

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROBERTO BASTOS DOS SANTOS FILHO

***BUCK* INTERCALADO PARA CARREGAMENTO DE
BATERIAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

ROBERTO BASTOS DOS SANTOS FILHO

***BUCK* INTERCALADO PARA CARREGAMENTO DE
BATERIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Co-orientador: Cassiano Ferro Moraes

PATO BRANCO

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado BUCK INTERCALADO PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS, do aluno Roberto Bastos dos Santos Filho foi considerado APROVADO de acordo com a ata da banca examinadora N° 240 de 2019.

Fizeram parte da banca os professores:

Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Diogo Vargas

Juliano de Pelegrini Lopes

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

Dedico este trabalho à José Bastos e Dileta Bastos (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelas oportunidades que me proporcionou, pela boa saúde que me manteve firme durante todo o tempo, mesmo diante de rotinas mais severas, e por garantir com que eu tivesse tudo aquilo que me era necessário. Agradeço especialmente a minha família por me ensinar a ser positivo, otimista e a ver o lado bom de tudo, por estarem sempre presentes mesmo quando a distância era um grande obstáculo e por acreditarem em mim, mesmo quando diante de dificuldades minha própria auto credibilidade parecia esvaír.

Com todo carinho à Juliana por toda sua compreensão, carinho e apoio nos momentos mais difíceis.

Como disse uma vez um grande professor, Everton Luiz Aguiar (2019) "Na engenharia não formamos sozinhos, caminhamos juntos diante das dificuldades, trabalhamos em equipe, compartilhando o que sabemos, fazendo o possível diante de cada matéria". Diante dessas palavras, agradeço aos meus amigos que fizeram parte dessa jornada, que através de um ótimo trabalho em equipe me ensinaram que juntos somos mais fortes e podemos alcançar distâncias que antes eram inacessíveis.

Gostaria de agradecer, meu orientador Carlos Marcelo de Oliveira Stein pela credibilidade e auxílio, também pela oportunidade de fazer iniciação científica, que me mostrou uma perspectiva além daquilo com que eu estava acostumado, gerando muito aprendizado e conhecimento, além da oportunidade de trabalhar com equipamentos de última geração, gerando uma experiência que eu jamais havia esperado adquirir, além de possibilitar o encaminhamento deste trabalho.

Agradeço ao meu coorientador e amigo, por estar sempre presente, por compartilhar sua experiência e pela grande energia, acompanhando e me auxiliando, em cada detalhe, também por estar sempre disponível para me auxiliar na realização desse trabalho, eu não teria chegado até aqui se não fosse a ajuda dele.

Agradeço a toda equipe do laboratório da Politec, pelos conselhos e auxílios, por estarem sempre ao meu lado me instruindo e apresentando dicas, além do grande companheirismo, serei eternamente grato.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para esta etapa de minha vida.

RESUMO

FILHO, Roberto Bastos dos Santos. *BUCK* INTERCALADO PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS. 61 f. Trabalho de conclusão de curso – Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Este trabalho tem como objetivo principal o projeto e implementação de um conversor *buck* intercalado. Esta topologia servirá para ser utilizada como um controlador de carga para baterias, através da inserção de um painel fotovoltaico. O motivo para utilização desse conversor se deve ao fato de ser possível realizar um projeto com baixa ondulação de tensão e corrente, redução dos esforços nos semicondutores, além de diminuir o *ripple* da corrente de saída, tornando possível a utilização de um capacitor não polarizado elevando a vida útil do sistema. Essas características são possíveis pois em cada célula, constituída de um MOSFET, um indutor e um diodo, a corrente é dividida, sendo sobreposta posteriormente no *nó* que interliga o capacitor e a carga.

Inicialmente, exibe-se uma revisão da literatura sobre painéis fotovoltaicos apresentando a nomenclatura de construção e informações relevantes para implementação, sequencialmente técnicas de carregamento para baterias são apresentadas, fechando com uma revisão das principais topologias de conversores isolados com foco principal no conversor *buck* por ser essencial para entendimento dos critérios de projeto deste trabalho. Realizam-se análises e equacionamentos demonstrando metodologias de projeto e implementação do conversor *buck* intercalado, etapas de operação e os cálculos para os componentes a serem utilizados. Posteriormente os resultados de simulação são apresentados e discutidos, assim como os resultados experimentais na sequência. O fechamento é realizado com a apresentação da conclusão.

Palavras-chave: Buck intercalado, MOSFET, baterias

ABSTRACT

FILHO, Roberto Bastos dos Santos. INTERLEAVED BUCK FOR CHARGE BATERYS . 61 f. Trabalho de conclusão de curso – Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

This work has as main objective the design and implementation of an interleaved buck converter. This topology will serve to be used as a charge controller for batteries by inserting a photovoltaic panel. The reason for using this converter is because it is possible to carry out a project with low voltage and current ripple, reduction of semiconductor stresses, as well as reducing the output current ripple, making it possible to use a non-polarized capacitor increasing system life. These characteristics are possible because in each cell, consisting of a MOSFET, an inductor and a diode, the current is divided, and later superimposed on the emph node that connects the capacitor and the charge. Initially, a review of the photovoltaic panel literature showing the construction nomenclature and relevant information for implementation is presented, followed by battery charging techniques are presented, closing with a review of the main topologies of isolated converters with main focus on the emph buck for being essential for understanding the design criteria of this work. Analyzes and equations are performed demonstrating design methodologies and implementation of the interleaved buck converter, operating steps and the calculations for the components to be used. Later the simulation results are presented and discussed, as well as the experimental results in sequence. The closing is done with the presentation of the conclusion and the works to be developed in the future.

Keywords: Interleaved buck, MOSFET, Batery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Potencial de geração solar fotovoltaico.	12
Figura 2 –	Representação de uma célula fotovoltaica.	16
Figura 3 –	Modelo da célula fotovoltaica com um diodo.	17
Figura 4 –	Curvas I-V e P-V para irradiância variável.	18
Figura 5 –	Curvas I-V e P-V para temperatura variável.	19
Figura 6 –	Célula eletroquímica e seus processos de carga e descarga; a- Descarga; b-Carga.	20
Figura 7 –	Curvas de carga por tensão constante.	24
Figura 8 –	Curvas de carga por corrente constante.	25
Figura 9 –	Curvas de carga por corrente constante com limitação de tensão.	26
Figura 10–	Conversor <i>buck</i>	28
Figura 11–	Formas de onda <i>Gate</i> da chave <i>S</i> , tensão no indutor, corrente no indutor e corrente no capacitor.	30
Figura 12–	(a) Conversor <i>buck intercalado</i> ; (b) Esquema de chaveamento e formas de ondas das correntes.	32
Figura 13–	(a) Etapa 1; (b) Etapas 2 e 4; (c)Etapa 3.	35
Figura 14–	Formas de onda - conversor <i>buck</i> intercalado	36
Figura 15–	Conversor <i>buck</i> intercalado - descarga dos indutores	37
Figura 16–	Forma de onda da corrente no capacitor e nos indutores.	39
Figura 17–	Bateria UNIPOWER <i>12 V 7 Ah</i>	41
Figura 18–	Resultados de simulação operando com tensão de entrada de 30 V. Sinais de corrente nos indutores L1 e L2.	43
Figura 19–	Sinal de corrente na carga i_o em regime.	44
Figura 20–	Sinal de corrente na carga i_o	44
Figura 21–	Sinal de tensão na carga V_o em regime.	45
Figura 22–	Sinal de tensão na carga V_o	45
Figura 23–	Foto do conversor.	46
Figura 24–	Sinais de comando das chaves.	48
Figura 25–	Forma de onda experimental nos indutores L_1 e L_2	49
Figura 26–	Forma de onda experimental tensão de entrada V_{in} e tensão na chave V_{S2}	49
Figura 27–	Forma de onda experimental de tensão e corrente de saída V_o e i_o	50
Figura 28–	Forma de onda experimental de corrente de saída i_o em acoplamento CA.	51
Figura 29–	Forma de onda experimental de tensão de saída V_o em acoplamento CA.	51
Figura 30–	Rendimento do conversor.	52
Figura 31–	Núcleo e carretel do tipo E	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivos Gerais	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 PRINCÍPIOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	16
2.2 CARREGAMENTO DE BATERIAS	19
2.2.1 Tecnologias de construção	22
2.2.2 Modalidades de carga	23
2.2.2.1 Carga por tensão constante	23
2.2.2.2 Carga por corrente constante	24
2.2.2.3 Carga por corrente constante com limitação de tensão	25
2.3 CONVERSORES APLICADOS	26
2.3.1 Conversor Buck	27
2.3.2 Conversores Intercalados	31
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	33
3 CONVERSOR PROPOSTO	34
3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO	34
3.2 PROJETO DO CONVERSOR	40
3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	42
3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	45
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
4 CONCLUSÕES	53
5 TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS	55
Apêndice A – PROJETO DOS INDUTORES L_1 E L_2	58

1 INTRODUÇÃO

O sistema de geração de energia fotovoltaica manteve um crescimento extremamente rápido nos últimos anos se tornando a tecnologia de geração que mais cresce. Com o desenvolvimento da tecnologia eletrônica e da célula fotovoltaica, a eficiência desse sistema aumentou bastante tornando a utilização cada vez mais desejada (LI et al., 2016). A redução no custo de fabricação dos painéis fotovoltaicos e dos demais componentes do sistema, bem como os incentivos governamentais presentes em alguns países também contribuíram para um crescimento significativo da implantação de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia elétrica (KOURO et al., 2014).

Com todo esse crescimento, também tornou-se mais interessante pensar na melhoria qualitativa do fornecimento de energia, gerada através dos sistemas fotovoltaicos. Melhoria essa que surgiu graças à redução de custos nas próprias baterias (WEC, 2016), através de importante atuação na produção de energia elétrica proveniente de fontes alternativas. Em sistemas compostos por diferentes fontes de geração, painéis fotovoltaicos e geradores eólicos são conectados a bancos de baterias que atuam como acumuladores de energia em caso de produção elevada e eventualmente como fonte auxiliar em casos de baixa produção ou falha da rede elétrica (RASHID, 2011).

Devido aos bancos de baterias geralmente apresentarem baixos níveis de tensão, é necessário um processo de adequação desses níveis com o barramento CC. Esse processo é realizado através de conversores CC-CC (REDDY, 2011). Além disso o carregamento das baterias geralmente é realizado através de técnicas de conversão de energia, e um dos requisitos é a baixa ondulação de corrente. O conversor *buck* é amplamente utilizado para conversão CC-CC abaixadora no carregamento de baterias, quando o isolamento não se faz necessário. Uma boa alternativa para redução do tamanho dos componentes e alta qualidade de conversão de energia é o *buck* intercalado, pois garante uma baixa ondulação de corrente na saída, além de diminuir o estresse de tensão nos componentes (KANGAPPADAN; DAVID, 2016).

1.1 JUSTIFICATIVA

Globalmente, o investimento em energia solar bateu recorde em 2017: 18% (160,8 bilhões de dólares), a mais do que no ano anterior e recebeu mais investimentos do que outro tipo de fonte energética. O setor de energia solar dominou como nunca antes a nova capacidade de geração elétrica em energias renováveis, assim como os investimentos globais.

O mundo instalou um recorde de 98 gigawatts (GW) de nova capacidade solar, um aporte mais alto que o das demais tecnologias. A força impulsionadora por trás da onda de investimento solar foi a China, que agregou 53 GW, mais da metade do total, e investiu 86,5 bilhões de dólares, um aumento de 58% em relação ao ano anterior (ONU, 2018). Um dos fatores que contribuíram para esse crescimento foi o declínio de 80% no preço dos módulos solares, analisando o período de 2007 a 2015.

O armazenamento eletrônico tem sido caracterizado por mudanças rápidas, impulsionadas por custos reduzidos (especialmente baterias) e maior exigência do setor para gerenciar a volatilidade do sistema. Até o final de 2015 a capacidade de armazenamento instalada global era de 146 GW, consistindo de 944 projetos. Já existem cerca de 25 mil unidades na Alemanha. As projeções sugerem um mercado de armazenamento global de 1,4 GW até 2020, com forte crescimento, particularmente, em tecnologias eletromecânicas (WEC, 2016).

Em relação ao Brasil, os investimentos até metade de 2017 somavam um valor acima de R\$ 2 bilhões, atingindo a marca histórica de 300 MW de potência instalada em sistemas de microgeração e mineração distribuída solar fotovoltaica em residências, comércios, indústrias, produtores rurais e prédios públicos. A fonte solar fotovoltaica, baseada na conversão direta da radiação solar em energia elétrica de forma renovável, limpa e sustentável, lidera o segmento de microgeração e minigeração distribuída, com mais de 99,4% das instalações do país.

Em números de sistemas instalados, os consumidores residenciais estão no topo da lista, representando 76,9% do total. Em seguida aparecem as empresas dos setores de comércio e serviços (16,2%), consumidores rurais (3,4%), indústrias (2,5%), poder público (0,8%) e outros tipos, como serviços públicos (0,1%) e iluminação pública (0,02%).

Poucos setores no Brasil cresceram de forma tão robusta nos últimos anos, mesmo o País atravessando uma de suas piores crises econômicas. O setor fotovoltaico se destacou em comparação a economia nacional crescendo a taxas de mais de 100% por ano desde 2013.

Em 2017 o setor foi responsável pela geração de mais de 25 mil novos empregos

diretos e indiretos, em sua maioria qualificados e descentralizados ao redor do Brasil contribuindo para o desenvolvimento social, econômico e ambiental.

Em janeiro de 2018, o setor ultrapassou a marca de 1 gigawatt (GW) operacionais no Brasil, posicionando o País dentro do prestigiado clube das 30 principais nações do mundo em energia solar fotovoltaica (ABSOLAR, 2018).

Parte desse interesse dos brasileiros com essa energia renovável é ocasionado devido a alguns fatores, dentre eles, o fato de que o Brasil possui um grande potencial. No local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo. A Figura 1 mostra a sazonalidade da distribuição deste potencial de geração em 12 mapas mensais, na qual percebe-se como a distribuição da geração se comporta mês a mês em cada região. É importante notar que nos meses de verão, principalmente de dezembro a março, a geração é máxima nos estados do extremo Sul e Sudeste do Brasil e coincide com os máximos de demanda registrados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para essas regiões. Neste contexto e por sua natureza distribuída, a geração solar fotovoltaica tem também um grande potencial de contribuição para a redução dos picos de demanda dos sistemas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nos próximos anos, com o aumento da penetração da geração solar fotovoltaica por todo o Brasil, a geração de eletricidade próxima ao ponto de consumo deverá ser reconhecida pelo sistema elétrico como um dos principais atributos desta tecnologia de geração. Com a acentuada redução de custos experimentada pela tecnologia fotovoltaica nos últimos anos, o cenário vem ficando cada vez mais favorável à sua adoção em escala crescente (INPE, 2017).

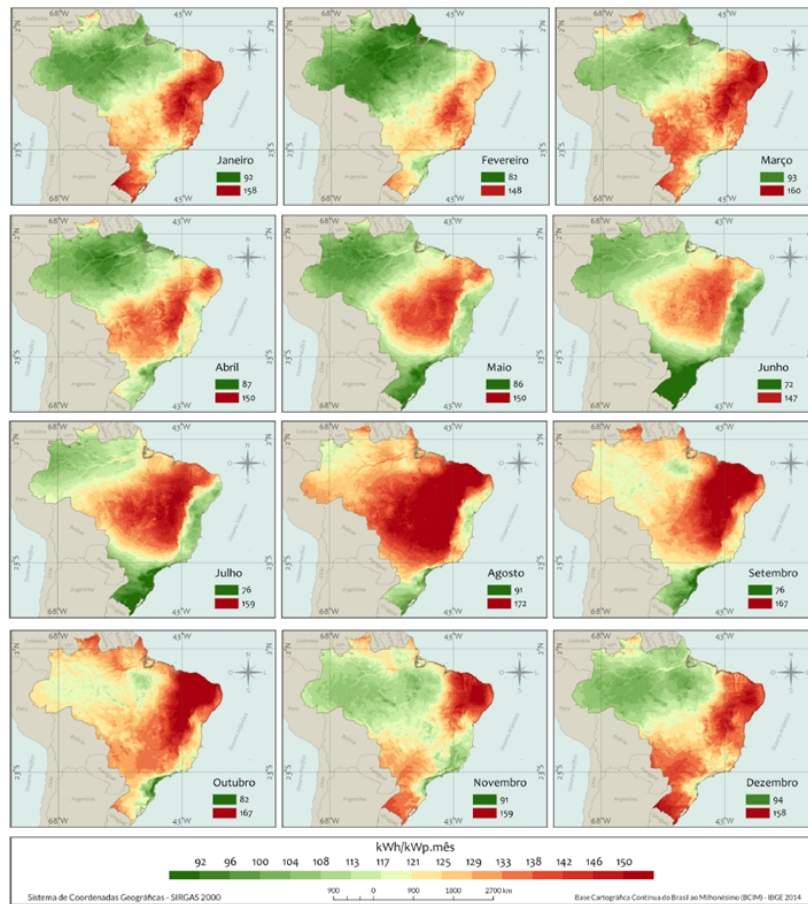


Figura 1: Potencial de geração solar fotovoltaico.

Fonte: Adaptado de (INPE, 2017)

Em 2017, após dois anos de queda, o consumo de eletricidade no país cresceu 1,2% em relação a 2016, alcançando 467 TWh, mantendo o Brasil entre os dez maiores consumidores do mundo. As regiões Sul e Centro Oeste lideraram o crescimento, com taxas de 3,1% e 2,4%, mas a região Sudeste lidera como a região de maior participação no consumo do país, representando praticamente 50% do total. O setor industrial é o maior consumidor, com quase 36% do total, seguido do setor residencial, com cerca de 29%.

A capacidade instalada de geração no Brasil foi expandida em 4,5%, em mesma base de comparação, para a qual contribuiu majoritariamente a geração hidráulica. Porém, a maior expansão proporcional ocorreu na geração solar, que fechou o ano de 2017 com uma potência instalada quase quarenta vezes superior à do ano anterior.

