

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARCOS GERALDO DE OLIVEIRA JUNIOR

**CONVERSOR FLYBACK APLICADO A SISTEMA FOTOVOLTAICO
DE ILUMINAÇÃO**

GUARAPUAVA

2022

MARCOS GERALDO DE OLIVEIRA JUNIOR

**CONVERSOR FLYBACK APLICADO A SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
ILUMINAÇÃO**

Flyback converter to photovoltaic system

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Granza

GUARAPUAVA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARCOS GERALDO DE OLIVEIRA JUNIOR

**CONVERSOR FLYBACK APLICADO A SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
ILUMINAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Tecnólogo em
Manutenção Industrial, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 05 de dezembro de 2022

Marcelo Henrique Granza
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Hilson Henrique Daum
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Alex Archela
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

GUARAPUAVA

2022

Dedico este trabalho à Deus e a minha
família, os quais são meu alicerce.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por estar me fortalecendo em todos os momentos.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelo espaço e equipamentos cedidos para o desenvolvimento deste trabalho, ao seu corpo docente, direção e administração.

Ao Professor Dr. Marcelo Rafael Cosetin (*in memoriam*), que deixou um grande legado a todos que o conheceram, sou grato por todos os ensinamentos durante o desenvolvimento do projeto, sua dedicação foi imprescindível.

Ao orientador Professor Dr. Marcelo Henrique Granza, por se prontificar a me orientar contribuindo com seu conhecimento e incentivo.

Aos meus pais Marcos e Scheila que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

Ao meu filho Joaquim e a minha esposa Eliara, por me motivarem a buscar meus objetivos, por todo amor, apoio e compreensão.

RESUMO

Este trabalho aborda uma análise teórica do panorama de energia solar no Brasil, o qual consiste em geração de energia por meio dos módulos fotovoltaicos, para aplicar tal energia é necessário converter os valores de tensão conforme a especificação da carga. O trabalho apresenta o desenvolvimento de um conversor CC-CC da topologia Flyback para alimentar um conjunto de lâmpadas LED de baixo consumo e alta eficiência. O circuito foi dimensionado e simulado por software para a tensão de saída ser elevada em relação a fonte, sendo a carga isolada da fonte através do indutor acoplado que é característico do flyback. Diante disso, foi implementado na prática o protótipo do conversor, para controle da razão cíclica e frequência de chaveamento foi utilizado um controlador PWM. Por fim, os resultados foram coletados em laboratório e observou-se que os valores projetados foram refletidos na implementação do circuito.

Palavras-chave: Sistemas de energia fotovoltaica; Conversores de corrente elétrica; Lâmpada de LED.

ABSTRACT

This work deals with a theoretical analysis of the solar energy scenario in Brazil, which consists of energy generation through photovoltaic modules, to apply such energy it is necessary to convert the voltage values according to the load specification. The work presents the development of a Flyback topology DC-DC converter to power a set of low-consumption and high-efficiency LED lamps. The circuit was dimensioned and simulated by software so that the output voltage is high in relation to the source, being the detailed load of the source through the coupled inductor that is characteristic of the flyback. In view of this, the prototype of the converter was implemented in practice, to control the duty cycle and switching frequency, a PWM controller was used. Finally, the results were collected in the laboratory and it was observed that the projected values were reflected in the implementation of the circuit.

Keywords: Photovoltaic systems; Electric current converters; LED lamps.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.	15
Figura 2 - Diagrama funcional de geração distribuída	17
Figura 3 - Sistemas fotovoltaicos isolados	18
Figura 4 - Diferença visual de painéis solares fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino	19
Figura 5 - Diagrama de blocos representando um conversor	21
Figura 6 - (a) Circuito conversor Buck (b) Forma de onda conversor	21
Figura 7 - Circuito de um conversor boost	22
Figura 8 - Circuito do conversor buck-boost	23
Figura 9 - Conversor Forward (Buck Isolado)	23
Figura 10 – Conversor Flyback	24
Figura 11 - Primeira etapa de operação Flyback	25
Figura 12 - Segunda etapa de operação Flyback	25
Figura 13 - Fluxograma da metodologia utilizada	26
Figura 14 – Diagrama eletrônico no PSIM	27
Figura 15- Sinal PWM do circuito de comando	37
Figura 16- Tensões no primário e secundário do indutor acoplado	39
Figura 17- Forma de onda de corrente no secundário	40
Figura 18- Tensão de entrada e de saída do conversor	41
Fotografia 1 – Circuito de comando	38
Fotografia 2 – Circuito de potência	38
Fotografia 3 – Medições em bancada	41
Fotografia 4 – Conversor acionando LED's	42
Fotografia 5 – Medições sendo realizadas com a carga ligada	43
Gráfico 1 - Gráfico de irradiação média anual em Guarapuava-PR	13

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de projeto previamente definidos.....	28
Tabela 2 - Parâmetros de projeto do indutor acoplado.	31
Tabela 3 - Especificações dos núcleos comerciais.	33
Tabela 4 – Resumo de dados para fabricação do indutor acoplado	35

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AWG	<i>American Wire Gauge</i> (Escala Americana Normalizada)
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
C	Capacitor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
E	Tensão de entrada
I	Corrente
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
GP	Campus Guarapuava
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
L	Indutor
LED	<i>Light emitter diode</i>
MCT	Tiristor controlado por <i>Metal-Oxide-Semiconductor</i>
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
R	Resistência
S	Chave
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Tensão de saída

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	14
2.1.1 Cenário atual da energia solar fotovoltaica	14
2.1.2 Tipos de geração a partir de sistemas fotovoltaicos	16
2.1.3 Células fotovoltaicas de silício	18
2.2 CONVERSORES CC-CC.....	20
2.2.1 Conversor Buck	21
2.2.2 Conversor Boost	22
2.2.3 Conversor Buck-Boost	22
2.2.4 Conversor Forward	23
2.2.5 Conversor Flyback	24
2.2.5.1 Etapas de operação do conversor Flyback	25
2.2.6 Controle de conversores por PWM	25
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 ELABORAÇÃO DE DIAGRAMA ELETRÔNICO E SIMULAÇÕES	26
3.2 DEFINIÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS	27
3.3 DIMENSIONAMENTO	28
3.3.1 Dimensionamento do conversor	28
3.3.2 Dimensionamento do indutor acoplado.....	31
3.4 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO	36
4 RESULTADOS	37
5 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS.....	45
ANEXO A - Datasheet e diagrama eletrônico do controlador SG3524.....	47

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fontes alternativas de energia apresenta efetivo crescimento, devido ao aumento progressivo do custo da energia elétrica e também a busca por sustentabilidade. Energias alternativas buscam evitar poluição atmosférica, resíduos radioativos ou grandes alagamentos, causados por usinas termoelétricas, nucleares e hidroelétricas, respectivamente.

A energia fotovoltaica provém do sol, sendo uma fonte considerada inesgotável que transforma energia solar em energia elétrica, sendo caracterizada como uma energia limpa. A conversão de energia pode ser realizada através de um dispositivo elétrico, definido como célula solar, ou célula fotovoltaica. Este dispositivo é constituído de semicondutores.

A primeira célula solar de selênio foi construída por Charles Fritts em 1880 provando que é possível gerar eletricidade. O próximo avanço foi em 1950 onde cientistas estudaram as características do silício que é o segundo elemento mais disponível em nosso planeta, sendo barato e o mais utilizado em construção de placas solares. Através dos estudos perceberam que o silício tratado com impurezas, torna-se reativo a luz, quando os raios solares atingem a célula ocorre a separação dos elétrons de seus átomos provocando movimentação. Por meio desse movimento gera eletricidade através de um circuito elétrico (BALFOUR; SHAW; NASH, 2016).

Como a energia elétrica é imprescindível no cotidiano das pessoas a aplicabilidade deste conceito de geração é ampla, podendo ser visto em áreas rurais, urbanas, industriais e pequenos sistemas autônomos em lugares remotos.

Para consumir essa energia não basta conectar a placa fotovoltaica na carga, porque os aparelhos e máquinas comumente funcionam com tensão e correntes padronizadas e os sistemas fotovoltaicos possuem especificações variadas de acordo com a sua construção. Devido a este motivo torna-se necessário trabalhar a energia visando atingir as grandezas elétricas nominais dos equipamentos para perfeito funcionamento.

