

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CAMPUS LITORAL NORTE
DEPARTAMENTO INTERDISCIPLINAR
ENGENHARIA DE GESTÃO DE ENERGIA

RODOLFO BACH

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DO
CONVERSOR D**

Tramandaí

2022

RODOLFO BACH

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DO CONVERSOR D

Este trabalho foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da atividade de ensino “Trabalho de Conclusão de Curso”, do Departamento Interdisciplinar e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Soares dos Reis, UFRGS.

Doutor Ingeniero Industrial pela Universidad Politécnica de Madrid, España.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Soares dos Reis, UFRGS.

Doutor Ingeniero Industrial pela Universidad Politécnica de Madrid, España.

Prof^a. Dra. Aline Cristiane Pan, UFRGS.

Doutora em Energia Solar Fotovoltaica pela Universidad Politécnica de Madrid, España.

M.E. Henrique Gabriel Cabral, PUCRS.

Mestre em Engenharia pela Pontifícia Universidade Católica do RGS – Porto Alegre, Brasil.

Coordenador(a) COMGRAD-EGE: _____

Prof^a. Dra. Gabriela Pereira da Silva Maciel

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DO CONVERSOR D

Rodolfo Bach¹ – rodolfo.bach@ufrgs.br
Fernando Soares dos Reis¹ – f.dosreis@ufrgs.br

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento Interdisciplinar – Engenharia de Gestão de Energia.

Resumo. O conversor D é um conversor CC-CC com características de fonte de corrente em sua entrada pertencente a família dos conversores redutores-elevadores, ou seja, possui a capacidade de receber em seus terminais de entrada uma tensão e reduzir ou elevar esse valor em seus terminais de saída, de acordo com a necessidade. Esses conversores podem ser utilizados associados a sistemas fotovoltaicos com o intuito de ajustar a tensão fornecida pelo sistema para um barramento CC posterior. No caso de sistemas isolados esse barramento é constituído por baterias, e nesse cenário o conversor atua como controlador de carga realizando ajustes na tensão para melhor carregamento e aumento da vida útil das baterias. Autores, como Khateb et al, tem atribuído ao conversor D a capacidade de aumento da eficiência na conversão da energia gerada nos sistemas fotovoltaicos para armazenamento em baterias. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo do conversor D, com intenção de alimentar uma bateria, através de análise bibliográfica, realização dos estudos qualitativo e quantitativo, modelagem e simulação do conversor D, realização do projeto de uma placa de circuito impresso e sua confecção, com a posterior implementação do conversor na placa e realização de ensaios de laboratório. Os resultados obtidos com o protótipo foram comparados com os resultados esperados, de acordo com as análises previamente realizadas tanto por meio de estudos teóricos, quanto através de simulações digitais, os resultados obtidos foram positivos visto que o protótipo do conversor D possui o comportamento esperado e as premissas definidas no pré-projeto foram cumpridas. Por fim são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Conversor D, Modo de Condução Contínua, Protótipo

Abstract. The D Converter is a DC-DC power converter with current source characteristics at its input, belonging to the buck-boost power converters family, which is, it has the ability to increase or decrease the voltage supplied to its input terminals, to provide the voltage required for the load connected to its output terminals. These converters can be used in combination with photovoltaic systems to fit voltage levels between the photovoltaic (PV) array and the DC bus bar. The D converter acts as a battery charger, in isolated photovoltaic systems, where the DC bus bar consists of batteries connected in series and/or in parallel. Some authors have credited the D converter with the capacity to increase global energy efficiency in photovoltaic systems. The aim of this work is the development of a laboratory prototype of the D converter, as a battery charger, to achieve this goal; the following initial steps were carried out bibliographic review, qualitative and quantitative studies, modelling and simulation of the D converter. To build a laboratory prototype, a design of a printed circuit board (PCB) and its manufacture have been made, including assembling all components on the PCB and manufacturing inductance coils, since these passive components are not available on the market. In addition, laboratory tests were carried out using the laboratory prototype of the D converter. The experimental results, which were obtained by performing laboratory tests on the prototype verified previous studies performed through both theoretical studies and numerical simulations. This leads to conclusions and suggestions for future works that are now presented in the sequence of this work.

Keywords: D converter, Continuous Conduction Mode, Prototype

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica pode ser tratada atualmente como um grande indicador geral para diversas finalidades. O consumo de energia em um país pode determinar a capacidade de crescimento, a capacidade industrial e até mesmo a qualidade de vida de sua população. Desta forma, existe uma constante necessidade de expansão da matriz elétrica de um país, tendo em vista o objetivo de crescimento e até mesmo a garantia de robustez e da operacionalidade do sistema.

Concomitantemente ao objetivo de expansão da matriz elétrica, existe a necessidade mundial de descarbonização das fontes energéticas. O Brasil é um país reconhecido pela alta participação das fontes renováveis em seu sistema de geração elétrico, representando, ao todo, uma parcela de 84,8% do total, quando somadas a produção nacional e as importações. Atualmente o maior responsável por este valor é a energia hídrica, responsável por 65,2% de toda a oferta interna (Empresa de Pesquisa Energética, 2021).

Analisando a matriz elétrica nacional, é obtido um dado positivo: a alta participação de fontes renováveis. Por outro lado, é evidente a dependência do país de uma única fonte de geração de energia elétrica, a hídrica, e por isso é explícita a necessidade de diversificação da matriz elétrica brasileira. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê um período de transição energética, através da utilização de uma maior gama de fontes energéticas, descentralização, uso de novas tecnologias e maior participação de energias renováveis (Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Esse período deve ser marcado por grandes desafios, dentre eles, garantir a transição energética para sistemas isolados, aonde não existe eletrificação a partir do Sistema Integrado Nacional (SIN), ou seja, áreas sem abrangência da geração centralizada nacional. Nestes locais é comum, atualmente, a utilização de geradores a diesel devido a possibilidade de estocagem e alto conhecimento sobre este combustível. Porém o suprimento de energia em sistemas isolados é dependente da logística do diesel, já que o mesmo não é produzido nessas regiões. Muitas vezes esse deslocamento ocorre por vias fluviais sendo extremamente prejudicado por períodos de estiagem (Empresa de Pesquisa Energética, 2022).

A energia solar fotovoltaica surge como uma grande aliada ao processo de transição energética no Brasil. Nos últimos anos essa fonte de energia renovável tem se consolidado no setor da geração distribuída e vêm crescendo de maneira exponencial, apresentando um aumento de 55% de potência instalada, sobre o total acumulado, apenas no ano de 2020 (GREENER, 2021). No ponto de vista da geração centralizada, também é esperado um grande aumento da potência instalada entre os anos de 2020 e 2030, passando a representar um total de 15% da geração nacional, em conjunto com a geração eólica (Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética, 2021). Em sistemas isolados as energias renováveis não possuem muito espaço, atualmente, e em uma perspectiva até 2026 é esperada a participação da energia solar apenas para contornar problemas, com a utilização de baterias para garantir uma maior disponibilidade de energia elétrica (Empresa de Pesquisa Energética, 2022).

A energia solar fotovoltaica é obtida a partir da irradiação solar em células fotovoltaicas, que convertem parte da energia incidente em corrente elétrica, este fenômeno é conhecido como efeito fotovoltaico. Em uma usina real, uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos (associação de células em série e em paralelo) é associada em série formando fileiras conhecidas como *strings*, e estas fileiras são associadas em paralelo, respeitando as características elétricas dos componentes, e então, são conectadas a um inversor, que é responsável por transformar uma corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos (SFV) são compostos por um conversor CC-CC e posteriormente por um inversor CC-CA quando conectados diretamente a rede elétrica. Quando conectados a um banco de baterias, em sistemas isolados, pode ser utilizado apenas o conversor CC-CC conectado diretamente ao sistema de armazenamento, neste caso é necessária a utilização de um algoritmo de controle. O equipamento resultante desse arranjo recebe o nome de controlador de carga e atua na otimização e no controle do fluxo de energia elétrica aumentando assim, tanto a vida útil das baterias, quanto a eficiência do sistema através do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) (Pinho e Galdino, 2014).

O conversor D é um conversor CC-CC da família dos conversores redutor-elevador, ou (do inglês, *buck-boost*). Isto significa que possui tanto a capacidade de atuar elevando a tensão de saída, em relação a entrada, quanto reduzindo. Essa família de conversores apresenta como seus principais integrantes os consolidados conversores *Buck-Boost*, SEPIC (*Single-Ended Primary Inductor Converter*), Čuk e Zeta, porém o conversor D apresenta a vantagem de garantir uma elevada redução na ondulação da sua corrente de entrada, quando é considerado um mesmo valor de indutância de entrada para os três conversores dessa família que apresentam características de fonte de corrente em suas entradas, como são os conversores SEPIC e Čuk. Dessa forma, se pode afirmar que o conversor D apresenta uma característica de fonte de corrente quase ideal em sua entrada, sem a necessidade da utilização de elevados valores de indutância de entrada, esse comportamento de fonte de corrente quase ideal, aumenta a eficiência do processo de conversão da energia quando associado a um SFV (El Khateb *et al*, 2015). No entanto, assim como os conversores *Buck-Boost* e Zeta, o conversor D também necessita de um circuito de acionamento (do inglês, *driver*) isolado para ativar e desativar seu interruptor, diferentemente dos conversores SEPIC e Čuk (Dos Reis *et al*, 2017).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de laboratório do conversor D e a realização de ensaios de laboratório, para isso foi realizado um estudo do conversor D a partir de suas análises qualitativa e quantitativa no modo de condução contínua (MCC), em regime estacionário, foi utilizada uma metodologia de dimensionamento já obtida por outro estudo para este equipamento (Dos Reis *et al*, 2017). O conversor foi modelado e simulado, com o objetivo de ter os seus terminais de entrada conectados a um único módulo FV, o qual se pode classificar como um sistema fotovoltaico isolado (SFI), isto é, um SFV desconectado da rede elétrica (Pinho e Galdino, 2014) e os seus terminais de saída conectados a uma bateria. Foram identificadas as formas de onda em seus componentes e comparadas com as premissas utilizadas para o dimensionamento. Posteriormente foi projetada e confeccionada uma placa de circuito impresso (PCI), onde foi implementado o conversor D, assim sendo produzido um protótipo de laboratório. Finalmente realizou-se ensaios de laboratório para confrontação com os resultados previstos nos estudos teóricos realizados previamente.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nesta seção é apresentada uma série de estudos sobre os conceitos base para compreensão do funcionamento do sistema proposto neste trabalho. Um sistema formado por módulos fotovoltaicos conectado a um conversor D, que atua

como controlador de carga para o carregamento de uma bateria. As análises seguintes provêm de uma revisão bibliográfica que deve embasar as proposições das seções que seguem.

2.1 Módulos fotovoltaicos

Módulo fotovoltaico é definido como uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de produzir energia elétrica (ABNT, 2013), desta forma pode-se compreender que um módulo fotovoltaico é uma associação de células fotovoltaicas com o objetivo de produzir energia elétrica. Células fotovoltaicas são estruturas compostas, em sua maioria, por semicondutores, produzidas com a capacidade e intuito de aproveitar a irradiação solar e converter essa energia em eletricidade, através do efeito fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos são caracterizados por parâmetros elétricos, que descrevem seu funcionamento sob condições de ensaio padrão (STC) (do inglês, *Standard Test Conditions*). As condições de ensaio padrão são as seguintes: 1000 W/m² para irradiância, 25°C para a temperatura da célula e a massa de ar é de 1,5 (do inglês, *air mass – AM 1,5*). Sob STC a tensão de circuito aberto, V_{oc} , (do inglês, *open circuit – OC*) é a máxima tensão que pode ser produzida por um módulo fotovoltaico, e esta ocorre quando não há corrente elétrica circulando pelos terminais do módulo. Sob STC a corrente de curto-circuito, I_{sc} , (do inglês, *short circuit – SC*) é a máxima corrente que o módulo pode fornecer sob STC quando os terminais do módulo são curto circuitados, e portanto a tensão em seus terminais é nula. O fator de forma é a razão entre a máxima potência fornecida pelo módulo sob STC e o produto entre I_{sc} e V_{oc} . A eficiência é o parâmetro que define o quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica, sendo a razão entre a potência elétrica produzida e a potência de energia solar incidente sob STC (Pinho e Galdino, 2014).

