

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA**

AUGUSTO BRAGA DE ALMEIDA

**ESTUDO DE UM CONVERSOR CC-CC CÚK BIDIRECIONAL A
QUATRO CHAVES EM MCC**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

AUGUSTO BRAGA DE ALMEIDA

**ESTUDO DE UM CONVERSOR CC-CC CÚK BIDIRECIONAL A
QUATRO CHAVES EM MCC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font

PONTA GROSSA

2017



FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DO CONVERSOR CC-CC CÚK BIDIRECIONAL A QUATRO CHAVES EM MCC

Desenvolvido por:

AUGUSTO BRAGA DE ALMEIDA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 24 de novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. O candidato foi arguido pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinado. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr. Carlos Henrique Illa Font
Professor Orientador

Dr. Eloi Agostini Junior
Membro titular

Dr. Marcio Mendes Casaro
Membro titular

À Deus,
Aos meus pais, Marcos e Lúcia
As minhas avós, Maria (Dóca) e Maria
Aos meus amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve presente em minha vida, independente de momentos de alegria ou tristeza.

Aos meus pais e familiares, que sempre me apoiaram e ajudaram para continuar no decorrer do curso e que, nos momentos difíceis, me deram conforto, ânimo, alegria e nunca deixaram que faltasse algo.

Ao professor Dr. Carlos Henrique Illa Font, meu orientador, pela disponibilidade, colaboração e paciência prestada desde o início deste trabalho e, principalmente, por ser um excelente guia, me desafiando e me fazendo enxergar além do meu potencial.

A todos os professores que me auxiliaram no decorrer da universidade, ou que me deram a base de conhecimento para que eu pudesse desenvolver o projeto.

A minha namorada, Caroline Peixoto Santos, por todo seu suporte e pela sua dedicação em me ajudar em todos os meus desafios no decorrer do curso e no desenvolvimento do projeto.

Enfim, aos meus amigos que sempre se fizeram presentes, tanto em momentos de trabalho quanto de lazer; e a todos aqueles que confiaram em meu trabalho.

“You were born to the rolling hills and little
rivers of the Shire. But home is now
behind you. The world is ahead.”
(Gandalf, *The Hobbit: An Unexpected
Journey*, 2012)

RESUMO

BRAGA DE ALMEIDA, Augusto. **Estudo de um conversor CC-CC Cúk bidirecional a quatro chaves em MCC**. 2017. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Esse trabalho foi desenvolvido para fazer um estudo da topologia Cúk bidirecional a quatro chaves e sua aplicação na conexão de um banco de baterias à uma microrrede CC. A área de estudo de microrredes tem se mostrado rica em trabalhos e evoluções de topologias. Este trabalho é composto pela análise teórica, projeto, simulação numérica e aquisição de dados experimentais por meio da montagem de um protótipo do conversor proposto. Ao final, este conversor apresentou resultados satisfatórios para as condições e especificações em que foi exposto com rendimento máximo de 95,7%. As especificações de projeto são as seguintes: tensão de entrada de 250 V, tensão de saída de 360 V, potência de saída de 1000 W e frequência de comutação de 20 kHz.

Palavras-chave: Cúk Bidirecional. Banco de Baterias. Microrredes CC. Armazenamento de Energia.

ABSTRACT

BRAGA DE ALMEIDA, Augusto. **Study of a DC-DC bidirectional Cúk converter using four switches in continuous conduction mode.** 2017. 63 p. Completion of Coursework (Bachelor's Degree in Electronic Engineering) - Federal Technological University of Parana. Ponta Grossa, 2017.

This work was developed to study a bidirectional Cúk topology using four switches and its application on connecting a battery bank to a DC microgrid. The area of study of microgrids has been rich in works and evolutions of topologies. This work consists of the theoretical analysis, design, numerical simulation and experimental data acquisition through the assembly of a prototype of the proposed converter. At the end, this converter presented satisfactory results for the conditions and specifications in which it was exposed with a maximum efficiency of 95.7%. The design specifications are as follows: 250 V input voltage, 360 V output voltage, 1000 W output power and 20 kHz switching frequency.

Keywords: Bidirectional Cúk. Battery bank. DC Microgrid. Energy Storage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de sistema de armazenamento a baterias.	15
Figura 2 – Banco de Baterias da TESLA.	16
Figura 3 – Conversor CC-CC Cúk Bidirecional: topologia convencional.	19
Figura 4 – Conversor CC-CC Cúk Bidirecional: topologia estudada.	20
Figura 5 – Primeira Etapa de Operação do Conversor.	21
Figura 6 – Segunda Etapa de Operação do Conversor.	22
Figura 7 – Formas de Onda Ideais.	23
Figura 8 – Malha em análise.	27
Figura 9 – Simulação com transferência de potência de V_1 para V_2/V_3	29
Figura 10 – Pulsos de <i>gate</i> (Simulação).	30
Figura 11 – Tensão e Corrente de Entrada (Simulação).	30
Figura 12 – Tensão e Corrente nos Capacitores C_1 e C_2 (Simulação).	31
Figura 13 – Tensões nas chaves S_1 e S_2 (Simulação).	31
Figura 14 – Tensões nos Capacitores de Entrada (Simulação).	32
Figura 15 – Tensões V_2 , V_3 e V_o (Simulação).	32
Figura 16 – Corrente L_2 e L_3 (Simulação).	33
Figura 17 – Simulação com transferência de potência de V_2/V_3 para V_1	33
Figura 18 – Tensão V_o e corrente de L_2 e L_3	34
Figura 19 – Tensão nos Capacitores Intermediários.	34
Figura 20 – Tensão nas Chaves S_1 e S_2	35
Figura 21 – Tensão nas Chaves S_3 e S_4	35
Figura 22 – Tensão e Corrente de Saída no segundo sentido.	36
Figura 23 – Protótipo do Conversor.	38
Figura 24 – Pulsos de Comando das chaves S_1 , S_2 , S_3 e S_4	39
Figura 25 – Tensão e Corrente do indutor L_1 1000 W.	40
Figura 26 – Tensão nos Capacitores C_1 e C_2 a 1000 W.	41
Figura 27 – Tensões nas Chaves S_1 e S_2 a 1000 W.	42
Figura 28 – Tensões nas Chaves S_3 e S_4 a 1000 W.	43
Figura 29 – Tensões V_o e sobre os Banco de Capacitores (V_2 e V_3) a 1000 W.	44
Figura 30 – Tensão V_o e Corrente de Saída a 1000 W.	45
Figura 31 – Potência x Rendimento.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de Projeto	28
Tabela 2 – Valores Preliminares Projetados Baseados nas Especificações	28
Tabela 3 – Valores Preliminares Projetados Baseados nas Especificações.....	36
Tabela 4 – Lista de Principais Componentes Utilizados no Protótipo.	38
Tabela 5 – Potência x Rendimento	45

LISTA DE ABREVIATURAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
MCC	Modo de condução contínua
W	Watt
V	Volt
Hz	Hertz
Wh	Watt hora

LISTA DE ACRÔNIMOS

UTFPR-PG	Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa
FGV	Fundação Getúlio Vargas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA DA PESQUISA.....	12
1.1.1 Delimitação do Tema	12
1.2 PROBLEMA	12
1.3 HIPÓTESE/PREMISSA	13
1.4 OBJETIVOS.....	13
1.4.1 Objetivo Geral.....	13
1.4.2 Objetivos Específicos.....	13
1.5 JUSTIFICATIVA.....	14
1.6 MÉTODO DA PESQUISA	14
2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO	15
2.1 USO DE BANCO DE BATERIAS EM MICRORREDES.....	15
2.2 VANTAGEM DA UTILIZAÇÃO DE MICRORREDES	16
2.3 DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA	17
2.4 MICRORREDES EM CORRENTE CONTÍNUA	18
3 ANÁLISE TEÓRICA DO CONVERSOR	19
3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR	20
3.1.1 Primeira Etapa de Operação.....	20
3.1.2 Segunda Etapa de Operação.....	21
3.2 FORMAS DE ONDA IDEAIS.....	22
3.3 GANHO ESTÁTICO	24
3.4 ANÁLISE DAS TENSÕES E EQUAÇÕES DE PROJETO DOS CAPACITORES	24
3.5 ANÁLISE DAS TENSÕES E EQUAÇÕES DE PROJETO DOS INDUTORES	25
3.5.1 Cálculo do Indutor L_1	25
3.5.2 Cálculo dos Indutores L_2 e L_3	26
4 PROJETO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA	28
4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	29
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	38
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A – PLANILHA DE CÁLCULO DOS COMPONENTES	50
APÊNDICE B – LAYOUT DO CIRCUITO	60
APÊNDICE C – LAYOUT DA PLACA	62

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um conversor CC-CC Cúk bidirecional a quatro chaves operando em modo de condução contínuo para ser utilizado na conexão de um banco de baterias em uma microrrede em corrente contínua. Portanto, este conversor será capaz de carregar o banco de baterias ou utilizar na microrrede a energia armazenada.

No desenvolver deste trabalho, alguns temas relevantes ao assunto são descritos, tais como: microrredes em corrente contínua, banco de baterias, as características do conversor e detalhes de projeto juntamente com os resultados obtidos.

1.1 TEMA DA PESQUISA

Estudo de um conversor CC-CC Cúk bidirecional a quatro chaves operando em modo de condução contínuo para uso em uma microrrede em corrente contínua.

1.1.1 Delimitação do Tema

Estudo do funcionamento do conversor até então sem nenhuma referência encontrada, levantamento de resultados de simulação numérica e experimentais, avaliação experimental de rendimento do conversor proposto em malha aberta.

1.2 PROBLEMA

Desenvolver um conversor CC-CC Cúk a quatro chaves para conectar um banco de baterias de 360 V à uma microrrede CC com barramento de 250 V. Espera-se deste conversor um bom rendimento e que o mesmo possa ser utilizado para este cenário.

1.3 HIPÓTESE/PREMISSA

Um dos projetos futuros na UTFPR-PG é a construção de uma microrrede em CC, composta de um conversor bidirecional na entrada da microrrede para conexão com a rede elétrica, um conversor elevador de tensão para uma microturbina eólica e um conversor bidirecional para um banco de baterias. O conversor bidirecional para uso no banco de baterias deve ser capaz de elevar a tensão de barramento para carregar o banco de baterias e reduzir a tensão do banco de baterias para a tensão de barramento.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste projeto é o de adquirir domínio sobre a tecnologia proposta, montando um protótipo para testes onde pode-se avaliar resultados de desempenho com base em simulações numéricas validando a topologia proposta até então sem nenhuma referência encontrada.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Fazer um estudo da topologia proposta;
- Levantar as equações de projeto;
- Projetar o conversor de acordo com especificações de projeto;
- Realizar simulações computacionais;
- Montar um protótipo do conversor;
- Fazer aquisição de resultados experimentais;
- Comparar e avaliar os resultados obtidos com os simulados.

1.5 JUSTIFICATIVA

Altos níveis de eficiência energética não estão atrelados somente à descoberta de novas fontes de energia, mas também ao estudo de como processar energia de forma melhor buscando altos níveis de rendimento e elevado fator de potência nos conversores eletrônicos. O estudo e desenvolvimento do conversor proposto nesse trabalho pode ser promissor pois até o momento não se encontrou referências sobre ele.

Para a aplicação em banco de baterias este conversor pode ser muito conveniente pois se beneficia do fato de ter corrente contínua filtrada em ambos os sentidos de transferência de potência.

Em sistemas de conversão de energia eólica, em geral, o banco de baterias pode ser conectado em paralelo com o barramento CC por meio de conversores de potência apropriados.

Como citado anteriormente, o conversor proposto será avaliado para que se tenha certeza de que suas características de funcionamento e de rendimento sejam adequadas para a utilização no banco de baterias.

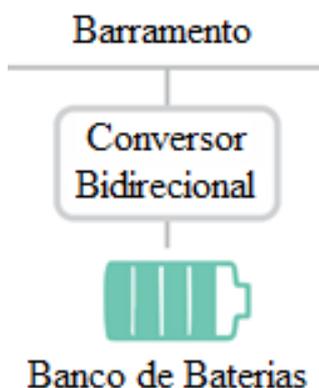
1.6 MÉTODO DA PESQUISA

O desenvolvimento desta pesquisa é baseado em trabalhos e materiais já publicados. Depois de fazer a revisão bibliográfica, será feita a análise teórica do conversor. Então, o projeto e dimensionamento dos componentes do conversor serão apresentados. Em seguida, uma simulação numérica será feita para entender melhor e verificar se o dimensionamento dos componentes e funcionamento do conversor condizem com a análise teórica. Após esta etapa, o protótipo é montado para ser feita a experimentação prática e pôr fim a análise dos resultados.

2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Um sistema de armazenamento a baterias geralmente pode-se encontrar três componentes: as baterias, um conversor CC-CC bidirecional e o barramento CC como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de sistema de armazenamento a baterias.



Fonte: Autoria própria.

As baterias como mencionado anteriormente podem ser de vários tipos de tecnologia, sendo que as tecnologias mais utilizadas são chumbo-ácido e íons de lítio. Além dos índices de desempenho, o tipo de bateria também irá influenciar a tecnologia de controle utilizada para a carga da mesma.

O conversor pode ser de dois tipos, CA-CC bidirecional comumente utilizado já que a maioria das instalações funcionam em CA. A outra opção e foco deste trabalho é um conversor bidirecional CC-CC.

O último componente do sistema é o barramento onde as cargas estão ligadas assim como as fontes de energia distribuída.

2.1 USO DE BANCO DE BATERIAS EM MICRORREDES

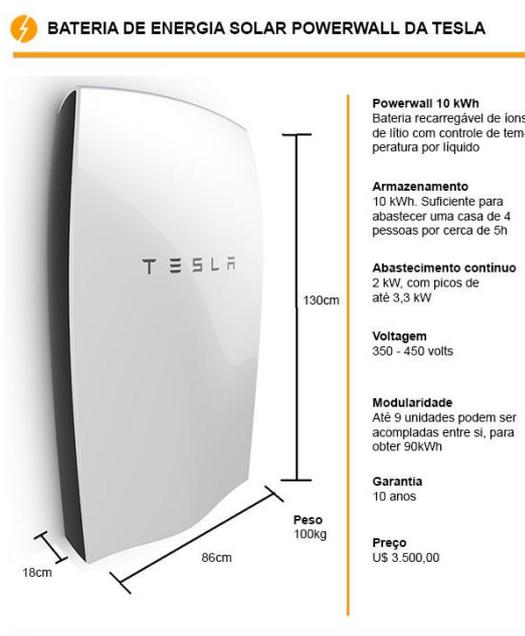
Existem vários sistemas de armazenamento que podem ser utilizados: flywheels, bancos de baterias, super-capacitores. Por exemplo, flywheels são dispositivos giratórios de alto momento de inércia com capacidade de armazenar energia em forma de energia cinética e tal energia pode ser transformada com até 90% de eficiência, mas seu armazenamento varia entre 3 e 130 kWh (FISKE; RICCI,

2006), (STEPHAN; ANDRADE JR.; SOTELLO, 2008). Adicionalmente, estes dispositivos não são portáteis, exigem manutenção mecânica e possuem menores densidades de potência que as baterias.

Os sistemas de armazenamento baseados em super-capacitores têm a vantagem de realizar trocas de energia em tempos reduzidos. Como desvantagem, eles apresentam maiores custos e menores densidades de potência que baterias.