Outro fator importante, é que segundo o Relatório Anual Integrado 2017 do BNDES, sofreu uma redução no spread básico (taxa por meio da qual o BNDES é remunerado), com foco nos setores prioritários definidos pelo planejamento estratégico. Assim, as taxas cobradas caem de 1,7% ao ano para 0,9% ao ano, em projetos nas áreas de segurança, pública, inovação, meio ambiente, energia solar, entre outras (BNDES, 2017).

Nos sistemas fotovoltaicos cada módulo gera uma tensão contínua (CC),

relativamente baixa, aproximadamente 30V (dependendo do modelo). Com isso, visando obter níveis de tensão mais elevados que o valor de pico da tensão da rede elétrica, geralmente os módulos são conectados em série, formando *strings*. As *strings* posteriormente são associadas em paralelo e então conectadas a um inversor. Uma desvantagem que afeta esse sistema é o sombreamento que além de diminuir a eficiência do painel, dificulta a implementação do sistema de controle do Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.

Para aumentar a densidade de potência gerada pode ser utilizado o sistema *multi-string*, no qual cada *string* possui um estágio CC-CC separado, porém o estágio inversor permanece centralizado. Com a conexão de conversores CC-CC para cada *string* é possível otimizar o desempenho de geração, já que esses realizam o controle de Máxima Potência ideal (MPPT), para cada um dos arranjos, reduzindo os impactos do sombreamento (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005).

Atualmente, a fim de melhorar a eficiência da geração fotovoltaica, diversos trabalhos de pesquisa são focados no uso do algoritmo MPPT. Mas apesar de ter melhorado até certo ponto, algumas pesquisas tem negligenciado o efeito do conversor CC/CC no sistema de controle desse algoritmo (LU Zhiguo, 2013).

Resultados experimentais sobre o conversor *buck* intercalado, mostram que a tensão de saída e o *ripple* de corrente são reduzidos e esse projeto é mais adequado para o controle MPPT de um sistema fotovoltaico (YU et al., 2004).

Considerando o crescente consumo de energia ao decorrer dos anos e as poucas fontes de geração encontradas atualmente, pesquisas referentes a produção e aproveitamento de fontes alternativas procuram aumentar os níveis de produção assim como diversificar as fontes de geração. Nesse contexto, pode-se citar a geração eólica e solar como as fontes de energia alternativa mais relevantes por serem inesgotáveis, limpas e compactas quando comparadas com as hidrelétricas, mesmo sendo fortemente dependentes de fatores climáticos como a ocorrência de ventos e incidência de luz (FARIA et al., 2012). Outra característica de sistemas de geração envolvendo redes eólicas e fotovoltaicas é que são geralmente formados por unidades isoladas, não sendo possível otimizar o aproveitamento de energia proveniente desses sistemas, visto que alternam períodos de grande produção a períodos de produção nula (TANIGUCHI; KOJIMA; FUKUI, 2009).

Uma abordagem possível para esses problemas é a criação de redes integradas, em que diferentes fontes de produção são interligadas através de sistemas de armazenamento de energia. Nesses sistemas, períodos de geração excedente são utilizados para armazenar energia, que posteriormente passa a ser utilizada em períodos de baixa produção ou de grande demanda. A forma mais comum de armazenamento de energia ocorre através

de bancos de baterias, amplamente aplicados em sistemas híbridos de produção, assim como na criação de UPSs (*Uninterrupted Power Supply* - Fonte Ininterrupta de Energia), utilizadas em diversas aplicações que necessitam de maior confiabilidade no fornecimento de energia (YANG et al., 2001).

Para carregamento de baterias, é necessário que o sistema possua em sua estrutura um conversor responsável por garantir uma regulação adequada de tensão e corrente (DUSMEZ; COOK; KHALIGH, 2011). Este trabalho estuda a utilização desse conversor identificado como *buck* CC-CC intercalado, trabalhando em regime de condução contínua.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é projetar e implementar um carregador de baterias interligado a um sistema fotovoltaico, através da topologia *buck* entrelaçado e avaliar os benefícios de se utilizar esse tipo de conversor, satisfazendo as especificações necessárias referentes as metodologias de carregamento para baterias.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O desenvolvimento do trabalho tem por finalidade atender os seguintes objetivos:

- Estudo de operação e métodos de carga para baterias;
- Estudo de um conversor *buck* CC-CC entrelaçado para carregamento de baterias;
- Estudo e definição da potência do circuito e modelo de bateria para utilização;
- Análise e dimensionamento do conversor proposto;
- Implementação de um protótipo para estudo de atuação do conversor *buck* CC-CC entrelaçado em malha aberta;
- Análise dos resultados do protótipo.

1.3 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 exibe-se um revisão da literatura sobre painéis fotovoltaicos apresentando a nomenclatura de construção e informações relevantes para implementação, sequencialmente técnicas de

carregamento para baterias são apresentadas, fechando com uma revisão das principais topologias de conversores isolados com foco principal no conversor *buck* por ser essencial para entendimento dos critérios de projeto deste trabalho. O capítulo 3 inicia-se com análises e equacionamentos demonstrando metodologias de projeto e implementação do conversor *buck* intercalado, etapas de operação e os cálculos para os componentes a serem utilizados. Posteriormente os resultados de simulação são apresentados e discutidos, assim como os resultados experimentais na sequência. O fechamento é realizado no capítulo 4 com a apresentação da conclusão através de uma análise geral do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda uma revisão bibliográfica contendo temas essenciais para o entendimento e desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, será realizada uma explicação sobre o funcionamento das células fotovoltaicas. Na sequência, metodologias para carregamento de baterias serão apresentadas. O capítulo é finalizado com topologias de conversores CC-CC, tendo na última subseção uma breve explicação sobre o conversor proposto para este trabalho.

2.1 PRINCÍPIOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um sistema fotovoltaico realiza a conversão da energia solar em energia elétrica, sendo que a unidade elementar desses sistemas é a célula fotovoltaica. Essas são, geralmente, associadas em série para se obter maiores níveis de tensão tendo-se a formação dos conhecidos módulos, os quais podem ser associados, resultando na formação de arranjos fotovoltaicos.

As células são constituídas por diodos semicondutores cujas junções $p-n$ são expostas à irradiação solar. O material mais utilizado para a fabricação das células é o silício (Si), o qual pode ser estruturado em monocristalino e policristalino. No processo de fabricação, uma das camadas do Si é dopada para formar a junção, além disso uma lâmina metálica é fixada sobre a superfície sobre a qual haverá irradiação solar e outra lâmina é utilizada como base para as conexões elétricas, como pode ser visto na Figura 2. Quando há incidência de radiação, se o fóton incidente é suficiente para que haja transferência de elétrons pelo semicondutor, tem-se a geração de energia elétrica nos terminais da célula (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

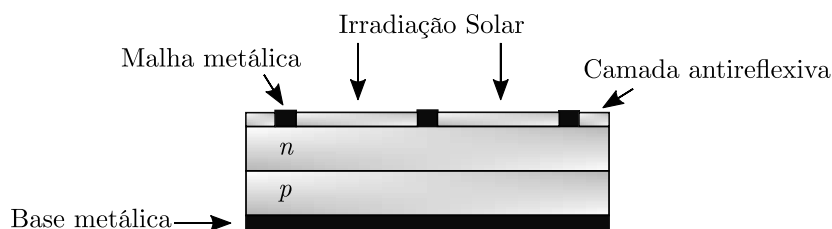


Figura 2: Representação de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009; LUQUE; HEGEDUS, 2011).

O modelo de uma célula com um diodo e as resistências série e paralela é disposto na Figura 3.

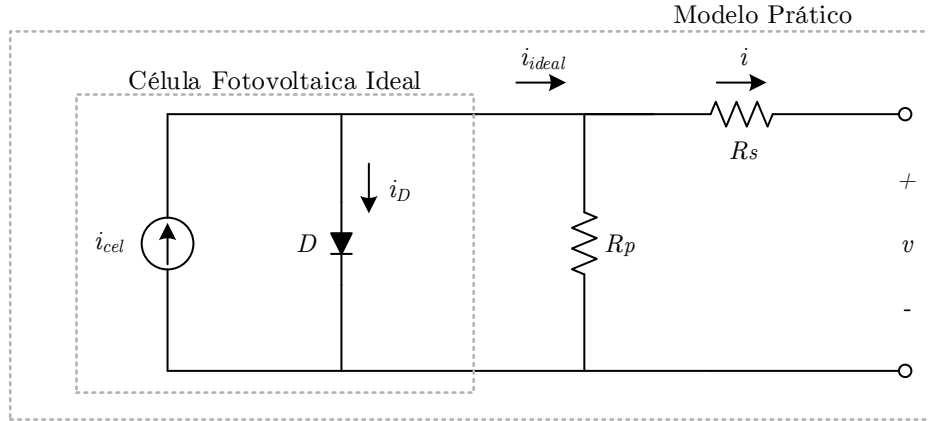


Figura 3: Modelo da célula fotovoltaica com um diodo.

Fonte: Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

A corrente i_D é a corrente no diodo Shockley de quatro camadas, que pode ser calculada por

$$i_D = i_{cel0} \left[\exp\left(\frac{qv}{akT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

sendo que:

i_{cel0} : Corrente reversa de saturação do diodo em Ampères;

q : Carga de um elétron ($1,60217646 \cdot 10^{-19}$ C);

v : Tensão de saída da célula em Volts;

a : Constante de idealidade do diodo ($1 \leq a \leq 2$, de acordo com o material do semicondutor);

k : Constante de Boltzmann ($1,3806503 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$);

T : Temperatura da junção $p-n$ em Kelvin.

Considerando uma célula ideal, sem resistência série e paralela, a corrente gerada i_{ideal} pode ser determinada pela equação (2), tal que i_{cel} é a corrente gerada pela célula fotovoltaica em Ampères.

$$i_{ideal} = i_{cel} - i_D \quad (2)$$

Como na prática os módulos fotovoltaicos são compostos por diversas células associadas, geralmente em série, tem-se que a equação que descreve a corrente terminal i

de uma célula não ideal é dada por (3), tal que N_s é o número de células associadas, i_{pv} é a corrente total gerada pelo conjunto de células e i_0 a soma das correntes de saturação dos diodos.

$$i = i_{pv} - i_0 \left[\exp\left(\frac{q(v + R_s i)}{N_s k T}\right) - 1 \right] - \frac{v + R_s i}{R_p} \quad (3)$$

A partir da equação (3) pode-se obter a curva i-v (corrente *versus* tensão) da célula ou conjunto de células associadas (módulo fotovoltaico), bem como a corrente de curto-circuito i_{sc} , a tensão de circuito aberto v_{oc} e o Ponto de Máxima Potência (MPP) (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as curvas características i-v e P-v (potência *versus* tensão) do modelo com um diodo do módulo 1Soltech 1STH-250-WH para um arranjo de 10 painéis conectados em série e diferentes condições de irradiação e temperatura.

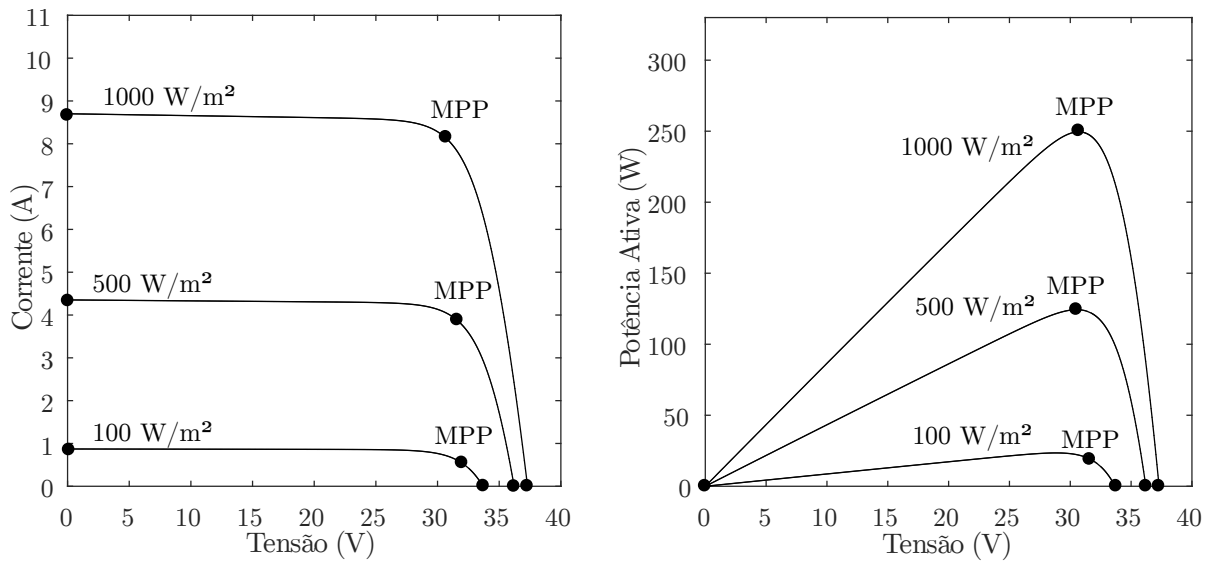


Figura 4: Curvas I-V e P-V para irradiação variável.

Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2018).

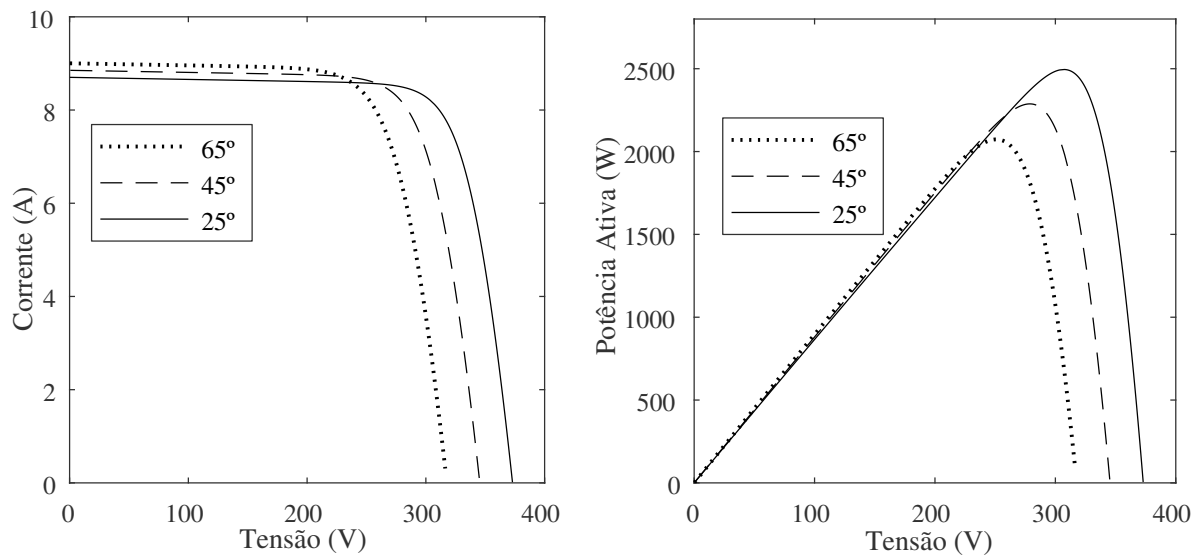


Figura 5: Curvas I-V e P-V para temperatura variável.

Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2018).

Por meio das Figuras 4 e 5 é possível observar que para diferentes condições de irradiação e temperatura se obtêm pontos de máxima transferência de potência, v_{OC} e i_{SC} distintos. Desse modo, para a extração da máxima potência gerada é necessário aplicar técnicas de *Maximum Power Point Tracking*- Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) (MORAES et al., 2018).

2.2 CARREGAMENTO DE BATERIAS

Basicamente a bateria se trata de um dispositivo eletroquímico, construído com o propósito de converter energia química em energia elétrica. Quando esse processo é reversível, são classificadas como secundárias ou recarregáveis, podendo servir como um acumulador ou fonte de energia em diversas aplicações, como no caso de UPS e em sistemas de geração (KIEHNE, 2003), (LINDEN D.; REDDY, 2011). As baterias primárias por não apresentarem a possibilidade de carregamento, não serão abordadas neste trabalho.

Devido a flexibilidade, tanto no carregamento quanto em relação ao consumo de energia, as baterias secundárias podem ser encontradas nas mais diversas aplicações, como em veículos elétricos, aparelhos eletrônicos, dispositivos móveis e centrais de produção de energia, na qual normalmente são integradas a fontes renováveis.

Em sua construção, uma bateria é formada pela associação (em série ou em paralelo) de células eletroquímicas de menor tensão. Como uma célula possui tensão nominal muito baixa, as baterias são construídas a partir da associação de várias células, os elementos mais básicos e os responsáveis efetivos pelo acúmulo de energia em baterias (KIEHNE, 2003).

A seguir, são indicados os principais componentes que formam uma célula de bateria:

- Ânodo: eletrodo negativo, sendo oxidado durante o processo de descarga, cedendo elétrons para o circuito externo;
- Cátodo: eletrodo positivo, aceita elétrons e é reduzido durante a reação química;
- Eletrólito: condutor iônico, serve como meio de transferência de carga entre o ânodo e o cátodo.

Quando uma carga é ligada à bateria, os elétrons livres do eletrodo negativo, o ânodo, se deslocam para o eletrodo positivo, criando uma diferença de potencial entre os terminais da bateria. Dessa forma os eletrodos reagem quimicamente com o eletrólito liberando energia elétrica, como ilustrado pela Figura 6-a. No processo de carga, deve ser aplicada à bateria uma tensão superior a sua tensão de circuito aberto, forçando os elétrons a circularem em sentido contrário ao processo de descarga, assim ocorre a reação química inversa, apresentada na Figura 6-b (KIEHNE, 2003).