Por meio da eletrônica é possível fazer a conversão para chegar nos valores desejados, utilizando conversores CC-CC que também são chamados de *choppers*. Os conversores CC-CC podem ser considerados o equivalente em CC de um

transformador CA, sua finalidade é abaixar ou elevar uma tensão CC assim como o transformador tem a mesma função em CA. (RASHID, 2014).

O desenvolvimento de um conversor possibilita a aplicação deste componente nas pesquisas de energia sustentável na UTFPR do campus de Guarapuava. Sendo assim, o estudo consiste no projeto de um conversor estático CC-CC para processamento da energia obtida através do painel fotovoltaico para alimentação de uma lâmpada ou um conjunto de lâmpadas.

1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo principal desenvolver um conversor estático com entrada em corrente contínua a partir do painel fotovoltaico para alimentar uma lâmpada ou um conjunto de lâmpadas LED caracterizando uma potência a ser definida. Tal topologia caracteriza o sistema fotovoltaico de iluminação proposto como uma fonte de energia alternativa para iluminação em geral, proveniente de energia solar.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar literatura sobre sistemas fotovoltaicos e conversores;
- Elaborar diagrama eletrônico via software;
- Dimensionar e selecionar os componentes eletrônicos;
- Realizar simulações no software verificando funcionamento;
- Fabricar protótipo;
- Realizar experimentos em bancada para análise dos resultados.

1.3 JUSTIFICATIVA

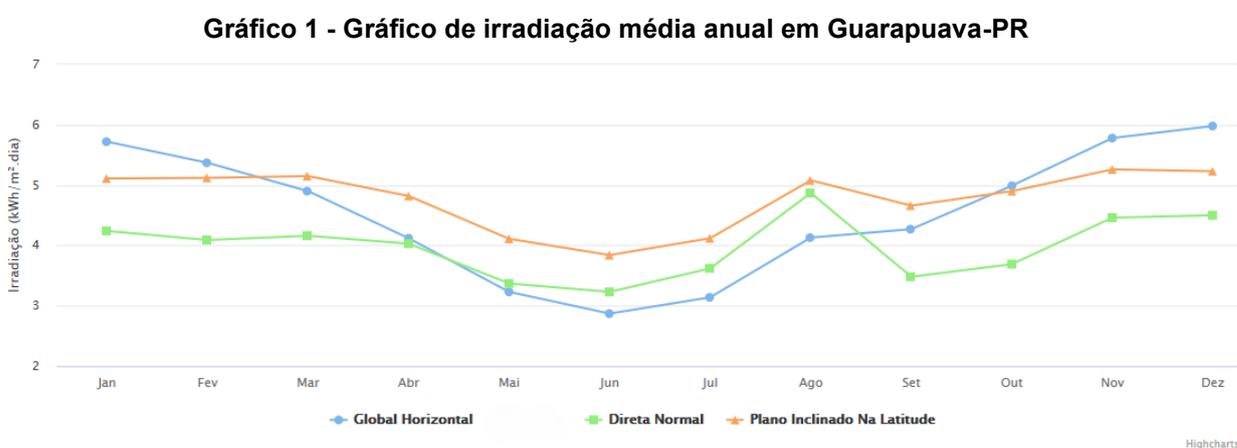
Sabendo da importância da energia elétrica e a busca por inovação de seus processos que resultam em eficiência energética, sustentabilidade e economia.

O presente estudo tem como propósito a utilização de energia fotovoltaica e a sua conversão para as grandezas elétricas iguais a especificação comercial dos LED's a ser utilizados no sistema de iluminação autônomo fotovoltaico, sendo

possível maior aproveitamento deste benefício que traz economia de energia e leva energia a lugares remotos.

A cidade de Guarapuava-PR apresenta forte potencial para geração de energia fotovoltaica, sobretudo quando comparada aos países europeus, que são referência em energias renováveis. Consta-se que a média de irradiação anual obtida no estado é 43% superior à da Alemanha; 2,22% superior à da Itália; 55,11% superior à do Reino Unido; 18,25% superior à da França e 8,14% inferior à da Espanha (TIEPOLO et al., 2017).

O gráfico 1 aponta as médias anuais de irradiação solar na cidade de Guarapuava-PR, onde será realizado a pesquisa.



Fonte: Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná - 1ª Edição – 2017, disponibilizado pela Ferramenta Web Interativa, UTFPR Curitiba.

Existe um investimento inicial nos sistemas fotovoltaicos para aquisição e instalação, sendo o retorno financeiro a longo prazo, pois é possível diminuir significativamente ou até zerar a conta mensal com energia elétrica. Economicamente são vantajosos por não ser necessário pagar taxas de transmissão à concessionária, não possuir impostos, baixa manutenção e a tendência que se tem na queda do valor de produção deste tipo de energia. Além dos benefícios socioambientais como expansão de energia elétrica em localidades isoladas e ser uma alternativa em relação às fontes de energia que agredem o meio ambiente (CABRAL; VIEIRA, 2012).

Portanto, é de grande importância as pesquisas relacionadas a este assunto no campus da UTFPR-GP com um protótipo funcional por contribuir no avanço da tecnologia, tendo o intuito de viabilizar ainda mais no âmbito econômico a utilização

de energia elétrica proveniente de sistemas fotovoltaicos, convertidos por meio de circuitos eletrônicos para atender as mais variadas aplicações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

É ciência que utiliza a energia do sol para produzir energia elétrica por meio da irradiação solar que atinge as células fotovoltaicas que é composta de um material semicondutor (geralmente de silício) tendo a função converter a energia solar em eletricidade devido a movimentação dos elétrons (BALFOUR; SHAW; NASH, 2016).

2.1.1 Cenário atual da energia solar fotovoltaica

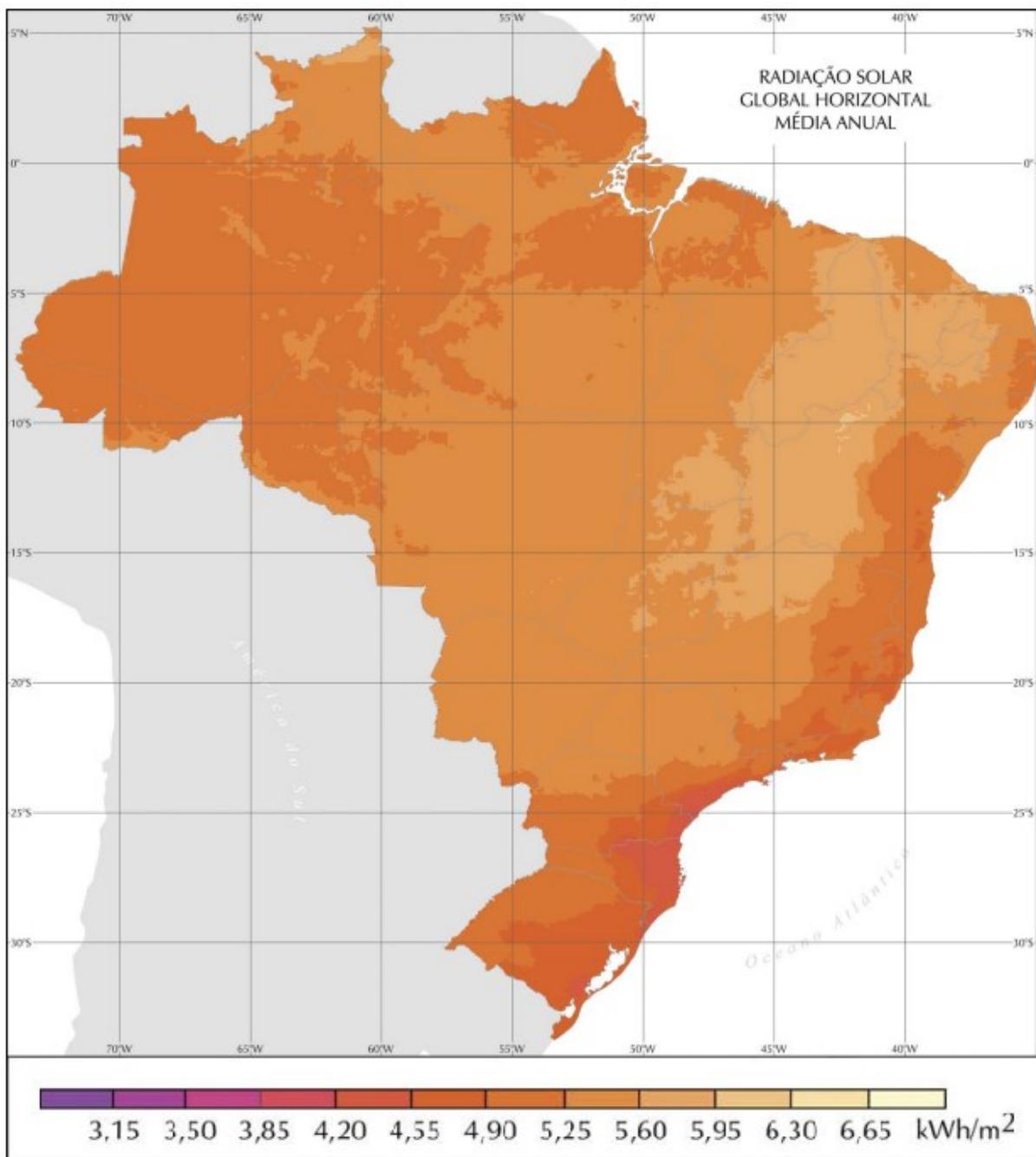
A energia solar fotovoltaica se enquadra como uma das opções de geração de energia elétrica que não afetam drasticamente o meio ambiente, juntamente com a questão de viabilidade econômica. As formas de geração convencionais, como hidrelétrica e termelétrica, precisam de altos investimentos devido ao alto custo de implantação, como os países não desfrutam de elevadas taxas de poupança recorrem a fontes financeiras internacionais. Nesse aspecto existe uma tendência como estratégia de desenvolvimento que aponta para o uso de energias renováveis que além de reduzirem danos ambientais estão se tornando economicamente viáveis. Vale ressaltar que a energia solar fotovoltaica é uma fonte tecnologicamente desenvolvida e é alvo de pesquisas para aprimoramento da mesma (DA ROSA; GASPARIN, 2016).