Além dos parâmetros elétricos, outro importante parâmetro a ser analisado é o ponto de máxima potência, P_{MP} , este ponto indica o valor exato de corrente e tensão que para dadas condições o módulo assumirá o máximo valor de potência possível. Este parâmetro, assim como os demais, pode ser analisado na curva I-V do módulo, também conhecida como curva característica, onde é possível analisar ponto a ponto as condições de corrente, partindo da I_{sc} , e de tensão, partindo da V_{oc} , buscando encontrar para quais valores obtém-se a máxima potência do módulo. Comumente a curva I-V é apresentada, como na Fig. 1, em conjunto com a curva de potência em relação a tensão, chamada de curva P-V (Pinho e Galdino, 2014).

Quando se utiliza a geração solar fotovoltaica o objetivo é sempre trabalhar no P_{MP} , com o objetivo de alcançar sempre a maior potência que pode ser gerada para a condição em que o SFV está instalado e consequentemente obter sempre a maior eficiência possível para o sistema. Geralmente os inversores ou conversores, aos quais os módulos são associados, utilizam sistemas de busca do P_{MP} , ponto aonde a derivada da curva P-V em relação a tensão é nula, para manter sempre a geração em seu máximo valor, estes sistemas são conhecidos como MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) (Pinho e Galdino, 2014).

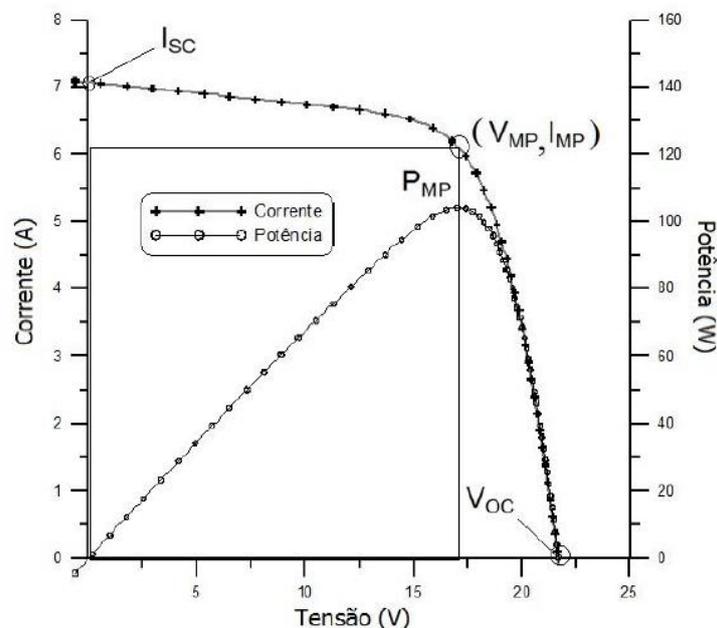


Figura 1 – Curvas I-V e P-V do Módulo Fotovoltaico (Pinho e Galdino, 2014).

2.2 Baterias

Dispositivos de armazenamento de energia são essenciais em SFI. Isso ocorre, pois, o Sol não está disponível em todos os horários do dia, e nem todos os dias de um ano. A utilização de sistemas de armazenamento garante a

disponibilidade de energia elétrica a noite, dias chuvosos e nublados. Com esse intuito dimensiona-se o SFI de maneira que não seja utilizada toda a energia solar convertida em elétrica imediatamente, assim, a parcela excedente é armazenada para um momento de demanda futura.

Existem diversas maneiras de armazenar energia, porém, a bateria eletroquímica é a mais utilizada em SFI, por ser uma forma conveniente e eficiente de armazenamento de energia elétrica. Uma bateria é um conjunto de células ou vasos eletroquímicos, conectados em série e/ou paralelo, capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química por meio de um processo eletroquímico de oxidação e redução (redox) que ocorre em seu interior. (Pinho e Galdino, 2014).

As baterias são classificadas em duas categorias, sendo elas baterias primárias e baterias secundárias. Baterias primárias são dispositivos eletroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem a energia elétrica, são descartadas, pois não podem ser recarregadas. Baterias secundárias possuem a vantagem de que podem ser regeneradas, ou seja, através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais pode-se reverter as reações responsáveis pela conversão da energia elétrica, assim recarregando a bateria.

Os SFI utilizam as baterias da categoria secundária, ou seja, recarregáveis. Isto ocorre pela necessidade de carga durante os dias e descarga durante as noites, ou períodos de baixa irradiação. Existem inúmeros tipos de baterias secundárias, as mais comuns são as chumbo-ácido e as níquel-cádmio (Rosembach, 2004).

O processo de carga ou recarga de uma bateria secundária é extremamente importante e muitas vezes complexo, diversos fabricantes recomendam que para obter um processo de carga rápido, seguro e completo o processo seja dividido em quatro estágios, representados na Fig. 2, denominados: carga leve ou suave, carga profunda, sobrecarga e carga de flutuação.

O 1º estágio, estágio de carga leve, ocorre quando a tensão da bateria está abaixo do valor V_{CHGENB} , tensão especificada pelo fabricante que indica que a bateria alcançou ou ultrapassou sua capacidade de descarga crítica. Nessa situação a bateria deve receber uma pequena corrente de carga definida por I_{TC} que tem o valor típico de $C/100$, onde C é a capacidade nominal da bateria para o regime de 10 horas. Essa pequena corrente deve ser aplicada até que a tensão na bateria alcance o valor de V_{CHGENB} .

O 2º estágio, estágio de carga profunda ocorre após a tensão na bateria ter alcançado o valor de V_{CHGENB} , neste momento é fornecida a bateria a máxima corrente de carga que a bateria suporta sem excessiva perda de água, I_{BULK} , este valor é fornecido pelo fabricante. Essa corrente deve ser aplicada até que o valor de tensão na bateria seja igual ao valor de tensão de sobrecarga, fornecido pelo fabricante, definido como V_{OC} da bateria.

O 3º estágio, estágio de sobrecarga ocorre em tensão constante, igual ao V_{OC} da bateria, para que essa alcance plena carga. Esse estágio ocorre até que a corrente de carga caia a aproximadamente 10% da I_{BULK} , esse valor também é conhecido como I_{OCT} .

O 4º estágio, estágio de carga de flutuação ocorre a uma tensão constante, especificada pelo fabricante, conhecida como V_{FLOAT} , ou tensão de flutuação. A aplicação desta tensão sobre a bateria visa evitar o processo de autodescarga, evitando perdas. Conforme a bateria seja descarregada sua tensão é reduzida, caso o SFI esteja gerando energia, quando a tensão na bateria alcançar o valor de $0,9V_{FLOAT}$ o 2º estágio será reiniciado, porém, caso não seja um momento de produção de energia pelos módulos fotovoltaicos, a tensão irá reduzir conforme ocorre a descarga da bateria, podendo alcançar novamente a V_{CHGENB} , assim iniciando o 1º estágio no momento que existir geração de energia (Rosembach, 2004).

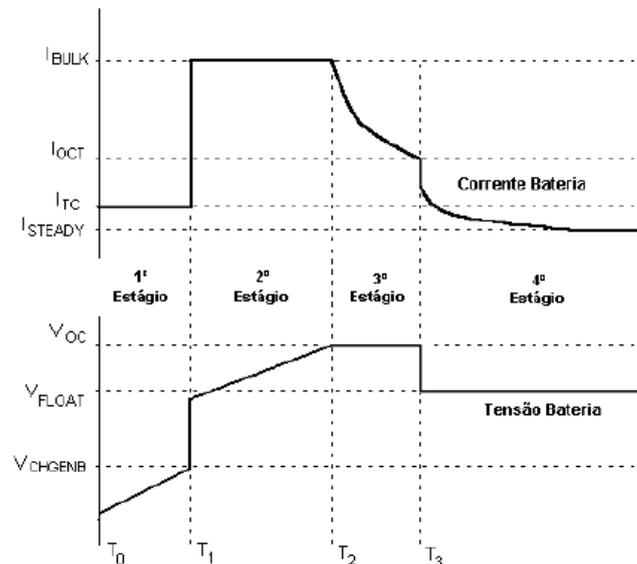


Figura 2 – Curvas de corrente, em ampères, e tensão, em volts, nos quatro estágios do processo de carga da bateria (Rosembach, 2004).

2.3 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são dispositivos responsáveis por receber um determinado nível de tensão ou corrente contínua em seus terminais de entrada e ajustar esta grandeza para um valor de tensão ou corrente contínua desejado nos terminais de saída (Roseback, 2004). Os conversores CC-CC são divididos em três grupos, os conversores abaixadores de tensão (*Buck*), os conversores elevadores de tensão (*Boost*) e os conversores redutores-elevadores (*Buck-Boost*). Conforme os próprios nomes indicam os conversores *Buck* possuem a característica de entregar uma tensão de saída menor, em relação a entrada, os conversores *Boost* elevam a tensão de saída em relação a entrada e os conversores da família *Buck-Boost* tem a característica de realizar ambas as funções, podendo elevar ou reduzir a tensão de saída em relação a entrada (Martins e Barbi, 2006).

Os conversores CC-CC comutados possuem dois modos de operação de acordo com a corrente que circula pelo indutor, sendo eles, o modo de condução contínua (MCC), onde a corrente no indutor é sempre maior que zero durante um período de comutação, e o modo de condução descontínua (MCD) onde a corrente no indutor é igual a zero durante alguns instantes no período de comutação (Roseback, 2004).

Uma aplicação comum para conversores CC-CC é como controlador de carga de baterias a partir da energia gerada pelo SFI. A utilização do conversor CC-CC permite um maior controle sobre a corrente e tensão de carga da bateria, aumentando sua vida útil e melhorando a eficiência no processo de transferência da energia do gerador para a bateria. A utilização do conversor se torna obrigatória quando se deseja uma tensão de saída CC diferente da tensão fornecida pelo SFI (Pinho e Galdino, 2014).

Esse tipo de conversor, quando atuando como controlador de carga, pode conter um mecanismo de controle MPPT, aumentando drasticamente a eficiência do sistema como um todo, já que este proporciona ao SFI a operação no P_{MP} . Para isso é necessário a utilização de algoritmos de programação que atuam sobre o controle eletrônico que controlam os dispositivos de comutação do conversor CC-CC (Pinho e Galdino, 2014).

2.4 Conversor D

O conversor D, representado na Fig. 3, foi proposto por Landsman (1979), e redescoberto por El Khateb *et al* (2015) que atribui uma maior eficácia no processo de conversão da energia gerada no SFI para o sistema de armazenamento ao utilizar este conversor como controlador de carga, uma vez que o conversor D apresenta uma baixa ondulação na corrente de entrada. Existe também uma grande vantagem na utilização do conversor D em relação aos outros principais conversores da família *Buck-Boost*, sendo eles o SEPIC e Cuk, que é a utilização de um indutor com uma indutância menor, em relação aos demais conversores, para obter os mesmos níveis de ondulação na corrente de entrada. Dessa forma o conversor D apresenta em sua entrada uma característica de fonte de corrente quase ideal, resultando em um aumento da eficiência do processo de conversão de energia, quando associado a um SFV (El Khateb *et al*, 2015).

Geralmente os conversores CC-CC empregados nos controladores de carga de bateria, utilizados em associação com SFI utilizam capacitores eletrolíticos de elevada capacitância em paralelo aos módulos fotovoltaicos (os quais são conhecidos como capacitores de desacoplamento), porém, devido à baixa ondulação da corrente de entrada imposta pelo conversor D, se obtém uma drástica redução dessa capacitância ou até mesmo a eliminação deste capacitor. Assim, se pode afirmar que o uso do conversor D ocasiona uma redução dos custos de fabricação dos controladores de carga de bateria. (El Khateb *et al*, 2016).

Ao contrário dos demais conversores da família *Buck-Boost* citados, o conversor D apresenta a necessidade de um circuito de acionamento isolado, com o objetivo de ativar e desativar o seu interruptor (Dos Reis *et al*, 2017).

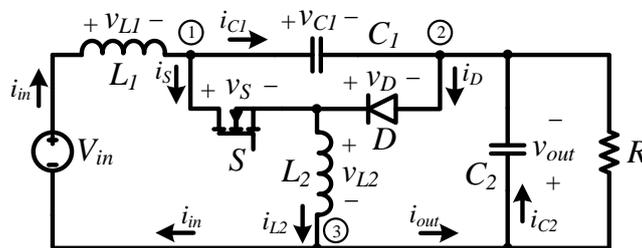


Figura 3 - Topologia do conversor D (Dos Reis *et al*, 2017).

3. ANÁLISE QUALITATIVA MCC

Nesta seção do trabalho é apresentada uma descrição detalhada do funcionamento do conversor D operando no MCC. Desta forma são definidas e apresentadas as suas etapas de funcionamento, as características elétricas do conversor em cada etapa de operação e são definidas expressões básicas para o desenvolvimento do estudo.