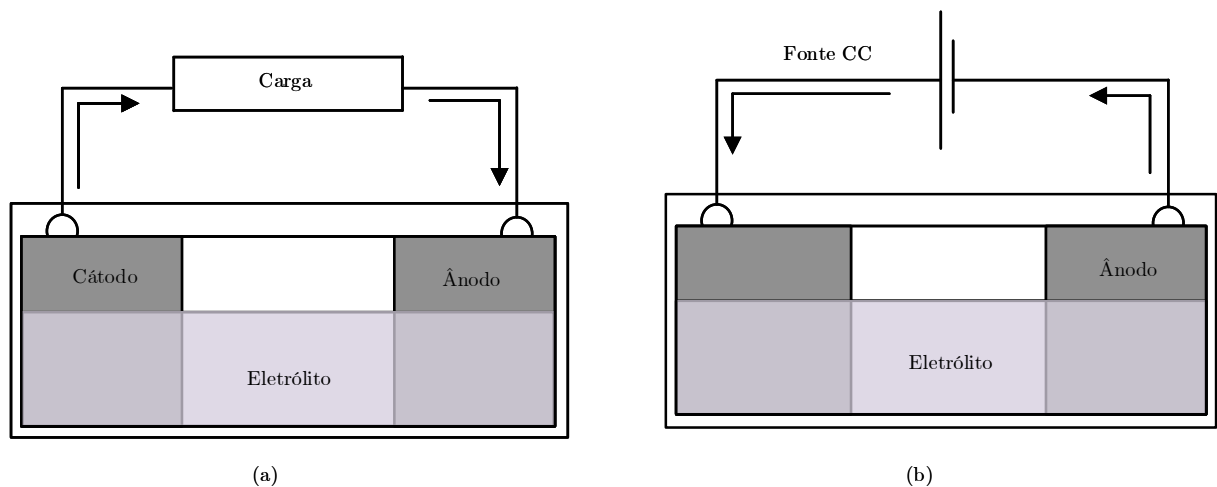


Figura 6: Célula eletroquímica e seus processos de carga e descarga; a- Descarga; b-Carga.

Fonte: Adaptado de Kiehne (2003).

A norma *American Institute of Electrical Engineers* - Instituto Americano de Engenheiros Eletricistas (A.I.E.E.) n^o 36, referente ao armazenamento de baterias, apresenta algumas definições:

- Tensão Nominal: resultado das tensões de cada célula que forma uma bateria, ou banco de baterias;
- Tensão final de descarga: valor de tensão no qual deve-se considerar uma bateria descarregada;

- Tensão de circuito aberto: tensão entre os terminais das baterias em circuito aberto;
- Capacidade de carga: quantidade de energia que pode ser fornecida por uma bateria antes de atingir a sua tensão final de descarga. Com a capacidade de carga representada uma taxa de transferência de carga, pode ser medida em Ah (amperes fornecidos durante o período de uma hora), ou watt-h. Comumente representado por C;
- Carga: restauração do material ativo através da passagem de corrente de sentido oposto a corrente de descarga, ou seja, conversão de energia elétrica em energia química;
- Taxa de carga: corrente em que a bateria é carregada;
- Descarga: conversão de energia química em energia elétrica;
- Autodescarga: descarga em circuito aberto;
- Sobrecarga: prolongamento de carga que ocorre além do instante final de carga de uma bateria;
- Resistência interna: resistência medida entre os terminais de uma bateria em circuito aberto;
- Vida útil: tempo no qual uma bateria é capaz de operar com condições adequadas, até ser considerada inutilizada. Esse tempo está diretamente relacionado com a perda de capacidade das baterias.

Dessas propriedades define-se que trabalhando como acumuladores de energia, as baterias estão em modo de carga, e enquanto atuando como fonte estão no modo de descarga.

Para o dimensionamento adequado de um bateria é necessário avaliar critérios como a tensão nominal, capacidade de carga, autonomia e vida útil do equipamento (SILVA et al., 2018).

Em relação à capacidade de armazenamento, dada em Ah, é definida pelo produto entre a corrente de descarga pelo tempo em que leva para ser totalmente descarregada (UNIPOWER, 2003), (A.I.E.E, 1994). Isto equivale a dizer que uma bateria que possui capacidade igual a 10 Ah, pode ser descarregada com uma corrente de 5A com uma autonomia de duas horas. Esta mesma bateria deverá fornecer uma autonomia de quatro horas ao ser descarregada com uma corrente de 2,5A (UNIPOWER, 2003). Dessa forma é necessário analisar não somente a capacidade de corrente das baterias, mas também a

autonomia desejada, a fim de definir o equipamento adequado para cada aplicação (SILVA et al., 2018).

2.2.1 TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO

Ao se tratar especificamente de UPS o IEEE std. 446-1995, referente a sistemas de energia emergenciais, indica que para aplicações estacionárias as baterias de Níquel-Cádmio e Chumbo-Ácido são as mais indicadas.

As baterias de Níquel-Cádmio são construídas por células de 1,3 V, compostas por cádmio metálico e hidróxido de níquel. A principal característica dessa construção é a boa capacidade de retenção de carga, porém a baixa densidade energética exige maiores quantidades de material ativo, elevando o volume dos componentes (LUQUE, A.; HEGEDUS,S., 2003).

Para esse tipo de bateria é indicado utilizar a menor taxa de descarga possível, sendo que os valores típicos de descarga se encontram entre 1,0-1,1 V por célula. Entretanto, podem suportar descargas profundas sem grandes perdas de capacidade. Essa característica permite que sejam indicadas para aplicações em que o fornecimento de energia demande sistemas de maior autonomia (LUQUE, A.; HEGEDUS,S., 2003), (IEEE STD 1184, 2006).

A principal desvantagem da opção por baterias de Níquel-Cádmio está relacionada com o alto custo inicial quando comparadas com as baterias de Chumbo-Ácido. Porém o maior ciclo de vida pode compensar investimentos a longo prazo (LUQUE, A.; HEGEDUS,S., 2003).

Em relação ao processo de carga é indicado para as baterias de Níquel-Cádmio processos de carga rápidos, como por exemplo, carga por corrente constante (LUQUE, A.; HEGEDUS,S., 2003), (CURTIS, 2011), (BERNDT, D., 2003).

As baterias de Chumbo-Ácido são geralmente construídas a partir de células de 2,1 V, baseadas em eletrodos de chumbo e eletrólito de ácido sulfúrico dissolvido em água. Em comparação com as baterias de Níquel-Cádmio, as baterias de Chumbo-Ácido apresentam menor custo de fabricação e baixa manutenção, fatores que a fazem altamente difundida no mercado. O ponto negativo de se utilizar as baterias de Chumbo-Ácido está relacionado com o fato de que não permitem descargas profundas, mesmo sendo comumente encontradas em UPS (LUQUE, A.; HEGEDUS,S., 2003), (CURTIS, 2011), (BERNDT, D., 2003).

Por apresentarem alta sensibilidade a variações de carga é indicado que sejam carregadas por métodos de carga lentos, ou seja, que envolvem a regulação da tensão

e menores níveis de corrente (LUQUE, A.; HEGEDUS,S., 2003), (CURTIS, 2011), (BERNDT, D., 2003).

Entre outras alternativas para a escolha de uma bateria, se destacam as baterias de Níquel Metal-Hidreto e Lítio-Íon; ambas apresentam vantagens em relação as suas propriedades elétricas quando comparadas com as baterias de Níquel-Cádmio e Chumbo-Ácido, entretanto seu uso ainda é limitado em aplicações estacionárias.

Em comparação a outras tecnologias, as baterias de Níquel Metal-Hidreto surgem como uma alternativa menos poluente em comparação as baterias de Níquel-Cádmio, porém possuem uma eficiência menor do que as baterias de Lítio-Íon, e ciclo de vida igual ou inferior as baterias de Chumbo-Ácido (LINDEN D.; REDDY, 2011).

As baterias de Lítio-Íon apresentam características interessantes como menor peso e volume, assim como alta eficiência, porém o custo elevado faz com que sua aplicação seja reduzida a casos que exijam menores níveis de tensão como dispositivos móveis e aparelhos eletrônicos. Devido suas vantagens em relação as características elétricas, quando comparadas com baterias de Chumbo-Ácido ou de Níquel, seu uso em aplicações estacionárias é crescente nos últimos anos (LINDEN D.; REDDY, 2011).

Neste ponto pode-se concluir que as diferentes tecnologias de construção de baterias diferem principalmente de acordo com seu material ativo. Isso resulta em características elétricas diferentes e conseqüentemente melhores resultados de acordo com a aplicação em que estão inseridas (SILVA et al., 2018).

As baterias de chumbo-ácido apresentam bom desempenho em relação a tensão nominal e densidade energética. Essas características, juntamente com o menor preço, tornam-se interessantes para a utilização desse modelo. Outro ponto interessante é a temperatura de operação e auto descarga, pois apresentam valores mais apropriados se comparados as baterias de Níquel-Cadmio. As baterias de Lítio-Íon devido ao alto custo, tornam-se alternativas inviáveis para aplicações em protótipos em laboratório (SILVA et al., 2018). Com base nessas informações, o modelo a ser utilizado para esse trabalho será do tipo Chumbo-Ácido.

2.2.2 MODALIDADES DE CARGA

2.2.2.1 CARGA POR TENSÃO CONSTANTE

O método de carga por tensão é ilustrado pela Figura 7. Apesar do nome, é necessário uma pequena inserção de um valor constante de corrente para que se inicie o carregamento, a diferença deste método com o de carga por corrente constante com limitação de tensão, está no curto período em que a corrente é utilizada e também na

demora com que a bateria finaliza a carga completa. Consiste na inserção de carga por uma corrente inicial que é regulada durante determinado intervalo de tempo ($t_0 - t_1$) com o objetivo de elevar a tensão das baterias para o valor indicado para sua carga. Em um segundo momento ($t_1 - T$) a tensão deve ser mantida constante enquanto a corrente é reduzida gradualmente devido a reação natural de carga das baterias.

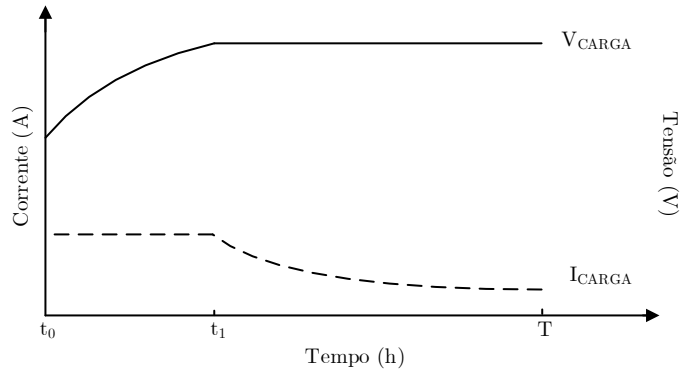


Figura 7: Curvas de carga por tensão constante.

Fonte: Adaptado de (SILVA et al., 2018)

Como é considerado um método de carga lenta, tem como principal desvantagem o tempo de carga. Esse método é indicado para casos em que as baterias apresentem maior sensibilidade a variações de tensão, por exemplo, as baterias de Chumbo-Ácido, para as quais não são recomendados métodos de carga rápidos (IEEE STD 466, 1995; UNIPOWER, 2003).

2.2.2.2 CARGA POR CORRENTE CONSTANTE

O método de carga por corrente constante é implementado de maneira simples, mantendo a corrente de carga constante enquanto a tensão da bateria se eleva de acordo com o seu estado de carga, conforme apresentado pela Figura 8.

Como se trata de um método de carga que mantém por maiores períodos a corrente de carga constante, é considerado um método de carga rápido, indicado para baterias que tenham maior retenção de carga, como no caso das baterias de Níquel-Cádmio (OSMAN; RAHIM; JEYRAJ, 2014), (CHEN; LAI, 2011).

As vantagens desse método estão relacionadas com a simplicidade de controle e a velocidade de carregamento. Em contrapartida deve-se ter cuidado para não ultrapassar os limites de carga da bateria, resultando em sobrecarga. Por esse motivo é desejável manter a tensão de carga constante na etapa final de carregamento, garantindo que não ocorram elevações indesejáveis de tensão (CBS BATTERY,), (UNIPOWER, 2003), (OSMAN; RAHIM; JEYRAJ, 2014), (CHEN; LAI, 2011).

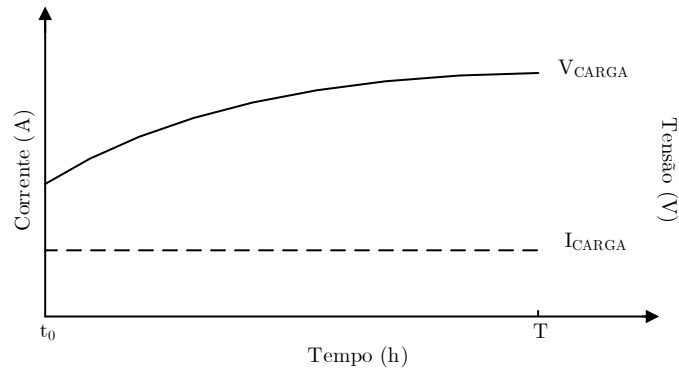


Figura 8: Curvas de carga por corrente constante.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018)

Apesar de não ser um método usual, é eficiente no processo de carga de várias baterias ao mesmo tempo, sendo indicado para a carga de baterias associadas em série, muitas vezes servindo de equalizador para baterias com diferentes estados de carga. Uma limitação a ser observada, está relacionada com a necessidade de distribuição igualitária de corrente entre as baterias, neste sentido esse método não é indicado para associações de baterias em paralelo, na qual não se pode garantir que isso aconteça (UNIPOWER, 2003).

2.2.2.3 CARGA POR CORRENTE CONSTANTE COM LIMITAÇÃO DE TENSÃO

Para compensar a desvantagem do tempo de carga apresentada pelo método por tensão constante, a utilização de uma etapa inicial com a manutenção de uma corrente constante de valor elevado permite que esse tempo seja diminuído. Portanto, esse método une as características de carga por tensão e corrente constante, conforme ilustrado pela Figura 9.

A primeira etapa ($t_0 - t_1$) diz respeito a um processo de carga rápida, em que se aplica uma corrente constante na bateria, até atingir um valor próximo a sua tensão nominal, representando cerca de 80% da capacidade total da bateria. Nesse momento, o processo de carga passa para uma segunda etapa ($t_1 - T$) em que opera através de uma tensão constante. A corrente injetada na bateria deve diminuir gradualmente até a bateria ser completamente carregada (LINDEN D.; REDDY, 2011), (CHEN; LAI, 2011), (UNIPOWER, 2003).

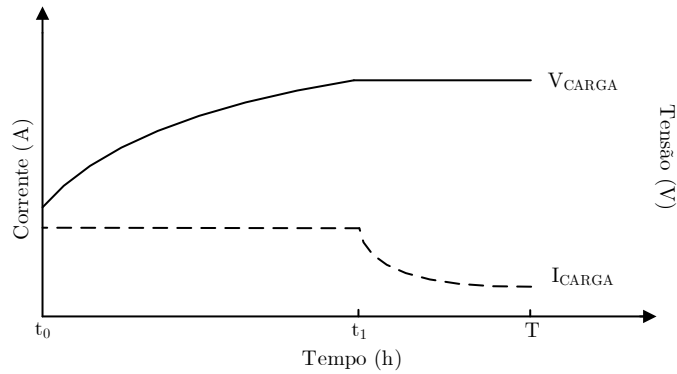


Figura 9: Curvas de carga por corrente constante com limitação de tensão.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018)

Como é um método eficiente e une as vantagens de carga por tensão constante e corrente constante, atualmente é a estratégia mais comum aplicada na carga de baterias, pois permite reduzir o tempo de carga e protege a bateria contra sobrecarga. Contudo, esse método de carga não pode ser usado em associações de baterias em paralelo devido à etapa inicial de carga por corrente constante (LUQUE, A.; HEGEDUS,S., 2003), (UNIPOWER, 2003).

Outros métodos de carga mais elaborados podem ser implementados, porém, como se baseiam nas estratégias apresentadas até aqui, não serão abordados.

É conveniente expor que as estratégias de carga dependem do controle dos níveis de tensão e corrente inseridos na bateria (SILVA et al., 2018). No entanto, o foco do presente trabalho está relacionado com as características eletrônicas do conversor, de modo que as estratégias de controle não serão abordadas.

2.3 CONVERSORES APLICADOS

De acordo com as diferentes situações exigidas no projeto, assim como as diferentes características apresentadas dos diversos conversores estudados, a escolha do conversor tem como objetivos:

- Baixa ondulação de corrente para a carga da bateria;
- Baixa ondulação de tensão para a carga da bateria, com objetivo de elevar qualitativamente a transferência de energia;
- Reduzida degradação de componentes apresentando baixa tendência a manutenções;
- Considerável tempo de vida útil, afim de tornar o conjunto como um todo, com elevada durabilidade.

A partir desses critérios a configuração do conversor deve ser escolhida com o propósito de atender os modos de operação da bateria.

A escolha de um conversor do tipo de fonte de corrente garante baixa ondulação de corrente para a carga da bateria, devido a presença do indutor do lado da bateria (SILVA et al., 2018).

As várias modalidades de carga de uma bateria exigem o controle de fluxo de potência entre uma fonte de tensão e as baterias. Este controle é realizado por meio de conversores estáticos que tem como principal função adequar os níveis de tensão entre a fonte e a bateria (SILVA et al., 2018). Nas seções a seguir serão estudadas as configuração mais relevantes, que contribuem para o projeto do conversor proposto para este trabalho.

2.3.1 CONVERTOR BUCK

A Figura 10 mostra um filtro passa baixas LC adicionado ao conversor básico. O diodo proporciona um caminho para a corrente no indutor quando a chave é aberta e é polarizada reversamente quando a chave é fechada. Este circuito é chamado de *conversor buck* ou *conversor abaixador* por que a tensão na saída é menor que a da entrada.