Podemos considerar o Brasil com um alto potencial de utilização de energia solar fotovoltaica, por apresentar regularidade em relação a energia eólica por exemplo, levando em conta fontes alternativas. O território brasileiro é privilegiado por possuir elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões. A quantidade de energia gerada depende da insolação do local, destaca-se a região Nordeste e Centro-Oeste com maiores potenciais, as demais regiões não ficam atrás. O país que mais usa energia solar é a Alemanha e sua maior insolação é de 3,5 kWh/m²

(quilowatt-hora por metro quadrado) por dia, para comparação o Brasil possui valores de insolação diária entre 4,5 kWh/m² e 6 kWh/m² (VILLALVA, 2015).

A figura 1 apresenta graficamente a média anual de irradiação solar no Brasil, percebe-se que apesar do grande território existe boa uniformidade.

Figura 1 - Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.



Fonte: Adaptado de (RÜTHER et al. 2006, p. 34)

Machado e Miranda (2014) observam que os países mais desenvolvidos na aplicação energia solar são os Europeus, Estados Unidos e Japão e o que motivou esta ascensão foi programas de incentivo. Esses programas se baseiam na descentralização da produção de energia, sistema instalados por pessoas físicas interligado a rede sendo a energia gerada comprada pela concessionária. O Brasil por ser um país privilegiado no contexto fotovoltaico por apresentar altos níveis de radiação solar tem amplo campo de expansão, mas ainda tem o obstáculo do custo por falta de políticas de incentivos.

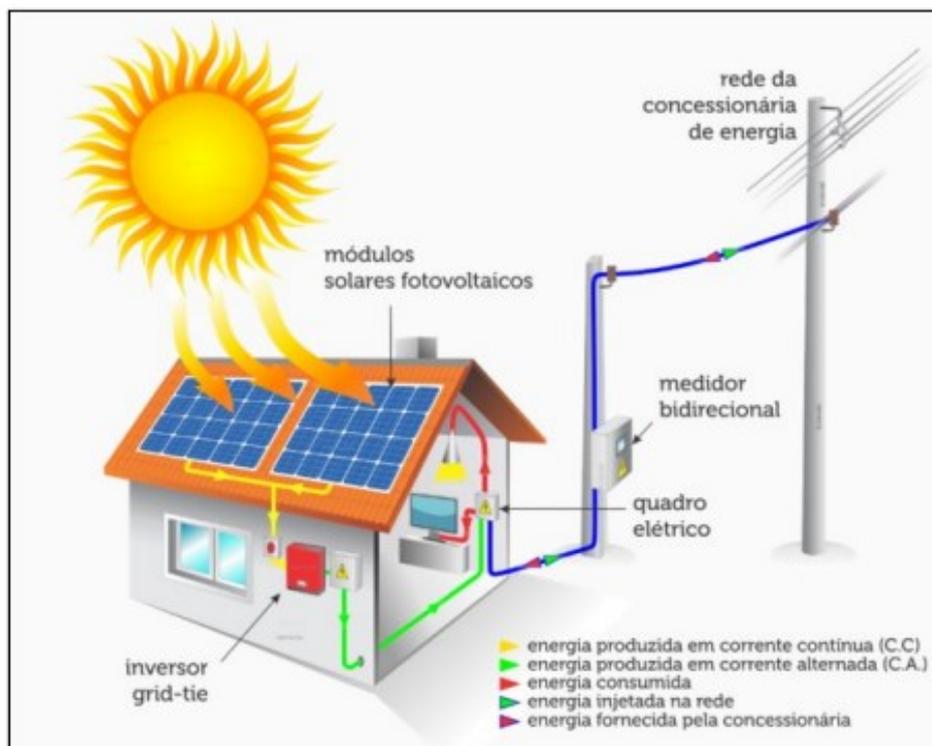
2.1.2 Tipos de geração a partir de sistemas fotovoltaicos

Quando se trata de sistemas fotovoltaicos, o aproveitamento da energia é dividido em três grupos principais: geração distribuída, geração centralizada e geração isolada. Conforme Da Rosa e Gasparin (2016) explicam:

- Geração distribuída é quando a unidade consumidora está ligada à rede de distribuição da concessionária, fornecendo energia gerada excedente à rede, são chamados de sistemas micro e minigeradores distribuídos;

A figura 2 exemplifica geração distribuída.

Figura 2 - Diagrama funcional de geração distribuída

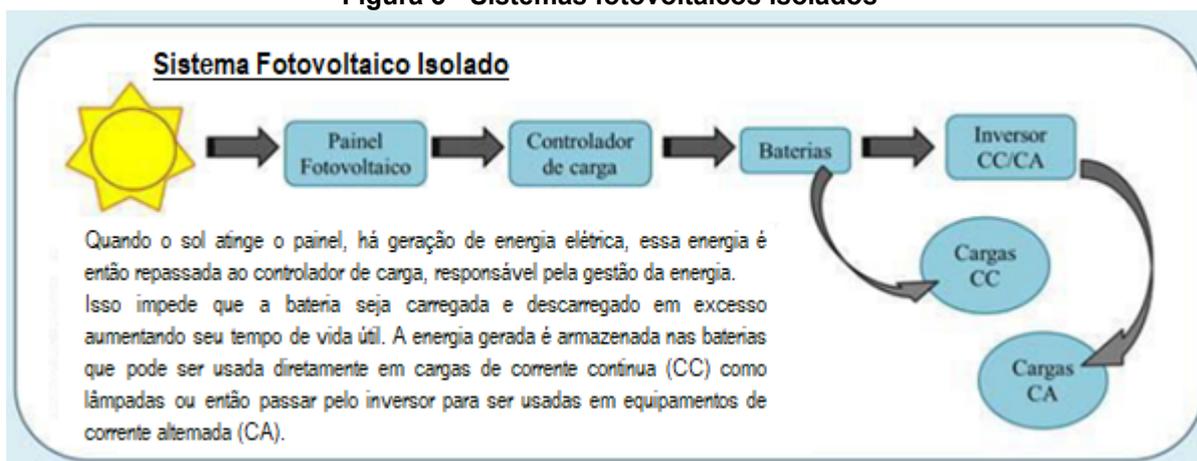


Fonte: (Sevenia). Disponível em: <http://www.sevenia.com.br/distributed-energy/>

- Geração Centralizada é caracterizada pela grande produção de energia provenientes de usinas solares, disponibilizada no sistema elétrico através das linhas de transmissão;
- Geração Isolada é definida por geração e consumo na própria localidade, geralmente são projetos de pequeno porte e sua aplicação na grande maioria em lugares remotos.