No MCC o conversor D apresenta duas etapas de operação, que são definidas a partir do estado do interruptor S , que neste caso é um transistor, e do diodo D . A primeira etapa de operação, etapa 1, é definida como o intervalo entre t_0 e t_1 , sendo que, o momento t_0 é caracterizado pelo instante de tempo em que o interruptor S entra em condução, a chave é fechada. Enquanto t_1 é o instante em que ocorre o bloqueio do interruptor S , a chave é aberta. Com o final da etapa 1 se inicia a segunda etapa de operação, etapa 2, que é definida como o intervalo entre t_1 e t_2 , sendo que o momento t_2 é definido como o momento em que se encerra o bloqueio do interruptor S concluindo o período total de comutação.

Para realização deste estudo foram determinadas algumas hipóteses simplificadoras, que serão utilizadas ao longo de todo o trabalho, sendo elas: a) todos os componentes do conversor serão considerados ideais; b) a ondulação de corrente no indutor de entrada L_1 é muito pequena; c) o capacitor de filtragem de saída C_2 é dimensionado de tal forma que a ondulação de tensão em seus terminais possa ser negligenciada; d) o capacitor de acoplamento C_1 é dimensionado para apresentar baixos níveis de ondulação de tensão em seus terminais. É importante salientar que a baixa ondulação de tensão nos capacitores permite uma drástica redução no valor da indutância do indutor de entrada L_1 , em relação aos conversores SEPIC e Ćuk (Dos Reis *et al*, 2018).

3.1 Primeira etapa de operação

A etapa 1 está representada na Fig. 4 e tem início quando o interruptor S começa a conduzir corrente, por ser considerado um componente ideal a tensão no interruptor é nula. A corrente que flui através do interruptor é a mesma que flui pelo indutor L_2 (i_{L2}) e pode ser definida como a soma da corrente de entrada i_{in} e da corrente de saída i_{out} , enquanto a tensão sobre este indutor (V_{L2}) é igual a tensão de entrada V_{in} . Pois, segundo (Dos Reis *et al*, 2017) a tensão média no capacitor C_1 (V_{C1}) é igual à soma dos valores médios das tensões de entrada e de saída V_{in} e V_{out} respectivamente.

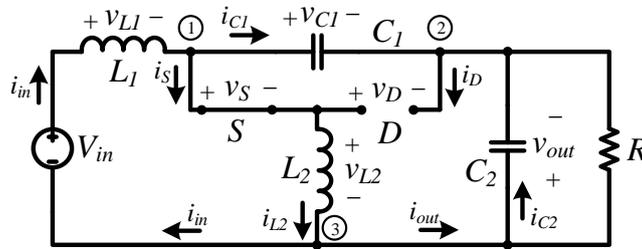


Figura 4- Circuito equivalente da primeira etapa de operação (Dos Reis *et al*, 2017).

Durante a etapa 1 o diodo D não conduz corrente, isto ocorre devido ao fato deste componente estar inversamente polarizado, adquirindo a característica de uma chave aberta. A primeira etapa de operação tem sua conclusão quando é transcorrido o tempo de condução do transistor (t_{on}), geralmente essa grandeza é expressa em função do ciclo de trabalho (d), conforme definido na Eq. (1), onde T é o período de comutação, isto é, o recíproco da frequência de comutação (F_s).

$$d = \frac{t_{on}}{T} \tag{1}$$

3.2 Segunda etapa de operação

A etapa 2 está representada na Fig. 5 e tem início quando o interruptor S é aberto, ocorrendo o bloqueio da corrente que circulava por este. Nesse momento o diodo D está diretamente polarizado, iniciando seu intervalo de condução e assumindo a corrente do indutor L_2 (i_{L2}). Devido as simplificações determinadas a tensão considerada em D é nula.

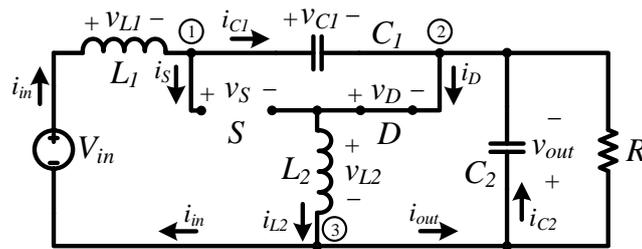


Figura 5- Circuito equivalente da segunda etapa de operação (Dos Reis *et al*, 2017).

Durante a segunda etapa de operação o indutor L_2 apresenta em seus terminais tensão igual a tensão de saída V_{out} porém com o valor negativo, pois encontra-se em paralelo com o capacitor de filtragem de saída C_2 . O transistor S , neste momento, apresenta comportamento de chave aberta e está em paralelo com o capacitor de acoplamento C_1 , desta forma ambos apresentam a mesma tensão.

Nesta etapa é iniciado o ciclo de carga do capacitor C_1 , que ocorre a partir da corrente de entrada i_{in} que é aproximadamente constante neste intervalo, desta forma a tensão V_{C1} apresenta um crescimento linear em seus terminais.

O intervalo de condução do diodo ($t_{on\ diodo}$), no MCC, é igual ao tempo de bloqueio do interruptor S (t_{off}), e ao final desta etapa é iniciada novamente a etapa 1. Expressando o tempo de condução do diodo ($t_{on\ diodo}$), em função do ciclo de trabalho d se pode obter a expressão mostrada na Eq. (2).

$$t_2 - t_1 = t_{on\ diodo} = t_{off} = (1 - d)T \quad (2)$$

4. ANÁLISE QUANTITATIVA MCC

Nessa seção será apresentada uma revisão bibliográfica da análise quantitativa realizada por Dos Reis *et al* (2017), todas as expressões que serão apresentadas foram obtidas por esse autor. A análise quantitativa representa a obtenção das expressões que descrevem o comportamento das correntes e das tensões nos componentes do conversor. Neste caso considera-se o conversor D operando em regime estacionário no MCC, como em todo esse trabalho.

O primeiro valor determinado é a tensão média no capacitor C_1 , devido a relevância deste componente. Para isso é aplicada a lei de Kirchhoff das tensões (LKT) a malha externa do conversor D, a partir de manipulações como a aplicação da definição de valor médio, se obtém a Eq. 3 em função dos valores médios das tensões de entrada (V_{in}) e de saída (V_{out}).

$$V_{C1\ avg} = V_{in} + V_{out} \quad (3)$$

A corrente no indutor L_2 (i_{L2}) é expressa a partir da soma das correntes de entrada (i_{in}) e saída (i_{out}) quando aplicada a lei de Kirchhoff das correntes ao nó 3 representado na Fig. 3, resultando na Eq. 4.

$$i_{L2}(t) = i_{in}(t) + i_{out}(t) \quad (4)$$

A seguir é apresentada a análise quantitativa para cada uma das duas etapas de operação do conversor D no MCC.

4.1 Etapa 1 ($t_0 < t < t_1$)

Nessa etapa de operação a análise é realizada sobre o circuito apresentado na Fig. 4, aplicando a LKT a malha contendo o indutor L_2 e os capacitores C_1 e C_2 , e desprezando as ondulações de tensão nos capacitores C_1 e C_2 se verifica que a tensão sobre L_2 (v_{L2}) é igual a tensão de entrada (v_{in}), conforme a Eq. (5). A equação da corrente no indutor L_2 (i_{L2}) é obtida na mesma análise e essa é igual a corrente que circula pela chave S (i_s) já que durante a etapa 1 esses componentes estão em série, a Eq. 6 representa a corrente i_{L2} , onde $I_{L2\ min}$ representa a corrente mínima que circula por L_2 .

$$v_{L2} = v_{in} \quad (5)$$

$$i_{L2}(t) = I_{L2\ min} + \frac{V_{in}}{L_2} t \quad (6)$$

Aplicando a LKC ao nó 1 do circuito representado na Fig. 4 e empregando a relação característica tensão e corrente em um capacitor, ao capacitor C_1 se obtém a tensão em C_1 (v_{C1}) e sua corrente (i_{C1}) que por sua vez é igual a corrente de saída com sinal contrário $-i_{out}$, essas expressões estão representadas nas Eq. 7 e Eq. 8 respectivamente, onde $V_{C1\ max}$ é a tensão máxima no capacitor C_1 e I_{in} é a corrente de entrada.

$$v_{C1}(t) = V_{C1\ max} + \frac{I_{in} - I_{L2\ min}}{C_1} t - \frac{V_{in}}{2L_2C_1} t^2 \quad (7)$$

$$i_{C1}(t) = I_{in} - (I_{L2\ min} + \frac{V_{in}}{L_2} t) = -i_{out}(t) \quad (8)$$

Aplicando a LKC ao nó 2 do circuito representado na Fig. 4 e empregando a relação característica tensão e corrente em um capacitor, ao capacitor C_2 se obtém a tensão em C_2 (v_{C2}) e sua corrente (i_{C2}), representadas pelas Eq. 9 e Eq. 10 respectivamente, onde I_R é a corrente que circula pela carga.

$$v_{C2}(t) \cong \frac{V_{in}}{2L_2C_2}t^2 + \frac{V_{in}dT}{2L_2C_2} + V_{out} \quad (9)$$

$$i_{C2}(t) = I_{L2\ min} - I_{in} - I_R + \frac{V_{in}}{L_2}t \quad (10)$$

4.2 Etapa 2 ($t_1 < t < t_2$)

Nessa etapa de operação a análise é realizada sobre o circuito apresentado na Fig. 5, quando o diodo assume a corrente i_{L2} , o indutor L_2 está em paralelo com saída durante a etapa 2, sendo assim, sua tensão é igual a tensão de saída com valor negativo, pois foram arbitradas inversamente, conforme apresentado na Fig. 5, a Eq. 11 descreve essa tensão. Empregando a relação corrente e tensão em um indutor ao indutor L_2 se obtém i_{L2} a qual é mostrada na Eq. 12, onde $I_{L2\ max}$ é a corrente máxima no indutor L_2 .

$$v_{L2} = -v_{out}(t) \quad (11)$$

$$i_{L2}(t) = I_{L2\ max} - \frac{V_{out}}{L_2}t \quad (12)$$

Aplicando a LKC ao nó 1 do circuito representado na Fig. 5 e aplicando a relação característica tensão e corrente ao capacitor C_1 é obtida a tensão em C_1 (v_{C1}) e sua corrente (i_{C1}), representadas pelas Eq. 13 e Eq. 14 respectivamente, onde $V_{C1\ min}$ é a mínima tensão sobre o capacitor C_1 .

$$v_{C1}(t) = \frac{I_{in}}{C_1}t + V_{C1\ min} \quad (13)$$

$$i_{C1}(t) = i_{in}(t) \cong I_{in} \quad (14)$$

Aplicando a LKC ao nó 2 do circuito representado na Fig. 5 e aplicando a relação característica tensão e corrente ao capacitor C_2 é obtida a tensão em C_2 (v_{C2}) e sua corrente (i_{C2}), representadas pelas Eq. 15 e Eq. 16 respectivamente.

$$v_{C2}(t) \cong \frac{V_{in}dT}{2L_2C_2} - \frac{V_{out}}{2L_2C_2}t + V_{out} \quad (15)$$

$$i_{C2}(t) = I_{L2\ max} - I_{in} - I_R - \frac{V_{out}}{L_2}t \quad (16)$$

4.3 Análise simplificada para o indutor de entrada

A lógica da análise quantitativa clássica apresentada por Dos Reis *et al* (2017) permite o dimensionamento de todos os componentes passivos do conversor a exceção do indutor L_1 , visto que os autores assumiram como hipótese simplificativa que a corrente que circula por esse elemento é constante e isenta de ondulação, isto é, quando associado com a fonte de tensão de entrada, o conjunto apresenta comportamento de fonte de corrente. Assim, para a determinação da tensão aplicada ao indutor L_1 , os autores apresentam uma análise partindo da aplicação da LKT a malha externa do circuito apresentado na Fig. 3, de onde se observa que a tensão aplicada a esse indutor é a componente alternada das tensões em ambos os capacitores do circuito. Deste modo, os autores para contornar essa questão realizam um estudo simplificado segundo o qual apenas a componente fundamental da tensão alternada aplicada ao indutor L_1 é levada em consideração, e para a determinação da corrente neste indutor é aplicada a análise de regime permanente senoidal para a determinação da componente alternada e o teorema da superposição para a inclusão da componente contínua dessa

corrente, resultando numa expressão aproximada para corrente no indutor L_1 , que permite o seu dimensionamento. De tal modo, se obtém a corrente (i_{L1}) e a tensão (v_{L1}) no indutor L_1 , esses valores são apresentados nas Eq. 17 e Eq. 18, respectivamente, e dependem da ondulação máxima da tensão nos capacitores C_1 (ΔV_{C1}) e C_2 (ΔV_{C2}), assim como da frequência de comutação F_S .

$$i_{L1}(t) \cong \frac{\sqrt{\Delta V_{C1}^2 + \Delta V_{C2}^2}}{4\pi F_S L_1} \text{sen}\left(2\pi F_S t - \frac{\pi}{2}\right) + I_{in} \quad (17)$$

$$v_{L1}(t) \cong \frac{1}{2} \sqrt{\Delta V_{C1}^2 + \Delta V_{C2}^2} \text{sen}(2\pi F_S t) \quad (18)$$

5. DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR D E SIMULAÇÃO

Nessa seção são apresentadas as equações utilizadas para determinar as grandezas dos elementos passivos (capacitores e indutores) do conversor D, os critérios e premissas utilizados para o seu dimensionamento, as especificações de todos os componentes passivos do conversor, projetado segundo o processo de dimensionamento, a simulação do conversor no software PSIM, e a consequente validação de todas as premissas utilizadas para no seu dimensionamento.

