- A inserção de componentes destinados à proteção elétrica dos circuitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, Newton. **Como funcionam as Fontes Chaveadas (ART1448)**. Disponível em: < <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/8397-como-funcionam-as-fontes-chaveadas-art1448>>. Acesso em: 03 ago. 17.

BRAGA, Newton. **Fontes chaveadas – Revisando Conceitos Básicos (ART711)**. Disponível em: < <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/novos-componentes/52-artigos-tecnicos/artigos-diversos/5549-art711>>. Acesso em 03 ago. 17.

COELHO, Roberto. **Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos**. Florianópolis, 2008.

DANVIC, Equipamentos. **Perguntas Mais Frequentes sobre Pastilhas Termoelétricas e o Efeito Peltier**. Disponível em: <<http://www.peltier.com.br/index.php?url=faq>> Acesso em: 14 nov. 18

DA VIDA, Museu. **Termociclador**. Museu da Vida, 2015. Disponível em: <<http://www.museudavida.fiocruz.br/index.php/museologico/objeto-em-foco/termociclador>>. Acesso em: 14 nov. 18

KHAN ACADEMY. **Reação em Cadeia da Polimerase (PCR)**. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/biology/biotech-dnatechnology/dna-sequencing-pcr/electrophoresis/a/polymerase-chain-reaction-pcr>. Acesso em: 6 jul. 2017.

MARIS, Deivid. **Carregador de Baterias Baseado em um Conversor Buck para Aplicação em Sistemas Ininterruptos de Energia**. Fortaleza, 2012.

MOURA, José. Aplicações Tecnológicas do Efeito Peltier. In:., **Filmes Nanométricos de FeN e AlN Crescidos por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. Natal, 2010.

PETRY, Clóvis. **Introdução aos Conversores CC-CC**. Florianópolis, 2001.

POMILIO, José. **Eletrônica de Potência**. Campinas, 2014. Disponível em: <www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/hist.pdf>. Acesso em: 03 ago. 17.

SILVA, Guilherme. **Projeto e Análise Teórico-Experimental de um Retificador Monofásico com Correção do Fator de Potência**. Alegrete, 2011.

TUCKER, John. Low Power DC/DC Applications. **Understanding output voltage limitations of DC/DC buck convertes**. Analog Applications Journal, 2008. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slyt293/slyt293.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2018.

TURNELL, Mathew. **Modelagem, Simulação e Controle de um módulo termoelétrico de Peltier**. Campina Grande, 2013.

WILKIN, Elie. **Biotechnology and forensic science advanced**. 2016. Disponível em: <<http://www.ck12.org/biology/Biotechnology-and-Forensic-Science/lesson/Biotechnology-and-Forensic-Science-Advanced-BIO-ADV/>>. Acesso em: 14 nov. 18

ANEXO 1



Núcleos Toroidais

Pó de Ferro - 026

Características Gerais

- 1) Permeabilidade Relativa: 75
- 2) Perdas maiores do que o material 052
- 3) Grande variedades de tamanhos
- 4) $B_{sat} = 1,38T$

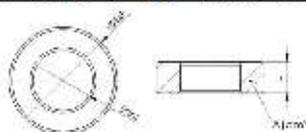
APLICAÇÕES

- Indutores de filtros CC: frequência < 50 kHz, filtros de Modo Diferencial em 60 Hz, indutores para Dimmers de luz e indutores PFC (f<50kHz).

ESPECIFICAÇÕES

CÓDIGO PEÇA	PRODUTO	AL [nH/esp ²]	Diam. Ext. (ØExt) [mm]	Diam. Int. (ØInt) [mm]	ALTURA (H) [mm]	L [cm]	A [cm ²]	V [cm ³]	As [cm ²]	Massa [g]
1.01.0016	MMT026T1305	33	12,7	7,7	4,83	3,19	0,112	0,358	8,88	2,52
1.01.0017	MMT026T1508	50	15,2	8,53	5,94	3,74	0,187	0,609	9,84	4,9
1.01.0018	MMT026T2008	46	20,2	12,6	8,35	5,14	0,231	1,19	15,5	8,33
1.01.0019	MMT026T2711	93	26,9	14,5	11,1	6,49	0,659	4,28	31	29,96
1.01.0020	MMT026T3311	81	33	19,8	11,1	8,28	0,698	5,78	42,2	40,46
1.01.0021	MMT026T3811	96	38,4	21,5	11,1	9,38	0,887	8,31	53,2	58,17
1.01.0022	MMT026T4015	100	39,9	24,1	14,5	10,1	1,06	10,7	63,2	74,9
1.01.0023	MMT026T4718	189	46,7	24,1	18	11,2	1,88	21	89,2	147
1.01.0024	MMT026T7713	80	77,2	49	12,7	19,8	1,68	33,4	173	233,8
1.01.0025	MMT026T7725	180	77,2	49	25,4	19,8	3,38	67	223	469
1.01.0026	MMT026T10218	131	102	57,2	16,5	25	3,46	86,4	301	604,8
1.01.0027	MMT026T10233	262	102	57,2	33	25	6,85	171	384	1197
1.01.0028	MMT026T13220	149	132	78,2	20,3	33,1	5,24	173	496	1211
1.01.0029	MMT026T13240	298	132	78,2	40,6	33,1	10,5	347	629	2429
1.01.0216	MMT026T16551	434	165	88,9	50,8	39,9	18,4	734	986	6902

* Outras dimensões estão disponíveis sob consulta.



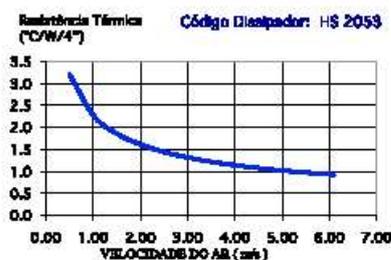
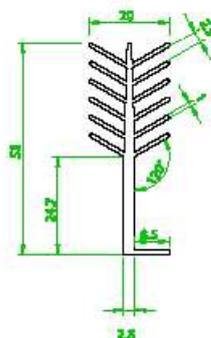
ANEXO 2

Código: HS 2053

Logo aqui para o lado 22

Perímetro: 366 mm
Resistência Térmica: 4,22 °C / W / 4"

lançamento em estoque



Atenção: todas as especificações contidas neste catálogo são apenas referenciais para fins informativos das características de calor e não devem ser consideradas como limites de operação. Os valores de resistência térmica representam o desempenho teórico do dissipador, sem levar em consideração as condições reais de instalação (condições reais de instalação e também sobre a superfície de dissipação em um caso real). Consulte-nos em caso de dúvidas. Sempre recomendamos consultar a especificação técnica para obter mais detalhes, em português.

www.hedwepetrova.com.br www.hedwepetrova.com.br