Bancos de baterias apesar de serem volumosos são largamente utilizados atualmente, e também a tecnologia que mais tem espaço para desenvolvimento principalmente com o avanço em pesquisa de veículos elétricos. As baterias mais comuns a serem utilizadas são as de chumbo-ácido estacionárias apesar de seu peso e volume, e as baterias com maior transferência de potência por peso são as de íons de lítio, como por exemplo o sistema de armazenamento da TESLA mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Banco de Baterias da TESLA.



Fonte: Solar (2017).

2.2 VANTAGEM DA UTILIZAÇÃO DE MICRORREDES

De acordo com a aplicação, qualidade de energia é um requisito indispensável, por exemplo, em manufatura de semicondutores ou produtos químicos. Uma microrrede com alta qualidade de energia depende principalmente se todos os

geradores dela são bem projetados levando em conta a demanda das cargas (TELEKE, 2014).

Em desastres naturais (tornados, terremotos, tsunamis) redes elétricas tradicionais podem ficar inoperantes por completo. Em alguns países tais desastres são frequentes, derrubando a energia de áreas que as vezes não foram atingidas sofrendo consequências por ter perdido a conexão com as fontes de energia. Dado que microrredes não dependem das fontes de energia da rede elétrica, podendo operar sem haver conexão com a rede elétrica.

Caso haja um crescimento em demanda elétrica em uma região com microrredes instaladas, tais demandas poderão ser supridas com a simples instalação de novas fontes de geração, tal como painéis fotovoltaicos ou microturbinas eólicas.

Assim, microrredes diminuiriam investimentos em sistemas de transmissão e distribuição além de diminuir a insatisfação de residentes de áreas que podem ter linhas de elétricas construídas próximo de suas residências (TELEKE, 2014).

2.3 DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

A quantidade de equipamentos que utilizam um conversor CA-CC para alimentação é enorme e continuará a aumentar. De acordo com uma pesquisa da FGV até o fim deste ano no Brasil haverá 1 smartphone por habitante (CAPELAS, 2017). Levando em conta que cada aparelho necessita de um carregador então serão 208 milhões de conversores CA-CC. Tendo em vista este dado e alguns setores tecnológicos como transportes elétricos, operações militares, telecomunicações e datacenters são as principais influências para essa mudança de CA para CC.

Alguns exemplos de aplicação de redes em CC largamente utilizados são navios, bondes, locomotivas a diesel, e sistemas de energia elétrica de submarinos. O mercado de carros elétricos também tem boas premissas e tende a uma dominação do mercado automobilístico no futuro e tais veículos terão sistemas de armazenamento de energia bem desenvolvidos, e utilizarão sistemas em CC (IEEE ELECTRIFICATION, 2016).

De um ponto de vista teórico, a utilização de um conversor CA-CC tem menor eficiência energética que um conversor CC-CC pois contém um estágio a mais no funcionamento.

Ainda existem muitos obstáculos que impedem a difusão de padrões CC para dentro das casas. Alguns obstáculos são a falta de entendimento, falta de padrões, falta de produtos somente CC-CC e legislações vigentes que incentivem e permitam o uso de tensões contínuas dentro de casa (IEEE ELECTRIFICATION, 2016).

2.4 MICRORREDES EM CORRENTE CONTÍNUA

Quanto menor a distância entre a geração de energia e a demanda menor serão as perdas para se entregar essa energia, isso é o que a geração distribuída propõe. Para isso deve-se levar em conta o custo de tal geração comparado aos mais tradicionais meios, entretanto se a geração distribuída tiver um sistema inteligente de integração, a energia pode ser mais confiável e robusta contra faltas.

Uma microrrede é um sistema de energia elétrica com limitações em uma área fechada. Ele é composto por geração distribuída, consumidores e opcionalmente sistemas de armazenamento de energia. Com isso, alguns recursos são otimizados como, qualidade de energia e confiabilidade, sustentabilidade e benefícios econômicos.

Além disso, uma microrrede pode funcionar em modo desconectado da rede elétrica (ilha), conectado a ela, ou em modo duplo por meio de um sistema de chaveamento entre ligado e desligado da rede elétrica (AG, 2011).

3 ANÁLISE TEÓRICA DO CONVERSOR

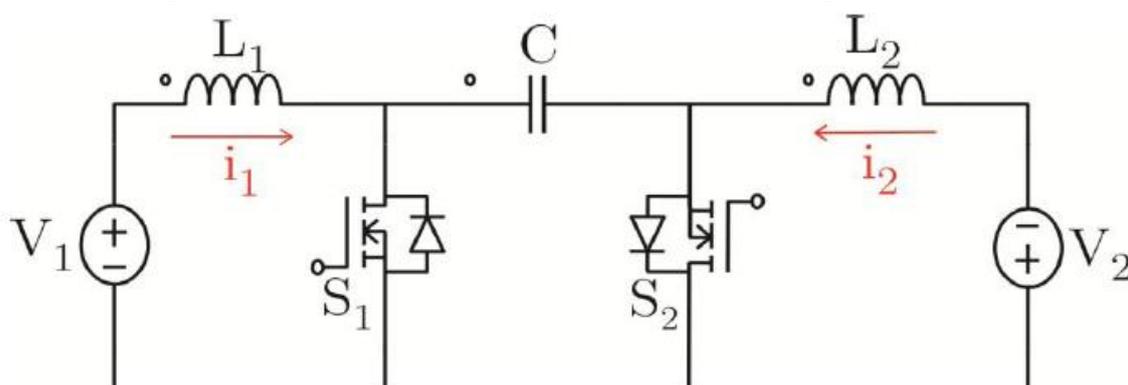
O conversor Cúk também é conhecido como conversor CC-CC de acumulação capacitiva. Sua principal característica é a transferência de potência entre duas fontes de corrente.

O circuito de potência bidirecional convencional consiste de dois indutores um em série a fonte V_1 e um em série a fonte V_2 , um capacitor, e duas chaves (usualmente IGBTs ou MOSFETs). Cada chave inclui um diodo de roda livre, e as chaves são ligadas e desligadas de forma complementar. A Figura 3 demonstra a configuração do circuito.

É uma topologia robusta pelo número reduzido de componentes, as tensões que as chaves são submetidas são a soma da tensão V_1 e a tensão V_2 e a tensão V_2 tem a polaridade invertida com relação a tensão de V_1 .

Na aplicação estudada, o conversor Cúk tem a vantagem de drenar correntes com baixa ondulação e carregar o banco de baterias também com uma corrente de baixa ondulação de forma natural quando opera em MCC, sem a necessidade de adicionar filtros.

Figura 3 – Conversor CC-CC Cúk Bidirecional: topologia convencional.

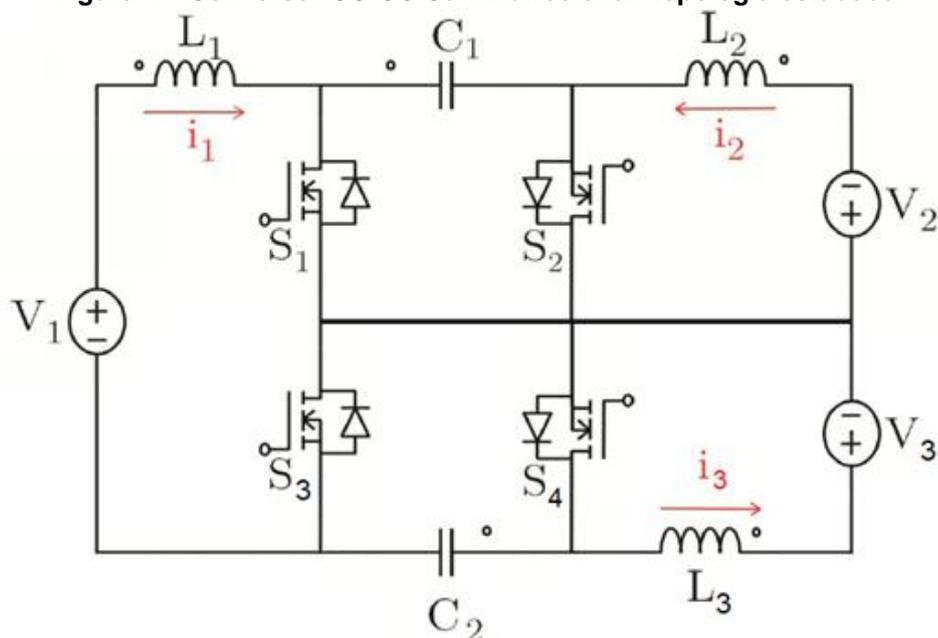


Fonte: BARBI, 2015.

O conversor proposto tem três indutores um em série a fonte V_1 , o segundo em série com a fonte V_2 e o terceiro em série com a fonte V_3 , dois capacitores, e 4 chaves como mostrado na Figura 4. O funcionamento deste conversor proposto é bastante similar ao tradicional com algumas ressalvas que serão explicadas no próximo tópico.

Embora este conversor empregue mais componentes, ele tem a característica de dividir a tensão nos semicondutores, o que permite utilizar as tecnologias de semicondutores que possuem menores perdas.

Figura 4 – Conversor CC-CC Cúk Bidirecional: topologia estudada.



Fonte: Autoria própria.

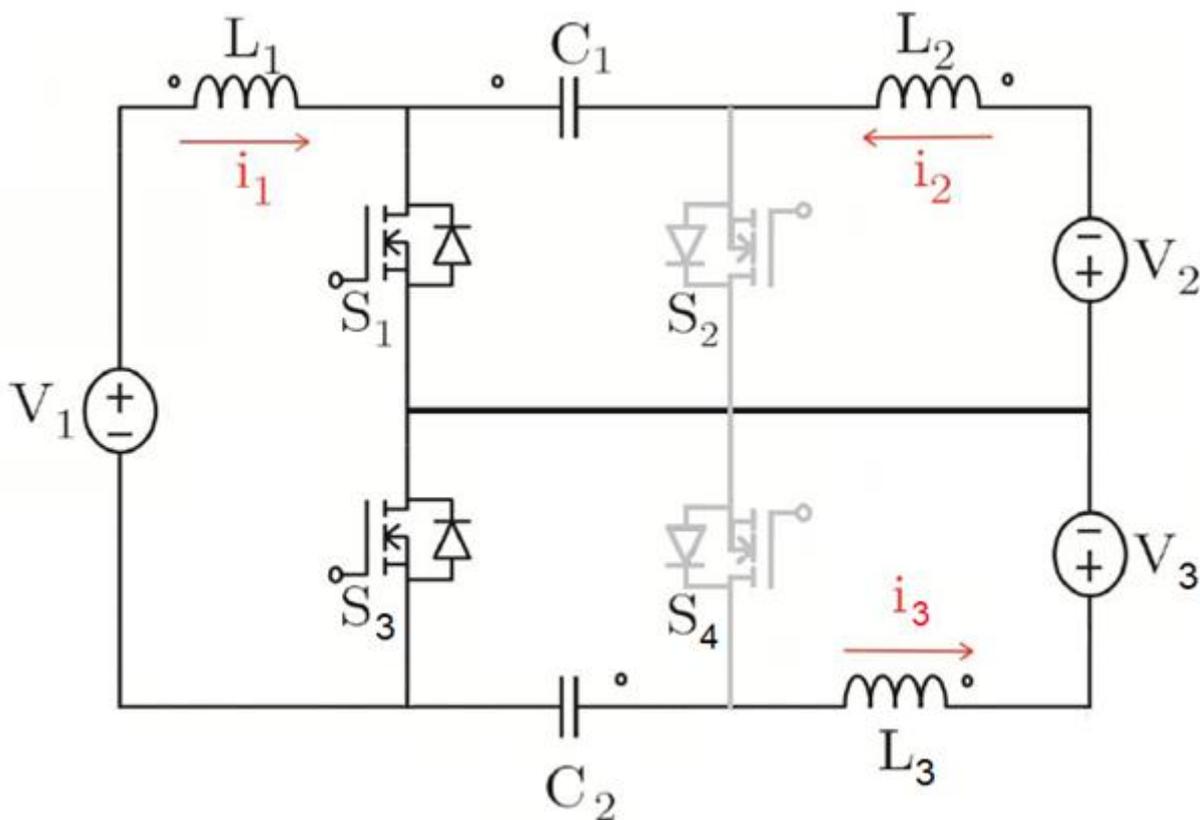
3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR

O princípio de operação deste conversor pode ser decomposto em duas etapas de operação. Cada etapa de operação será descrita a seguir.

3.1.1 Primeira Etapa de Operação

Na primeira etapa de operação, os interruptores S₁ e S₃ encontram-se em condução e S₂ e S₄ bloqueados. Nesta etapa a fonte V₁ carrega o indutor L₁, os capacitores C₁ e C₂ descarregam fornecendo energia para o carregamento dos indutores L₂ e L₃, o uso dos capacitores C₁ e C₂ é essencial para conectar as fontes V₁ as fontes V₂ e V₃ para que haja transferência de potência já que não existe possibilidade de transferência de potência entre duas fontes com mesma característica. Esta etapa é ilustrada pela Figura 5.

Figura 5 – Primeira Etapa de Operação do Conversor.

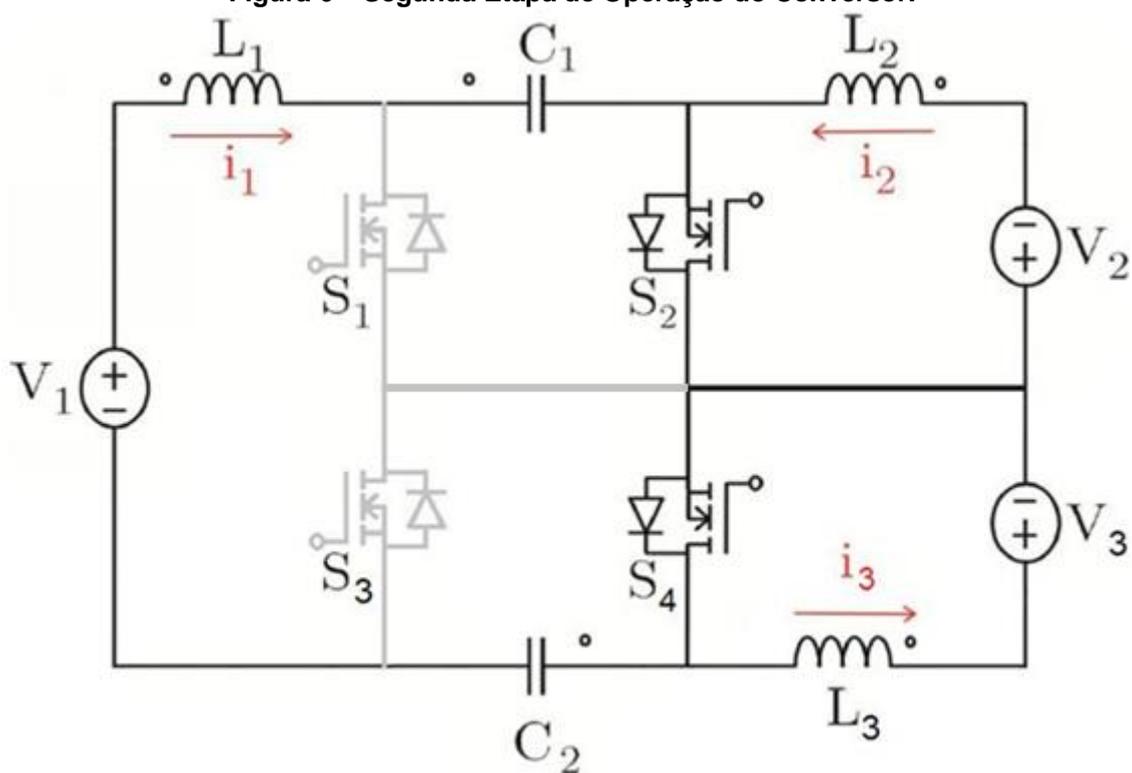


Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Segunda Etapa de Operação

Na etapa seguinte de operação, os interruptores S_2 e S_4 entram em condução, enquanto os interruptores S_1 e S_3 bloqueiam. O indutor L_1 fornece energia para os capacitores C_1 e C_2 carregando os mesmos, enquanto os indutores L_2 e L_3 fornecem energia para as fontes V_2 e V_3 . Esta etapa é ilustrada pela Figura 6.