A figura 3 apresenta um diagrama de blocos representando sistemas fotovoltaicos isolados.

Figura 3 - Sistemas fotovoltaicos isolados



Fonte: (MACHADO; MIRANDA, 2014)

2.1.3 Células fotovoltaicas de silício

Atualmente existem várias tecnologias para construção de células e módulos fotovoltaicos. Tendo como matéria-prima predominante o silício que é presente em cerca de 95% de todas as células fabricadas, por ser abundante e de baixo custo. As categorias mais comuns encontradas no mercado são as de silício monocristalino e a do silício policristalino. O silício utilizado na fabricação de células fotovoltaicas é extraído do mineral quartzo, sendo este mineral encontrado em abundância no Brasil que é um dos maiores produtores do mundo, porém, a purificação do silício e a fabricação das células não são feitas no Brasil (VILLALVA, 2015).

De acordo com Nascimento (2004) as células de silício monocristalino são produzidas por meio de blocos de silício ultrapuro inseridos em fornos especiais com altas temperaturas e submetidos a um processo de formação de cristal, aplicado impurezas, em seguida são cortadas em pastilhas finas (0,4 – 0,5 mm² de espessura). Alcançam eficiência superior a 12% e até 18%.

O processo de produção das células de silício policristalino é mais barato em relação ao monocristalino. Seu processo inicia a partir de um lingote formado por aglomerados de pequenos cristais com tamanhos e orientações diferentes. As células policristalinas possuem aparência heterogênea e normalmente são azuis. Em relação a eficiência encontra-se entre 13% e 15%, levemente inferior às células monocristalinas, contudo, o custo de fabricação é mais barato e na maioria dos casos equivale à redução da eficiência (VILLALVA, 2015).

A figura 4 mostra dois painéis solares, o da esquerda é um com células fotovoltaicas monocristalinas de silício que apresenta aspecto uniforme, já o da direita é confeccionado com células fotovoltaicas policristalinas e possui a presença de manchas em sua coloração devido ao tipo de silício usado em sua fabricação.

Figura 4 - Diferença visual de painéis solares fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino



Fonte: (Ecori). Disponível em: <http://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/7b3ca9>

O conjunto de células associadas em série paralelo forma os chamados painéis, placa ou módulo fotovoltaico, juntamente com outros dispositivos como baterias, conversores, inversores, controladores, medidores, etc. Formam os sistemas fotovoltaicos de energia elétrica. Um dos pontos fortes deste tipo de fonte de energia é a confiabilidade por não possuir partes móveis, sendo possível expandir facilmente por estar disposto em módulos (DO NASCIMENTO, 2004).

2.2 CONVERSORES CC-CC

Os conversores CC-CC também conhecidos como *choppers*, são utilizados para obter uma tensão CC variável a partir de uma tensão CC constante, ou vice-versa. A conversão básica consiste na combinação de um indutor e/ou um capacitor juntamente com um dispositivo de estado sólido que tenha uma operação de chaveamento em alta frequência. Os conversores utilizam de dispositivos com entrada em condução e desligamento controlados por exemplo: BJTs, MOSFETs, IGBTs, MCTs, SITs e GTOs. Na maioria dos casos utiliza a técnica de controle por PWM (modulação por largura de pulso), para realizar o chaveamento (AHMED, 2000).

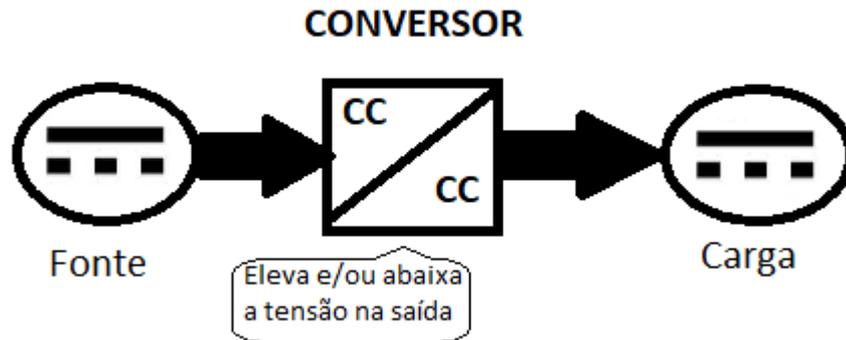
Segundo Rashid (2014) os conversores CC-CC têm muitas aplicações industriais como carregadores de bateria, acionamentos de motores, controle de tração de motores em automóveis elétricos, trólebus, guindastes marinhos, empilhadeiras de almoxarifados, transportadores em minas, frenagem regenerativa em máquinas de corrente contínua para devolver energia para a fonte de alimentação, resultando em economia de energia para sistemas de transporte com paradas seguidas, entre outras inúmeras aplicações.

Existem vários tipos de conversores com funções variadas, as topologias mais comuns de conversores CC-CC são conhecidas como:

- Conversor Buck – abaixador de tensão;
- Conversor Boost – elevador de tensão;
- Conversor Buck-bust – elevador e abaixador de tensão;
- Conversor Forward – buck isolado;
- Conversor Flyback – buck-bost isolado.

A figura 5 demonstra através do diagrama de blocos que um conversor CC-CC recebe uma tensão CC e pode elevar, abaixar ou ambas as funções de acordo com a necessidade.

Figura 5 - Diagrama de blocos representando um conversor



Fonte: Autoria própria

2.2.1 Conversor Buck

De acordo com Barbi e Martins (2000) o conversor Buck é tem a função de abaixador de tensão, caracterizado por ter entrada em tensão e saída em corrente. Na Figura 6a mostra-se o diagrama elétrico correspondente a este conversor.

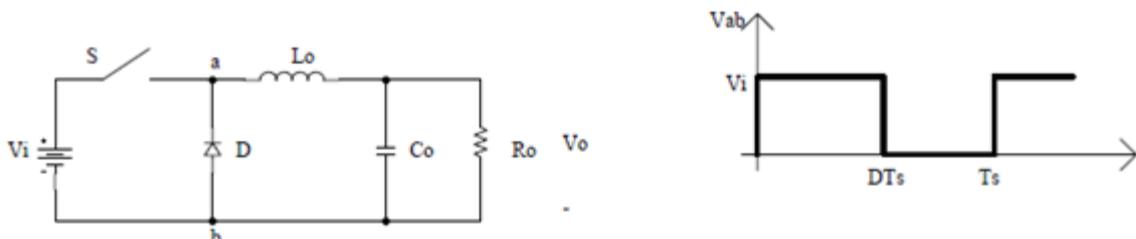
As etapas de funcionamento do conversor Buck são descritas a seguir.

Etapa 1: S está conduzindo em condução contínua. A corrente circula por L_o e pela saída. Nesta etapa V_i fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor L_o .

Etapa 2: S está bloqueado. No instante de abertura de S o diodo D entra em condução. A energia do indutor é transferida para a carga, isto é, o indutor é desmagnetizado.

A forma de onda da tensão V_{ab} é demonstrada na Figura 6b.

Figura 6 - (a) Circuito conversor Buck (b) Forma de onda conversor

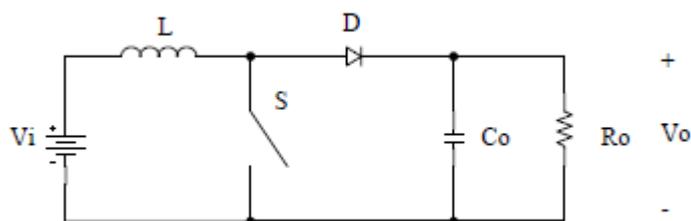


Fonte: (PETRY, 2001)

2.2.2 Conversor Boost

O conversor Boost é utilizado para elevação da tensão na saída, sendo a mínima tensão na saída igual à de entrada ou superior, a tensão de saída não poderá ser menor que da entrada para ser considerado conversor Boost (MARTINS; BARBI, 2006). A Figura 7 mostra o esquema elétrico do conversor Boost.