Se o filtro passa baixas é ideal, a tensão na saída é a média da tensão de entrada para o filtro. A tensão de entrada para o filtro, v_x na Figura 10, é V_S quando a chave é fechada e é zero quando está aberta, desde que a corrente no indutor permaneça positiva, mantendo o diodo ligado. Se a chave é fechada periodicamente numa taxa de trabalho D , a tensão média na entrada do filtro é $V_S D$.

Esta análise supõe que o diodo permanece polarizado diretamente por todo o tempo em que a chave está aberta, implicando que a corrente no indutor permaneça positiva. Uma corrente no indutor que permanece positiva por todo o período de chaveamento é conhecida como *modo de condução contínua*. Reciprocamente, o modo de condução descontínuo de corrente é caracterizado pela corrente no indutor retornando a zero durante cada período (HART, 2016).

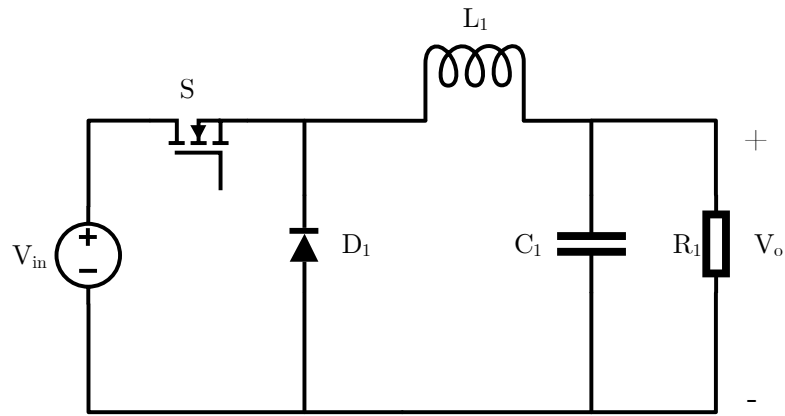


Figura 10: Conversor *buck*.

Fonte: Autoria própria

Primeiramente para projetar o conversor é necessário analisar as etapas de operação conforme indicado abaixo:

- **Primeira etapa - *S_{on} D_{off}*:** Quando a chave é fechada no circuito do conversor *buck* da Figura 10, o diodo é polarizado reversamente, tornando-se um circuito aberto denotando com isso a tensão no indutor como:

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (4)$$

Como a derivada da corrente é uma constante positiva, a corrente aumenta linearmente, com isso, modificando a equação pode ser obtido:

$$\Delta i_{Lon} = \frac{(V_{in} - V_o)D}{Lf} \quad (5)$$

- **Segunda etapa - *S_{off} D_{on}*:** Quando a chave é aberta, o diodo fica polarizado diretamente para conduzir a corrente no indutor, fazendo com que a tensão no diodo seja θ e com isso, a equação que representa a tensão no indutor é:

$$V_L = -V_o \quad (6)$$

Substituindo e rearranjando da mesma forma que na primeira etapa, é possível obter a equação:

$$\Delta i_{Loff} = \frac{(-V_o)(1 - D)}{Lf} \quad (7)$$

O funcionamento no estado estável exige que a corrente no indutor no final do

ciclo de chaveamento seja a mesma do início, o que significa que a troca líquida de corrente no indutor sobre um período é zero (HART, 2016). Isto exige que:

$$\Delta i_{lon} + \Delta i_{Loff} = 0 \quad (8)$$

Substituindo a Equação 5 e 7 e isolando o termo D é possível obter a razão cíclica:

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (9)$$

Substituindo-se a Equação 9 na Equação 5, e isolando o termo L , é possível obter a equação para a indutância.

$$L = \frac{(V_{in} - V_o)D}{\Delta i_{Lf}} = \frac{V_o(1 - D)}{\Delta i_{Lf}} \quad (10)$$

Na prática, a tensão na saída não pode se manter perfeitamente constante com uma capacitância finita. A variação na tensão de saída, ou ondulação, é calculada pela relação tensão corrente no capacitor.

$$i_C = i_L - i_R \quad (11)$$

Enquanto a corrente no capacitor for positiva, ele estará carregado. Então através da definição de capacitância:

$$\Delta Q = C \Delta V_o \quad (12)$$

Quando existe tensão de comando na chave, a mesma passa a conduzir, fazendo com que exista uma tensão V_L no indutor, que imediatamente começa a carregar com uma corrente i_L . Durante a abertura da chave com a razão cíclica em zero, a tensão V_L no indutor é nula, fazendo com que o componente comece a descarregar. A corrente no capacitor i_C é equivalente a corrente no indutor i_L sem o *offset* de tensão, passando a cortar o eixo 0. Essa análise é importante pois irá auxiliar na determinação de ΔQ , que corresponde a área positiva do triângulo, como pode ser verificado na Figura 11.

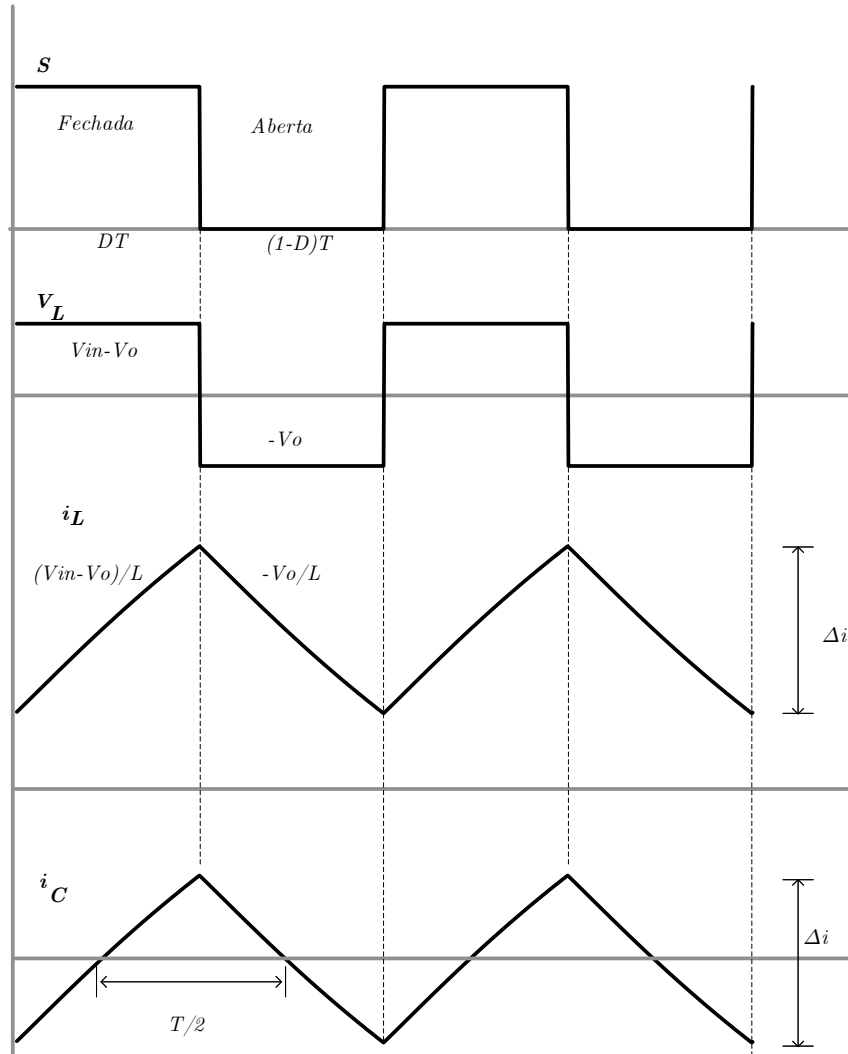


Figura 11: Formas de onda *Gate* da chave S , tensão no indutor, corrente no indutor e corrente no capacitor.

Fonte: Autoria própria

Analisando a forma de onda da corrente no capacitor é possível determinar ΔQ através da Equação 13.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{\Delta i_L}{8f} \quad (13)$$

Através da definição de ΔQ deduzida pela análise da forma de onda i_C , é possível enfim determinar a ondulação de tensão na saída ΔV_o e posteriormente a equação que expressa a capacitância.

Inicialmente, substituindo a Equação 12 na Equação 13 e isolando o termo ΔV_o é obtido:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta i_L}{8Cf} \quad (14)$$

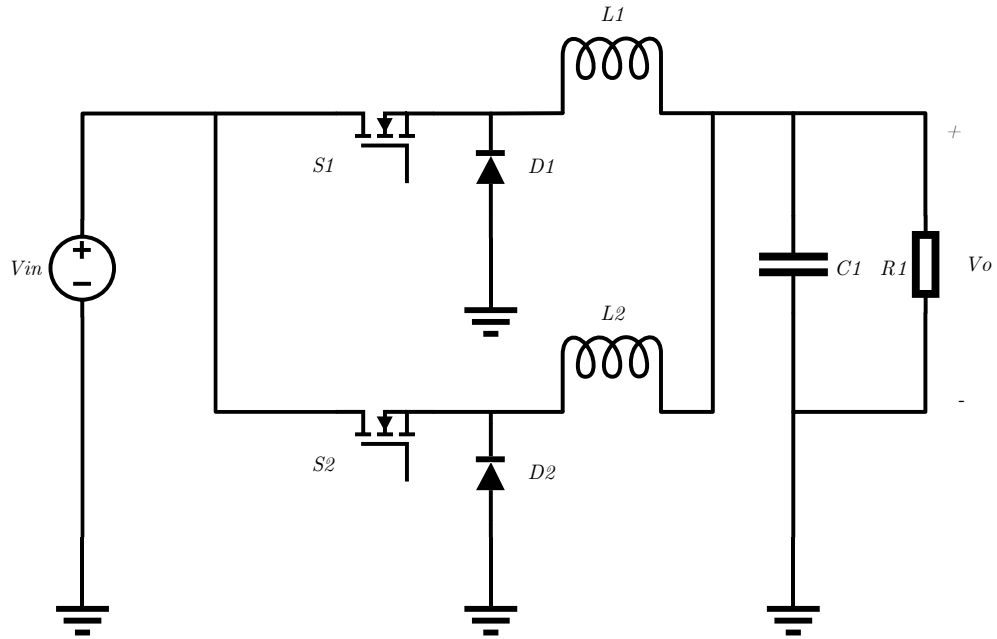
Através da Equação 5 com 14, isolando a capacitância C , é possível por fim, obter a equação responsável para esse componente no projeto do conversor *buck*.

$$C = \frac{(1 - D)}{8L(\Delta V_o/V_o)f^2} \quad (15)$$

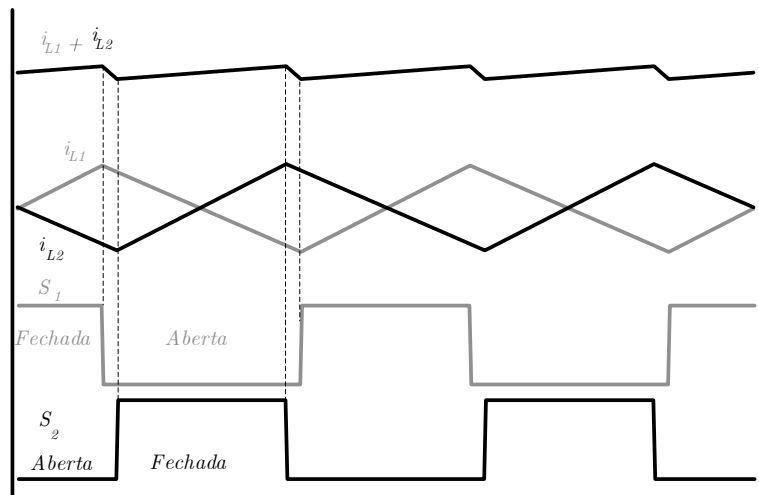
2.3.2 CONVERSORES INTERCALADOS

Conversor intercalado, conhecido também por *conversor multifase*, é uma técnica utilizada para reduzir os valores dos componentes do filtro. Um conversor *buck intercalado* é mostrado na Figura 12-(a). Isso equivale a uma combinação em paralelo de duas configurações de chaves, diodos e indutores conectados com um capacitor de filtro e uma carga comum. As chaves funcionam defasadas de 180° , produzindo correntes também defasadas em 180° (HART, 2016).

A corrente que passa no capacitor e na resistência de carga é a soma das correntes dos indutores, possuindo menores variações de pico a pico. Além disso a frequência é considerada o dobro quando comparada com as correntes individuais de cada ramo. Isso resulta em uma variação de pico a pico menor na corrente do capacitor do que seria obtido em um conversor *buck* simples, requerendo uma menor capacitância para a mesma ondulação na saída. A variação na corrente vinda da fonte também é reduzida. A Figura 12-(b) mostra as formas de onda de corrente de saída e em cada um dos indutores (HART, 2016).



(a)



(b)

Figura 12: (a) Conversor *buck* intercalado; (b) Esquema de chaveamento e formas de ondas das correntes.

Fonte: Autoria própria

A tensão na saída é obtida tomando a lei da tensão de Kirchhoff em torno da malha contendo a fonte, uma chave, um indutor e a tensão de saída. A tensão no indutor é $V_S - V_O$ com a chave fechada e $-V_O$ com a chave aberta. Esses valores são os mesmos do conversor *buck* da Figura 10 estudado anteriormente, resultando em:

$$V_O = V_S D \quad (16)$$

Em que D é a taxa de trabalho de cada chave.

Cada indutor fornece metade da corrente da carga e da potência de saída, logo a corrente média no indutor é a metade da que seria para o conversor *buck*.

Podem ser intercalados mais de dois conversores. O deslocamento de fase entre o fechamento da chave é de $360^\circ/n$, sendo que n é o número de conversores numa configuração em paralelo.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo de revisão da literatura foram abordados alguns princípios das células fotovoltaicas, módulos e arranjos fotovoltaicos. Posteriormente, foi introduzido um estudo sobre os princípios de operação e características das baterias, conceitos de carga e descarga, tendo como enfoque principal métodos de carga para baterias estacionárias. Sequencialmente foi apresentado um conversor CC-CC, utilizado para processar a energia gerada pelos painéis, sendo mais relevante a topologia rebaixadora conhecida como conversor *buck*, por ser a base para deduções e definições das equações necessárias para o conversor apresentado neste trabalho, *buck* intercalado. No próximo capítulo será apresentado com maiores detalhes o funcionamento do conversor, com equações para projeto e etapas de operação.

3 CONVERTOR PROPOSTO

No capítulo anterior, foram apresentados dois modelos de conversores CC-CC, sendo equivalentes entre si, mas ambos com aplicações diretas em sistemas fotovoltaicos. Neste capítulo serão demonstrados os princípios de operação, equações e procedimentos para projeto do conversor proposto *buck* intercalado, o fechamento irá apresentar o dimensionamento do projeto, justificando a aplicação dos valores definidos.

3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO

O que define um conversor intercalado são os comandos na chaves, sincronizados e defasados entre si de maneira uniforme de acordo com a relação 360° divididos pelo número de fases, resultando em menores ondulações nas correntes de entrada e saída (ZICH, 2009). Além de reduzir e distribuir melhor as perdas por condução entre os diversos ramos que utilizam semicondutores controlados e não controlados, facilita-se a dissipação térmica (BASCOPE et al., 2001; BALESTERO et al., 2012; SIMÓN-MUELA et al., 2007).

Nesta seção são analisadas as etapas de operação do conversor *buck* intercalado de duas células apresentado na Figura 12-a, operando com uma razão cíclica $D < 0,5$. Obtendo-se as formas de onda das tensões e correntes de acordo com o acionamento das chaves S_1 e S_2 como ilustrado na Figura 12-b.

- **Primeira etapa - t_1** : Como demonstrado pela Figura 13(a), no decorrer desta etapa a chave S_1 é levada à condução, carregando o indutor L_1 através da diferença de tensão entre V_{in} e V_o , enquanto o diodo D_2 permite a descarga do indutor L_2 . A chave S_2 e o diodo D_1 permanecem bloqueados suportando a tensão V_{in} ;
- **Segunda etapa - t_2** : Ilustrado pela Figura 13(b), durante o segundo intervalo a chave S_1 é bloqueada e o diodo D_1 entra em condução, o que implica na descarga do indutor L_1 . Por sua vez a chave S_2 continua bloqueada e o indutor L_2 alimenta a carga através de D_2 ;
- **Terceira etapa - t_3** : Pode ser visto na Figura 13(c), no instante $t = 0,5T$ a chave

S_2 é levada à condução, carregando o indutor L_2 , enquanto o diodo D_2 é bloqueado. Durante este período a chave S_1 encontra-se desligada e a corrente do indutor L_1 alimenta a carga através do diodo D_1 ;

- **Quarta etapa - t_4 :** Semelhante a Etapa 2, ilustrado na Figura 13(b), na etapa final a chave S_2 é desligada e os indutores L_1 e L_2 transferem energia para a carga por meio dos diodos D_1 e D_2 .