Figura 6 – Segunda Etapa de Operação do Conversor.

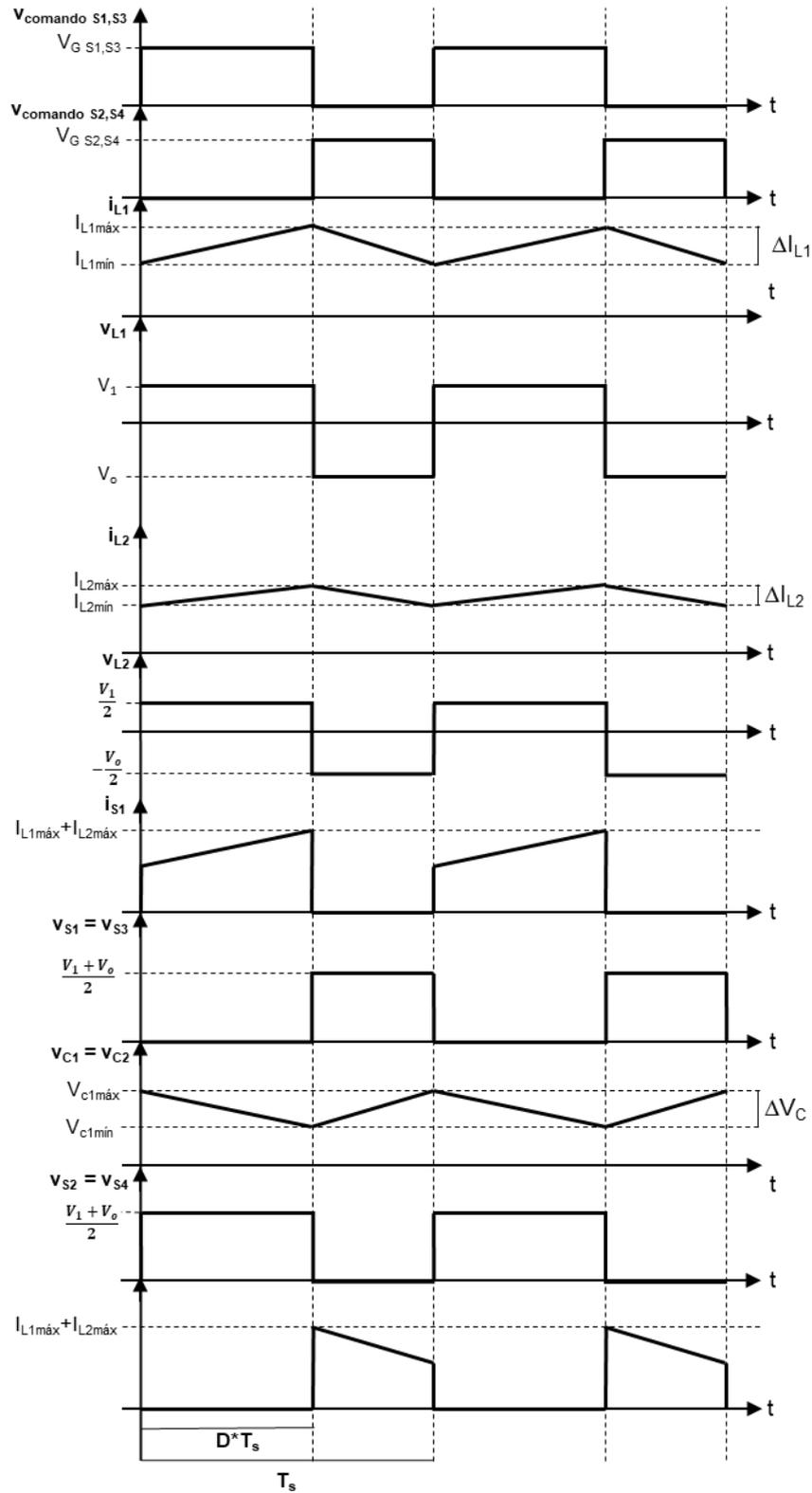


Fonte: Autoria própria.

3.2 FORMAS DE ONDA IDEAIS

Com a análise das etapas de operação pode-se traçar as formas de onda ideais dos componentes do circuito, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Formas de Onda Ideais.



Fonte: Autoria própria.

3.3 GANHO ESTÁTICO

Analisando e trabalhando a Equação (1) de tensão média no indutor L_1 obtém-se a Equação (2) que define o ganho estático.

$$V_{L1med} = 0 \rightarrow \left(V_1 * \frac{t_{on}}{T} \right) + \left(((-V_o) * \frac{(T-t_{on})}{T}) \right) = \frac{0}{T}, \text{ onde } V_o = V_2 + V_3 \quad (1)$$

$$\frac{V_o}{V_1} = \frac{D}{1-D}, \text{ para } D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

Onde:

D: razão cíclica

T_{on} : tempo da chave S_1 em condução

T: período de chaveamento

É conhecido da topologia tradicional que a tensão na chave é a soma da tensão V_1 e a tensão V_2 como mencionado anteriormente.

O uso de braços com duas chaves em série faz com que os níveis de tensões sejam metade das tensões da topologia tradicional como mostra a Equação (3).

$$V_{smáx} = \frac{(V_1 + V_o)}{2}, \text{ onde } V_o = V_2 + V_3 \quad (3)$$

Onde:

$V_{smáx}$: tensão máxima nas chaves

3.4 ANÁLISE DAS TENSÕES E EQUAÇÕES DE PROJETO DOS CAPACITORES

Para encontrar as equações das tensões dos capacitores tem-se a Equação (4) pela análise de malhas e assumindo verdadeira a Equação (5).

$$-V_1 + V_{C1} - V_o + V_{C2} = 0, \text{ onde } V_o = V_2 + V_3 \quad (4)$$

$$V_{C1} = V_{C2} \quad (5)$$

Onde:

V_{C1} : tensão no capacitor C_1

V_{C2} : tensão no capacitor C_2

Com as equações (4) e (5) pode-se obter a Equação (6) abaixo.

$$V_{C1} = V_{C2} = \frac{(V_1 + V_o)}{2} \quad (6)$$

Agora pode-se utilizar a Equação (7) para determinação da capacitância, obtida da análise da primeira etapa de operação.

$$C_1 = C_2 = \frac{I_o * D}{f_s * \Delta V_{C1}} \quad (7)$$

Onde:

D: razão cíclica

f_s : frequência de chaveamento

ΔV_{C1} : ondulação de tensão no capacitor C_1

Assim, conclui-se uma das etapas de projeto, ou seja, a designação do valor dos capacitores intermediários.

3.5 ANÁLISE DAS TENSÕES E EQUAÇÕES DE PROJETO DOS INDUTORES

Outros componentes importantes do circuito são os indutores. Eles garantem que o conversor opere em modo de condução contínua além de fazer com que drene e forneça correntes contínuas. Conhecendo estas equações o conversor pode ser projetado de acordo com suas especificações.

3.5.1 Cálculo do Indutor L_1

Analisando a entrada do circuito pode-se verificar que a corrente fornecida por V_1 é a própria corrente do indutor L_1 . Portanto, pode-se obter a corrente média de entrada I_{L1} a partir da Equação (8) considerando-se que o conversor é ideal.

$$I_{L1} = \frac{P_o}{V_1} \quad (8)$$

Onde:

I_{L1} : Corrente média no indutor;

P_o : Potência Processada;

Com este dado encontra-se o valor da indutância L_1 utilizando-se a Equação (9), obtida pela análise da primeira etapa de operação.

$$L_1 = \frac{V_1 * D}{f_s * \Delta I_{L1}} \quad (9)$$

Onde:

ΔI_{L1} : Ondulação de corrente no indutor;

P_o : Potência processada;

3.5.2 Cálculo dos Indutores L_2 e L_3

De forma similar, calcula-se primeiro a corrente nos indutores L_2 e L_3 visto que pode-se dividir a potência processada P_o entre as duas fontes e que a soma de V_2 e V_3 é a tensão de saída V_o desejada. Assim tem-se a Equação (10) que apresenta a corrente média de L_2 e L_3 .

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (10)$$

Onde:

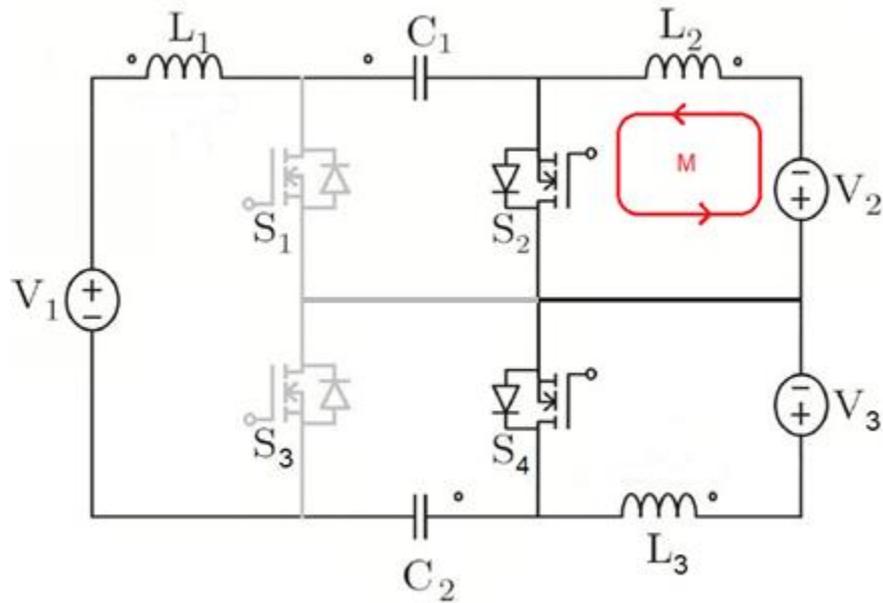
I_o : corrente média de L_2 e L_3 ;

P_o : potência de processada

V_o : $V_2 + V_3$.

Agora ao realizar a análise da malha M mostrada na Figura 8, obtém-se a Equação (11).

Figura 8 – Malha em análise.



Fonte: Autoria própria.

$$\frac{V_o}{2} + V_{L2} - V_{C1} = 0 \quad (11)$$

Trabalhando com as variáveis podemos obter as equações (12) e (13).

$$\frac{V_o}{2} + V_{L2} - \frac{V_1}{2} - \frac{V_o}{2} = 0 \quad (12)$$

$$V_{L2} = \frac{V_1}{2} \quad (13)$$

Onde:

V_{L2} : tensão no indutor L_2 ;

Aplicando a Equação (13) na Equação (9) e ajustando os termos utilizados para os indutores L_2 e L_3 tem-se a Equação (14):

$$L_2 = L_3 = \frac{V_1 * D}{2 * f_s * \Delta I_{L2}} \quad (14)$$

Onde:

ΔI_{L2} : ondulação de corrente no indutor L_2 ;

Juntando as Equações (9) e (14), tem-se a capacidade de calcular os indutores do circuito baseado em valores de especificação de projeto.

4 PROJETO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O projeto dos componentes do conversor foi feito baseado nas equações dos componentes descritos anteriormente com as especificações contidas na Tabela 1. Todos os cálculos envolvidos para se projetar o conversor estão no Apêndice A.

Tabela 1 – Especificações de Projeto

Grandeza	Valor
Tensão V_1	250V
Tensão V_2	180V
Tensão V_3	180V
Tensão V_o	360V
Potência Processada (P_o)	1000W
Frequência de Comutação (f_s)	20kHz
Porcentagem de Ondulação da Tensão nos Capacitores C_1 e C_2	15%
Porcentagem de Ondulação da Corrente nos Indutores L_1 , L_2 e L_3	20%

Fonte: Autoria própria.

Sabendo as especificações de projeto, obtêm-se os valores relevantes do projeto expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores Preliminares Projetados Baseados nas Especificações

Grandeza	Valor
Razão Cíclica	0,59
Corrente de Entrada (I_{L1})	4A
Corrente de Saída	2,778A
Resistência da Carga para transferência de potência de $V_1 \rightleftharpoons V_2/V_3$	129,6 Ω
Resistência da Carga para transferência de potência de $V_2/V_3 \rightleftharpoons V_1$	62,5 Ω
Ondulação de Tensão nos Capacitores C_1 e C_2	45,75V
Ondulação de Corrente no Indutor L_1	800mA
Ondulação de Corrente nos Indutores L_2 e L_3	555,56mA
Corrente Máxima no Indutor L_1	4,8A
Corrente Máxima nos Indutores L_2 e L_3	3,333A
Capacitância dos Capacitores C_1 e C_2	1,792 μ F
Tensão Máximo nos Capacitores C_1 e C_2	305V
Indutância L_1	9,221mH

Fonte: Autoria própria.

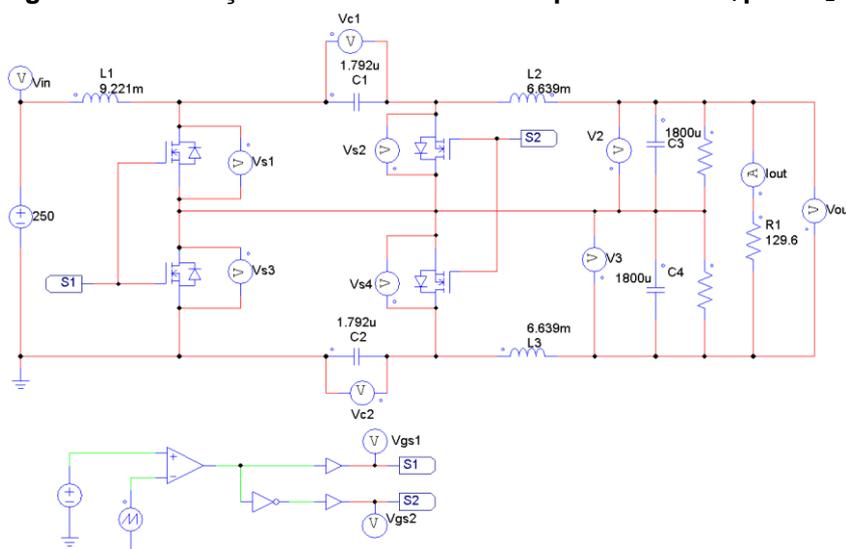
Agora com os valores dos componentes do conversor uma simulação numérica em um ambiente de simulação virtual pode ser feita. A partir desse ponto o protótipo poderá ser montado.

4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Com o conversor projetado, simulações numéricas do circuito foram realizadas com os valores dos componentes projetados. A simulação foi realizada em ambiente virtual de simulação de circuitos eletrônicos e obteve os resultados apresentados a seguir.

Primeiramente fez-se a simulação com a potência sendo transferida da fonte V_1 para as fontes V_2 e V_3 como mostra a Figura 9.