Figura 7 - Circuito de um conversor boost



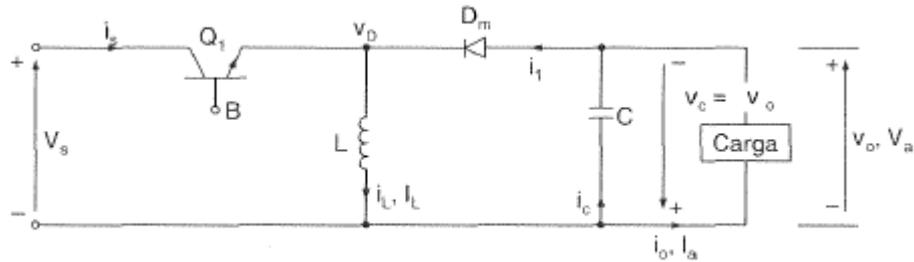
Fonte: (PETRY, 2001)

Segundo Erickson (2007) o funcionamento consiste em duas partes, a primeira etapa de funcionamento acontece no momento que a chave entra em condução e o indutor passa a ser carregado, neste momento o diodo não conduz porque o conversor ficará em curto-circuito. Em seguida na próxima parte a chave está aberta e o indutor é descarregado na carga, completando o ciclo de operação do conversor Boost.

2.2.3 Conversor Buck-Boost

Rashid (2014) explica que os conversores buck-boost fornecem uma tensão de saída que pode ser maior ou menor em relação a tensão de entrada, através desta característica vem o nome buck-boost. A polaridade da tensão de saída é contrária à de tensão de entrada. A disposição do circuito de um conversor buck-boost é mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Circuito do conversor buck-boost



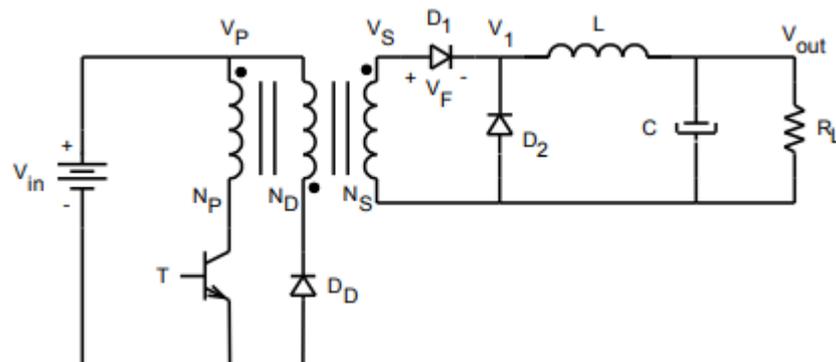
Fonte: (RASHID, 2014)

A operação do conversor possui dois modos. No primeiro o transistor Q1 conduz e o diodo Dm fica reversamente polarizado, a corrente de entrada aumenta e flui através do indutor e do transistor Q1. No segundo modo o transistor Q1 é desligado e a corrente que estava fluindo pelo indutor, passa pelo próprio indutor, pelo capacitor, diodo e carga. Sendo a energia armazenada no indutor transferida para a carga e a corrente diminui até que o transistor conduza novamente no próximo ciclo.

2.2.4 Conversor Forward

O conversor Forward ou Buck isolado é uma derivação do conversor Buck e possui a função de abaixador de tensão, a principal diferença é adição do indutor acoplado e outro diodo no circuito de saída que não estão presentes no Buck convencional. Na figura 9 podemos ver o esquema do conversor Forward (PETRY, 2001).

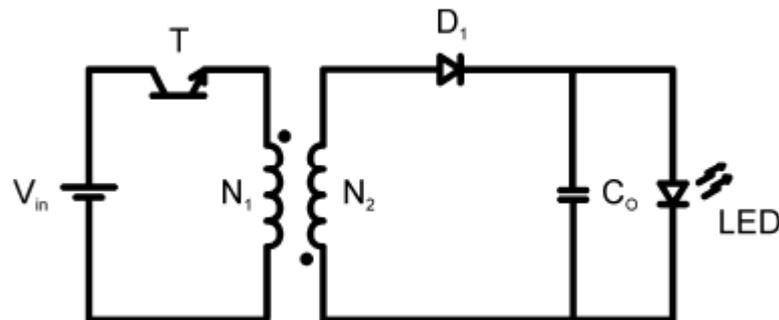
Figura 9 - Conversor Forward (Buck Isolado)



2.2.5 Conversor Flyback

O conversor Flyback é semelhante ao conversor Buck-Boost, ou seja, os dois fornecem uma tensão de saída maior ou menor que a entrada. O que distingue as duas topologias está na isolação entre a fonte de entrada e a carga. Para isso, um enrolamento secundário é introduzido ao indutor do Buck-Boost. (PINTO, 2008) O circuito é demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Conversor Flyback



Pinto (2008) explica que no momento que um interruptor conduz, o indutor acoplado armazena energia pela corrente que circula no enrolamento primário. O diodo tem a função de impedir que esta energia seja conduzida de maneira imediata para a carga, como acontece com um transformador. Apenas quando o interruptor é bloqueado, a energia acumulada no indutor acoplado é transferida pela carga pelo caminho do diodo.

O Conversor flyback tem muitas aplicações em circuitos eletrônicos de baixa potência, por sua simplicidade, número de componentes reduzidos, saída isolada da entrada. Além, de ser possível ter mais de uma saída, acrescentando mais enrolamentos.

Portanto, o conversor escolhido para desenvolvimento do trabalho foi o flyback, pois sua topologia tem diversas características que beneficiam o projeto, conforme Petry (2001) destacou:

- É um conversor à acumulação de energia;
- A saída é isolada da entrada;
- Permite ajustar a razão cíclica de operação através da relação de transformação;
- Possibilita usar várias saídas;
- Pode operar como elevador ou abaixador;

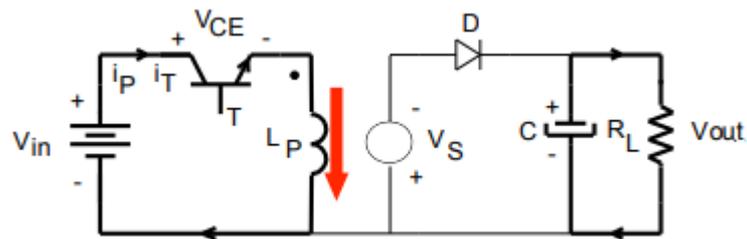
- A corrente de saída é descontínua;
- A corrente na entrada é descontínua.

2.2.5.1 Etapas de operação do conversor Flyback

Petry (2001) observa que o conversor Flyback tem o funcionamento em duas etapas, são explicadas a seguir:

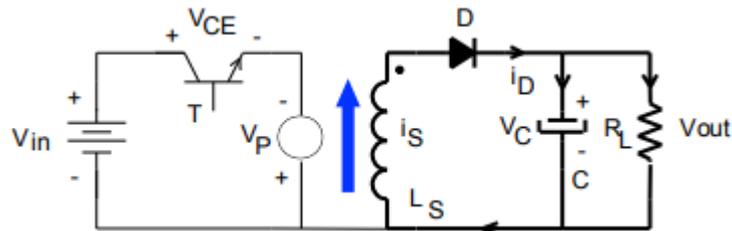
Etapa 1: A chave T está conduzindo, a fonte V_{in} fornece energia para a magnetização do enrolamento primário do transformador e o diodo D está reversamente polarizado. A figura 11 destaca a primeira etapa de operação.

Figura 11 - Primeira etapa de operação Flyback



Etapa 2: A chave T está bloqueada, a energia armazenada no indutor acoplado vai para saída através do diodo D que nesse momento está em condução. A figura 12 destaca a segunda etapa de operação.