5.1 Equações para o dimensionamento

Todas as equações apresentadas nessa seção foram obtidas por (Dos Reis, 2017) e definem a metodologia de dimensionamento dos quatro elementos passivos existentes no conversor D: L_1 , L_2 , C_1 e C_2 . Também existe um transistor operando como chave (S) e um diodo (D). Estes componentes estão ilustrados na Fig. 3.

A primeira equação a ser utilizada para o dimensionamento do conversor D é a equação referente ao ganho (G), Eq. 3. Neste momento cabe lembrar que esse conversor faz parte da família *buck-boost*, desta forma o ganho pode assumir valores superiores a 1 (elevador) ou inferiores a 1 (reductor). O ganho estático do conversor (G) pode ser obtido em função das tensões de entrada (V_{in}) e de saída (V_{out}) ou por meio do ciclo de trabalho (d) conforme a Eq. 19.

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d}{(1-d)} \quad (19)$$

Para realizar a determinação das indutâncias L_1 e L_2 e das capacitâncias C_1 e C_2 é necessário conhecer a frequência de operação (F_S) do conversor e as taxas de ondulações de corrente nos indutores e de tensão nos capacitores δi_{Lx} , Eq. 20, e δv_{Cx} , Eq. 21, respectivamente, onde o subíndice x assume os valores 1 e 2, para indicar o componente específico ao qual se refere a taxa de ondulação em questão. Para determinar as taxas de ondulação de tensão e corrente nos componentes passivos é necessário conhecer a ondulação da corrente no indutor (ΔI_{Lx}) e a corrente média no indutor ($I_{Lx med}$) ou a ondulação da tensão no capacitor (ΔV_{Cx}) e a tensão média no capacitor ($V_{Cx med}$).

$$\delta i_{Lx} = \frac{\Delta I_{Lx}}{I_{Lx med}} \quad (20)$$

$$\delta v_{Cx} = \frac{\Delta V_{Cx}}{V_{Cx med}} \quad (21)$$

Para o correto dimensionamento do conversor o engenheiro deve conhecer as especificações técnicas como são a potência, as taxas de ondulação de corrente e tensão nos indutores e capacitores, as tensões de entrada e de saída. Já frequência de operação (F_S), geralmente é especificada em valores iguais ou superiores a 20 kHz, para que seja evitado o ruído audível, para os seres humanos, note, contudo, que o valor superior de F_S depende de uma relação custo-benefício em relação ao tamanho dos componentes passivos e as perdas nesses elementos e a tecnologia dos semicondutores utilizados. Consequentemente, é possível determinar as indutâncias e capacitâncias a partir das equações Eq. 22, Eq. 23, Eq. 24 e Eq. 25:

$$L_1 = \frac{V_{out}^2}{2\pi P_{out} F_S} \frac{(1-d)}{d^2} \frac{\sqrt{d^2 \delta v_{C2}^2 + \delta v_{C1}^2}}{\delta i_{L1}} \quad (22)$$

$$L_2 = \frac{V_{out}^2}{P_{out} F_S} \frac{(1-d)^2}{\delta_{iL_2}} \quad (23)$$

$$C_1 = \frac{P_{out}}{V_{out}^2 F_S} \frac{d^2}{\delta_{vC_1}} \quad (24)$$

$$C_2 = \frac{P_{out}}{8 F_S V_{out}^2} \frac{\delta_{iL_2}}{\delta_{vC_2} (1-d)} \quad (25)$$

5.2 Critérios e premissas para o dimensionamento

Para realizar o dimensionamento dos componentes do conversor D, e por consequência sua modelagem, é necessário antes definir o cenário em que ele estará atuando. No caso deste estudo é necessário definir parâmetros elétricos do SFI que será utilizado, e que estará conectado aos terminais de entrada do conversor, e os parâmetros elétricos do sistema de armazenamento que estará conectado nos terminais de saída.

Foi adotado para representar o SFI um módulo fotovoltaico de 55 W e com tensão nominal de operação de 17 V. A escolha deste sistema é devido a disponibilidade desse módulo em caso de estudos futuros utilizando o protótipo. Como sistema de armazenamento foi empregada uma bateria estacionária com tensão nominal de 12 V e capacidade de carga de 45 Ah.

Desta forma já está definida a tensão de entrada do conversor D, sendo ela 17 V, porém, para a tensão de saída é necessário definir a tensão máxima de carregamento da bateria. A bateria de 12 V é formada por seis células (elementos) de 2 V cada, e é definida como tensão máxima de carregamento para essa bateria 2,5 V por célula (Moura, 2020). Sendo assim a tensão de saída para dimensionamento do conversor deve ser 15 V.

Outro ponto importante é definir a carga a ser utilizada na simulação, visto que o software de simulação utilizado, PSIM, não possui um modelo de bateria a ser utilizado nesses casos. Cabe lembrar que neste estudo os componentes são considerados ideais, sendo assim, não existem perdas de potência no processo de conversão, então a potência de saída pode ser definida como igual a potência de entrada, 55 W. A carga (R) a ser utilizada na simulação foi definida conforme a Eq. (26), e o valor obtido foi de 4,091 Ω .

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} \quad (26)$$

Para este estudo foram definidas ondulações desejadas para tensão nos capacitores e corrente nos indutores, sendo assim, a simulação e os resultados devem atingir no máximo os valores definidos nesta seção. O critério adotado foi de que as taxas de ondulação máximas em todos os elementos passivos devem ser de 10%, exceto no indutor L_2 no qual esse valor pode ser de 25%. A frequência de comutação (F_S) definida para o projeto foi de 20 kHz.

5.3 Dimensionamento do conversor D

O dimensionamento do conversor D foi realizado considerando as Eq. (22), Eq. (23), Eq. (24) e Eq. (25) para os elementos passivos, a utilização de um transistor MOSFET como chave e um diodo, além de considerar uma fonte de tensão de 17 V na entrada e uma carga de 4,091 Ω na saída. O ciclo de trabalho (d) foi determinado a partir da definição do ganho, utilizando a Eq. (19). A Tab. 1 apresenta todos os dados utilizados para o dimensionamento, enquanto a Tab. 2 apresenta os valores obtidos para os componentes.

Tabela 1 – Especificações utilizadas para o dimensionamento do conversor D.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tensão de saída (V_{out})	15 V
Potência de saída (P_{out})	55 W
Frequência de comutação (F_S)	20 kHz
Ciclo de trabalho (d)	0,4687
Taxa de ondulação na tensão de C_1 (δ_{vC_1})	0,1
Taxa de ondulação na tensão de C_2 (δ_{vC_2})	0,1
Taxa de ondulação na corrente de L_1 (δ_{iL_1})	0,1
Taxa de Ondulação na corrente de L_2 (δ_{iL_2})	0,25

Tabela 2 – Valores obtidos para os componentes passivos do conversor D.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Capacitância de C_1	27,0 x μ F
Capacitância de C_2	7,20 x μ F
Indutância de L_1	86,3 x μ H
Indutância de L_2	229,0 x μ H

Após o completo dimensionamento de todos os componentes passivos do conversor D, o qual foi realizado em função das especificações técnicas descritas na Tab. 1, o conversor foi projetado segundo a metodologia descrita, e foi na sequência simulado no software PSIM. A Fig. 6 apresenta uma imagem do diagrama esquemático do conversor D inserido no PSIM, com os respectivos valores dos componentes apresentados na Tab. 2.

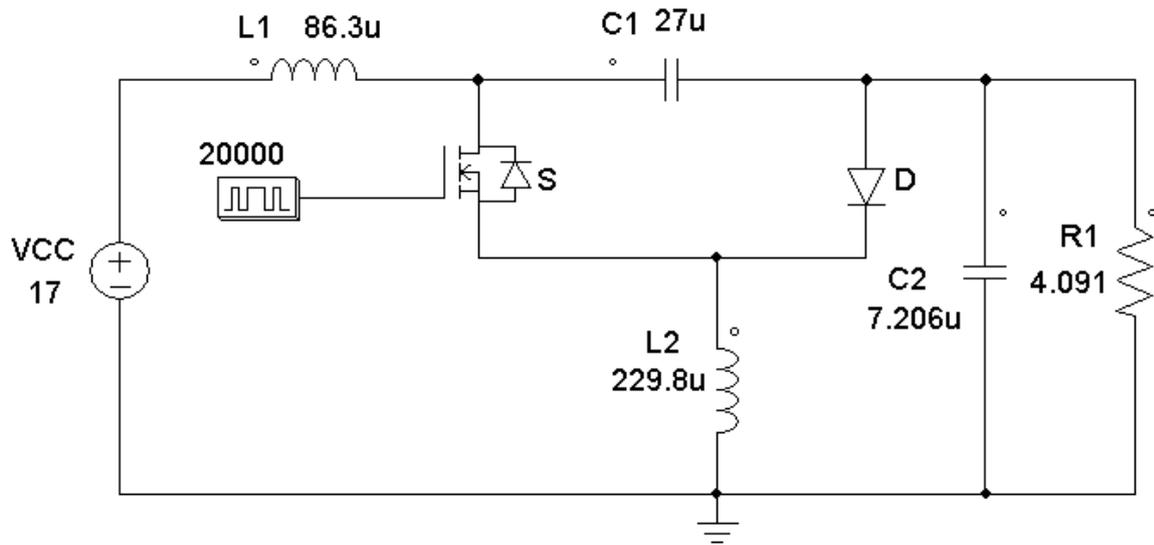


Figura 6 – Diagrama esquemático do conversor D elaborado no PSIM.

5.4 Simulação do conversor D

A simulação do modelo resultante do conversor D projetado no software PSIM tem como objetivo a obtenção das formas de ondas de corrente e tensão em todos os componentes do conversor, para validação das premissas de pré-projeto e para serem utilizadas posteriormente como referência para os ensaios com o protótipo.

Para obter as formas de onda desejadas foram adicionados elementos que representam voltímetros e amperímetros ao modelo da Fig. 6, então o modelo foi simulado obtendo as formas de onda que estão representadas na Fig. 7.