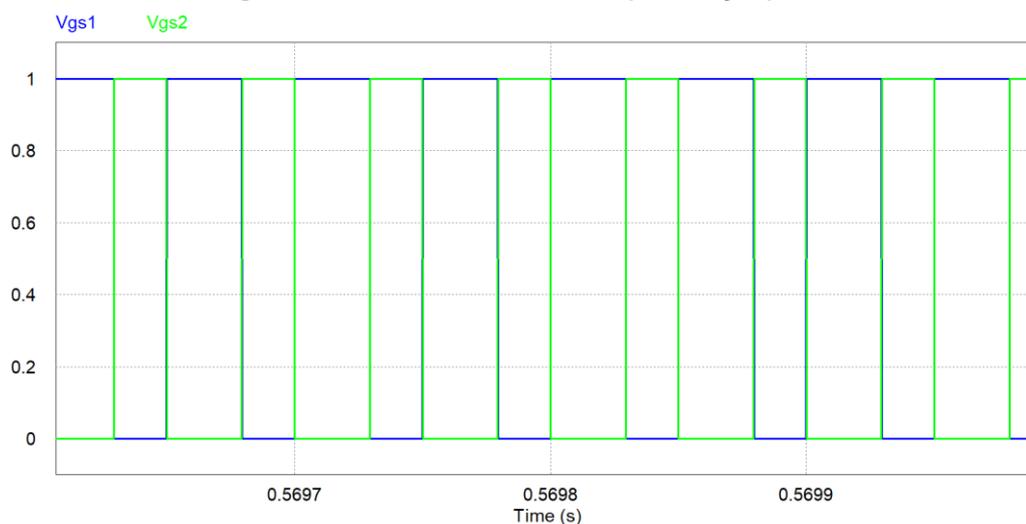
Figura 9 – Simulação com transferência de potência de V_1 para V_2/V_3 .



Fonte: Autoria própria.

A Figura 10 ilustra os pulsos de comando das chaves, onde V_{gs1} é o pulso das chaves S_1 e S_3 com razão cíclica de 0,59 e V_{gs2} , o pulso complementar ao pulso V_{gs1} , é o pulso das chaves S_2 e S_4 .

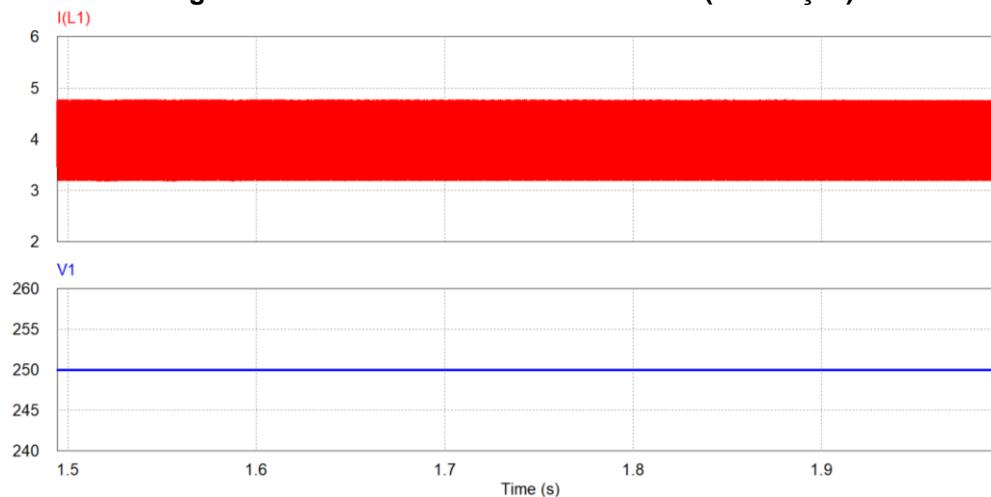
Figura 10 – Pulsos de comando (Simulação).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 11 ilustra a tensão V_1 e corrente do indutor L_1 . Esta corrente apresenta um componente de alta frequência por causa do chaveamento em 20 kHz.

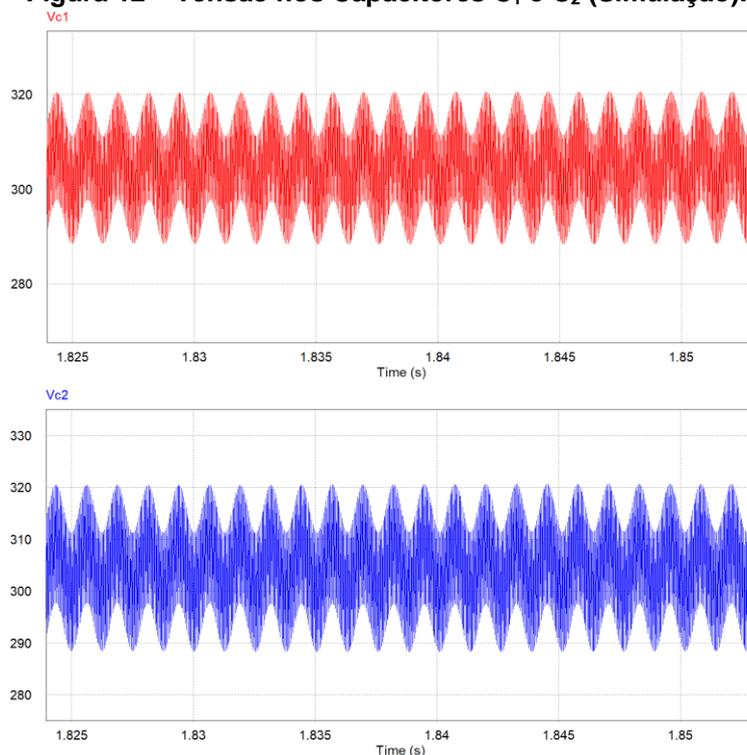
Figura 11 – Tensão e Corrente de Entrada (Simulação).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 12 ilustra a tensão nos capacitores intermediários. Assim como calculado as tensões são metade do que seria na topologia tradicional.

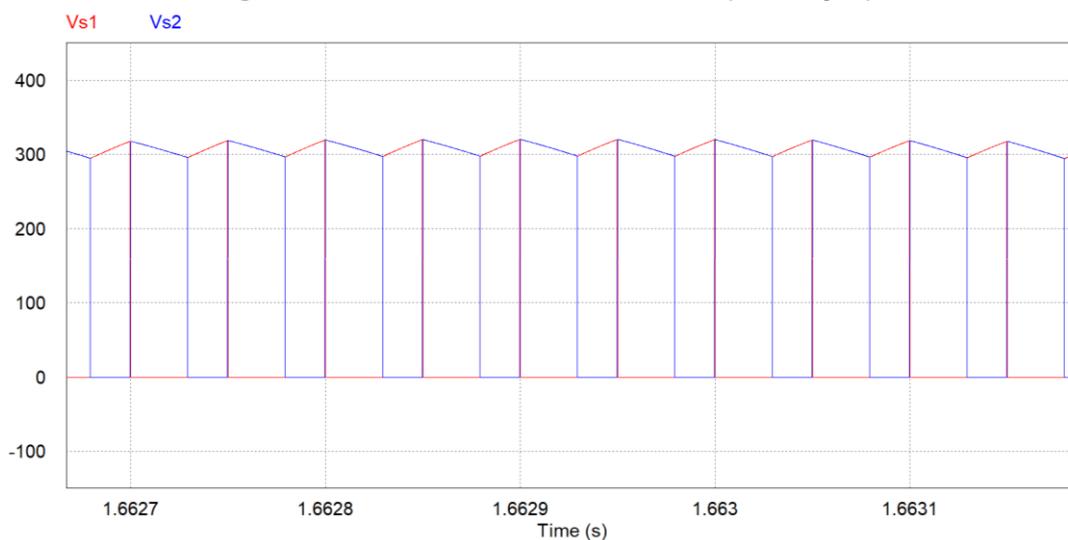
Figura 12 – Tensão nos Capacitores C_1 e C_2 (Simulação).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 13 apresenta as tensões nas chaves S_1 e S_2 as quais são as primeiras chaves de cada braço e complementares em funcionamento uma da outra.

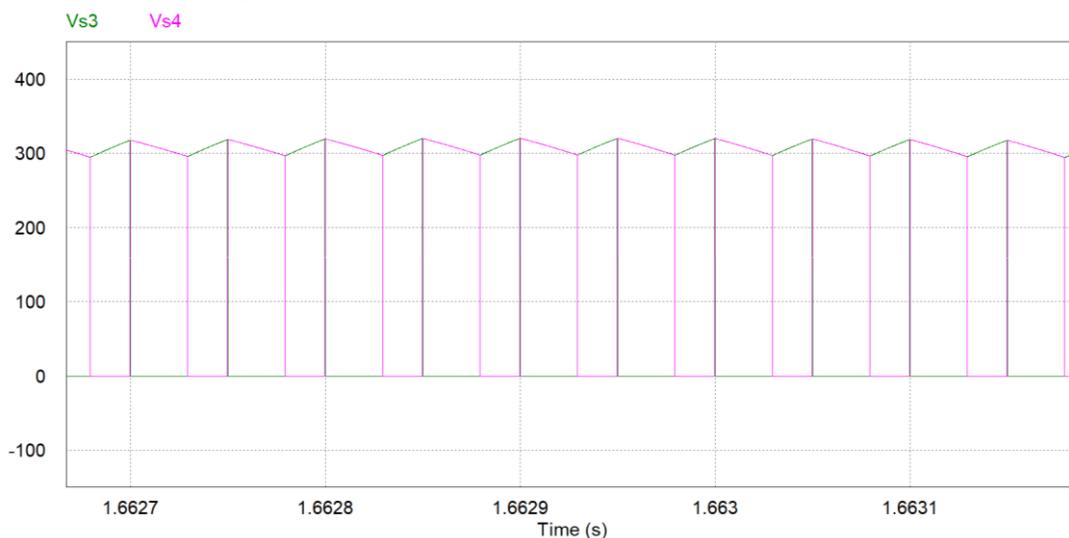
Figura 13 – Tensões nas chaves S_1 e S_2 (Simulação).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 14 mostra as tensões nas chaves S_3 e S_4 as quais são as segundas chaves de cada braço e complementares em funcionamento uma da outra.

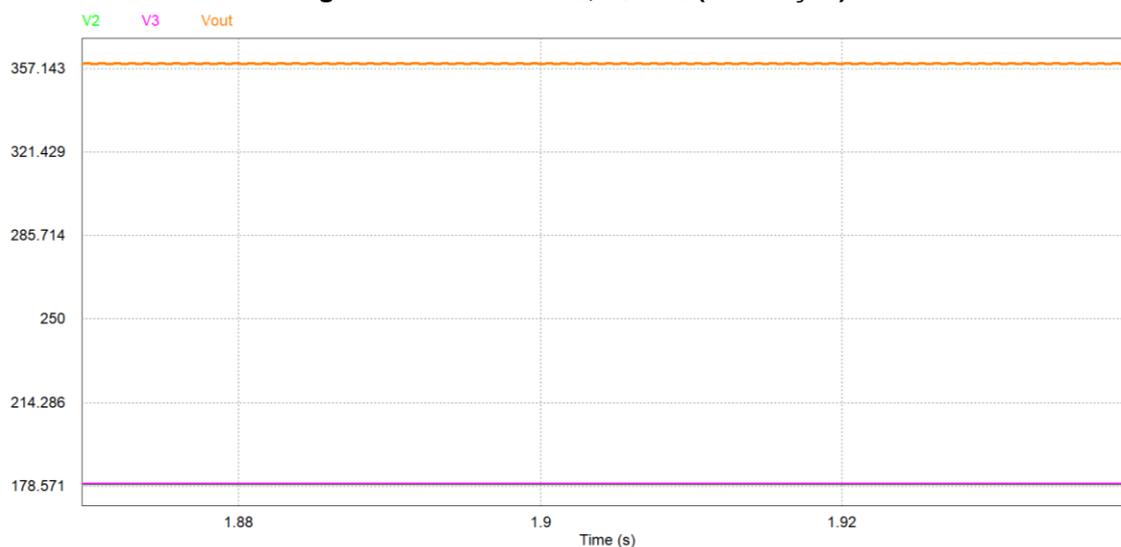
Figura 14 – Tensões nas chaves S_3 e S_4 (Simulação).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 15 ilustra as tensões das fontes V_2 e V_3 assim como a soma das duas fontes. Pode-se verificar que aproximadamente atingem os valores esperados. Para que as simulações fossem ambientes próximos do ambiente de testes práticos e também como não foi implementado controle os testes utilizaram cargas que simulavam fontes de tensão; um resistor de carga em paralelo com dois bancos de capacitores ambos de aproximadamente $1800 \mu\text{F}$.

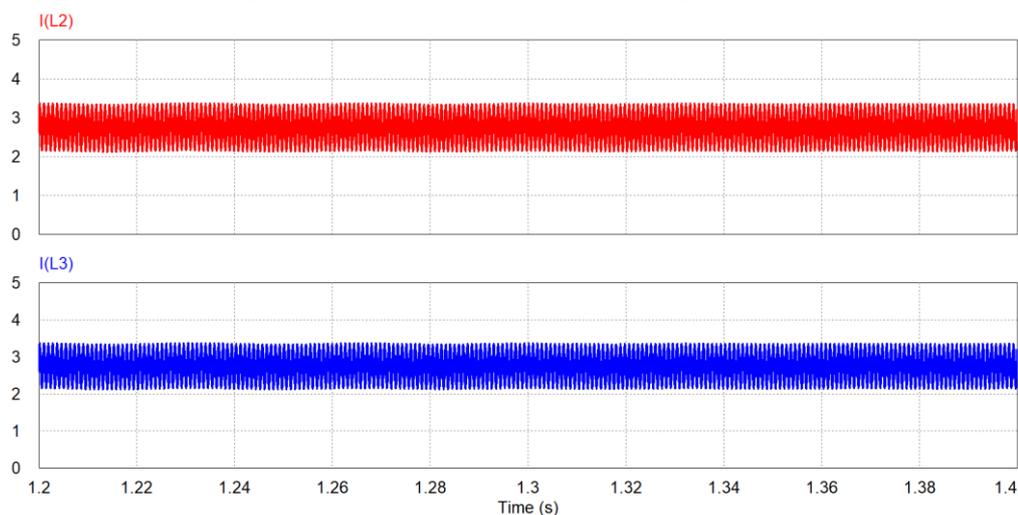
Figura 15 – Tensões V_2 , V_3 e V_o (Simulação).



Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Figura 16, tem-se o valor de corrente de L_2 que é o mesmo valor da corrente de L_3 os quais estão bem próximos dos valores calculados anteriormente.

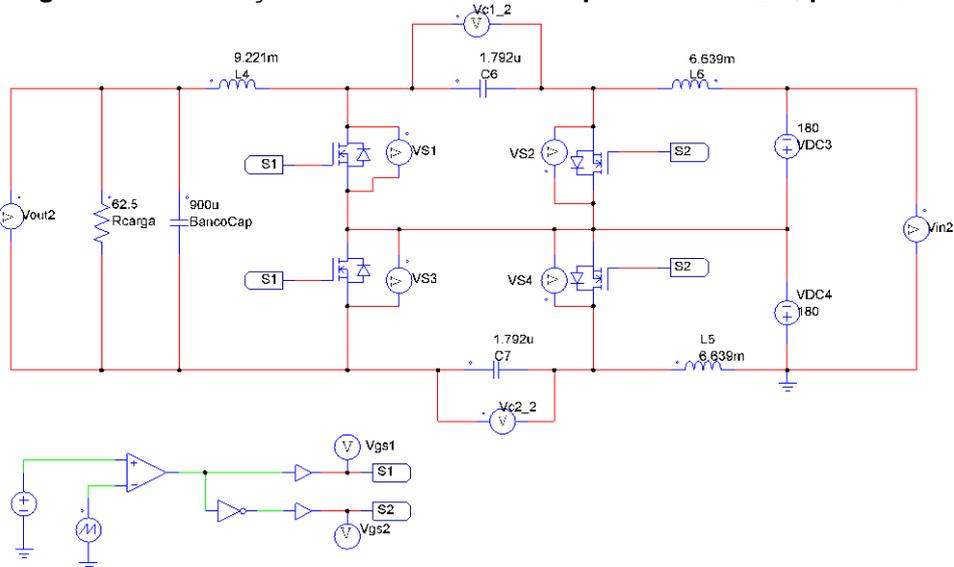
Figura 16 – Corrente L_2 e L_3 (Simulação).