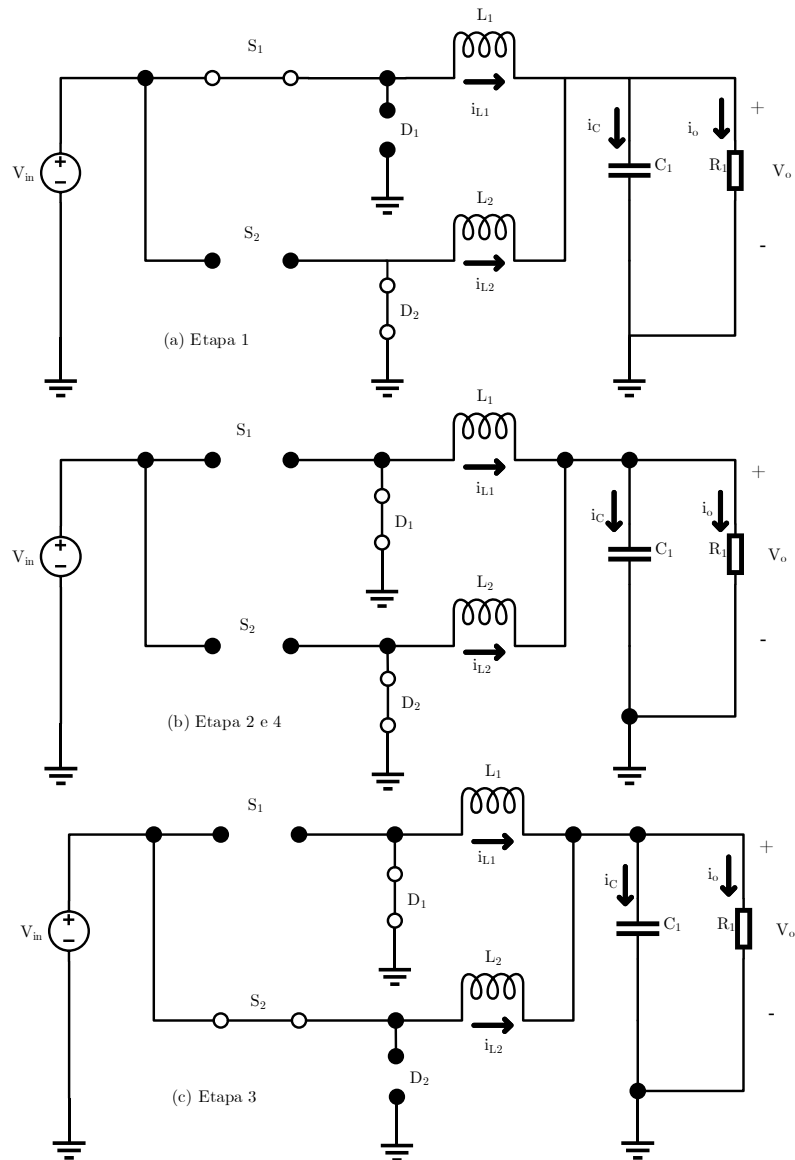


Figura 13: (a) Etapa 1; (b) Etapas 2 e 4; (c) Etapa 3.

Fonte: Autoria própria

O conversor *buck* intercalado de duas células atua com uma defasagem de 180° em cada ciclo de comutação D , sendo assim, cada chave trabalha de maneira individual não permanecendo em condução simultaneamente, para isso o projeto deve ser compreendido com $D < 0,5$. Essa informação é importante pois define a forma com que será possível projetar e escolher os componentes para cada ramo.

As principais formas de onda, do conversor *buck* intercalado são apresentadas na Figura 14, seu estudo será importante para análise e deduções de equações na sequência.

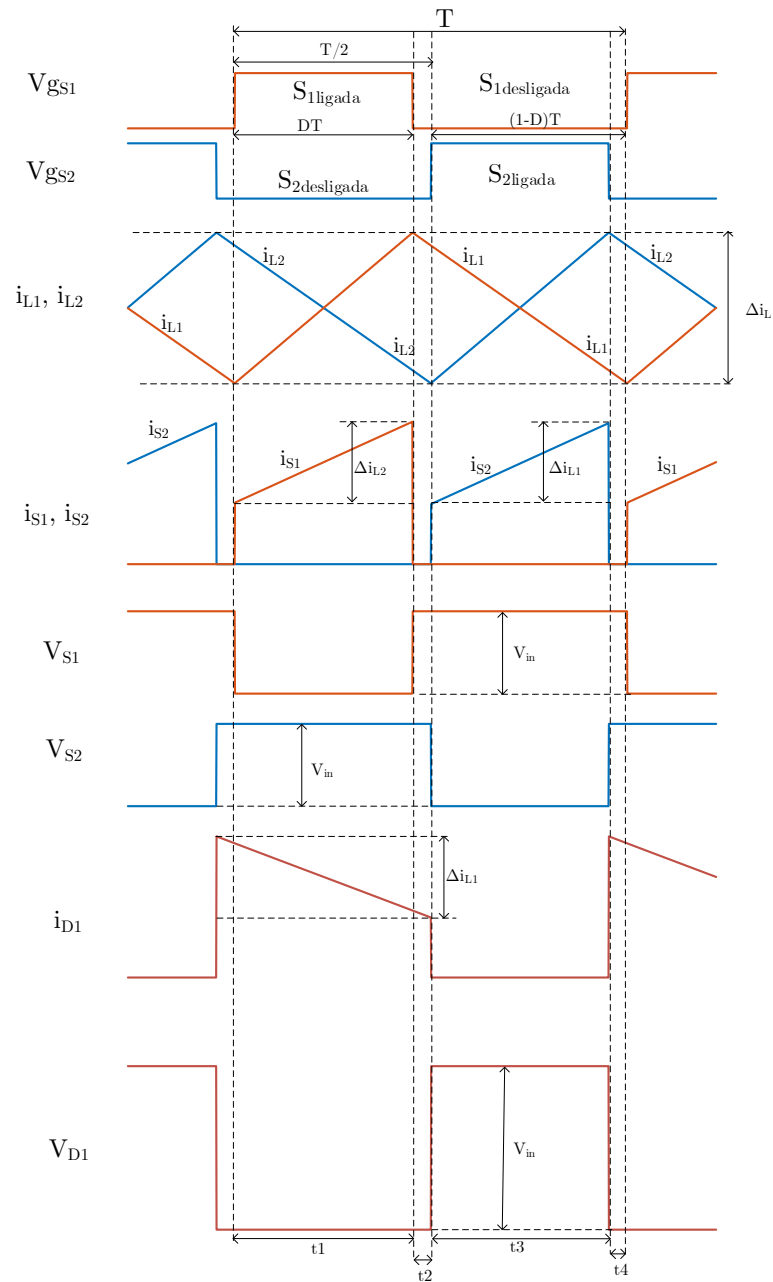


Figura 14: Formas de onda - conversor *buck* intercalado

Fonte: Autoria própria

- V_{gS1} - Sinal de comando da chave S_1 ;
- V_{gS2} - Sinal de comando da chave S_2 ;
- i_{L1} - Corrente no indutor L_1 ;
- i_{L2} - Corrente no indutor L_2 ;
- Δi_L - Variação de corrente nos indutores;

- i_{S1} - Corrente na chave S_1 ;
- i_{S2} - Corrente na chave S_2 ;
- V_{S1} - Tensão na chave S_1 ;
- V_{S2} - Tensão na chave S_2 ;
- V_{in} - Tensão de entrada;
- i_{D1} - Corrente no diodo 1;
- V_{D1} - Tensão no diodo 1.

De forma mais específica considerando todos os componentes como ideais, é possível ponderar que a tensão será dividida linearmente em cada ramo, por isso na escolha dos componentes como MOSFETs e diodos, para efeitos de projeto, a tensão máxima será $V_{in}/2$.

As correntes de cada indutor são somadas no ponto de conexão com o capacitor, assim, considerando os momentos t_2 e t_4 , sendo estes os momentos em que os indutores estão descarregando e simultaneamente alimentando a carga, é possível determinar a ondulação total através da análise do momento de descarga do capacitor.

De acordo com a Figura 14 o período é definido por T , considerando metade do período como $T/2$ e desconsiderando o tempo morto de V_{gS1} com V_{gS2} é possível obter a variação de tempo para a descarga como:

$$\Delta T = \frac{T}{2} - DT = T(0,5 - D) \quad (17)$$

Para efeitos de projeto, considera-se os indutores como ideais, com isso, de acordo com a Figura 15:

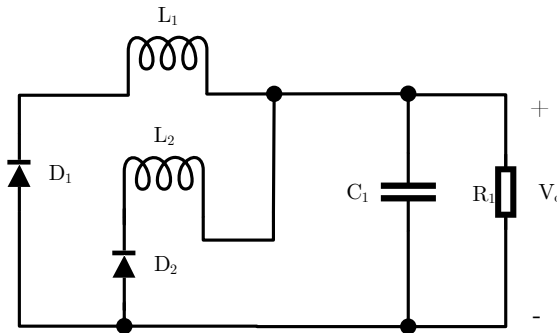


Figura 15: Conversor *buck* intercalado - descarga dos indutores

Fonte: Autoria própria

A tensão nos indutores L_1 e L_2 , é definida como:

$$V_{L1} = V_{L2} = -V_o \quad (18)$$

De acordo com a teoria, também abordada na seção 2.3.1, a tensão no indutor pode ser definida como;

$$V_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta T} \quad (19)$$

Substituindo-se (18) e (17) em (19) é possível obter a ondulação de corrente Δi_L nos indutores:

$$\Delta i_{L1} = \Delta i_{L2} = \frac{V_o(D-0,5)}{fL} \quad (20)$$

sendo f a frequência de chaveamento, D a razão cíclica e considerando $L_1 = L_2 = L$.

Para determinar a ondulação de corrente no capacitor (Δi_C), despreza-se as ondulações de corrente na carga, assim variação de corrente no capacitor é igual a soma das ondulações de cada indutor (MENDES, 2018):

$$\Delta i_C = \Delta i_{L1} + \Delta i_{L2} = \frac{V_o(2D-1)}{fL} \quad (21)$$

Semelhante ao *buck* clássico, a ondulação de tensão na saída em função da variação de carga é dada conforme a Equação (22):

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (22)$$

Na Figura 16 é apresentada a forma de onda da corrente no capacitor em conjunto com a corrente nos indutores. Como se trata de um conversor *buck* intercalado de duas células, a frequência da corrente no capacitor (f_c) é definida como:

$$f_c = 2f_s \quad (23)$$

Sendo ΔQ a área positiva do triângulo, encontrada acima do eixo t , observável na Figura 16, referente ao sinal de corrente no capacitor i_C .

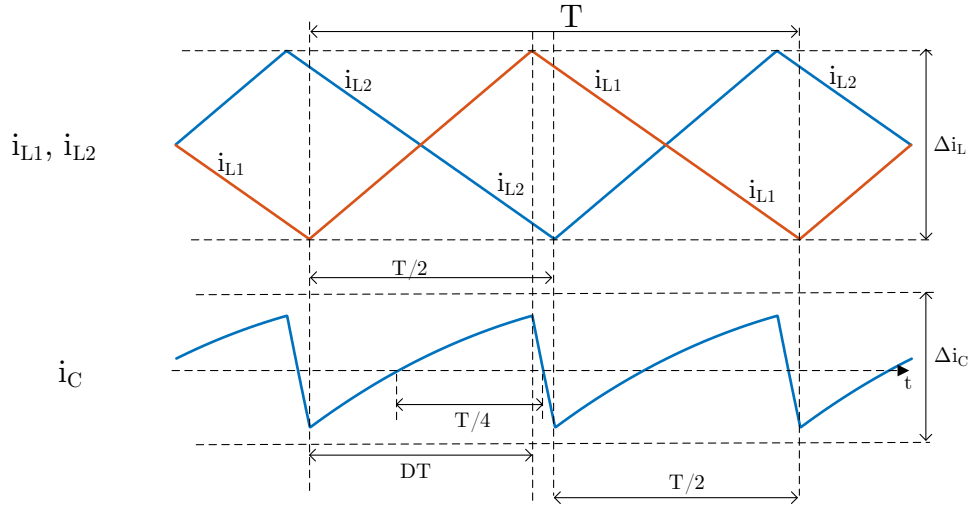


Figura 16: Forma de onda da corrente no capacitor e nos indutores.

Fonte: Autoria própria

Similarmente ao conversor *buck*, considera-se que a área do triângulo acima do eixo é igual a área abaixo, assim:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{T}{4} \frac{\Delta i_C}{2} = \frac{\Delta i_C}{16f} \quad (24)$$

Substituindo-se a Equação (24) na Equação (22), é obtido:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta i_C}{16fC} \quad (25)$$

Associando-se a Equação (21), a ondulação de tensão na saída pode ser representada como:

$$\Delta V_o = \frac{V_o(2D-1)}{16LCf^2} \quad (26)$$

Finalmente, isolando a capacitância na Equação 26 e rearranjando os termos, é definido:

$$C = \frac{V_o(2D-1)}{16L\Delta V_o f^2} \quad (27)$$

É importante ressaltar que o objetivo deste trabalho é um circuito com alta taxa qualitativa para conversão de tensão e corrente, variações devem ser ínfimas, devido a isso para o cálculo do capacitor será utilizado a metodologia definida através do requisito de baixa ondulação de corrente.

De acordo com a lei de Ohm, é possível definir:

$$\Delta i_o = \frac{\Delta V_o}{R} \quad (28)$$

Sendo assim, rearranjando a Equação 27 e utilizando-se da definição abordada na Equação 28, é possível obter a equação do capacitor como:

$$C = \frac{V_o(2D-1)}{16LR\Delta i_o f^2} \quad (29)$$

3.2 PROJETO DO CONVERTOR

Se tratando de conversores intercalados, n células podem ser empregadas, mas para esse trabalho a escolha foi delimitada em 2. Um dos motivos para isso se deve ao problema de que aumentando essa quantidade aumentaria também o número de componentes para o circuito, além disso, mais células resultariam no acréscimo de *drivers* para MOSFET, implicando em mais dispositivos para implementação no projeto. Sendo assim a escolha de 2 células se fez necessária para facilitar o projeto dentro dos recursos a pronta utilização disponíveis.

Para definição dos valores, a escolha foi realizada com base nos parâmetros da bateria e do painel solar.

O **Painel Solar 285W Canadian Solar Policristalino - CS6K-285P**, apresenta tensão para o ponto de máxima potência em 31,4 V mas com o objetivo de aproximar mais a relação de um circuito ideal com algumas perdas, facilitando igualmente a implementação dos cálculos o valor utilizado foi de 30 V denominado como V_{in} . Outra relação importante é que o projeto tem a ideia de compor vários sistemas de carregamento, ligados em paralelo, sendo cada ramo composto por um conversor CC-CC *buck* intercalado como carregador para bateria.

A bateria utilizada é a UNIPOWER *UP1270E 12 V 7 Ah*, apresenta corrente máxima para carga de 1,4 A com tensão entre 13,5 V e 13,8 V, conforme a Figura 17 abaixo:



Figura 17: Bateria UNIPOWER 12 V 7 Ah.

Fonte: Autoria própria

A Tabela 1 aponta os valores utilizados para implementação do projeto.

Tabela 1: Parâmetros para projeto do conversor

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de Entrada	V_{in}	30 V
Tensão de Saída	V_o	13,6 V
Potência de Saída	P_o	20 W
Frequência de chaveamento	f_s	50 kHz
Ondulação da corrente nos indutores L_1 e L_2	ΔI_L	0,55 A
Ondulação da tensão de saída	ΔV_o	0,120 V
Corrente de Saída	i_o	1,36 A
Ondulação de corrente de saída	Δi_o	1%

Utilizando-se dos valores da tabela, através das etapas de funcionamento é possível definir os valores de projeto conforme indicado nas Equações (30) (31).

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} = 0,4535 \quad (30)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{V_o(1-D)}{\Delta i_L f} = 273\mu H \quad (31)$$

Como mencionado na seção 3.1, o capacitor será dimensionado através da ondulação de corrente. Sendo a ondulação de corrente Δi_o igual a 1%, e a corrente

de saída i_o com valor de 1,36 A, obtêm-se com a Equação (32) o valor de:

$$\Delta i_o = 0,01i_o = 14mA \quad (32)$$

Substituindo-se o valor na Equação (29) é possível obter:

$$C = \frac{V_o(2D-1)}{16LR\Delta i_o f^2} = 0,854\mu F \quad (33)$$

Por questões comerciais e devido a maior acessibilidade o valor utilizado para o capacitor será:

$$C = 1\mu F \quad (34)$$

Agora, que o capacitor foi definido, é possível recalculer para os valores reais de ondulação tanto de corrente como de tensão de saída do conversor. Rearranjando a Equação (29), isolando o termo Δi_o e utilizando o valor de capacitância definido, é possível obter:

$$\Delta i_o = \frac{V_o(2D-1)}{16LRCf^2} = 11,58mA \quad (35)$$

Nota-se que a ondulação de corrente é extremamente baixa e dentro dos parâmetros para o projeto, mais precisamente compondo 0,85% do valor nominal.

Com o valor de Δi_o , é possível determinar, enfim a ondulação de tensão com o capacitor escolhido através da Equação (36):

$$\Delta V_o = \frac{\Delta i_o}{16LCf^2} = \frac{V_o(2D-1)}{16LCf^2} = 116mV \quad (36)$$

É possível notar ao realizar a comparação de ΔV_o com o valor nominal, que esse compõe o percentual de 0,85%.

Ambos os resultados fortacem o indicativo de que esse circuito é um apresenta boa características para utilização em carregamento de baterias.

3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Utilizando os resultados anteriores, o conversor foi simulado no *software* PSIM de forma idealizada, sem considerar as perdas e os parasitas dos componentes utilizados. Na Figura 18, são apresentadas algumas formas de onda do conversor. Na simulação foi

considerada tensão de entrada de $30V$ ($D = 0,4535$) e a potência nominal na saída de $20W$.

A Figura 18 apresenta as correntes nos indutores L_1 e L_2 , na simulação a variação de corrente obtida foi igual a 540 mA e o valor médio foi de 657 mA .