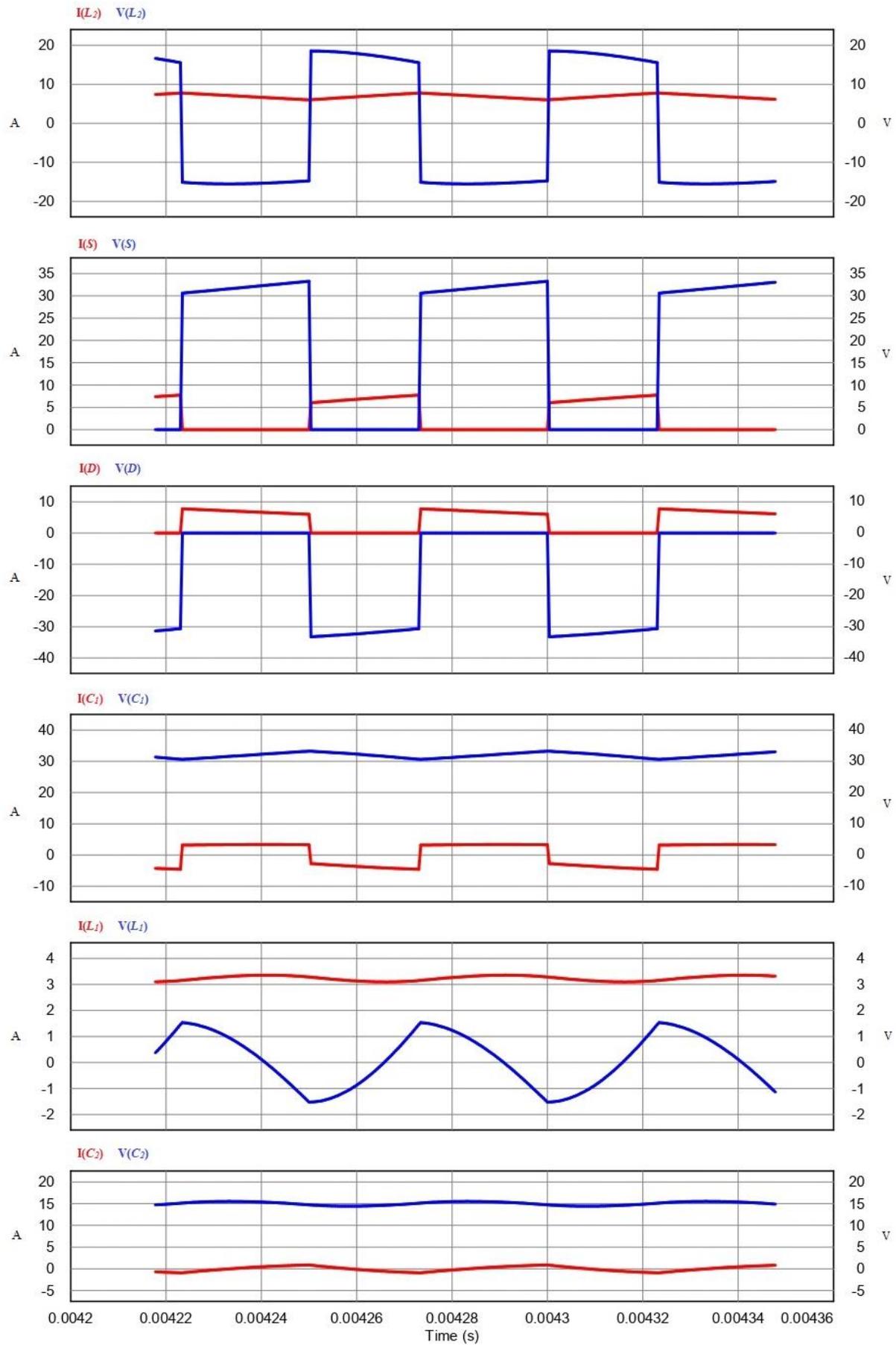


Figura 7 – Formas de ondas obtidas para todos os componentes do conversor através de simulação.

5.5 Validação das premissas

A partir da obtenção das formas de onda nos diversos componentes do conversor é possível verificar se o modelo projetado representa o esperado pela teoria, e se é possível seguir com a construção do protótipo a partir dos valores obtidos. A primeira análise feita é a validação que o conversor está atuando no MCC, é possível verificar este fato analisando as curvas da chave (S) e do diodo (D). O MCC é caracterizado pela não interrupção da condução em momento algum, ou seja, o momento em que o transistor deixa de conduzir o diodo entra em condução imediatamente, não existindo momentos em que a corrente seja nula nestes componentes ao mesmo tempo, o que pode ser verificado na Fig. 7.

O software PSIM permite além de visualizar as formas de onda também adquirir valores como máximo, mínimo, média e valor eficaz, tanto para corrente quanto para tensão. Sendo assim é possível avaliar se a tensão de saída para o modelo simulado está respeitando o valor referente a tensão máxima de carregamento da bateria, de 15 V. O valor médio obtido a partir da simulação foi de 15,1 V, o que equivale a uma diferença de 0,67%, o qual pode ser facilmente compensado através de um pequeno ajuste no valor do ciclo de trabalho (d).

Outra utilidade do software PSIM é para a validação das taxas de ondulação máximas, de tensão e corrente, as quais foram definidas nas especificações do projeto. A Tab. 3 apresenta os valores obtidos através da simulação no software PSIM e calculados para a ondulação. A coluna Ondulação máxima o máximo valor teórico aceitável para as ondulações de tensão e corrente nos capacitores e indutores, respectivamente, ou seja, definidas a partir das especificações técnicas apresentadas na Tab. 1. A coluna Ondulação real indica qual a ondulação obtida a partir da simulação e a coluna Taxa de ondulação indica qual percentual que a Ondulação real representa sobre o respectivo valor médio da corrente ou da tensão em questão.

Tabela 3 – Taxa de Ondulação de corrente e tensão nos indutores e capacitores.

Componente	Ondulação máxima	Ondulação real	Taxa de ondulação
C_1	3,20 V	3,28 V	10%
C_2	1,52 V	1,76 V	12%
L_1	0,33 A	0,37 A	11%
L_2	1,76 A	1,79 A	25%

Os valores obtidos por simulação para as taxas de ondulação foram considerados aceitáveis, ainda mais quando se considera que os valores dos componentes obtidos por meio da metodologia de dimensionamento utilizada não são valores comerciais e dificilmente podem ser obtidos exatamente iguais mesmo através da utilização de associações de componentes comerciais. Dessa forma, se vai optar por componentes comerciais com valores próximos, mas com valores nominais mais elevados, em relação aos valores teóricos, o que deve reduzir as respectivas ondulações de tensão e corrente.

6. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO CONVERSOR D

6.1 Projeto da placa de circuito impresso

Para seguir com o desenvolvimento de um protótipo do conversor D é necessário previamente realizar o projeto da placa de circuito impresso (PCI) em que o conversor será implementado. Antes de realizar o projeto é necessário conhecer todos os componentes que serão inseridos sobre a placa, não apenas suas características elétricas como também suas características físicas, pois assim é possível respeitar as distâncias necessárias entre componentes e até mesmo entres os terminais de cada componente.

Para este projeto foi utilizada uma placa de cobre dupla face de 20x20 cm. Também foi necessário realizar o projeto e a manufatura dos indutores, o que é bastante usual na área de eletrônica de potência, especialmente na etapa de desenvolvimento de protótipos. Pois, os poucos indutores disponíveis comercialmente, em sua esmagadora maioria não atendem as especificações de projeto. Para o dimensionamento dos indutores estavam disponíveis um núcleo tipo EE 55/28/25 e um núcleo tipo EE 65/33/26, desta forma foi definido que o maior seria utilizado para o indutor de maior indutância e o menor para o de menor.

Os indutores foram produzidos utilizando fio de cobre 21 AWG, para suportar a corrente a eles imposta foram utilizados 4 fios em paralelo em cada indutor. O indutor de maior indutância (L_2) foi dimensionado para possuir 18 voltas, após sua confecção a distância entre os núcleos, *gap*, foi aumentada para garantir um ajuste fino da indutância deste componente, o valor de indutância final nesse indutor ficou em 230 μ H. O indutor de menor indutância (L_1) foi dimensionado para possuir 10 voltas, o ajuste do *gap* foi realizado como no primeiro caso e ao final a indutância deste indutor foi medida com 86,5 μ H. Os dois indutores desenvolvidos estão ilustrados na Fig. 8.



Figura 8 – Indutores confeccionados para o protótipo com indutâncias de 230 μH (esquerda) e 86,5 μH (direita).

Em sequência foram analisados os capacitores disponíveis para a realização do projeto. A partir dos componentes disponíveis foi definida a realização de uma associação de 10 capacitores de 3,3 μF de polipropileno metalizado conectados em paralelo para o capacitor de maior capacitância (C_1). O capacitor ficou ligeiramente maior que o dimensionado previamente, 33 μF , porém devido aos capacitores além de serem caracterizados pela sua capacitância também serem caracterizados por sua resistência série equivalente e sua indutância série equivalente, é importante utilizar associações de capacitores em paralelo com o intuito de minimizar os impactos desses elementos, série parasitas, garantindo que a corrente circule por mais elementos. Para o capacitor de menor capacitância (C_2) foi implementado através da associação de 5 capacitores de 2,2 μF de polipropileno metalizado conectados em paralelo, representando assim um capacitor de 11 μF . Após a confecção dos indutores e a determinação dos capacitores utilizados uma nova simulação foi realizada com intuito de validar os novos valores de indutâncias e capacitâncias. A Tab. 4 apresenta os novos valores de ondulação de corrente e tensão obtidos a partir da simulação, validando a tese apresentada por (Dos Reis *et al*, 2018) segundo a qual a redução das ondulações de tensão nos capacitores C_1 e C_2 contribuem para a minimização da ondulação de corrente de entrada.

Tabela 4 – Novos valores para taxa de ondulação de corrente e tensão nos indutores e capacitores.

Componente	Ondulação máxima	Ondulação real	Taxa de ondulação
C_1	3,19 V	2,66 V	8%
C_2	1,50 V	1,230 V	8%
L_1	0,32 A	0,27 A	8%
L_2	1,73 A	1,76 A	25%

Para definir as especificações dos componentes que apresentam comportamento de interruptores, a saber, o transistor, e o diodo foram determinadas via simulação digital no software PSIM: a corrente máxima, a tensão máxima e a corrente média a que esses componentes são submetidos. A partir dos resultados obtidos nas simulações e tendo em mente que é necessário empregar fatores de segurança foi definido, neste sentido, que os componentes escolhidos, isto é, tanto o transistor quanto o diodo, devem suportar 1,5 vezes a sua corrente máxima, 2 vezes a sua tensão máxima e 2 vezes a sua corrente média. Neste sentido, a Tab. 5 foi elaborada e apresenta as especificações mínimas necessárias que esses componentes devem atender para que possam ser utilizados na implementação do protótipo.

Tabela 5 – Valores de tensão e corrente utilizados para a especificação do transistor e do diodo no projeto.

Componente	Corrente máxima	Tensão máxima	Corrente média
Transistor	11,61 A	66,6 V	6,36 A
Diodo	11,64 A	66,6 V	7,22 A

Desta forma foram definidos para serem utilizados no protótipo (a partir dos escassos componentes disponíveis) o transistor MOSFET SCT30N120 que apresenta como corrente máxima de pico 45 A, tensão máxima 1200 V e corrente média máxima de 34 A. O diodo definido para ser utilizado foi o STPSC1006D que apresenta como corrente máxima de pico 18 A, tensão máxima 600 V e corrente média máxima de 10 A. Também foi determinada a utilização de um dissipador para o transistor e outro para o diodo, com intuito de evitar o superaquecimento destes componentes e aumentar a vida útil do protótipo.

Após medir as dimensões de todos os componentes determinados e as distâncias entre seus terminais, foi realizado um projeto no software EAGLE, considerando todas essas dimensões e distanciamentos necessários. O projeto realizado está ilustrado na Fig. 9.

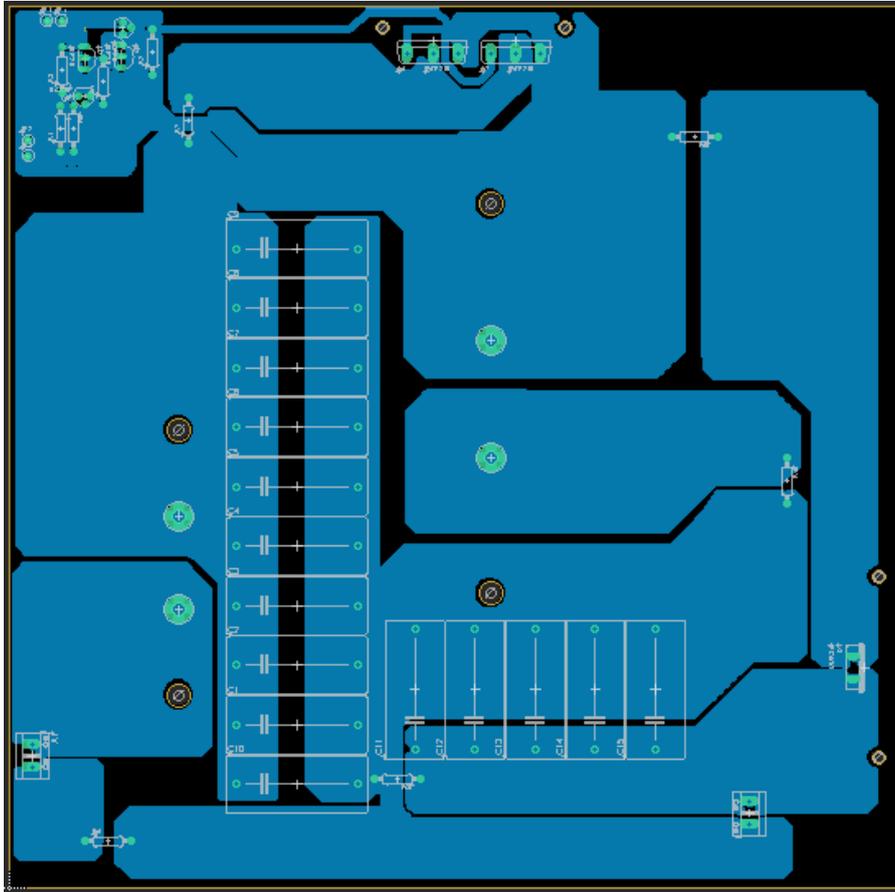


Figura 9 – Projeto da placa de circuito impresso no software EAGLE.