Figura 12 - Segunda etapa de operação Flyback



2.2.6 Controle de conversores por PWM

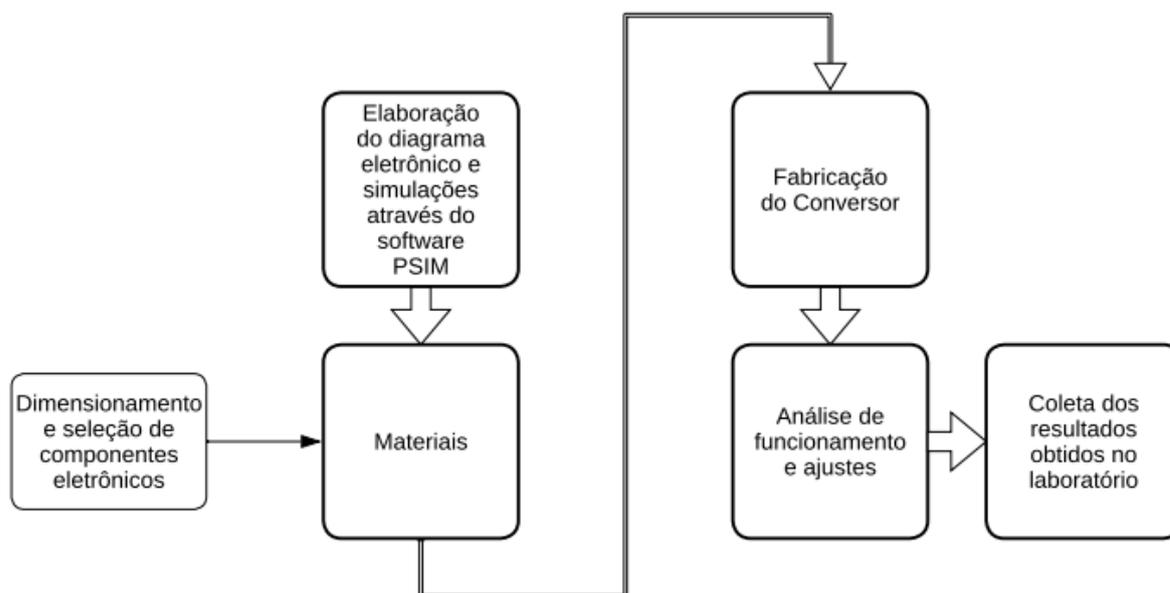
Rashid (2014) argumenta que na maioria das aplicações de inversores ou conversores é preciso ter o controle de tensão na saída, para lidar com as variações de tensão na entrada CC, ajustar a tensão dos conversores e atingir os requisitos de controle de tensão e corrente constantes. Para tal, existem técnicas distintas para variar o ganho e a razão cíclica dos inversores e conversores. O método mais

eficiente de controle do ganho é o PWM (*Pulse Width Modulation*) chamada de modulação por largura de pulso, é a técnica aplicada com maior frequência.

3 METODOLOGIA

Com a finalidade de obter melhor visualização de quais são as etapas necessárias para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi elaborado um fluxograma que pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia utilizada



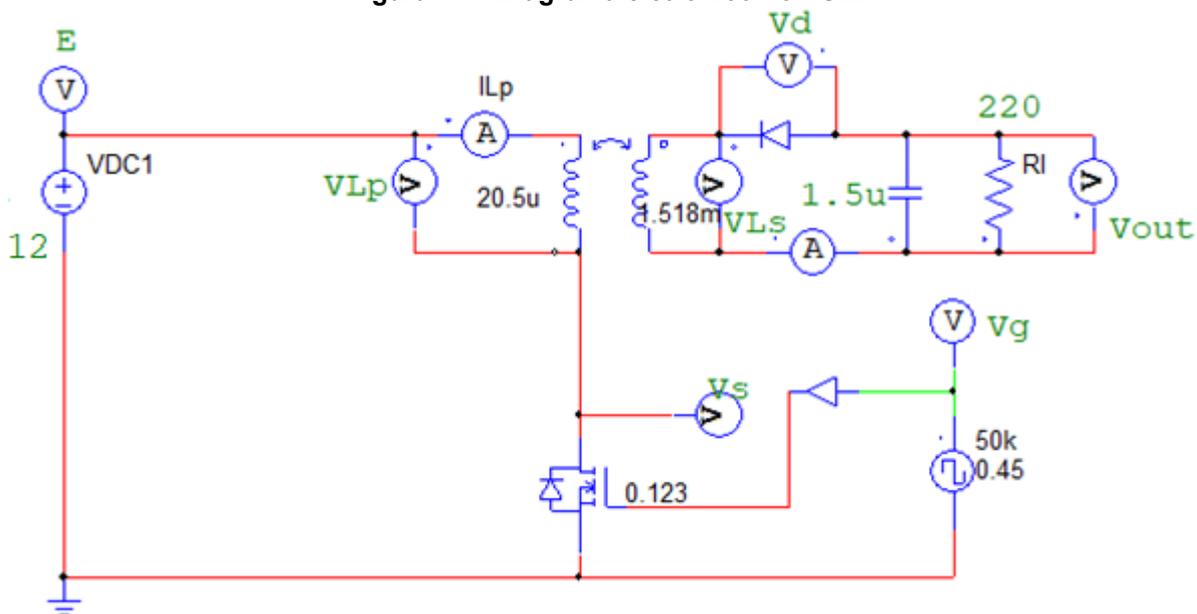
Fonte: Autoria própria

3.1 ELABORAÇÃO DE DIAGRAMA ELETRÔNICO E SIMULAÇÕES

Primeiramente, o circuito eletrônico será desenvolvido via software, utilizando o programa PSIM. Através destas ferramentas é possível realizar vários testes dos componentes definindo qual é o ideal para cada caso, gerar gráficos de medições das simulações e projetar o circuito eletrônico como um todo, verificando o funcionamento dentro do software. Logo, esta etapa da pesquisa se faz necessário por facilitar a elaboração do diagrama eletrônico e por existir possibilidade de fazer testes e medições antes mesmo de fazer o protótipo, sendo assim, torna-se mais rápido a identificação de problemas e conseqüentemente a resolução.

Conforme a figura 14, o diagrama eletrônico do conversor flyback no PSIM, onde foi possível inserir os valores calculados dos componentes, tornando possível verificar o funcionamento em simulação.

Figura 14 – Diagrama eletrônico no PSIM



Fonte: Autoria própria

3.2 DEFINIÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

O conversor será construído em uma placa de circuito impresso. Os tipos de componentes eletrônicos presentes no projeto são:

- Fusível;
- Resistores;
- Diodos;
- Capacitores;
- Transistores;
- Mosfet P16N15
- Circuito integrado;
- Transformador toroidal;
- Condutores;
- LED;

- Indutores.

O dimensionamento e seleção dos componentes será realizado por meio de uma rotina de cálculos no Mathcad simultaneamente com a etapa de elaboração do diagrama eletrônico por meio do Psim. Entende-se que é o momento adequado, pois, será consolidado as especificações do protótipo.

3.3 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento do projeto foi dividido em duas etapas, primeiro a do conversor que forneceu os valores de indutância requeridos para dimensionar o indutor acoplado na segunda etapa.

3.3.1 Dimensionamento do conversor

Para o dimensionamento do conversor e seus componentes a tabela 1 apresenta os parâmetros previamente definidos de projeto, os quais serão necessários para os cálculos.

Tabela 1 - Parâmetros de projeto previamente definidos.

Descrição	Símbolo	Valor
Tensão da entrada	V_{in}	12 Vcc
Tensão de saída	V_o	64 Vcc
Corrente de saída	A	0,3 A
Potência na saída	P_{out}	20 W
Queda de tensão no diodo	V_f	1 V
Frequência de comutação	f	25 kHz
Fator de utilização do primário	K_p	0,5
Fator de utilização da área do enrolamento	K_w	0,4
Razão cíclica máxima	D	0,5
Rendimento	η	95%

Fonte: Autoria própria

O conversor será projetado para o pior caso de operação, onde a tensão mínima é chamada de V_{min} e razão cíclica máxima é chamada de D_{max} . Portando $D=D_{max}$ e $V=V_{min}$.

Definição dos valores de entrada e saída do conversor, considerando uma variação na tensão da bateria igual a 15%.