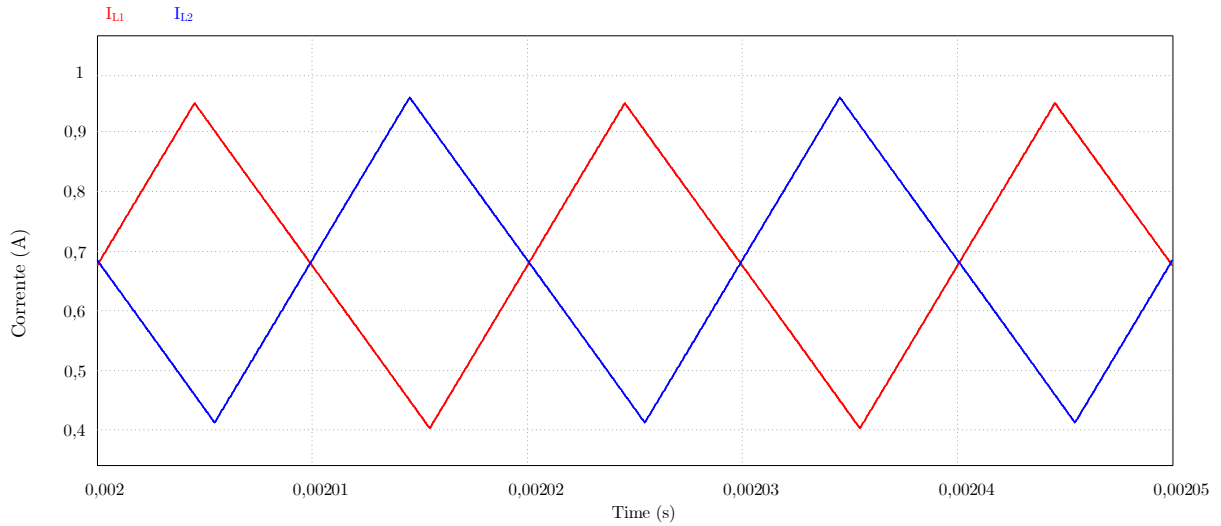


Figura 18: Resultados de simulação operando com tensão de entrada de 30 V . Sinais de corrente nos indutores L_1 e L_2 .

Fonte: Autoria própria

O diferencial do conversor *buck* intercalado é a somatória das correntes no ponto em comum com o capacitor, gerando uma baixa ondulação, tanto de corrente como de tensão. A Figura 19, apresenta a corrente de saída i_o . Nota-se que a ondulação alcançou valores muito baixos, fazendo com que o conversor possa ser utilizado para carregamento de baterias. A Figura 20 indica o sinal de corrente de saída, com o objetivo de melhor observar os parâmetros de ondulação. O valor médio obtido foi de $1,36\text{ A}$, enquanto o *ripple* foi de $11,62\text{ mA}$, esses valores estão próximos ao projetado.

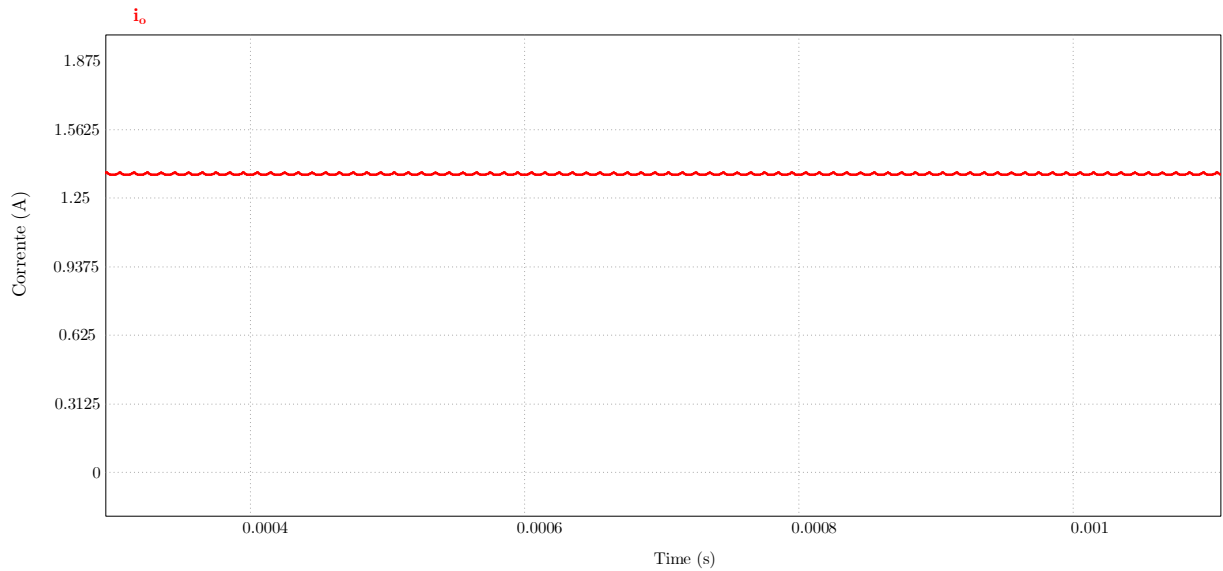


Figura 19: Sinal de corrente na carga i_o em regime.

Fonte: Autoria própria

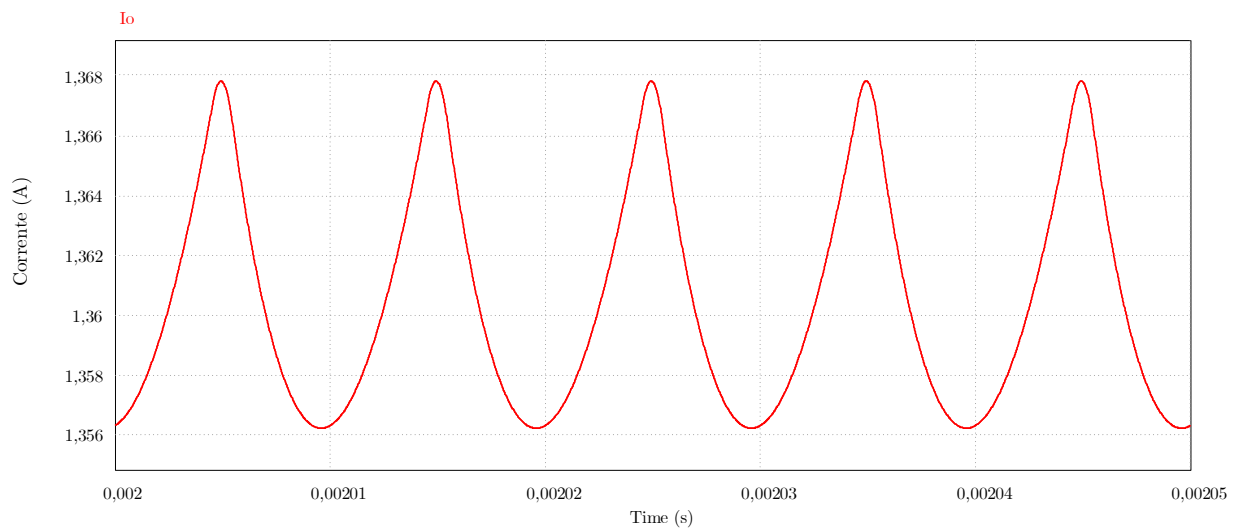


Figura 20: Sinal de corrente na carga i_o .

Fonte: Autoria própria

A Figura 21 apresenta a tensão de saída do conversor, pode-se também observar a baixa ondulação resultante, mais uma característica que torna o conversor *buck* intercalado ideal para aplicações em que existe a necessidade de uma redução de tensão e carga de bateria. A ondulação de tensão pode ser melhor visualizada na Figura 22 abaixo, a tensão média obtida na simulação foi de 13,6 V enquanto a variação ficou em 116 mV observa-se que ambos os valores ficaram de acordo com o projetado no item 3.2.

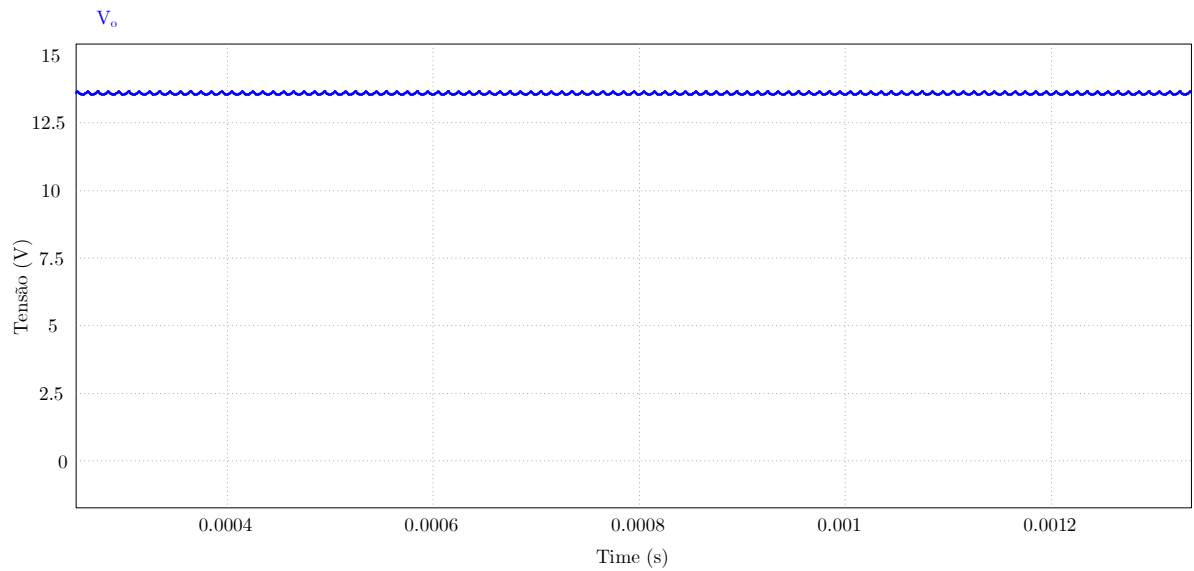


Figura 21: Sinal de tensão na carga V_o em regime.

Fonte: Autoria própria

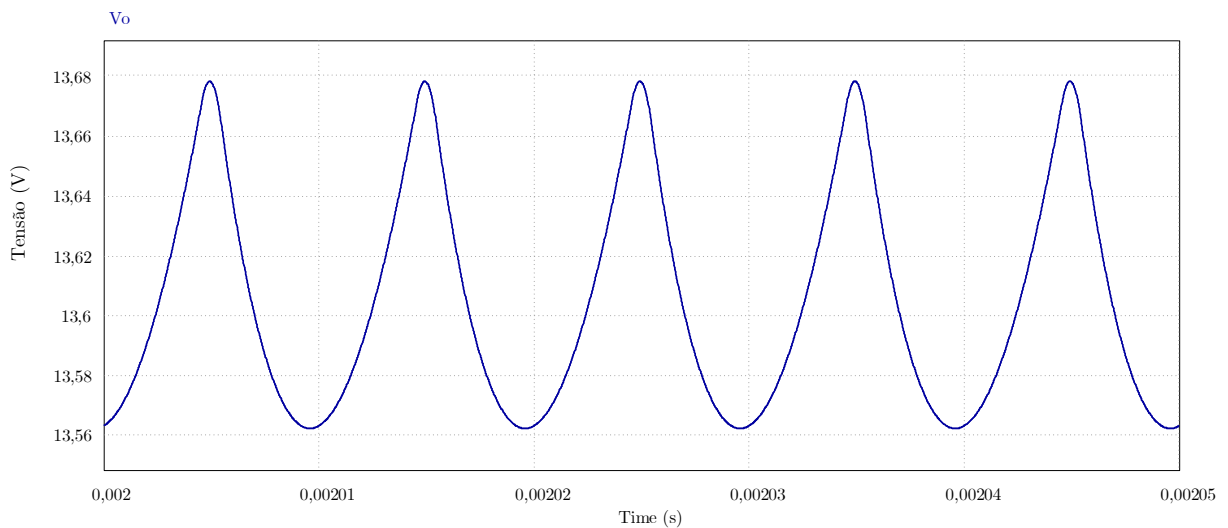


Figura 22: Sinal de tensão na carga V_o .

Fonte: Autoria própria

3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Através dos resultados de simulação, foi possível observar a capacidade do conversor em atuar com baixas variações de corrente e tensão na carga. Essa característica mostra que o conversor *buck* intercalado pode ser utilizado na aplicação para carregamento de baterias.

Após projeto e simulação o conversor foi construído e ensaiado em laboratório. Na Figura 23 é apresentada a imagem do conversor montado com indicação dos componentes que fazem parte do projeto presentes na placa. Os *drivers* foram acomodados de forma a

se eliminar alguns cabos e manter a conexão direta na placa de circuito impresso (PCI). Como a dissipação de potência projetada para o circuito é relativamente baixa, não foi necessário a inserção de dissipadores de calor para os semicondutores.

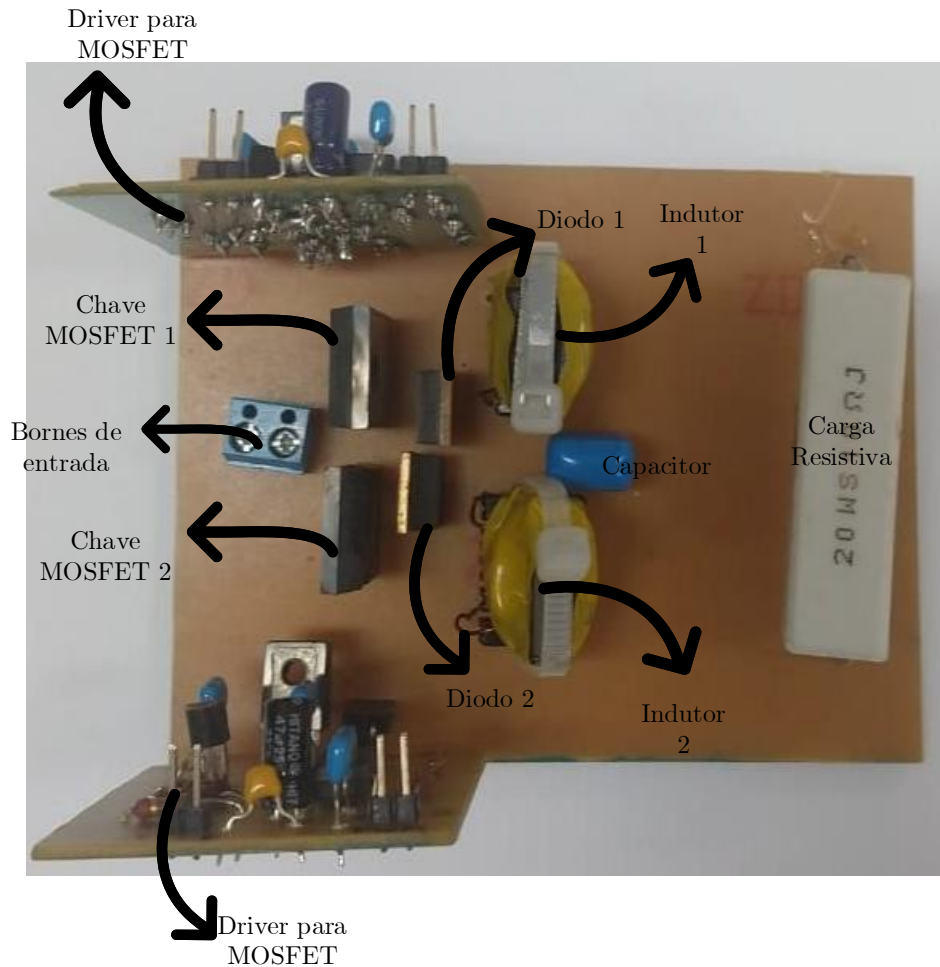


Figura 23: Foto do conversor.

Fonte: Autoria própria

Os indutores foram construídos no laboratório de acordo com o projeto descrito no Anexo A. As características elétricas foram medidas com o auxílio do *LCR Meter* Agilent, modelo 4263B. O indutor L_1 apresentou indutância de $274,03 \mu\text{H}$ e resistência CC de $190,45 \text{ m}\Omega$. O indutor L_2 apresentou indutância de $275,7 \mu\text{H}$ e resistência CC de $180,1 \text{ m}\Omega$.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos principais componentes projetados e suas principais especificações.

Tabela 2: Componentes utilizados.

Componente	Detalhes
Indutor L_1	274,03 μ H 190,45m Ω Núcleo EE/20/10/5 Thornton 28 Espiras Condutor AWG26 Entreferro 0,011 cm
Indutor L_2	275,7 μ H 180,1m Ω Núcleo EE/20/10/5 Thornton 28 Espiras Condutor AWG26 Entreferro 0,011 cm
Chaves S_1 e S_2	IRFP4332 Infineon V_{DS} 300 V - I_D 57 A $R_{DS(on)}$ 29 m Ω
Diodos D_1 e D_2	15ETH06 Infineon V_r 600 V - I_f 15 A t_{rr} 22 ns
Capacitor	0,9754 μ F Resistência 31,05m Ω poliéster
Carga resistiva	10 Ω 20W

O microcontrolador utilizado para gerar os sinais de acionamento das chaves foi o F28377S, do fabricante Texas Instruments. Utilizou-se de dois *drivers* isolados com optoacoplador que fazem uso de transistores, com alimentação em 12 V. Devido a utilização dessa topologia de *driver* foi necessário atentar-se a isolação, uma vez que o *source* de cada chave está em um potencial diferente da fonte de entrada. Os sinais de comando das chaves são apresentados na Figura 24, nota-se uma defasagem de 180° necessária para o acionamento das chaves conforme abordado na seção 3.1.