Neste ponto cabe mencionar que para o projeto da placa foram consideradas as utilizações de grandes áreas de cobre ao invés das delgadas trilhas de cobre empregadas em sistemas eletrônicos de sinais, sejam eles analógicos ou digitais, para a conexão entre os terminais dos componentes. Isso ocorre pois o projeto trata de um conversor destinado ao processamento de energia elétrica, usualmente denominado pela comunidade técnica como “conversor de potência”, em que a corrente geralmente é alta quando comparado a projetos de eletrônica de sinais. Outro ponto importante é a utilização de *jumper*s no protótipo dispostos em série com determinados componentes. Através da utilização desses *jumper*s será possível medir a corrente que circula por esses, seja através da inserção de resistores *shunt*, temporários, de reduzido valor ôhmico, ou seja, pela utilização de fios de cobre, dispostos no lugar desses resistores, de forma que seja possível a conexão de sondas de corrente de efeito *hall*. Dessa forma, o importante para a validação do projeto são os furos dos terminais dos resistores e não o componente em si.

Cabe ressaltar também a existência de um pequeno circuito, referente a fonte de alimentação auxiliar isolada para alimentar o circuito de acionamento do interruptor (MOSFET), uma desvantagem citada anteriormente. Como não é intuito deste trabalho focar no projeto desta fonte não será inserido um tópico sobre este assunto, porém, deve ser mencionado que foram inseridos na placa terminais para alimentação do circuito externo de acionamento bem como os terminais para receber o sinal que irá comandar o MOSFET.

6.2 Confeção da placa de circuito impresso

A confeção da placa de circuito impresso é o processo em que o projeto realizado é transferido para a placa de cobre. O primeiro passo para efetivamente realizar a confeção é transferir o desenho feito no software EAGLE para a

placa de cobre, para isso foi utilizado um método conhecido como método térmico, no qual o espaço que deve permanecer preenchido por cobre recebe uma camada protetora, enquanto todo o resto da área não recebe essa camada.

Posteriormente a placa passou por um processo conhecido como corrosão, aonde a placa foi inserida em um recipiente contendo uma solução de perclorato de ferro (ou cloreto de ferro (III) é um sal de fórmula química $FeCl_3$). Este agente químico é responsável pela corrosão do cobre, desta maneira apenas o espaço que recebeu anteriormente a camada protetora, durante a prensagem, não será corroído formando assim as áreas de cobre que foram projetadas.

A parte superior da placa de circuito impresso, ou seja, a face em que ficam os componentes foi totalmente corroída. Nesta etapa houve um erro durante a prensagem em que uma pequena parte do circuito não foi transferida para a placa, sendo assim, foi utilizada uma caneta de ponta porosa para proteger essa parte do circuito da etapa de corrosão, o ajuste foi bem sucedido e a placa corroída pode ser visualizada na Fig. 10.

O ajuste final da placa ocorreu no momento da perfuração na qual todos os espaços reservados para terminais ou furos necessários por outros componentes foram realizados com utilização de brocas de espessuras diferentes conforme a necessidade do componente.

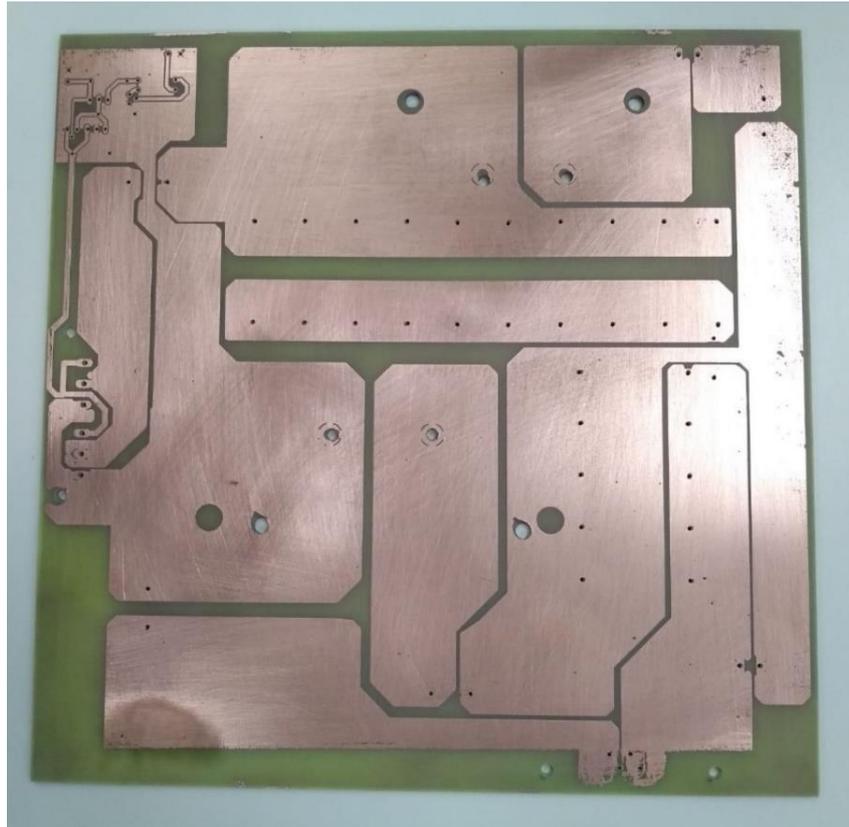


Figura 10 – Placa de circuito impresso confeccionada.

6.3 Implementação do protótipo do conversor D

A implementação do protótipo do conversor D ocorre no momento em que todos os elementos dimensionados, confeccionados, e escolhidos conforme as premissas pré-estabelecidas são posicionados e corretamente soldados na placa de circuito impresso especialmente elaborada para este fim.

Primeiramente todos os componentes foram posicionados nos furos referentes aos seus terminais, os que não obtiveram um bom encaixe ou não conseguiram ser posicionados tiveram seus furos aumentados para que assim fosse possível o posicionamento de todos os componentes. Um a um os terminais de todos os componentes foram sendo soldados junto a placa, sempre cuidando para que o estanho utilizado para a solda nunca formasse um curto circuito entre uma área de cobre e outra.

No processo de montagem do protótipo foi definida a utilização de fios de cobre nos furos reservados para os *jumpers*, citados na seção anterior. Essa escolha ocorreu devido ao fato de a corrente ser muito alta nos componentes do conversor, exigindo, assim, uma grande quantidade de resistores associados em paralelo, os quais não estavam disponíveis, os referidos resistores iriam atuar como *shunts* de corrente, por outro lado, a disponibilidade de uma sonda de efeito hall permitiu a utilização dos *jumpers*, garantindo assim, a medição da corrente em diversos pontos do conversor.

Durante a implementação do conversor D também foi necessário realizar novos furos em ambos os dissipadores, pois os furos de fábrica não encaixavam no transistor e no diodo. Após o furo realizado foi inserida pasta térmica na face de contato entre os componentes e os dissipadores e por final aparafusados os componentes nos dissipadores.

Para os terminais de entrada e saída do conversor foram utilizados conectores tipo KRE, que permitem uma conexão segura devido ao sistema de aparafusamento dos fios nos conectores. O protótipo do conversor D construído em laboratório pode ser visualizado na Fig. 11.

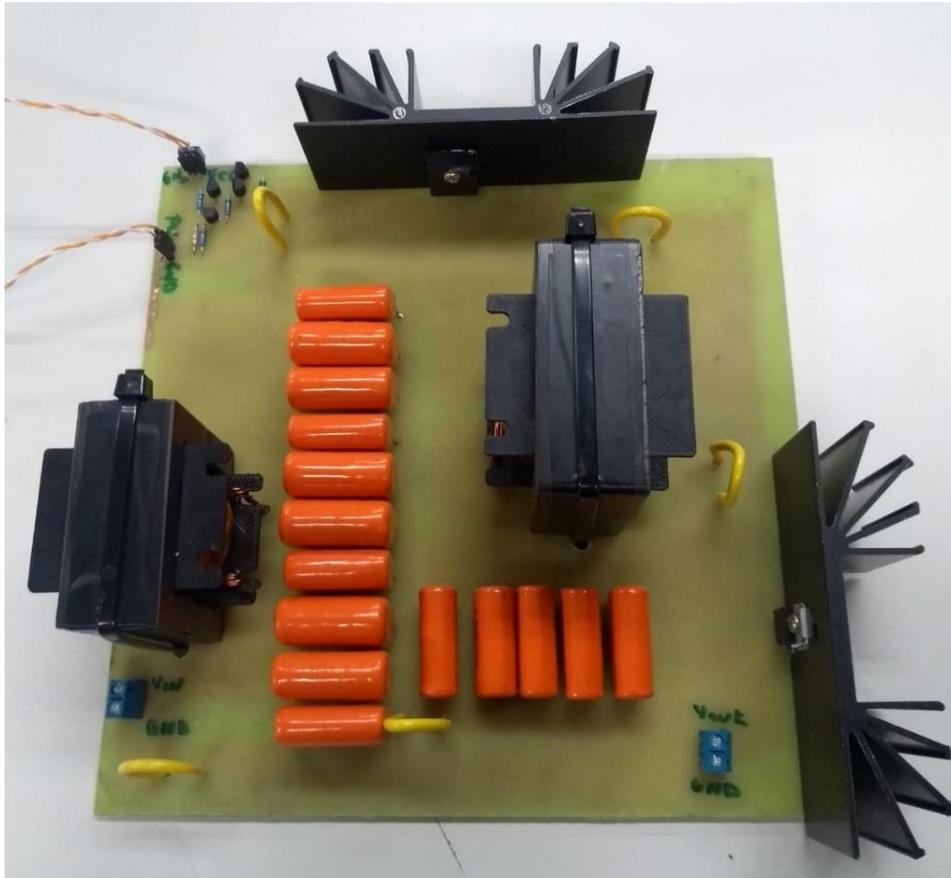


Figura 11 – Protótipo do conversor D.

7. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para realização dos ensaios de laboratório que devem gerar dados para serem confrontados com os resultados obtidos por meio da simulação e os resultados teóricos esperados é necessário, primeiramente, definir de que maneira será realizado o comando do transistor, e quais equipamentos serão conectados aos terminais de entrada e de saída do protótipo.

Definiu-se a utilização de uma fonte auxiliar de 19 V para alimentar o sistema de comando isolado do transistor, e a utilização de um gerador de funções, gerando uma onda quadrada com frequência de 20 kHz e ciclo de trabalho de 46,87% conforme determinado teoricamente, garantindo, assim, a adequada operação do transistor.

Para a alimentação do conversor D foi escolhida uma fonte de 17 V de corrente contínua, e para emular a carga do protótipo foi utilizado um resistor de 4,1 Ω , dessa forma os ensaios laboratoriais foram realizados numa configuração bastante similar ao circuito que foi simulado no software PSIM. Todas as fontes de alimentação utilizadas foram calibradas com a utilização de multímetros, para garantir que as tensões estivessem corretas.

Para realizar as medições foi utilizado um osciloscópio com a adição de uma sonda de efeito *hall*, com o intuito de medir as correntes utilizando os fios de cobre adicionados ao protótipo justamente com esse objetivo. Foram realizadas medições de tensão e corrente em todos os componentes do conversor D, exceto a corrente no capacitor C_2 não foi medida, posto que não é relevante, já que se trata de um capacitor de filtro cujo funcionamento é amplamente conhecido. Por isso, não foi inserido um *jumper* no circuito para esse fim. Contudo, existe espaço suficiente na placa para a inserção desse fio de cobre em caso de necessidades futuras.

Durante os ensaios foi constatado que o valor da tensão de saída estava superior ao esperado. Para realizar o ajuste dessa grandeza foi realizado um ajuste no ciclo de trabalho (d) e o valor obtido para a tensão de saída foi de 15 V, sendo o ciclo de trabalho igual a 0,39.