Fonte: Autoria própria.

Para o sentido oposto de funcionamento, onde as fontes V_2 e V_3 fornecem energia para a fonte V_1 o circuito de simulação é mostrado na Figura 17.

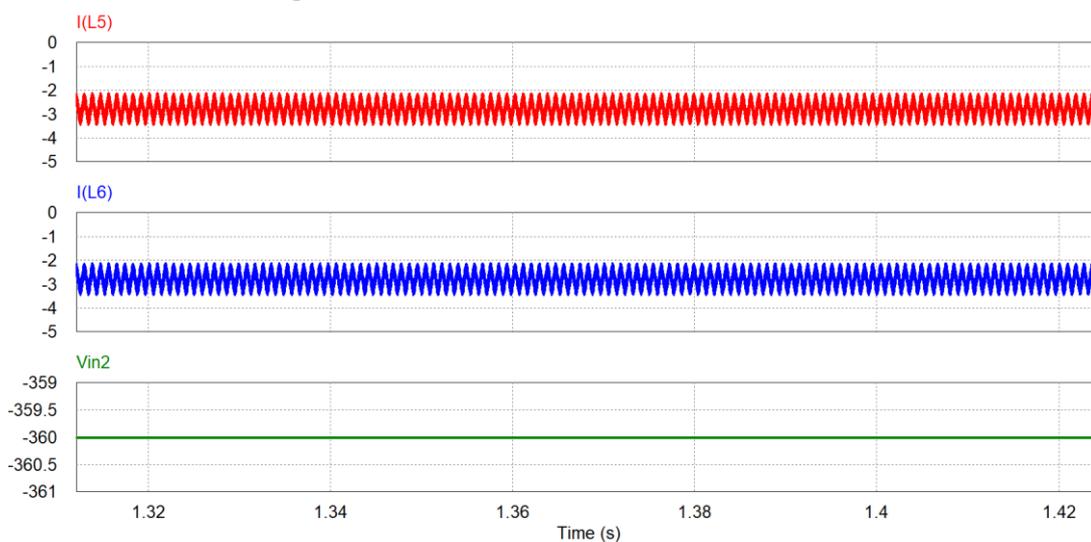
Figura 17 – Simulação com transferência de potência de V_2/V_3 para V_1 .



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18 têm-se as correntes referidas a cada uma das fontes conectadas e tensão de entrada também.

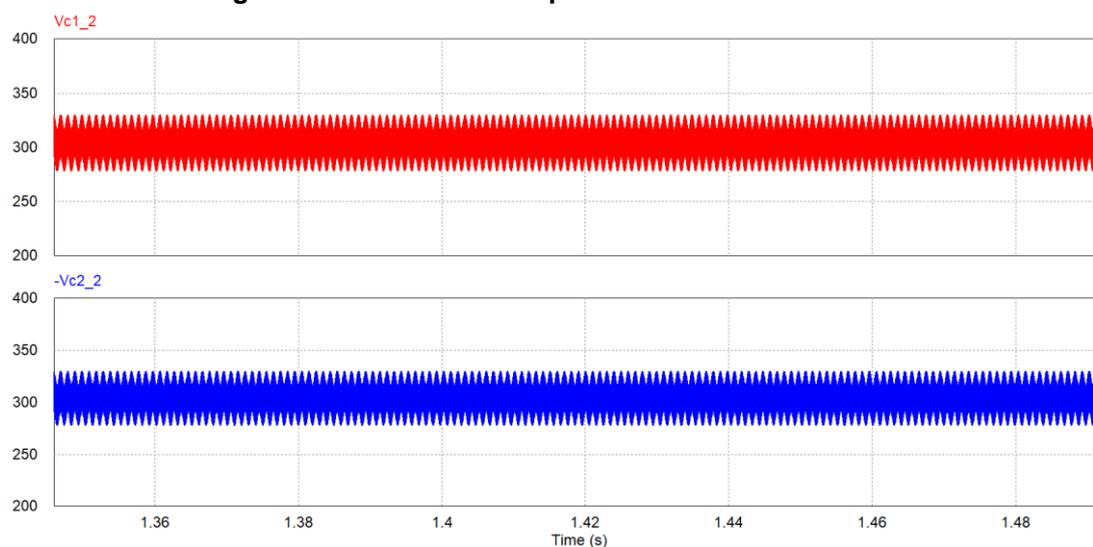
Figura 18 – Tensão V_o e corrente de L_2 e L_3 .



Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 mostra as tensões nos capacitores intermediários. Como pode-se notar, a tensão média é aproximadamente 305 V.

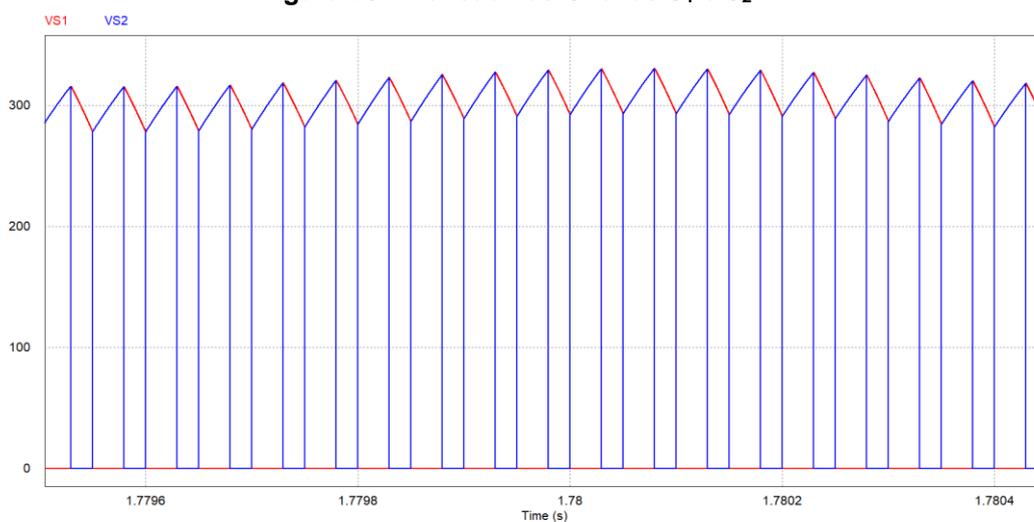
Figura 19 – Tensão nos Capacitores Intermediários.



Fonte: Autoria própria.

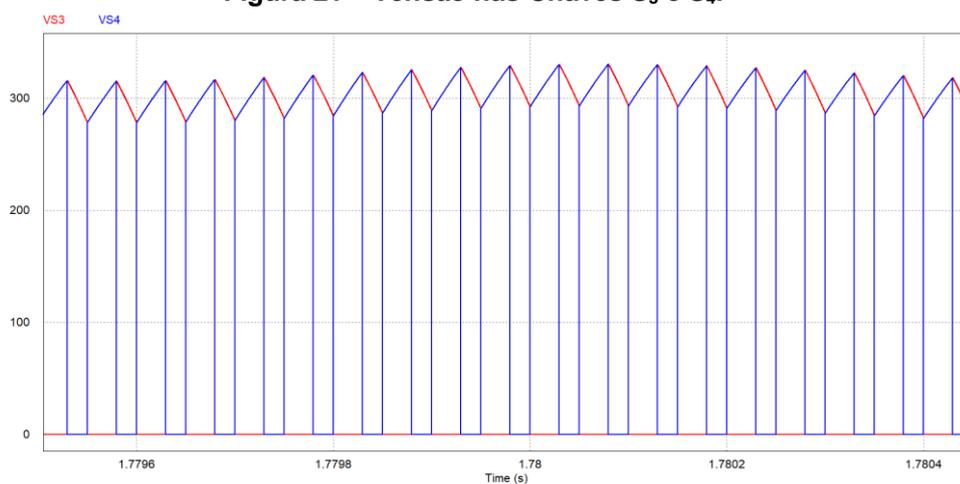
A próxima aquisição é das tensões das chaves S_1 , S_2 , S_3 e S_4 . Na Figura 20 têm-se as tensões das chaves S_1 e S_2 e a Figura 21 mostra as tensões nas chaves S_3 e S_4 . Mostrando assim que as chaves S_1 e S_2 assim como as S_3 e S_4 continuam complementares, respectivamente.

Figura 20 – Tensão nas Chaves S₁ e S₂.



Fonte: Autoria própria.

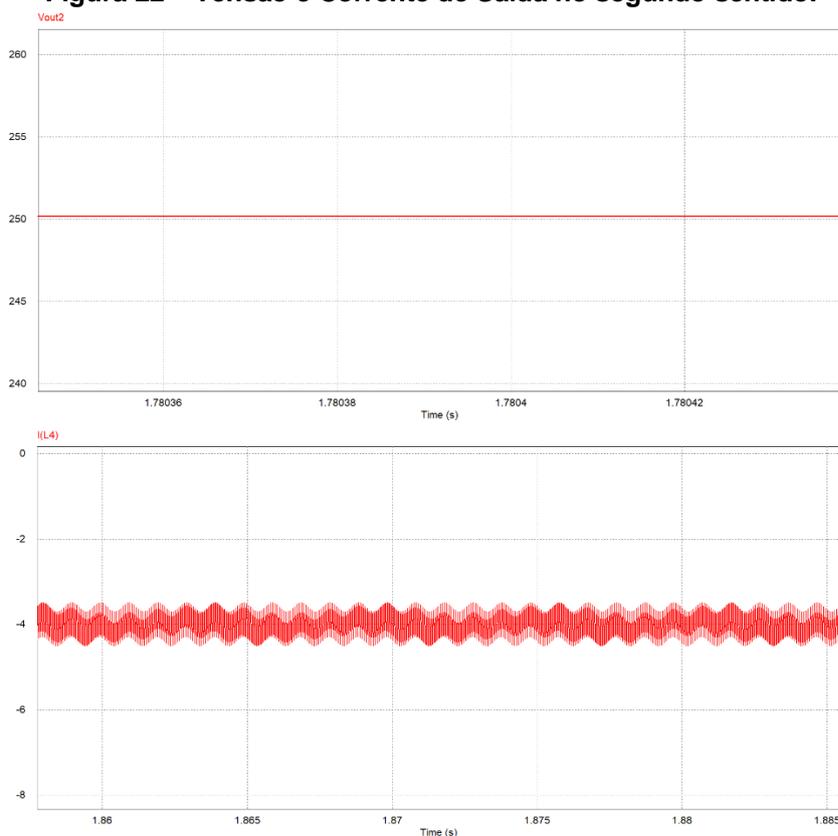
Figura 21 – Tensão nas Chaves S₃ e S₄.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 22 podemos ver a tensão em V_1 e a corrente de L_1 , ambas grandezas bem próximas das calculadas. Com isso, pode-se ter uma boa expectativa para como o conversor funcionará na prática conduzindo neste sentido, sendo capaz de retirar energia de um banco de baterias e fornecendo para a microrrede.

Figura 22 – Tensão e Corrente de Saída no segundo sentido.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 mostra os valores de algumas grandezas calculados, os valores obtidos por simulação e também o erro entre estes valores.

Tabela 3 – Valores Preliminares Projetados Baseados nas Especificações.

	Valores Calculados	Valores de Simulação	Erro
No sentido de condução $V_1 \rightarrow V_o$	$I_{L1méd} = 4A$	$I_{L1méd} = 3,99A$	0,25%
	$I_{L2méd} = I_{L3méd} = 2,778A$	$I_{L2méd} = I_{L3méd} = 2,774A$	0,144%
	$V_{S1máx} = V_{S3máx} = 350,75V$	$V_{S1máx} = V_{S3máx} = 352,58V$	0,522%
	$V_{S2máx} = V_{S4máx} = 350,75V$	$V_{S2máx} = V_{S4máx} = 352,51V$	0,502%
	$V_{C1méd} = V_{C2méd} = 305V$	$V_{C1méd} = V_{C2méd} = 304,69V$	0,102%
	$V_2 = V_3 = 180V$	$V_2 = V_3 = 179,62V$	0,211%
	$\Delta I_{L1} = 800mA$	$\Delta I_{L1} = 798,44mA$	0,19%
	$\Delta I_{L2} = 555,56mA$	$\Delta I_{L2} = 555,10mA$	0,082%
	$\Delta I_{L3} = 555,56mA$	$\Delta I_{L3} = 554,87mA$	0,124%
	$\Delta V_{C1} = 45,75V$	$\Delta V_{C1} = 45,37V$	0,83%
	$\Delta V_{C2} = 45,75V$	$\Delta V_{C2} = 45,37V$	0,83%

No sentido de condução $V_o \rightarrow V_1$	$V_1 = 250V$	$V_1 = 249,98V$	0,008%
--	--------------	-----------------	--------

Fonte: Autoria própria.

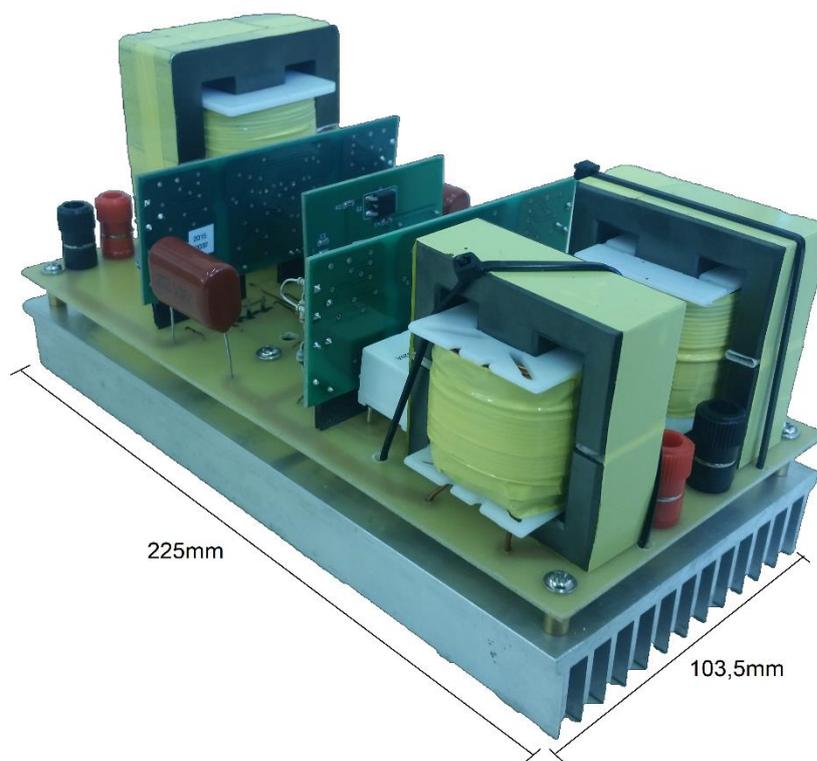
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com os resultados das simulações numéricas, o desenvolvimento do protótipo foi iniciado. Inicialmente foi feito um esquema elétrico do conversor como mostrada no Apêndice B.