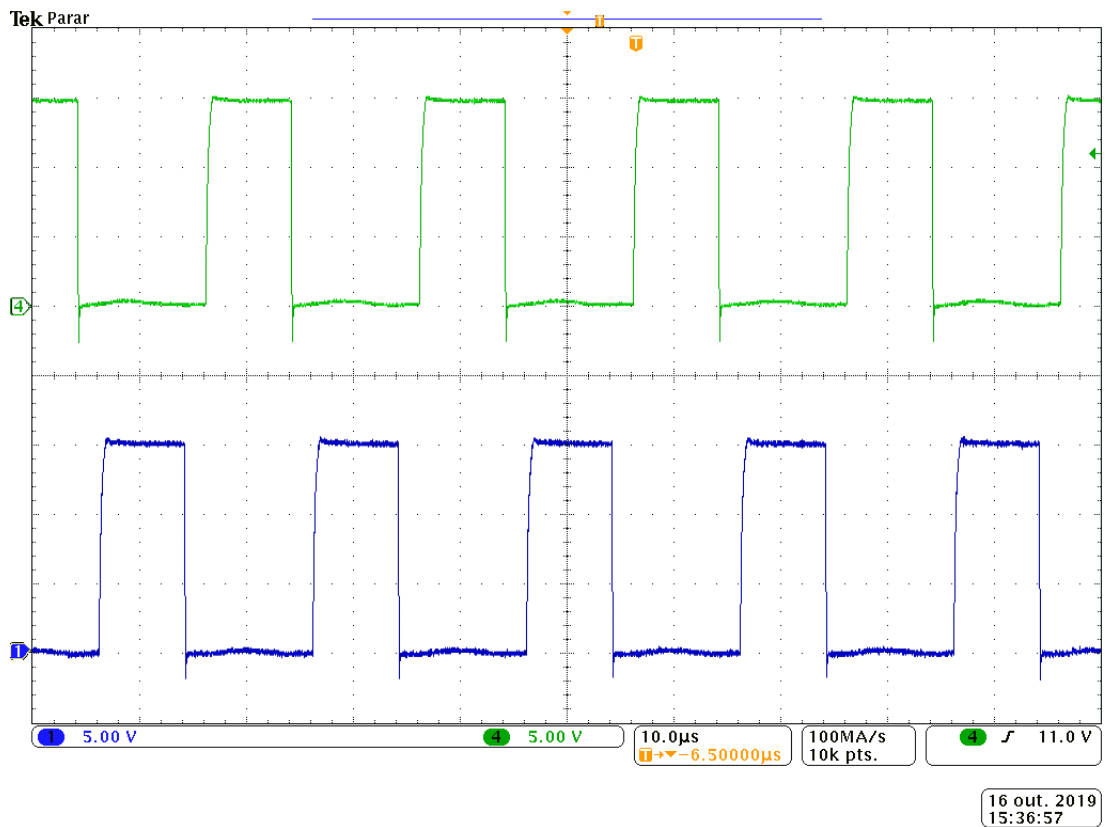


Figura 24: Sinais de comando das chaves.

Na Figura 25 são apresentadas as formas de onda para a corrente nos indutores L_1 e L_2 . Os cursores do osciloscópio indicam que a variação de corrente é de 535,1 mA possuindo erro relativo de 0,9% comparando-se ao obtido no projeto (540 mA). No caso da corrente média obteve-se 644,3 mA (erro relativo de 5,25%) para L_1 e 720,8 mA (erro relativo de 6%) para L_2 , enquanto para o projeto o valor médio para essas correntes foi de 680 mA. Nota-se um desbalanço entre as correntes, devido as não idealidades dos componentes, além das diferenças entre os indutores e comprimentos das trilhas, pois o circuito ideal deveria possuir as mesmas resistências no caminho de cada malha do conversor *buck* intercalado.

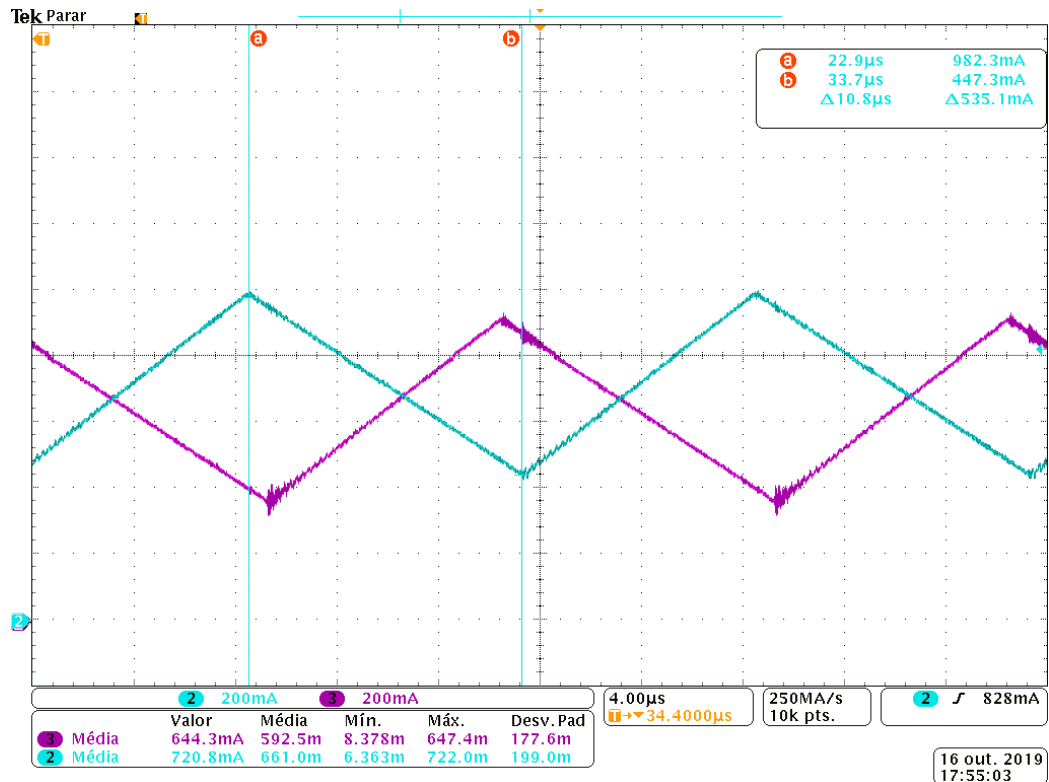


Figura 25: Forma de onda experimental nos indutores L_1 e L_2 .

A Figura 26 mostra os sinais de tensão na entrada V_{in} e em uma das chaves V_{S_1} , nota-se um pequeno ruído gerado durante as comutações. Por causarem pouco impacto no resultado final desse trabalho a abordagem não foi considerada necessária.

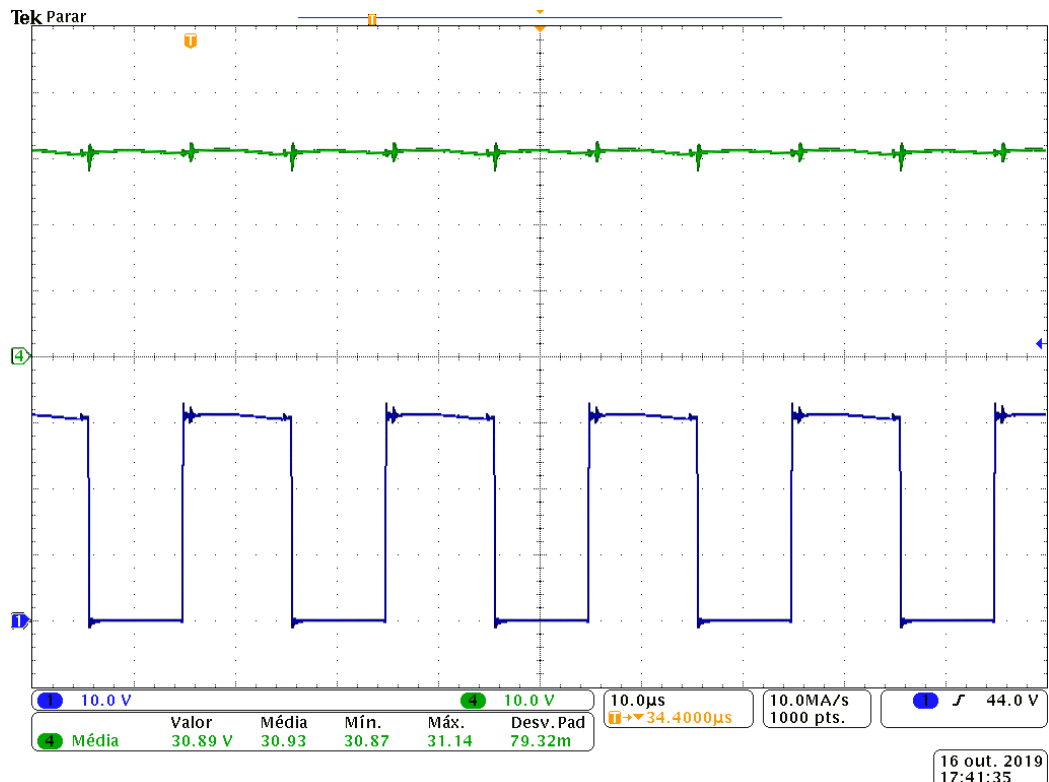


Figura 26: Forma de onda experimental tensão de entrada V_{in} e tensão na chave V_{S_2} .

Os sinais de corrente e tensão na carga são apresentados na Figura 27. É possível notar uma baixa ondulação nos dois sinais e pode-se observar que a tensão média ficou em 13,6 V, enquanto a corrente média obtida apresentou 1,32 A (erro relativo de 2,9%), tais valores são próximos aos definidos no projeto.

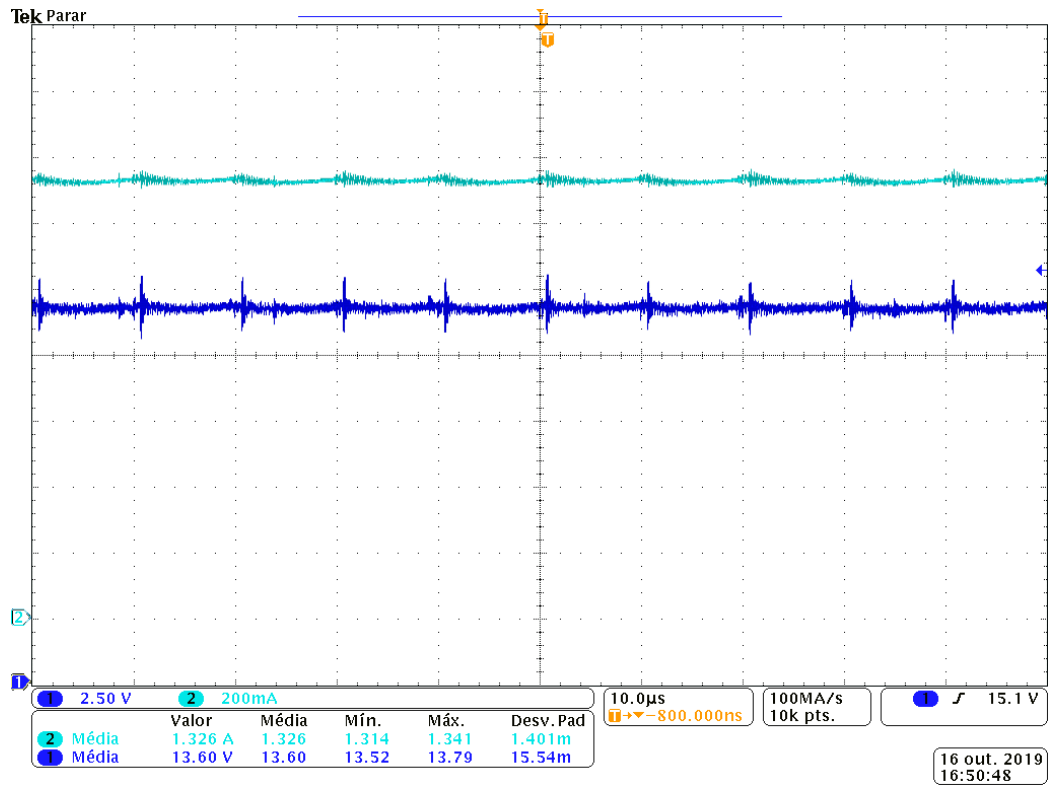


Figura 27: Forma de onda experimental de tensão e corrente de saída V_o e i_o .

Com objetivo de melhor identificar a variação de corrente de saída, foi utilizado o acoplamento CA no osciloscópio. Através dos cursores nota-se que a variação Δi_o é de 12,17 mA, erro relativo de 5,09% comparando-se ao valor de projeto (11,58 mA). Possivelmente, um valor maior de ondulação foi obtido devido aos desbalanços de corrente nos indutores e também não idealidades dos componentes.

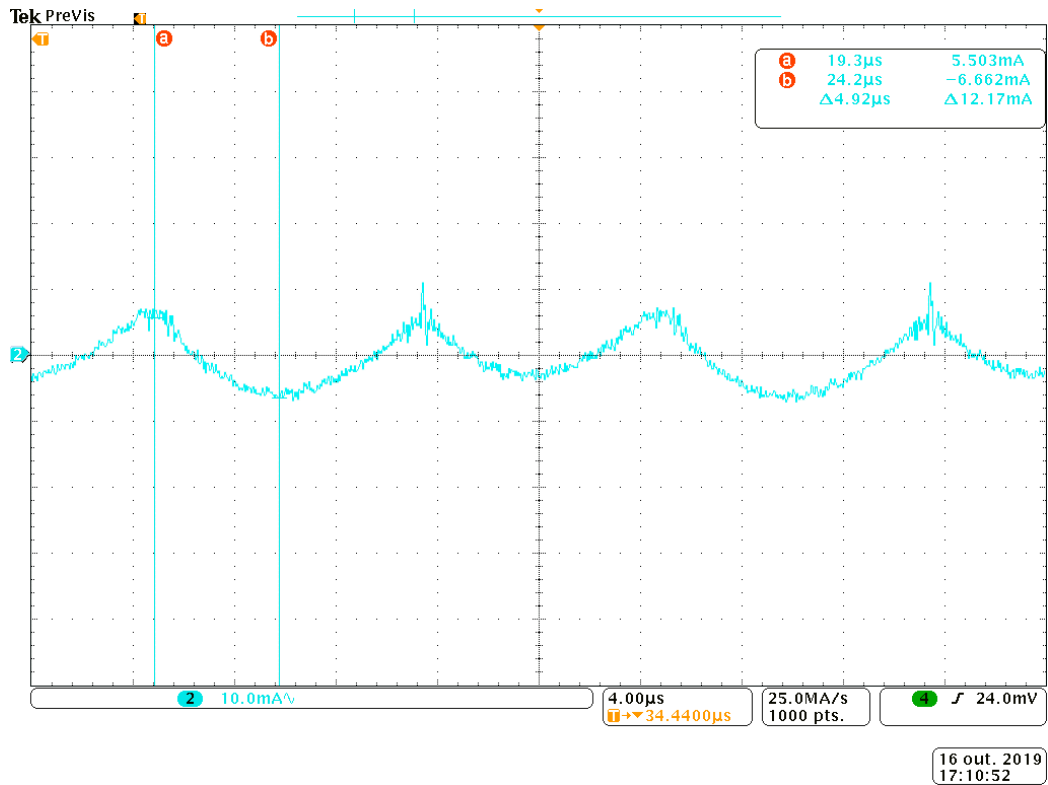


Figura 28: Forma de onda experimental de corrente de saída i_o em acoplamento CA.

Na Figura 29 o acoplamento CA também foi utilizado para melhor identificar os valores de variação de tensão. Pode ser observado que o valor ficou em 106,8 mV enquanto no projeto teórico a variação obtida foi de 116 mV (erro relativo de 7,9%). A diferença se deve a posição dos cursores, mas é importante notar que os valores estão próximos.

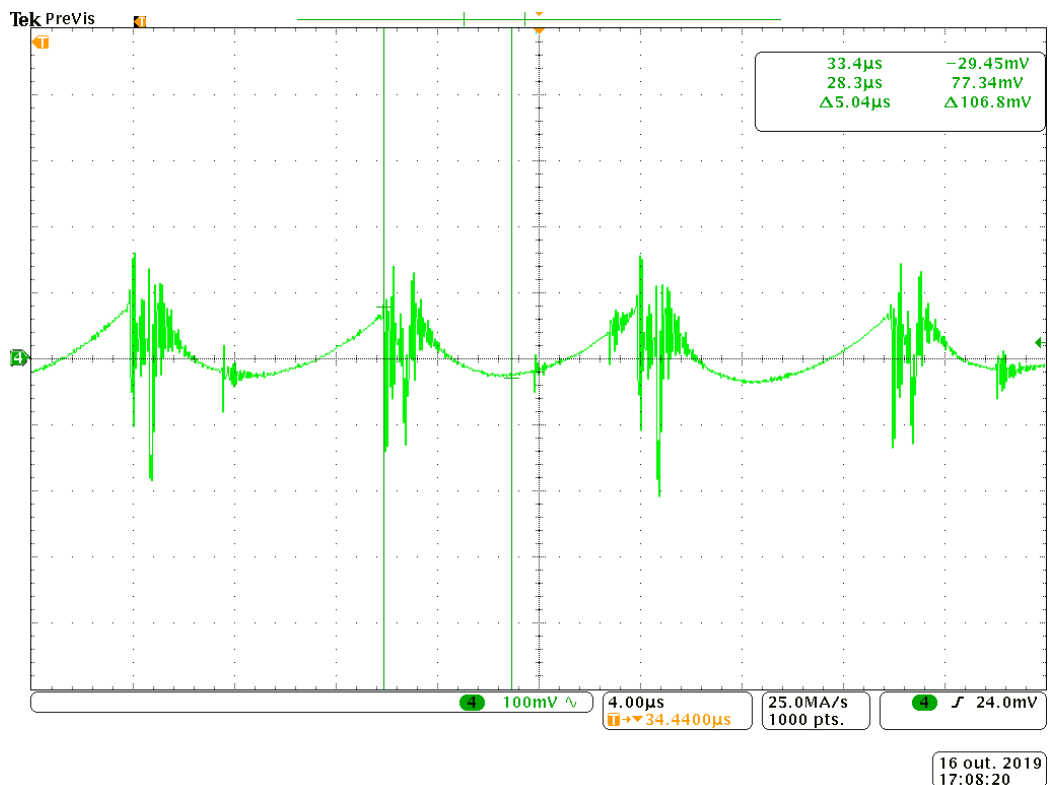


Figura 29: Forma de onda experimental de tensão de saída V_o em acoplamento CA.

A Figura 30 apresenta o rendimento do conversor *buck* intercalado. As medições foram adquiridas através do equipamento Yokogawa WT 1800.