As formas de onda obtidas a partir dos ensaios realizados estão representadas nas Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 e Fig. 17, além das imagens das formas de onda, obtidas com intuito de comparação com as ondas simuladas, também foram realizadas medições dos valores das ondulações de corrente e tensão, conforme o componente em questão.

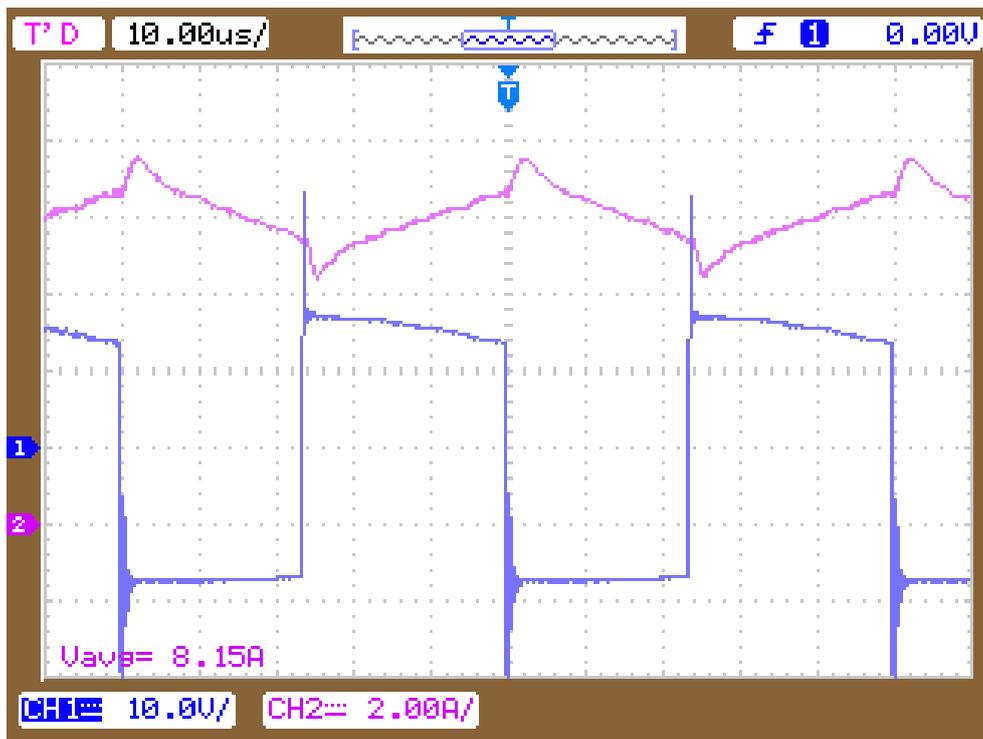


Figura 12 – O CH1 (10 V por divisão, azul) apresenta a tensão no indutor L_2 e o CH2 (2 A por divisão, rosa) mostra a corrente no indutor L_2 .

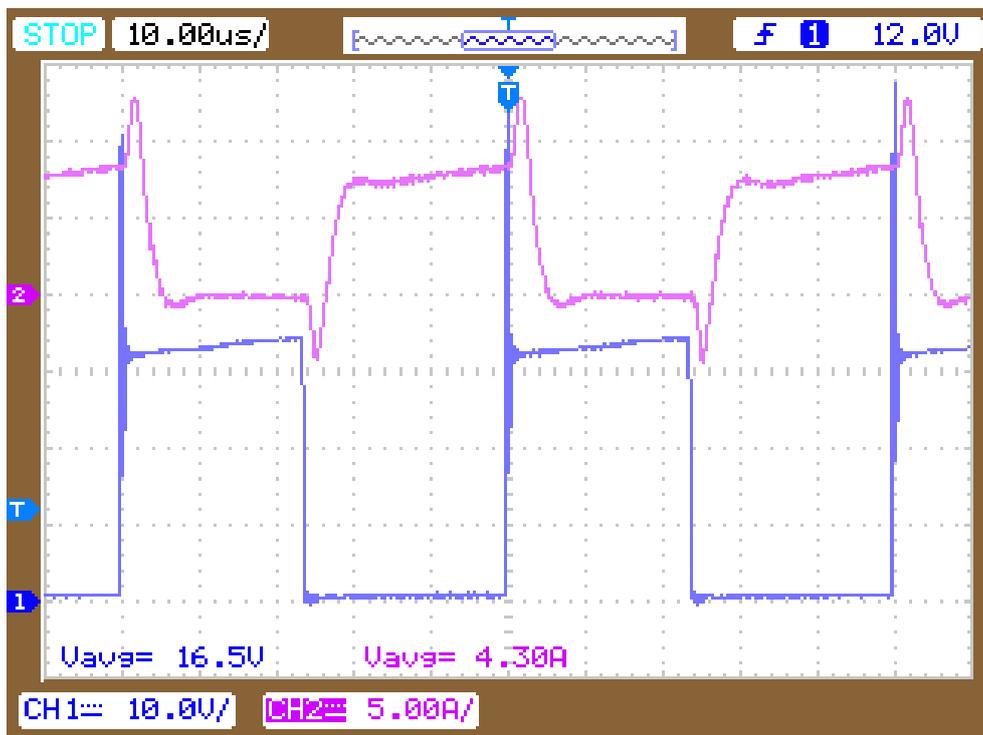


Figura 13 – O CH1 (10 V por divisão, azul) apresenta a tensão no transistor S e o CH2 (5 A por divisão, rosa) mostra a corrente no transistor S .

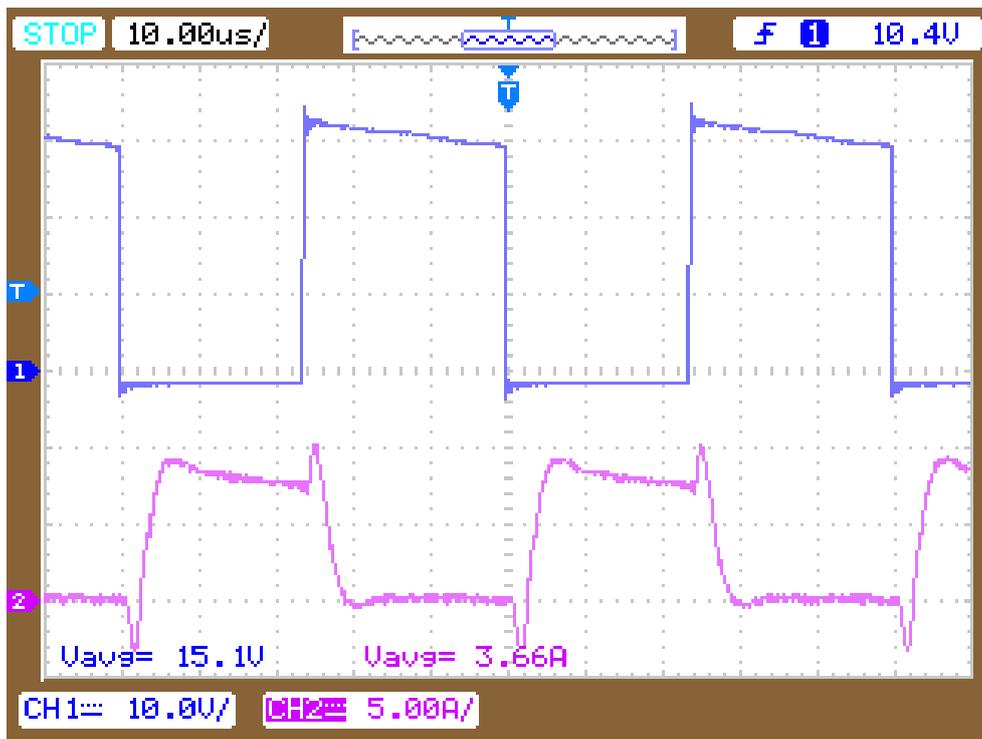


Figura 14 – O CH1 (10 V por divisão, azul) apresenta a tensão no diodo D e o CH2 (5 A por divisão, rosa) mostra a corrente no diodo D .

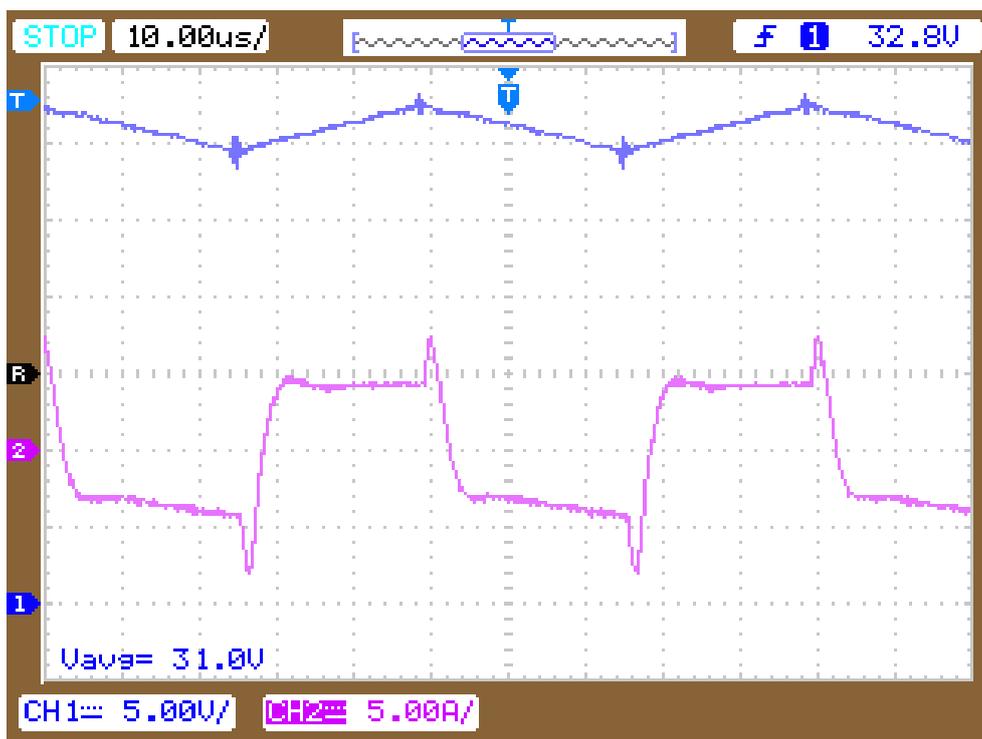


Figura 15 – O CH1 (5 V por divisão, azul) apresenta a tensão no capacitor C_1 e o CH2 (5 A por divisão, rosa) mostra a corrente no capacitor C_1 .

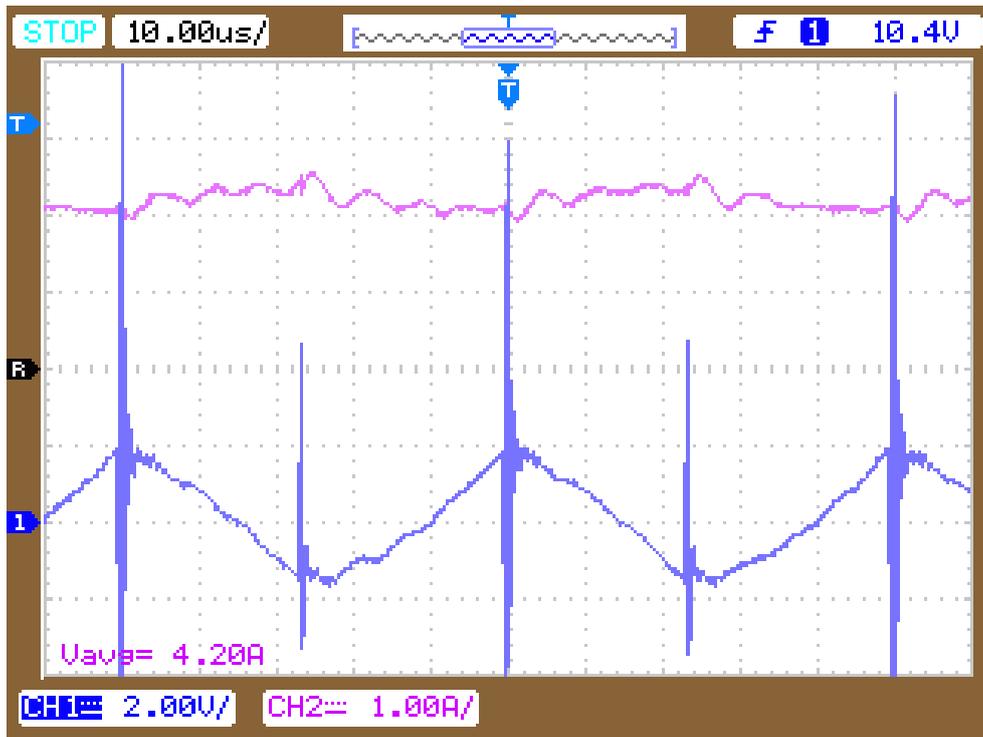


Figura 16 – O CH1 (2 V por divisão, azul) apresenta a tensão no indutor L_1 e o CH2 (1 A por divisão, rosa) mostra a corrente no indutor L_1 .