Por meio do esquema elétrico, o *layout* da placa foi elaborado como apresentado no Apêndice C.

Tendo o layout pronto, os componentes foram selecionados e o protótipo foi montado. A Figura 23 é a imagem da placa após sua montagem.

Figura 23 – Protótipo do Conversor.



Fonte: A autoria própria.

Os componentes utilizados para a montagem do protótipo do conversor estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Lista de Principais Componentes Utilizados no Protótipo.

Quantidade	Componente
1	Indutor 9,221mH/4A núcleo EE65
2	Indutores 6,639mH/3A núcleo EE55
2	Capacitor 2,2 μ F/630V

4	IGBT IKW40M65F5 650V 40A $V_{CESAT}=1.6V$
2	Driver duplo DRO100D25A
1	Fonte de Driver DS320-08A
1	Transformador de pulso TRM480D20A
4	Resistores de 10k Ω

Fonte: Autoria própria.

Após a montagem, o protótipo foi ensaiado em dois momentos distintos: um à metade da carga nominal 500 W e outro em regime nominal com processamento de 1 kW de potência, ambos com tensão de entrada 250 V, em malha aberta e simulando a microrrede entregando energia para o banco de baterias.

Para todas as medições foi utilizado os pulsos de comando nos IGBT's como mostra a Figura 24. Tais pulsos foram criados utilizando os circuitos integrados UC3524N, 74LS06 e 74LS07.

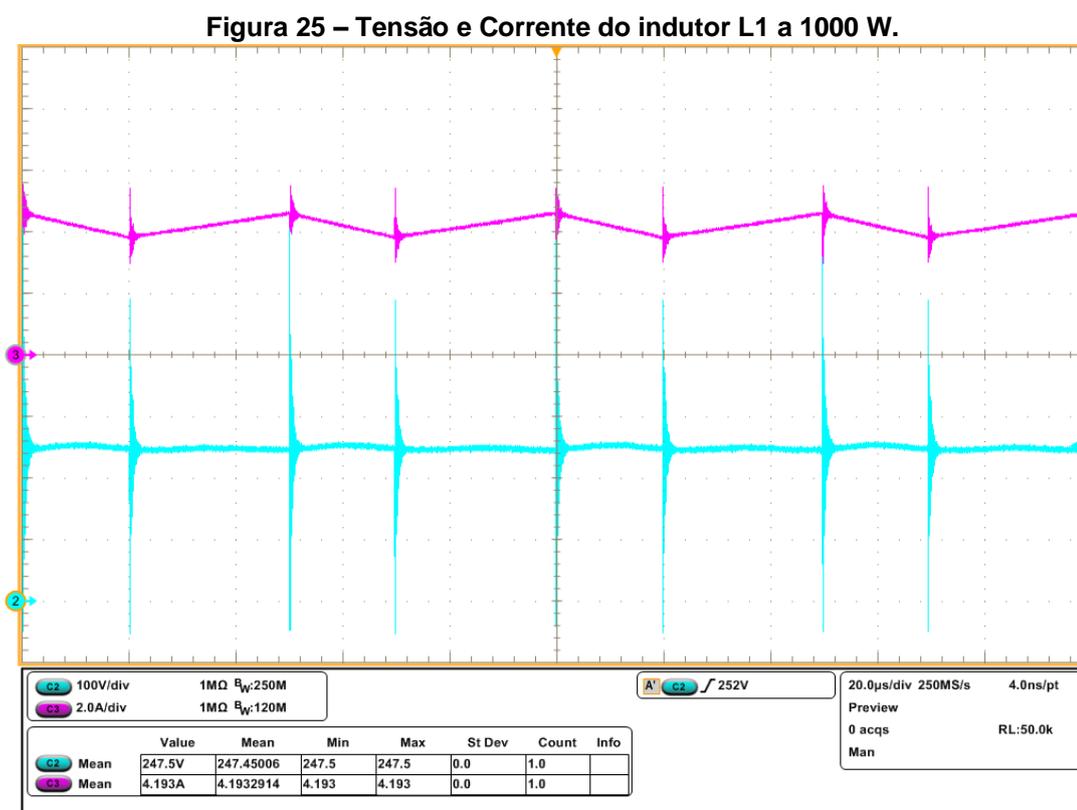
Figura 24 – Pulsos de Comando das chaves S₁, S₂, S₃ e S₄.



Fonte: Autoria própria.

Então, foram medidos vários pontos do circuito para que fossem comparados com os adquiridos na simulação numérica. A Figura 25 mostra a tensão e corrente de entrada a 1000 W.

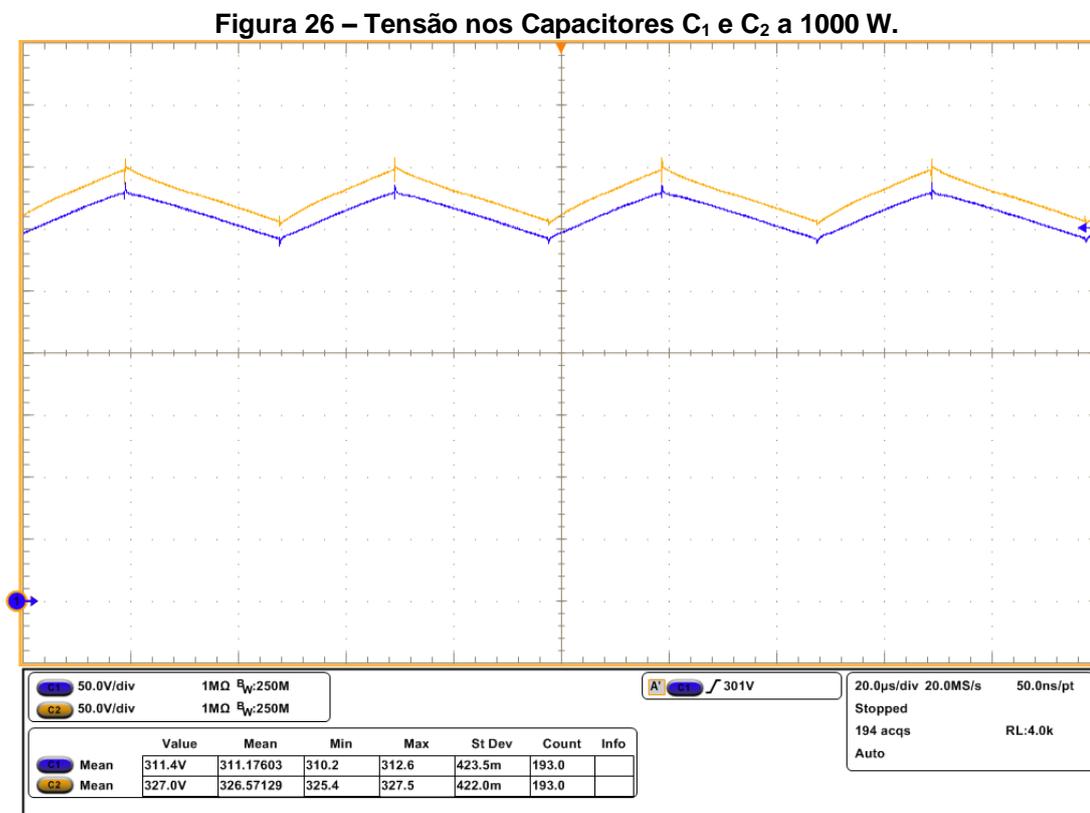
Os ruídos na imagem se dá ao fato do ruído de chaveamento dos IGBT's, e como a corrente de entrada é a mesma do indutor podemos observar que o mesmo está em modo de condução contínua e o valor de ambas as correntes é condizente com o que o projeto havia estipulado.



Fonte: Autoria própria.

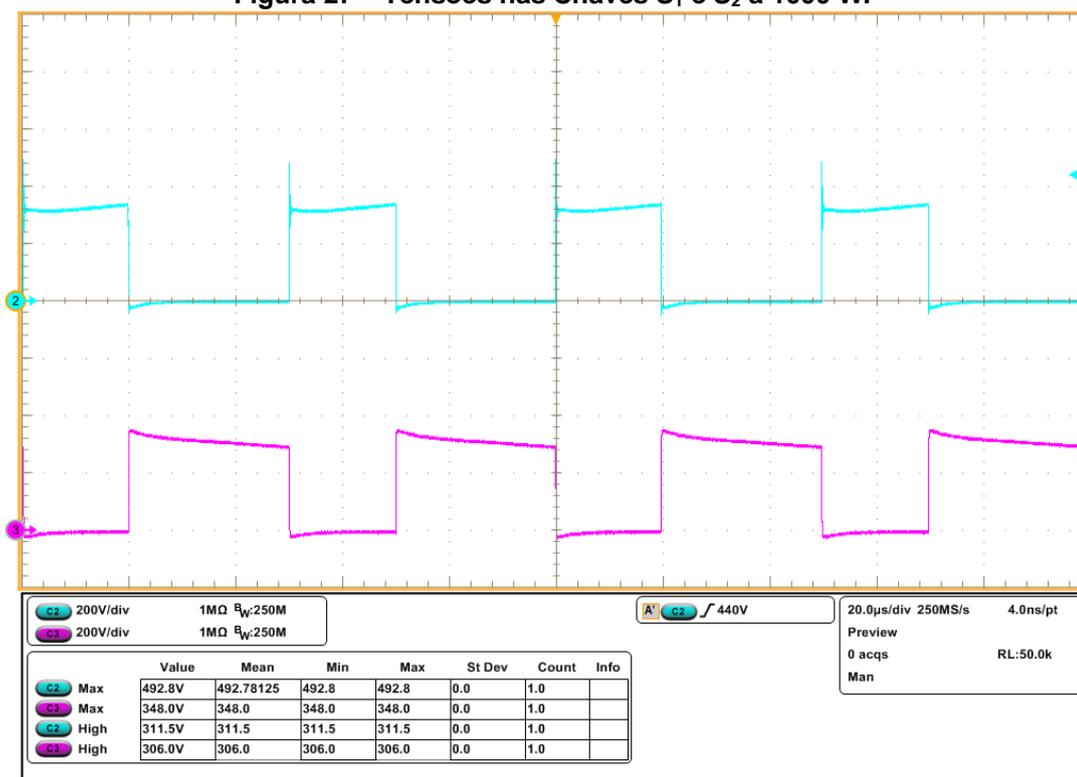
Em seguida, mediu-se as tensões nos capacitores intermediários e verificou-se que as tensões de saída não estavam equilibradas pois as tensões em cima dos capacitores C_1 e C_2 não eram iguais. Tal desequilíbrio se dá ao fato dos componentes envolvidos nos dois níveis de saída não serem perfeitamente iguais, o fato de ser um teste em malha aberta também contribui para o desequilíbrio e também foi testado a troca de lugar dos dois drivers duplos que estavam sendo utilizados o que resultou em um desequilíbrio maior pois em seus próprios circuitos os componentes têm um limite de precisão.

A curva capturada na Figura 26 mostra as tensões nos capacitores intermediários a 1000 W de potência.



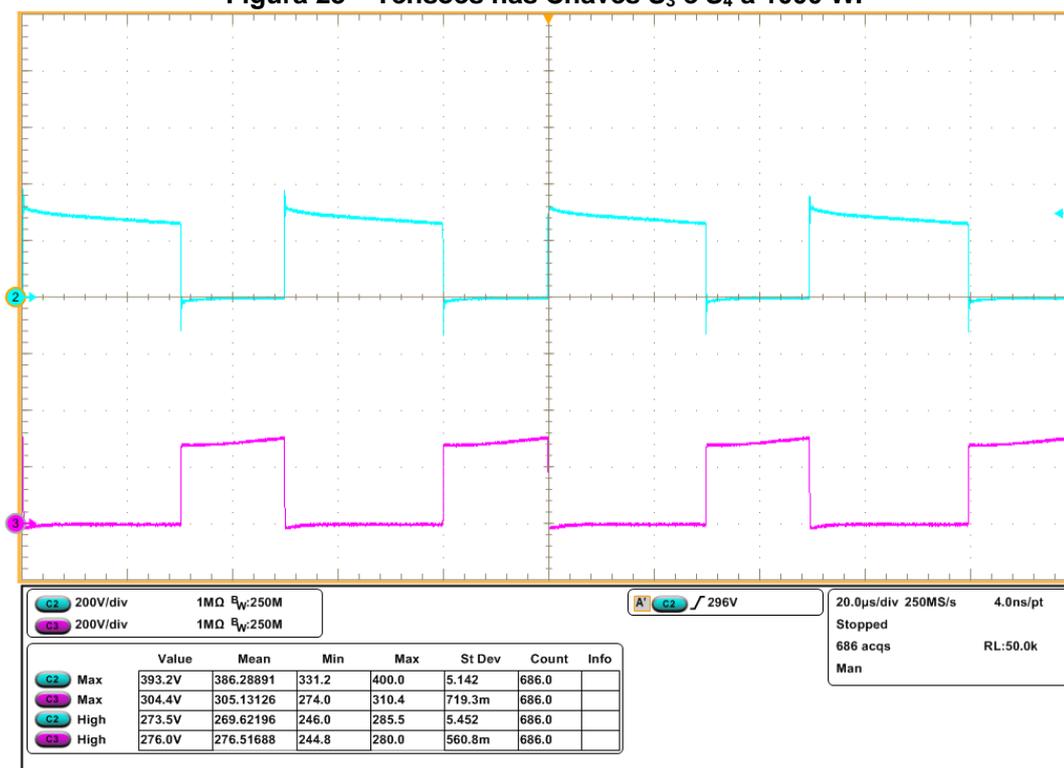
Fonte: Autoria própria.

A Figura 27 contém as formas de onda das tensões nas chaves S₁ e S₂. Como pode-se observar uma funciona complementar a outra pois são de braços opostos. Pode-se observar também que uma delas tem uma sobretensão maior que a outra isto se dá devido ao *layout*. Nota-se também na Figura 27 que os patamares de tensão próximas do esperado, ou seja, 305V.

Figura 27 – Tensões nas Chaves S₁ e S₂ a 1000 W.

Fonte: Autoria própria.