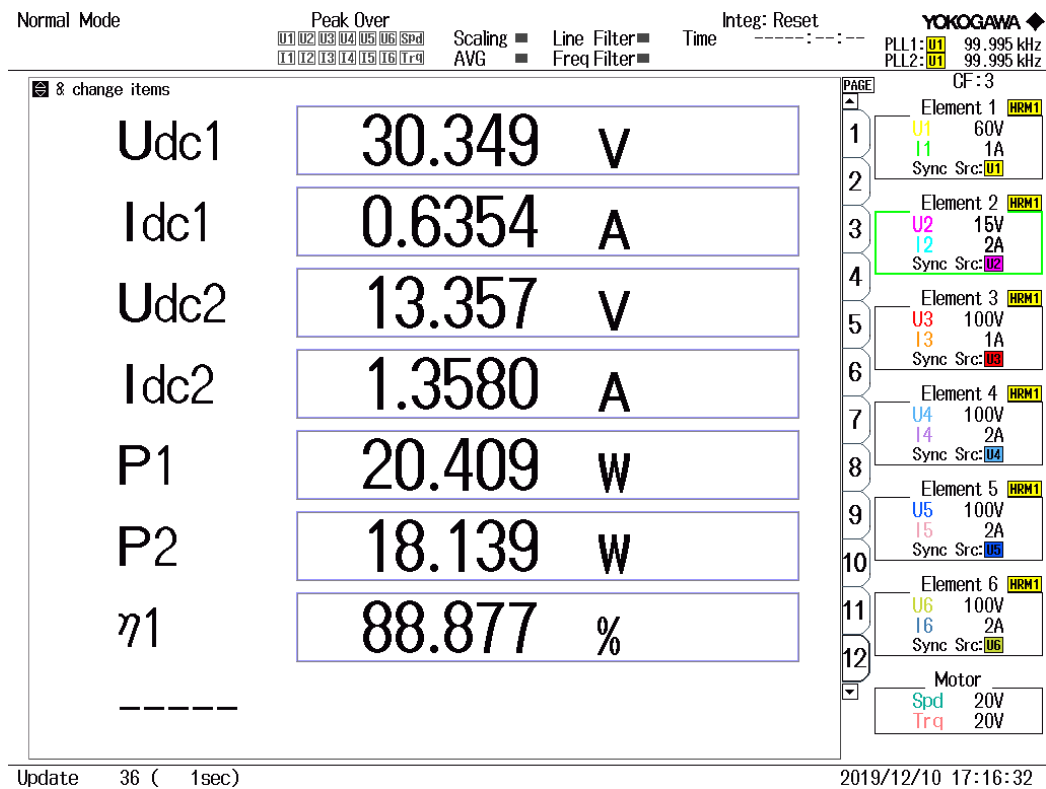


Figura 30: Rendimento do conversor.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo o conversor *buck* intercalado de duas células foi analisado através de seus resultados experimentais, que mostraram-se semelhantes aos resultados de simulação e teóricos. Algumas diferenças encontradas nos valores são devido a construção do projeto e não idealidades dos componentes, além de simplificações feitas inicialmente durante os cálculos teóricos.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado a topologia de conversor *buck* intercalado para carregamento de baterias. Foi realizada a análise das etapas de operação em malha aberta, o desenvolvimento matemático e a simulação do conversor projetado para uma potência de saída igual a 20 W. Os valores calculados e os obtidos em simulação ficaram próximos dos resultados experimentais. As diferenças existentes foram ocasionadas devido a aproximações matemáticas, imprecisão nas medições feitas nos equipamentos e não idealidades presentes tanto no *layout* da placa de circuito impresso, quanto nos componentes utilizados.

Após a implementação do conversor foram realizados testes para a potência nominal definida. Por meio da análise das formas de onda nos principais elementos do protótipo, foi possível observar uma operação coerente com os resultados simulados e os parâmetros de projeto definidos.

A frequência de chaveamento utilizada (50 kHz) proporcionou a redução do valor e volume dos filtros (indutores e capacitores). Dessa forma, o conversor proposto não demandou a utilização de capacitores eletrolíticos, o que aumenta consideravelmente a vida útil do protótipo.

Os procedimentos de projeto puderam ser validados através dos resultados obtidos na etapa de implementação experimental, em que as exigências de variações foram atendidas e os valores médios ficaram próximos aos projetados.

Por fim, os valores percentuais das ondulações de corrente e tensão na carga em relação aos valores médios foram de 0,92% e 0,78%, respectivamente. Desse modo, foi possível observar que o conversor *buck* intercalado proporciona baixas variações de corrente e tensão na carga. Assim, a topologia apresentada nesse trabalho demonstrou características aplicáveis para atuação em carga de baterias.

5 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros são indicados os itens abaixo:

- Modelo médio do conversor;
- Modelagem de pequenos sinais;
- Projeto dos controladores para carga das baterias;
- Instrumentação de tensão e corrente;
- Testes do conversor em malha fechada;

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, **Notícias Externas, Canal Energia**. 2018. Disponível em: <<http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/brasil-atinge-300-mw-em-geracao-solar-distribuida.html>>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- A.I.E.E. **Standards no. 36, Storage Batteries**. 1994. New York.
- BALESTERO, J. P. R. et al. A dc–dc converter based on the three-state switching cell for high current and voltage step-down applications. **IEEE transactions on power electronics**, IEEE, v. 28, n. 1, p. 398–407, 2012.
- BARBI, I.; FONT, C. H. I.; ALVES, R. L. **PROJETO FÍSICO DE INDUTORES E TRANSFORMADORES**. [S.l.: s.n.], 2002. 11 p.
- BASCOPE, G. V. T. et al. Nova família de conversores cc-cc pwm não isolados utilizando células de comutação de três estados. Florianópolis, SC, 2001.
- BERNDT, D. **I Electrochemical Energy Storage - Battery Technologic Handbook. 2ª Ed.** Marcel Dekker. 2003. New York.
- BNDES. **RELATÓRIO ANUAL INTEGRADO 2017, p. 25**. 2017. Disponível em: <www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Hotsites/Relatorio_Anuar_2017/index.html>. Acesso em: 15 ago. 2018.
- CBS BATTERY. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, **Notícias Externas, Canal Energia**. Disponível em: <http://www.csbbattery.com/english/03_support/01_support_detail.php>. Acesso em: maio 2017.
- CHEN, B.-Y.; LAI, Y.-S. New digital-controlled technique for battery charger with constant current and voltage control without current feedback. **IEEE transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 59, n. 3, p. 1545–1553, 2011.
- CURTIS, P. M. **Ups systems: Applications and maintenance with an overview of green technologies**. Wiley-IEEE Press, 2011.
- DUSMEZ, S.; COOK, A.; KHALIGH, A. Comprehensive analysis of high quality power converters for level 3 off-board chargers. In: IEEE. **2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. [S.l.], 2011. p. 1–10.
- FARIA, J. H. S. d. et al. Conversor cc-cc elevador de tensão full-bridge para aplicações em célula a combustível. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- IEEE STD 1184. **IEEE Guide for the Selection and Sizing of Batteries for Uninterruptible Power Systems**. 2006. In IEEE Standards Board.

IEEE STD 466. **IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications**. 1995. In IEEE Standards Board.

INPE. **Atlas Brasileiro Energia Solar 2a Ed. p. 12,39**. 2017. Disponível em: <ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2018.

KANGAPPADAN, E. T.; DAVID, D. Interleaved buck converter with continuous supply current using occ technique. In: IEEE. **2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)**. [S.l.], 2016. p. 320–325.

KIEHNE, H. A. **Battery technology handbook**. [S.l.]: CRC Press, 2003.

KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. **IEEE transactions on industry applications**, IEEE, v. 41, n. 5, p. 1292–1306, 2005.

KOURO, S. et al. Photovoltaic energy conversion systems. **Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications**, Wiley Online Library, p. 160–198, 2014.

LI, L. et al. Design of photovoltaic mppt controller using interleaving parallel buck circuit. In: IEEE. **2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)**. [S.l.], 2016. p. 876–880.

LINDEN D.; REDDY, T. B. **Linden’s handbook of batteries**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 2011.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2011. 1106 p. ISBN 978-0-470-72169-8.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Jhon Wiley and Sons Ltd. 2003. West Sussex, England.

MENDES, L. A. **COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS CONVERSORES BUCK ENTRELAÇADO DE TRÊS FASES E BUCK BASEADO NA CÉLULA DE COMUTAÇÃO DE QUATRO ESTADOS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São João del-Rei, 2018.

MORAES, C. F. et al. **CONVERSOR CC-CC MEIA PONTE ALIMENTADO EM CORRENTE COM SNUBBER REGENERATIVO APLICADO A MICROINVERSORES FOTOVOLTAICOS**. 2018.

ONU. **ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS Desenvolvimento Sustentável**. 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/energia-solar-agregou-mais-capacidade-de-geracao-eletrica-que-combustiveis-fosseis-em-2017/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

OSMAN, S.; RAHIM, N.; JEYRAJ, S. Single current sensor with multiple constant current charging method in solar battery charger. IET, 2014.

RASHID, M. H. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook. In: **ch. 12**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2011.

REDDY, T. B. **Linden’s handbook of batteries**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 2011.

SILVA, E. L. C. d. et al. **Desenvolvimento de conversor bidirecional isolado para controle de carga e descarga de bancos de baterias**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

SIMÓN-MUELA, A. et al. Comparative study of the optimal number of phases for interleaved voltage regulator modules. In: IEEE. **2007 European Conference on Power Electronics and Applications**. [S.l.], 2007. p. 1–8.

TANIGUCHI, I.; KOJIMA, K.; FUKUI, M. A practical battery charge/discharge simulator for future embedded systems including smart grids. In: IEEE. **2009 International SoC Design Conference (ISOCC)**. [S.l.], 2009. p. 173–176.

UNIPOWER. **Manual Técnico: Bateria de Chumbo-Ácida Selada Regulada por Válvula**. 2003. São Paulo.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, May 2009. ISSN 0885-8993.

WEC. **WORLD ENERGY RESOURCE 2016. Summary, Solar p. 6-7**. 2016. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

YANG, Z. et al. Integration of a statcom and battery energy storage. **IEEE Power Engineering Review**, IEEE, v. 21, n. 5, p. 63–63, 2001.

YU, G. et al. A novel two-mode mppt control algorithm based on comparative study of existing algorithms. **Solar Energy**, Elsevier, v. 76, n. 4, p. 455–463, 2004.

ZICH, S. M. Analysis and design of continuous input current multiphase interleaved buck converter. 2009.

APÊNDICE A – PROJETO DOS INDUTORES L_1 E L_2

Para a implementação dos elementos magnéticos fez-se uso da metodologia proposta por Barbi, Font e Alves (2002). Na Figura 31 é apresentado um núcleo e carretel de ferrite do tipo E, tal que A_w é a área da janela e A_e é a área da seção transversal do núcleo.

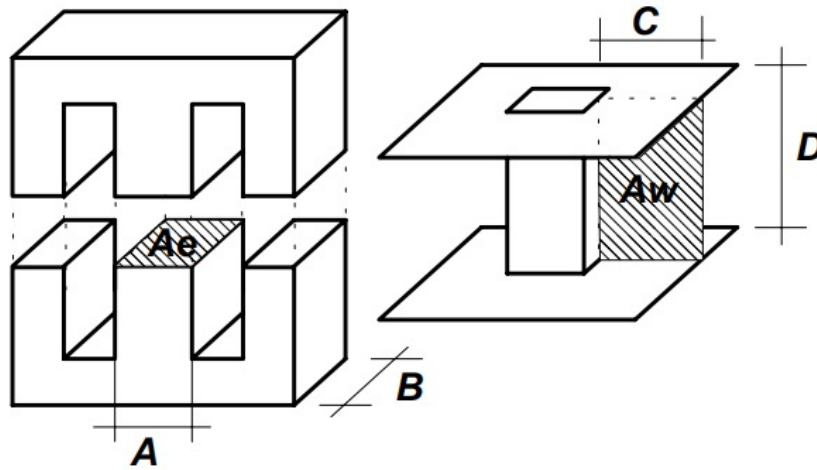


Figura 31: Núcleo e carretel do tipo E

Fonte: Barbi, Font e Alves (2002)

Para a escolha adequada do núcleo, o projeto físico é embasado nas Leis de Àmpere e Faraday, as quais são apresentadas respectivamente nas equações (37) e (38), sendo H o campo magnético, l o comprimento do condutor, i_L a corrente, $V_L(t)$ a tensão no indutor, N o número de espiras e $\Delta\phi$ a variação do fluxo.

$$\oint H dl = Ni_L \quad (37)$$

$$V_L(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (38)$$

Além dessas relações, faz-se uso da equação da tensão no indutor e da densidade de fluxo magnético, determinadas por (39) e (40), respectivamente.

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \quad (39)$$

$$B = \mu_o H \quad (40)$$

Igualando (38) e (39), obtém-se:

$$N\Delta\phi = L\Delta i_L, \quad (41)$$

de modo que:

$$\Delta\phi = \Delta B A_e. \quad (42)$$

Para a corrente máxima no indutor i_{Lmax} tem-se a densidade de fluxo máxima B_{max} . Substituindo (42) em (41), obtém-se:

$$NB_{max}A_e = Li_{Lmax} \quad (43)$$

Manipulando a equação (43), tem-se que

$$N = \frac{Li_{Lmax}}{B_{max}A_e} \quad (44)$$

A densidade máxima de corrente J_{max} é determinada pela equação (45), sendo que A_p é a área transversal do enrolamento e i_{Lef} a corrente eficaz no indutor.

$$J_{max} = \frac{Ni_{Lef}}{A_p} \quad (45)$$

Como os fios possuem geometria circular, esses ocupam apenas um percentual da janela disponível, sendo necessário estabelecer um fator de janela k_w . Desse modo, é possível estabelecer a relação presente na equação (46).

$$k_w = \frac{A_p}{A_w} \quad (46)$$

Por meio da relação de k_w e utilizando a equação (45) obtém-se que

$$N = \frac{J_{max}k_w A_w}{i_{Lef}}. \quad (47)$$

Igualando (44) e (47), tem-se

$$\frac{J_{max}k_w A_w}{i_{Lef}} = \frac{Li_{Lmax}}{B_{max}A_e}. \quad (48)$$

A partir da equação (48) é possível determinar o produto $A_e A_w$ mínimo em cm^4 para a implementação física do indutor, o qual é calculado pela equação (49).

$$A_e A_w = \frac{Li_{Lmax} i_{Lef}}{B_{max} J_{max} k_w} 10^4 \quad [\text{cm}^4] \quad (49)$$

Considerando a utilização de núcleos de ferrite do tipo E, o caso crítico para os esforços de corrente em L_1 e L_2 e a indutância desejada, tem-se que:

$$A_e A_w L_1 = A_e A_w L_2 = \frac{273 \times 10^{-6} \cdot 0,94 \cdot 0,7}{0,3 \cdot 450 \cdot 0,75} \cdot 10^4 = 0,018 \text{ cm}^4. \quad (50)$$

Desse modo, foi escolhido o núcleo EE/20/10/5, o qual possui as seguintes características: $A_e=0,31 \text{ cm}^2$, $A_w=0,255 \text{ cm}^2$ e $A_e A_w=0,079 \text{ cm}^4$.

Por meio da equação (44), considerando os dados do núcleo escolhido e os parâmetros de projeto é possível calcular o número de espiras para L_1 e L_2 :

$$N_{L_1} = N_{L_2} = \frac{273 \times 10^{-6} \cdot 0,94}{0,3 \cdot 0,31} \cdot 10^4 = 28 \text{ espiras}. \quad (51)$$

Com relação ao entreferro l_{gap} , esse é necessário para evitar a saturação do núcleo e para que o valor da indutância não varie tanto com as variações na permeabilidade do núcleo, a qual muda conforme a temperatura e o ponto de operação. O comprimento do entreferro pode ser calculado em cm por meio da equação 52, sendo μ_0 a permeabilidade do ar, igual a $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m].

$$l_{gap} = \frac{N^2 \mu_0 A_e}{L} 10^{-2} \quad (52)$$

No caso do projeto de L_1 e L_2 obtém-se:

$$l_{gap} L_1 L_2 = \frac{28^2 \cdot 4 \cdot \pi \times 10^{-7} \cdot 0,94}{273 \times 10^{-6}} \cdot 10^{-2} = 0,011 \text{ cm}. \quad (53)$$

Para a escolha do condutor é levado em consideração o efeito pelicular (*skin*). Com o aumento da frequência de chaveamento a corrente tende a se distribuir na periferia do condutor, o que reduz a densidade de corrente no centro, diminuindo a área útil do fio. O diâmetro máximo ϕ_{skin} que o condutor deve ter para amenizar esse efeito pode ser calculado por (54).

$$\phi_{skin} = 2 \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f_s}} \quad (54)$$

Para o projeto de L_1 e L_2 , tem-se:

$$\phi_{skin} = 2 \sqrt{\frac{1,72 \times 10^{-4}}{\pi \cdot 4 \cdot \pi \times 10^{-7} \cdot 1 \cdot 50 \times 10^3}} = 0,059 \text{ cm}. \quad (55)$$

Tendo em vista respeitar o efeito *skin* o condutor adotado foi o AWG 26.

O número de condutores em paralelo n_{cond} necessário para evitar o aumento da temperatura de operação dos fios é determinado pela expressão (56), sendo A_{skin} a área

do condutor escolhido respeitando o efeito *skin* em cm^2 .

$$n_{cond} = \frac{I_{ef}}{J_{max} A_{skin}} \quad (56)$$

Para L_1 e L_2 , tem-se que

$$n_{condL_1} = n_{condL_2} = \frac{0,7}{450 \cdot 2,047 \times 10^{-3}} = 1 \text{ condutor.} \quad (57)$$

Com isso, os indutores foram construídos com apenas 1 fio.

Após a implementação dos magnéticos o valor resultante da indutância foi igual a $275,7\mu H$ e resistência medida foi de aproximadamente $180,1m\Omega$ para L_1 e $274,03\mu H$ com resistência de $190,45m\Omega$ para L_2 .