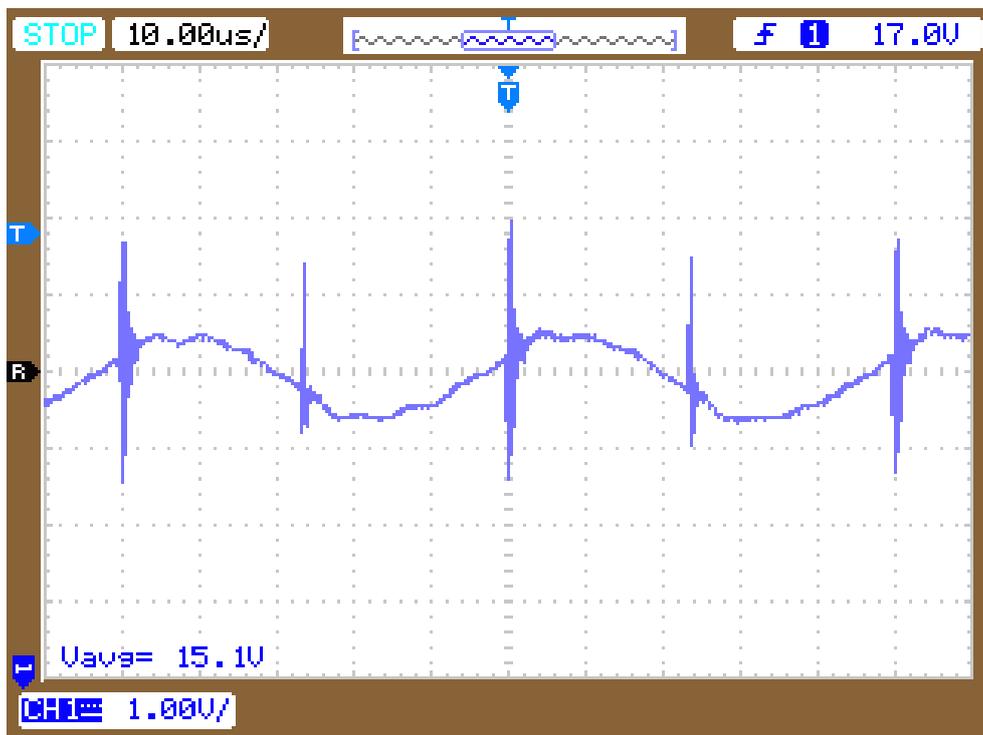


Figura 17 – O CH1 (1 V por divisão, azul) apresenta a tensão no capacitor C_2 .

8. RESULTADOS

Nessa seção são analisados os dados obtidos durante o ensaio do protótipo do conversor D e comparados com a simulação realizada previamente. Os dados foram obtidos através de medições e de capturas das formas de onda de corrente e tensão dos componentes do conversor, empregando para tanto um osciloscópio digital.

A primeira análise a ser feita é se o conversor está atuando no MCC, nesse caso não é possível realizar a análise a partir das formas de onda do transistor e do diodo, pois no caso do osciloscópio as ondas são dinâmicas e não temos como garantir que as imagens foram capturadas no mesmo intervalo de tempo. Desta forma, a análise deve ser feita a partir da Fig. 12, que apresenta as formas de onda do indutor L_2 , caso a corrente nesse componente fosse nula em algum intervalo de tempo o conversor estaria atuando no MCD, como a onda da corrente não atinge zero em momento algum e apresenta comportamento similar ao previsto pela simulação, pode-se dizer que o protótipo do conversor D está atuando no MCC.

Outra importante análise a ser realizada é a verificação da tensão de saída, que é esperada para ser igual a 15 V, segundo a simulação. Podemos analisar esse valor na Fig. 17, já que a tensão de saída é igual a tensão no capacitor C_2 . Como citado anteriormente o valor obtido em um primeiro momento foi superior ao esperado, porém foi realizado o ajuste do ciclo de trabalho e desta forma foi obtida a forma de onda apresentada e o valor médio de 15,1 V, valor muito próximo ao valor de premissa e obtido na simulação.

É necessário, para demonstrar o correto funcionamento do protótipo do conversor D, realizar a análise das ondulações de corrente e tensão nos indutores e capacitores, respectivamente, avaliando, se as premissas estipuladas na etapa de projeto foram cumpridas, mesmo com o conversor atuando com uma potência acima da qual foi projetado para funcionar. Assim, partindo dos mesmos paradigmas sintetizados na Tab. 3, a Tab. 6 foi elaborada e apresenta os valores medidos durante os ensaios para as ondulações em questão, recordando que a Ondulação máxima é determinada a partir dos respectivos valores médios de tensão e corrente, obtidos experimentalmente, multiplicados pelos valores percentuais das respectivas taxas de ondulação expressas na Tab. 1. A coluna Ondulação real indica qual a ondulação obtida a partir dos ensaios experimentais e a coluna Taxa de ondulação indica qual percentual que a Ondulação real representa sobre o respectivo valor médio da corrente ou da tensão em questão, utilizando os resultados experimentais para sua determinação.

Tabela 6 – Ondulações de corrente e tensão nos indutores e capacitores obtidas a partir dos ensaios.

Componente	Ondulação máxima	Ondulação real	Taxa de ondulação
C_1	3,10 V	3,00 V	10%
C_2	1,51 V	1,20 V	8%
L_1	0,42 A	0,32 A	8%
L_2	2,02 A	1,92 A	24%

Os valores obtidos para as taxas de ondulação de corrente e tensão a partir dos ensaios realizados são coerentes com o esperado, visto que todos estão abaixo das especificações de projeto, sintetizadas na Tab. 1 a exceção do valor da taxa de ondulação no capacitor C_1 que está exatamente igual ao valor especificado. Os resultados obtidos demonstram a validade da metodologia de projeto utilizada, assim como a fidelidade das análises qualitativa e quantitativa que descrevem o comportamento do protótipo do conversor D a perfeição. O desenvolvimento de um protótipo de laboratório encerra muitos desafios e a sua elaboração e verificação experimental foram experiências muito gratificantes e de grande realização profissional.

A comparação das formas de onda obtidas a partir do ensaio com as formas de onda obtidas em simulação também é de grande importância, pois garante que o protótipo está atuando conforme o esperado. Ao comparar componente a componente é perceptível que as formas de onda são semelhantes. A maior diferença é obtida quando analisada a Fig. 16, que representa o indutor de entrada L_1 , a medida obtida, durante o ensaio, nesse componente apresentou um excesso de ruído e grandes picos, na tensão, durante a comutação. É possível que outro motivo para a diferença da forma de onda da tensão, especificamente, no indutor L_1 seja a escala utilizada que não permitiu uma visualização semelhante a obtida em simulação.

É importante citar que em praticamente todas as imagens coletadas do osciloscópio durante os ensaios existem ruídos, que são comuns da utilização deste equipamento, porém com o uso da sonda de efeito *hall* geralmente são obtidas medidas com ruídos maiores, devido ao próprio funcionamento desse equipamento. Outro ponto importante de ser mencionado é a existência de muitos picos de tensão e corrente ocorrendo no momento de comutação do transistor S . Esse fenômeno é conhecido como picos de comutação e são comuns em transistores MOSFET, como o componente utilizado suporta valores muito superiores de corrente e tensão do que os alcançados esse acontecimento não deve ser um problema para o protótipo.

A última análise realizada foi quanto a eficiência do conversor, com este objetivo foram coletados os valores medidos de tensão e corrente, tanto na entrada quanto na saída do protótipo do conversor D. Os valores obtidos estão indicados na Tab. 7. A partir dos valores foi calculada primeiramente a potência de entrada e a potência de saída utilizando a Eq. 27 e em sequência foi calculada a eficiência do protótipo a partir da Eq. 28. O valor obtido foi uma eficiência de $\eta = 77\%$ e foi considerado condizente com a utilização dos componentes disponíveis (núcleos de ferrite de baixa qualidade) e com o fato do conversor operar em comutação dissipativa (do inglês, *hard switching*).

Tabela 7 – Valores de corrente e tensão na entrada e saída do protótipo.

Terminal	Corrente	Tensão
Entrada	4,2 A	17 V
Saída	3,66 A	15,1 V

$$P = VI \quad (27)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (28)$$

9. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos por meio das análises, simulações e ensaios, o protótipo do conversor D implementado foi considerado um sucesso, já que foi comprovada sua funcionalidade e sua operação ocorreu conforme as premissas utilizadas para seu dimensionamento. O conversor foi dimensionado de forma robusta e deve suportar diversos testes, visto que todos os seus componentes suportam tensões e correntes superiores as utilizadas tanto na simulação quanto nos ensaios.

O protótipo implementado desconsidera a utilização de um capacitor eletrolítico em paralelo com sua entrada, sendo estes componentes comumente utilizados em conversores associados a sistemas fotovoltaicos. A não utilização deste capacitor indica uma provável redução de custos para fabricação do conversor D em comparação com os conversores que não possibilitam a eliminação deste componente.

9.1 Sugestões para trabalhos futuros

O uso desse protótipo é recomendado para a realização de trabalhos futuros como:

- 1- Implementação de um algoritmo de controle para o conversor D;
- 2- Estudo e desenvolvimento de um algoritmo de controle e supervisão para o conversor D operando como controlador de carga de baterias;
- 3- Estudo e implementação de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência, para um controlador de carga de bateria, baseado no conversor D, alimentado por um módulo fotovoltaico.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10899:2013. Energia solar fotovoltaica –Terminologia.
- Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Plano Nacional de Energia 2050 - Brasília: MME/EPE.
- Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2021. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 - Brasília: MME/EPE.
- Dos Reis, F. S., Cabral, H. G., Dutra, S. C. A., Nery, E. G., Viera Jr, V. A., Pan, A. C., Dos Reis, F. B., Tonkoski, R., 2017. The D-Converter in CCM: Analysis, Design and Results - COBEP 2017.
- Dos Reis, F. S., Dutra, S. C. A., Cabral, H. G., Luz, L. A., Pan A. C., Dos Reis, F. B., Tonkoski, R., 2018. Análise e Dimensionamento do Conversor D no Modo de Condução Contínua - 13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2018, São Paulo.
- El Khateb, A. H., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Williams, B. W., 2013. The Effect of Input Current Ripple on the Photovoltaic Panel Efficiency - 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), pp. 478–481.
- El Khateb, A. H., Rahim, N. A., Member, S., Selvaraj, J., Williams, B. W., 2015. DC-to-DC Converter With Low Input Current Ripple for Maximum Photovoltaic Power Extraction", IEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 4, pp. 2246–2256.
- El Khateb, A. H., Uddin, M. N., Rahim, N. A., Williams, B. W., 2016. A Comparative Study on the D Converter Based on Control Schemes of Maximum Extracted Power - 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1–7.
- Empresa de Pesquisa Energética (Brasil), 2021. Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 - Rio de Janeiro: EPE.
- GREENER, 2021. Relatório Greener GD 2021. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracaodistribuida-1-semester-de-2021/>> Acesso 20 Abr 2022.
- Landsman, E. E., 1979. A Unifying Derivation of Switching DC-DC Converter Topologies - IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 239–243.
- Martins, D. C., Barbi, I., 2006. Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados - 2 ed. rev. Florianópolis: Ed dos Autores.
- Moura, 2020. Manual Técnico Linha Estacionária. Disponível em: <https://www.moura.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Manual_de_Instalação_e_Operação_Moura_Estacionária_VRLA_-_Série_MVA_Versão_V3_03_JANEIRO_2020_ANATEL.pdf> Acesso em 20 de Abr 2022.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos - Rio de Janeiro, pp. 116-244.
- Rosemback, R. H., 2004. Conversor CC-CC bidirecional buck-boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico. UFJF – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Diss. Dissertação de Mestrado, pp 16-30, Juiz de Fora.