Mínima tensão da bateria:

$$V_{min} = V \cdot 0,85 \quad (1)$$

$$V_{min} = 12 \cdot 0,85$$

$$V_{min} = 10,2 \text{ V}$$

Máxima tensão da bateria:

$$V_{max} = V \cdot 1,15 \quad (2)$$

$$V_{max} = 12 \cdot 1,15$$

$$V_{max} = 13,8 \text{ V}$$

Potência de entrada:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (3)$$

$$P_{in} = \frac{20}{0,95}$$

$$P_{in} = 21,05 \text{ W}$$

Potência de saída:

$$P_{out} = (V_{out} + Vf) \cdot I_{out} \quad (4)$$

$$P_{out} = (64 + 1) \cdot 0,3$$

$$P_{out} = 19,5 \text{ W}$$

Resistência equivalente da saída:

$$R_{out} = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (5)$$

$$R_{out} = \frac{64}{0,3}$$

$$R_{out} = 213,33 \Omega$$

Cálculo da corrente média no primário:

$$I_{medp} = \frac{P_{in}}{E_{min}} \quad (6)$$

$$I_{medp} = \frac{20,526}{10,2} = 2,012 \text{ A}$$

Cálculo da corrente de pico no primário:

$$I_{picop} = 2 \frac{I_{medp}}{D_{max}} \quad (7)$$

$$I_{picop} = 2 \frac{2,012}{0,45} = 8,944 \text{ A}$$

Cálculo da corrente eficaz no primário:

$$I_{rmsp} = I_{picop} \cdot \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} \quad (8)$$

$$I_{rmsp} = 8,944 \cdot \sqrt{\frac{0,45}{3}} = 3,464 \text{ A}$$

Cálculo de indutância no primário:

$$L_p = \frac{E_{min} \cdot D_{max}}{I_{picop} \cdot f_s} \quad (9)$$

$$L_p = \frac{10,2 \cdot 0,45}{8,944 \cdot 25000} = 20,528 \mu H$$

Pode-se calcular a indutância do primário de outra maneira:

$$L_p = \frac{2 \cdot P_{in}}{f_s \cdot I_{picop}^2} \quad (10)$$

$$L_p = \frac{2 \cdot 20,526}{25000 \cdot 8,944^2}$$

$$L_p = 20,528 \mu H$$

Cálculo de indutância no secundário:

$$L_s = \frac{L_p}{\left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2} \quad (11)$$

$$L_s = \frac{20,528}{\left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2}$$

$$L_s = 1,518 \text{ mH}$$

Cálculo da indutância mútua (utiliza no modelo de indutor acoplado no PSIM):

$$M = \sqrt{L_p \cdot L_s} \quad (12)$$

$$M = 176,54 \mu H$$

Cálculo da corrente média no secundário:

$$I_{meds} = \text{Corrente de saída} \quad (13)$$

$$I_{meds} = 0,3 \text{ A}$$

Cálculo da corrente de pico no secundário:

$$I_{picos} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{out}}{f_s \cdot L_s}} \quad (14)$$

$$I_{picos} = 1,014 \text{ A}$$

Cálculo da corrente eficaz no secundário:

$$I_{rmss} = I_{picos} \cdot \sqrt{\frac{1 - D_{max}}{3}} \quad (15)$$

$$I_{rmss} = 1,014 \cdot \sqrt{\frac{1 - 0,45}{3}}$$

$$I_{rmss} = 0,434 \text{ A}$$

Ondulação da tensão de saída:

$$\Delta V_o = v \cdot V_{out} \quad (16)$$

$$\Delta V_o = 0,05 \cdot 64$$

$$\Delta V_o = 3,2 \text{ V}$$

Cálculo do capacitor de saída:

$$C_o = \frac{I_{out} \cdot D_{max}}{f_s \cdot \Delta V_o} \quad (17)$$

$$C_o = \frac{0,3 \cdot 0,45}{25000 \cdot 3,2}$$

$$C_o = 1,688 \mu\text{F}$$

Cálculo do tempo de condução do diodo:

$$t_d = \frac{2 \cdot I_{out}}{I_{picos} \cdot f_s} \quad (18)$$

$$t_d = \frac{2 \cdot 0,3}{1,014 \cdot 25000}$$

$$t_d = 23,677 \mu\text{s}$$

3.3.2 Dimensionamento do indutor acoplado

Com base no projeto do conversor, será dimensionado o indutor acoplado com as indutâncias calculadas no projeto de acordo com os parâmetros da tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de projeto do indutor acoplado.

Descrição	Símbolo	Valor
Indutância no primário	L_p	20,528 μH

Indutância no secundário	L_s	1,518 mH
Frequência de comutação	f_s	25 kHz
Corrente RMS no primário	I_{rmsp}	3,5 A
Corrente RMS no secundário	I_{rmss}	434 mA
Fator de utilização do primário	K_p	0,5
Fator de utilização do secundário	K_s	0,5
Descrição	Símbolo	Valor
Fator de utilização da área do enrolamento	K_w	0,5
Densidade de corrente	J_{max}	350 A/cm ²
Limite de densidade de fluxo	B_{max}	0,2 T
Faixa de densidade de fluxo	ΔB	0,2 T
Potência de saída	P_o	20 W
Eficiência estimada	η	0,95
Máxima razão cíclica	D_{max}	0,45
Tensão de entrada	V_{in}	12 V

Fonte: Autoria própria

Cálculo da potência transferida:

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} 1,2 \quad (19)$$

$$P_{in} = \frac{20}{0,95} 1,2$$

$$P_{in} = 25,263 \text{ W}$$

Cálculo para definir qual núcleo de ferrite e carretel serão utilizados no indutor acoplado:

$$A_e A_w = \frac{P_{in} \cdot D_{max}}{\Delta B \cdot J_{max} \cdot K_p \cdot K_s \cdot K_w \cdot f_s} \cdot 1,2 \quad (20)$$

$$A_e A_w = 0,624 \text{ cm}^4$$

A tabela 3 relaciona os núcleos comerciais e algumas dimensões características do núcleo e do carretel:

Onde:

A_e =área transversal central;

A_w = área da janela do carretel;

l_e =comprimento magnético;

l_t =comprimento médio de uma espira;

V_e =volume do ferrite

Tabela 3 - Especificações dos núcleos comerciais.

Núcleo	Ae (cm ²)	Aw (cm ²)	le (cm)	lt (cm)	Ve (cm ³)	Peso (g)	AeAw (cm ⁴)
20	0,31	0,26	4,28	3,80	1,34		0,08
25/10/6	0,39	0,50	4,93		1,94	4,90	0,20
30/15/7	0,60	0,80	6,70	5,60	4,00	10,10	0,48
30/15/14	1,22	0,85	6,70	6,70	8,00	21,00	1,04
40/17/12	1,48	1,19	7,70	8,00	11,30	29,00	1,76
42/21/15	1,81	1,57	9,70	8,70	17,10	44,00	2,84
42/21/20	2,40	1,57	9,70	10,50	23,30	56,00	3,77
55/28/21	3,54	2,50	1,20	11,60	42,50	109,00	8,85

Fonte: Fabricante de núcleos de ferrite Thornton

Por meio do valor de AeAw calculado acima, considerando o valor comercial mais próximo, define-se o núcleo a ser utilizado:

- Núcleo 30/15/14
- Ae=1,22cm²
- Aw=0,85cm²
- Lt=6,7cm

Cálculo do número de espiras no primário:

$$N_p = \frac{V_{in} \cdot D_{max}}{A_e \cdot f_s \cdot B_{max}} \quad (21)$$

$$N_p = 8,852$$

$$N_p = 9$$

Cálculo do número de espiras no secundário:

$$N_s = N_p \frac{V_{out}(1 - D_{max})}{(V_{in})D_{max}} \quad (22)$$

$$N_s = 68,949$$

$$N_s = 69$$

Cálculo para determinar a área e bitola do fio de cobre do primário:

$$S_{Lp} = \frac{I_{Lp_rms}}{J_{max}} \quad (23)$$

$$S_{Lp} = \frac{3,5 \text{ A}}{350 \text{ A/cm}^2}$$

$$S_{Lp} = 1 \text{ mm}^2$$

$$bitola\left(\frac{S_{Lp}}{cm^2}\right) = 17$$

Cálculo para determinar a limitação do efeito skin:

$$S_{max} = \left(\frac{\pi \cdot 7,5 \text{ cm}^2}{f_s \cdot s}\right) \quad (24)$$

$$S_{max} = 0,707 \text{ mm}^2$$

$$bitola\left(\frac{S_{max}}{cm^2}\right) = 18$$

Número de fios em paralelo do fio de bitola máxima no primário:

$$N_{Cond1} = \text{ceil}\left(\frac{S_{Lp}}{S_{max}}\right) \quad (25)$$

$$N_{Cond1} = 2$$

Cálculo para determinar a área e bitola do fio de cobre do secundário:

$$S_{Ls} = \frac{I_{Ls_rms}}{J_{max}} \quad (26)$$

$$S_{Ls} = \frac{434 \text{ mA}}{350 \text{ A/cm}^2}$$

$$S_{Ls} = 0,124 \text{ mm}^2$$

$$bitola\left(\frac{S_{Ls}}{cm^2}\right) = 26$$

Número de fios em paralelo do fio de bitola máxima no secundário:

$$N_{Cond2} = \text{ceil}\left(\frac{S_{Ls}}{S_{max}}\right) \quad (27)$$

$$N_{Cond1} = 1$$

Dessa forma, deve-se recalculer a área que será utilizada pelo novo condutor.