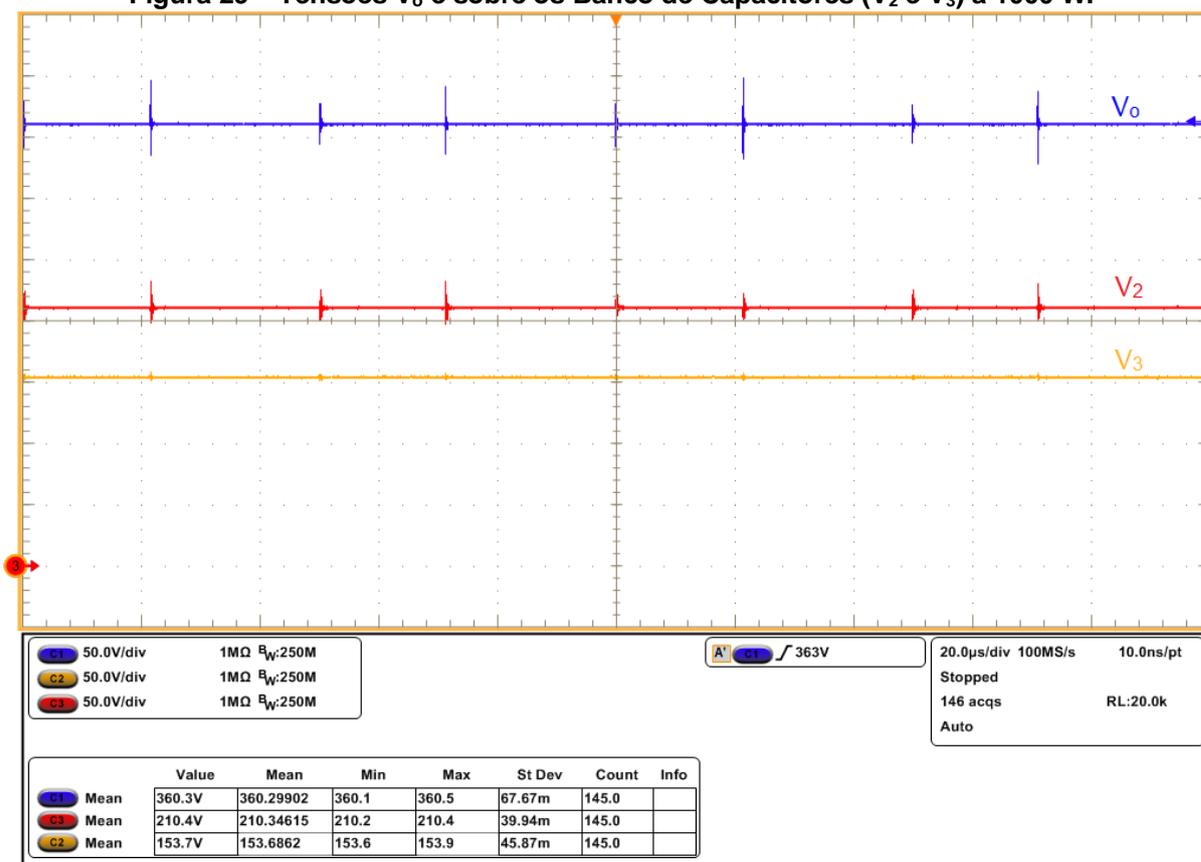
Em seguida aferiram-se, as tensões das chaves S₃ e S₄ a potência nominal mostrada na Figuras 28. Comparando a tensão nas chaves das Figuras 27 e 28, desconsiderando-se a tensão de pico, os valores são próximos aos 305 V esperados e pode-se ver também o desequilíbrio de tensão nas chaves do mesmo braço S₁ e S₃ ou S₂ e S₄.

Figura 28 – Tensões nas Chaves S_3 e S_4 a 1000 W.

Fonte: Autoria própria.

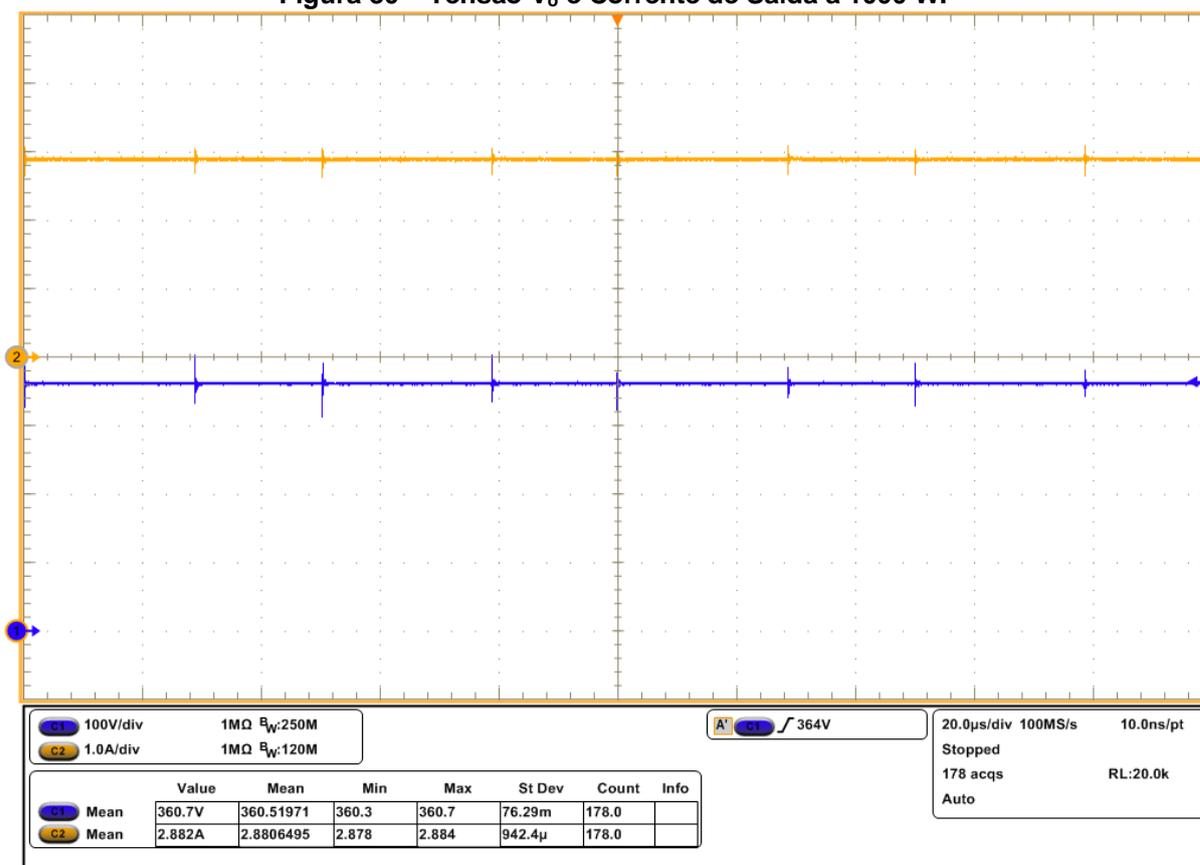
Agora foi a vez de aferir a tensão de V_o e as tensões nos dois bancos de capacitores que em paralelo com a carga resistiva simula um banco de baterias. A Figura 29 mostra as tensões a 1000 W.

Figura 29 – Tensões V_o e sobre os Banco de Capacitores (V_2 e V_3) a 1000 W.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 30, a carga nominal, tem-se a tensão V_o e a corrente de saída muito próxima ao valor nominal pois o valor de carga resistiva em teste foi um pouco maior que a nominal devido a limitações em arranjos de cargas do Centro de Pesquisas em Eletrônica da UTFPR-PG.

Figura 30 – Tensão V_o e Corrente de Saída a 1000 W.

Fonte: Autoria própria.

Foi realizado um teste para aquisição da curva de rendimento desta topologia. No teste manteve-se a tensão de entrada e tensão de saída fixas e variou-se a carga de saída para uma análise de rendimento do conversor de aproximadamente 100 W a 1000 W. A Tabela 5 mostra os valores de potência utilizados e seus respectivos rendimentos. A Figura 31 mostra o gráfico de rendimento plotado utilizando-se os valores da Tabela 5.

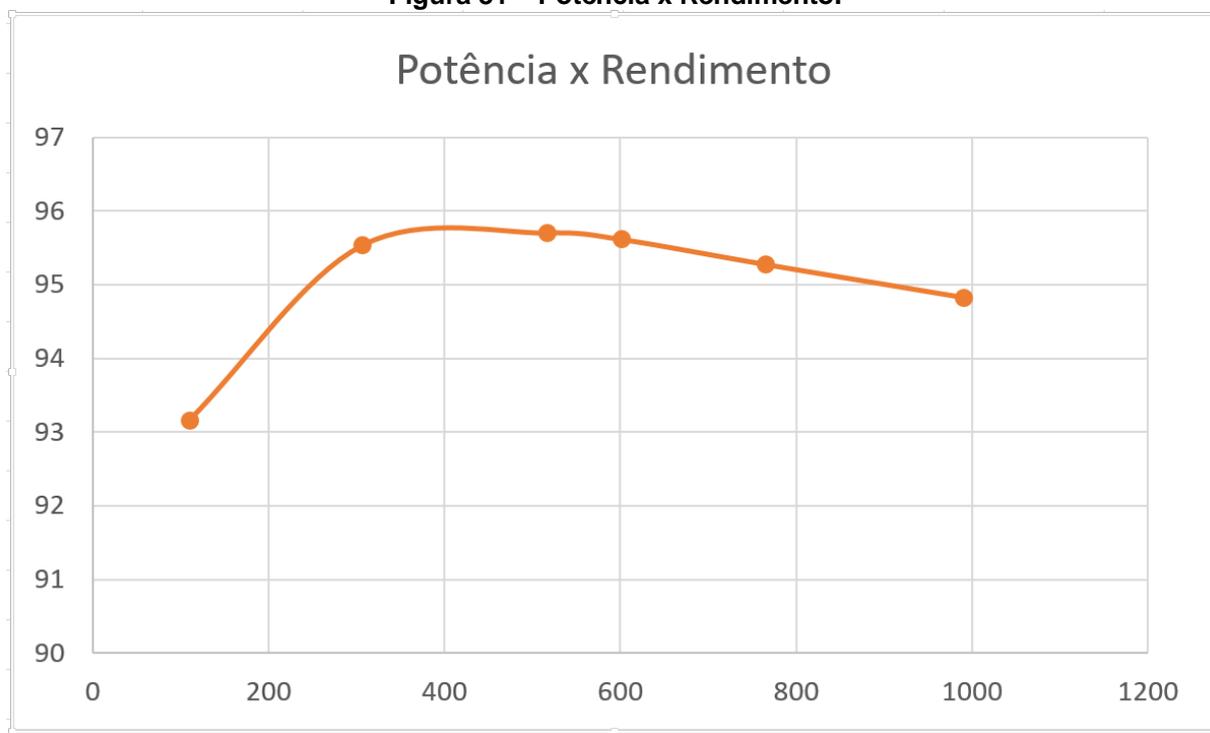
Tabela 5 – Potência x Rendimento

Potência (W)	Rendimento (%)
110.028	93,16
306.609	95,534
517.24	95,702
601.064	95,615
765.55	95,274
990.37	94,826

Fonte: Autoria própria

Verifica-se que o conversor apresentou um rendimento máximo de 95,7% e um rendimento de 94,82% na potência nominal.

Figura 31 – Potência x Rendimento.



Fonte: Autoria própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados dois objetivos principais que eram fazer um estudo e ter domínio sobre a tecnologia proposta que é o conversor CC-CC Cúk a quatro chaves e fazer aquisições e avaliação de resultados práticos do mesmo. Este trabalho possui grande relevância na área de banco de baterias conectados a uma microrrede CC, pois propõe um conversor com alto rendimento.

Além da análise teórica, foram apresentadas as equações das grandezas elétricas desse conversor que são comprovadas através da simulação numérica e pela montagem e teste deste protótipo.

Finalmente, conclui-se que essa topologia tem ótimas características na aplicação de conexão de um banco de baterias à microrredes CC. Em adição, este trabalho deixa em aberto algumas questões para trabalhos futuros em que o mesmo conversor como uma estratégia de controle de carga de baterias pois sem tal controle as baterias podem se danificar. Além disso, este conversor poderá ser estudado conectado à uma microrrede CC para se fazer a análise de como uma microrrede CC se comporta e estudar os melhores métodos de controle da mesma. Como trabalho futuro sugere-se a realização do controle do conversor por meio do controle de combinação linear da corrente de saída até que as tensões das baterias cheguem as suas tensões máximas, com as tensões em seus valores máximos a corrente deve decair gradualmente até zero, assim sabe-se que as baterias estão carregadas. Assim o limite de tensão que o fabricante impõe será respeitado.

REFERÊNCIAS

AG, S. **Microgrids White Paper**. [s.l.] Siemens, 2011. Disponível em: <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=DLA17_8>. Acesso em: 22 ago. 2017.

AYAI, Naoki et al. **DC Micro Grid System**. Sei Technical Review, 2012. 5 v.

CAPELAS, Bruno. **Até o fim de 2017, Brasil terá um smartphone por habitante, diz FGV**. Disponível em: <<http://link.estadao.com.br/noticias/gadget,ate-o-fim-de-2017-brasil-tera-um-smartphone-por-habitante-diz-pesquisa-da-fgv,70001744407>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

FERREIRA SOLTOSKI, Julio Cesar. **Estudo de um Retificador Trifásico Boost Operando no MCD com Aplicação em Geração Eólica de Pequeno Porte**. 2016. 68 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

IEEE ELECTRIFICATION. **Does dc Distribution Make Sense?**. New York: IEEE, v. 4, n. 2, jun. 2016. Mensal.

MENDONÇA, Lucas Paulis. **Introdução às Microrredes e seus Desafios**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. 74 p.

FISKE, O.J.; RICCI, M.R. **“Third generation flywheels for high power electricity storage.”** Apresentação da LaunchPoint Technologies Inc. Em setembro de 2006.

POLI DOS SANTOS, Paulo Tadeu. **Estudo do conversor boost bidirecional para conexão de uma microrrede à rede elétrica**. 2017. 90 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

STEPHAN, R.M.; ANDRADE JR., R. de; SOTELLO G.G. **“Third generation flywheels: a promising substitute to batteries.”** Eletrônica de Potência, vol.13, no.3, agosto de 2008.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.P.; CROSSLEY, P. “**Microgrids and Active Distribution Networks.**” IET 2009 (1ª ed.). Cap. 1,2,3,4 e 7.

SANTOS, Marcio de Miranda et al. **Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2012. 172 p.

SOLAR, Portal. **TESLA E A APLICAÇÃO DAS BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO NO MERCADO NACIONAL.** Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/bateria-solar/tesla-e-a-aplicacao-das-baterias-de-ion-de-litio-no-mercado-nacional.html>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

TELEKE, S. **Nanogrids with energy storage for future electricity Grids.** [s.l.] IEEE Power & Energy Society, 2014. Disponível em: <<http://www.ieee-pes.org/presentations/td2014/td2014p-000083.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

APÊNDICE A – Planilha de cálculo dos componentes.

Projeto de um Conversor CC-CC Cúk MCC a 4 Chaves

Acadêmicos: Augusto Braga de Almeida

Disciplina: TCC 2

Professor: Carlos Henrique Ila Font

Ponta Grossa- PR - Setembro / 2017

1) Especificações:

Tensão de Entrada:	$V_{in} := 250V$	
Tensão de Saída 1:	$V_{out1} := 180V$	
Tensão de Saída 2:	$V_{out2} := 180V$	
Tensão de Saída:	$V_{out} := V_{out1} + V_{out2}$	$V_{out} = 360V$
Potência de Saída:	$P_o := 1000W$	
Frequência de Comutação:	$f_s := 20kHz$	
Ondulação de Corrente no Indutor L1:	$\Delta I_{L1\%} := 20\%$	
Ondulação de Corrente no Indutor L2:	$\Delta I_{L2\%} := 20\%$	
Ondulação de Corrente no Indutor L3:	$\Delta I_{L3\%} := 20\%$	
Ondulação da Tensão no Capacitor C1:	$\Delta V_{C1\%} := 15\%$	
Ondulação da Tensão no Capacitor C2:	$\Delta V_{C2\%} := 15\%$	

2) Cálculos Preliminares:

Razão Cíclica:	$D := \frac{\frac{V_{out}}{V_{in}}}{1 + \frac{V_{out}}{V_{in}}}$	$D = 0.59$
Corrente de Entrada:	$I_{L1} := \frac{P_o}{V_{in}}$	$I_{L1} = 4 \text{ A}$
Corrente de Saída:	$I_{out} := \frac{P_o}{V_{out}}$	$I_{out} = 2.778 \text{ A}$
Resistencia da Fonte V1:	$R_1 := \frac{V_{in}}{I_{L1}}$	$R_1 = 62.5 \Omega$
Resistencia da Fonte V2:	$R_2 := \frac{V_{out}}{I_{out}}$	$R_2 = 129.6 \Omega$
Ondulação de Corrente no Indutor:	$\Delta I_{L1} := \Delta I_{L1\%} \cdot I_{L1}$	$\Delta I_{L1} = 800 \text{ mA}$
Ondulação de Corrente no Indutor:	$\Delta I_{L2} := \Delta I_{L2\%} \cdot I_{out}$	$\Delta I_{L2} = 555.556 \text{ mA}$
Ondulação de Corrente no Indutor:	$\Delta I_{L3} := \Delta I_{L3\%} \cdot I_{out}$	$\Delta I_{L2} = 555.556 \text{ mA}$
Ondulação de Tensão no Capacitor:	$\Delta V_{C1} := \Delta V_{C1\%} \cdot \frac{V_{in} + V_{out}}{2}$	$\Delta V_{C1} = 45.75 \text{ V}$
Ondulação de Tensão no Capacitor:	$\Delta V_{C2} := \Delta V_{C2\%} \cdot \frac{V_{in} + V_{out}}{2}$	$\Delta V_{C2} = 45.75 \text{ V}$

3) Dimensionamento dos Indutores:

Indutância L1:	$L_1 := \frac{V_{in} \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_{L1}}$	$L_1 = 9.221 \cdot \text{mH}$
Indutância L2	$L_2 := \frac{V_{in} \cdot D}{2f_s \cdot \Delta I_{L2}}$	$L_2 = 6.639 \cdot \text{mH}$
Indutância L3	$L_3 := \frac{V_{in} \cdot D}{2f_s \cdot \Delta I_{L3}}$	$L_2 = 6.639 \cdot \text{mH}$
Corrente Máxima L1:	$I_{L1\text{max}} := I_{L1} + \Delta I_{L1}$	$I_{L1\text{max}} = 4.8 \text{ A}$
Corrente Máxima L2:	$I_{L2\text{max}} := I_{out} + \Delta I_{L2}$	$I_{L2\text{max}} = 3.333 \text{ A}$
Corrente Máxima L3:	$I_{L3\text{max}} := I_{out} + \Delta I_{L2}$	$I_{L3\text{max}} = 3.333 \text{ A}$
Corrente Média L1:	$I_{L1\text{med}} := I_{L1}$	$I_{L1\text{med}} = 4 \text{ A}$
Corrente Média L2:	$I_{L2\text{med}} := I_{out}$	$I_{L2\text{med}} = 2.778 \text{ A}$
Corrente Média L3:	$I_{L3\text{med}} := I_{out}$	$I_{L3\text{med}} = 2.778 \text{ A}$
Corrente Eficaz L1:	$I_{L1\text{ef}} := 4.014 \text{ A}$	
Corrente Eficaz L2:	$I_{L2\text{ef}} := 2.80 \text{ A}$	
Corrente Eficaz L3:	$I_{L3\text{ef}} := 2.80 \text{ A}$	

4) Dimensionamento dos Capacitores:

$$\text{Capacitância C1:} \quad C1 := \frac{I_{\text{out}} \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_{C1}} \quad C1 = 1.792 \cdot \mu\text{F}$$

$$\text{Capacitância C2:} \quad C2 := \frac{I_{\text{out}} \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_{C2}} \quad C2 = 1.792 \cdot \mu\text{F}$$

$$\text{Tensao Máxima:} \quad V_{C1\text{max}} := \frac{V_{\text{in}} + V_{\text{out}}}{2} \quad V_{C1\text{max}} = 305 \text{ V}$$

$$\text{Tensao Máxima:} \quad V_{C2\text{max}} := \frac{V_{\text{in}} + V_{\text{out}}}{2} \quad V_{C2\text{max}} = 305 \text{ V}$$

5) Dimensionamento dos Transistores :

$$\text{Tensão Máxima S1:} \quad V_{S1\text{max}} := \frac{V_{\text{in}} + V_{\text{out}}}{2} + \Delta V_{C1} \quad V_{S1\text{max}} = 350.75 \text{ V}$$

$$\text{Corrente Máxima S1:} \quad I_{S1\text{max}} := 7.6 \text{ A} \quad I_{S1\text{max}} = 7.6 \text{ A}$$

$$\text{Corrente Média S1:} \quad I_{S1\text{med}} := I_{L1} \quad I_{S1\text{med}} = 4 \text{ A}$$

$$\text{Tensão Máxima S2:} \quad V_{S2\text{max}} := \frac{V_{\text{in}} + V_{\text{out}}}{2} + \Delta V_{C2} \quad V_{S2\text{max}} = 350.75 \text{ V}$$

Corrente Média S2:	$I_{S2med} := I_{L1}$	$I_{S2med} = 4 \text{ A}$
Tensão Máxima S3:	$V_{S3max} := \frac{V_{in} + V_{out}}{2} + \Delta V_{C1}$	$V_{S1max} = 350.75 \text{ V}$
Corrente Máxima S3:	$I_{S3max} := 7.6 \text{ A}$	$I_{S1max} = 7.6 \text{ A}$
Corrente Média S3:	$I_{S3med} := I_{out}$	$I_{S3med} = 2.778 \text{ A}$
Tensão Máxima S4:	$V_{S4max} := \frac{V_{in} + V_{out}}{2} + \Delta V_{C2}$	$V_{S2max} = 350.75 \text{ V}$
Corrente Máxima S4:	$I_{S4max} := 7.6 \text{ A}$	$I_{S2max} = 7.4 \text{ A}$
Corrente Média S4:	$I_{S4med} := I_{out}$	$I_{S4med} = 2.778 \text{ A}$

7) Projeto Físico do Indutor L1:

Máxima Indução:	$B_{max} := 0.3 \text{ T}$
Máxima Densidade de Corrente:	$J_{max} := 450 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$
Fator de Ocupação do Cobre:	$k_w := 0.7$

Permeabilidade do Ar:

$$\mu_o := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Produto de Áreas L1:

$$A_e A_w L_1 := \frac{L_1 \cdot I_{L1\text{max}} \cdot I_{L1\text{ef}}}{B_{\text{max}} \cdot J_{\text{max}} \cdot k_w} \quad A_e A_w L_1 = 18.801 \cdot \text{cm}^4$$

Adotou-se o núcleo EE 65, com as seguintes características:

$$A_e := 5.32 \text{cm}^2$$

$$A_w := 3.7 \text{cm}^2$$

Número de Espiras L1:

$$N_{eL1} := \text{ceil} \left(\frac{L_1 \cdot I_{L1\text{max}}}{B_{\text{max}} \cdot A_e} \right) \quad N_{eL1} = 278$$

Comprimento do Entreferro L1:

$$e_{L1} := \frac{N_{eL1}^2 \cdot \mu_o \cdot A_e}{L_1} \quad e_{L1} = 5.603 \cdot \text{mm}$$

Profundidade de Penetração:

$$d_{\text{max}} := \frac{15}{\sqrt{f_s}} \cdot \sqrt{\text{Hz}} \cdot \text{cm} \quad d_{\text{max}} = 0.106 \cdot \text{cm}$$

O condutor máximo a ser utilizado é 18AWG, com a seguinte área:

$$S_{\text{max}} := 0.008231 \text{cm}^2$$

Área do Fio Condutor L1:

$$S_{\text{fioL1}} := \frac{I_{L1\text{ef}}}{J_{\text{max}}} \quad S_{\text{fioL1}} = 8.92 \times 10^{-3} \cdot \text{cm}^2$$

Número de Fios em Paralelo L1:

$$n_{L1} := \frac{S_{\text{fioL1}}}{S_{\text{max}}} \quad n_{L1} = 1.084$$

O fio adotado é 18 AWG com a seguinte área:

$$S_{18L1} := 0.008231 \text{ cm}^2$$

Possibilidade de Execução L1:

$$A_{w_minL1} := \frac{N_{eL1} \cdot S_{18L1} \cdot n_{L1}}{k_w} \quad A_{w_minL1} = 3.543 \cdot \text{cm}^2$$

$$Exec_{L1} := \frac{A_{w_minL1}}{A_w} \quad Exec_{L1} = 0.957$$

9) Projeto Físico do Indutor L2:

Produto de Áreas L2:

$$A_e A_w L2 := \frac{L_2 \cdot I_{L2max} \cdot I_{L2ef}}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot k_w} \quad A_e A_w L2 = 6.557 \cdot \text{cm}^4$$

Adotou-se o núcleo EE 55, com as seguintes características:

$$A_{eL2} := 3.54 \text{ cm}^2$$

$$A_{wL2} := 2.5 \text{ cm}^2$$

Número de Espiras L2:

$$N_{eL2} := \text{ceil} \left(\frac{L_2 \cdot I_{L2max}}{B_{max} \cdot A_{eL2}} \right) \quad N_{eL2} = 209$$

Comprimento do Entreferro L2:

$$e_{L2} := \frac{N_{eL2}^2 \cdot \mu_o \cdot A_{eL2}}{L_2} \quad e_{L2} = 2.927 \cdot \text{mm}$$

$$d_{max} = 0.106 \cdot \text{cm}$$

O condutor máximo a ser utilizado é 18 AWG, com a seguinte área:

$$S_{maxL2} := 0.008231 \text{ cm}^2$$

Possibilidade de Execução L2:

$$A_{w_minL2} := \frac{N_{eL2} \cdot S_{21L2} \cdot n_{L2}}{k_w} \quad A_{w_minL2} = 1.858 \cdot \text{cm}^2$$

$$Exec_{L2} := \frac{A_{w_minL2}}{A_w} \quad Exec_{L2} = 0.502$$

10) Projeto Físico do Indutor L3:

Produto de Áreas L3:

$$A_e A_w L3 := \frac{I_3 \cdot I_{L3max} \cdot I_{L3ef}}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot k_w} \quad A_e A_w L3 = 6.557 \cdot \text{cm}^4$$

Adotou-se o núcleo EE 55, com as seguintes características:

$$A_{eL3} := 3.54 \text{cm}^2$$

$$A_{wL3} := 2.5 \text{cm}^2$$

Número de Espiras L3:

$$N_{eL3} := \text{ceil} \left(\frac{L_3 \cdot I_{L3max}}{B_{max} \cdot A_{eL3}} \right) \quad N_{eL3} = 209$$

Comprimento do Entreferro L3:

$$e_{L3} := \frac{N_{eL3}^2 \cdot \mu_o \cdot A_{eL3}}{L_2} \quad e_{L3} = 2.927 \cdot \text{mm}$$

$$d_{max} = 0.106 \cdot \text{cm}$$

O condutor máximo a ser utilizado é 18AWG, com a seguinte área:

$$S_{maxL3} := 0.008231 \text{cm}^2$$

Área do Fio Condutor L3: $S_{\text{fioL3}} := \frac{I_{L3\text{ef}}}{J_{\text{max}}}$ $S_{\text{fioL3}} = 6.222 \times 10^{-3} \cdot \text{cm}^2$

Número de Fios em Paralelo L3: $n_{L3} := \frac{S_{\text{fioL3}}}{S_{\text{maxL3}}}$ $n_{L3} = 0.756$

O fio adotado é 18 AWG com a seguinte área:

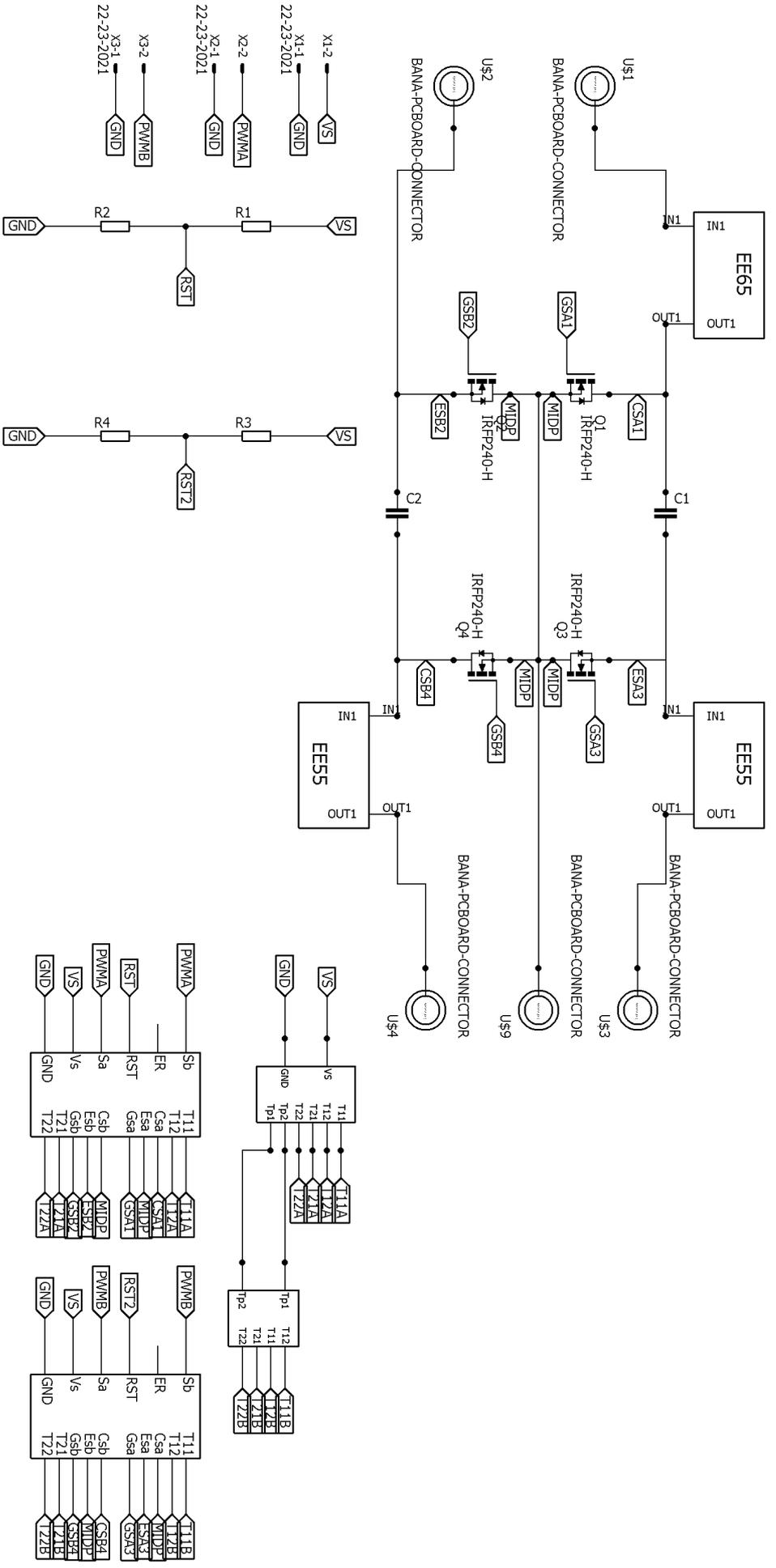
$$S_{31L3} := 0.008231 \text{cm}^2$$

Possibilidade de Execução L3: $A_{w_minL3} := \frac{N_{eL3} \cdot S_{31L3} \cdot n_{L3}}{k_w}$ $A_{w_minL3} = 1.858 \cdot \text{cm}^2$

$$\text{Exec}_{L3} := \frac{A_{w_minL3}}{A_w}$$

$\text{Exec}_{L3} = 0.502$

APÊNDICE B – Layout do Circuito.



APÊNDICE C – Layout da Placa.