Área do condutor do primário:

$$S_{awg18} = 0,52 \text{ mm}^2 \quad (28)$$

Cálculo da nova área do primário:

$$A_p = \frac{N_p \cdot N_{cond1} \cdot S_{awg18}}{K_p \cdot K_w} \quad (29)$$

$$A_p = 36,826 \text{ mm}^2$$

Área do condutor do secundário:

$$S_{awg26} = 0,13 \text{ mm}^2 \quad (30)$$

Cálculo da nova área do primário:

$$A_s = \frac{N_s \cdot N_{cond2} \cdot S_{awg26}}{K_p \cdot K_w} \quad (31)$$

$$A_p = 35,853 \text{ mm}^2$$

Cálculo da área total:

$$A_{total} = A_p + A_s \quad (32)$$

$$A_{tot} = 72,68 \text{ mm}^2$$

Se a área total A_{tot} é menor que a área A_w do núcleo escolhido anteriormente, pode-se utilizar o núcleo escolhido:

$$A_{tot} = 72,68 \text{ mm}^2 \quad (33)$$

$$A_w = 85 \text{ mm}^2$$

Cálculo do comprimento aproximado do fio do primário:

$$Lenght1 = N_p \cdot N_{cond1} \cdot l_t \quad (34)$$

$$Lenght1 = 1,186 \text{ m}$$

Cálculo do comprimento aproximado do fio do secundário:

$$Lenght2 = N_s \cdot N_{cond2} \cdot l_t \quad (35)$$

$$Lenght2 = 4,62 \text{ m}$$

A tabela 4 traz o resumo dos dados técnicos para facilitar a visualização das informações ao confeccionar o indutor acoplado.

Tabela 4 – Resumo de dados para fabricação do indutor acoplado

Descrição	Símbolo	Valor
Indutância no primário	L_p	20,528 μH
Indutância no secundário	L_s	1,518 mH
Número de espiras no primário	$Round(N_p)$	9
Número de espiras no secundário	$Round(N_s)$	69
Número de condutores no primário	N_{cond1}	2
Número de condutores no secundário	N_{cond2}	1
Seção do fio no primário	$Sawg18$	0,52 mm^2
Seção do fio no secundário	$Sawg26$	0,13 mm^2
Comprimento aproximado do fio do primário	$Lenght1$	1,186 m
Comprimento aproximado do fio do secundário	$Lenght2$	4,62 m
Núcleo	$Core$	30/15/14

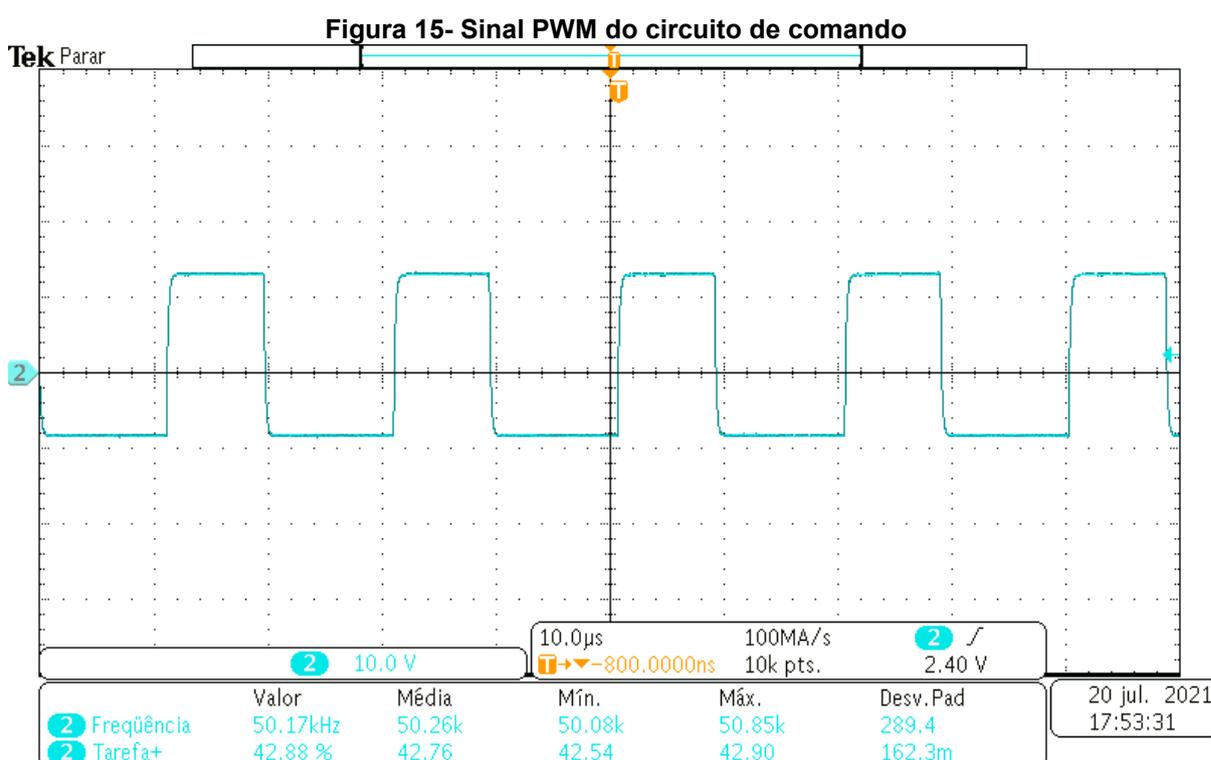
Fonte: Autoria própria

3.4 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para etapa de fabricação do protótipo funcional do conversor CC-CC da topologia flyback controlado por modulação por largura de pulso e do indutor acoplado foi utilizado o laboratório de eletrônica da UTFPR-GP onde existe bancadas, equipamentos de proteção individual, ferramentas específicas como osciloscópio e fonte de alimentação CC, entre outras.

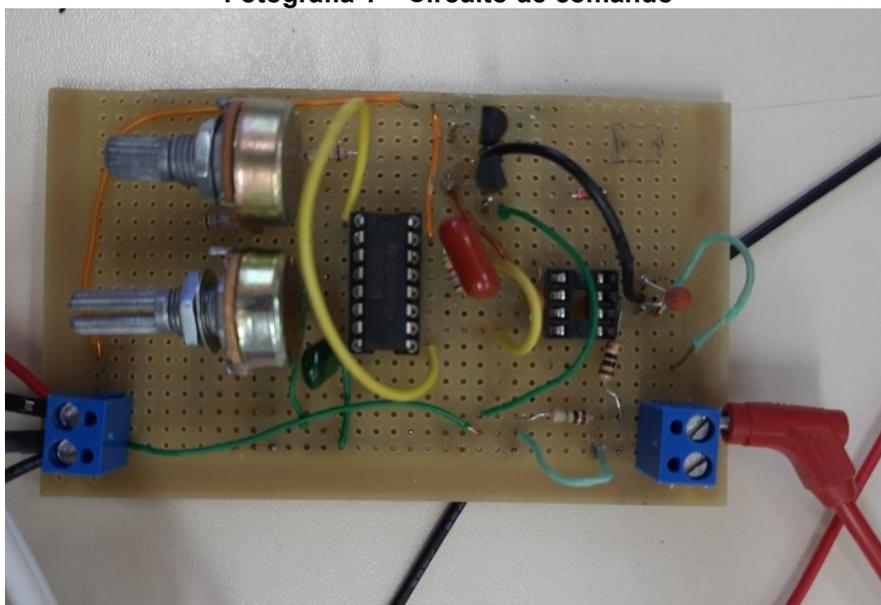
4 RESULTADOS

Logo após a montagem do conversor em bancada no laboratório de eletrônica, foi energizado por uma fonte CC o circuito de comando para verificar como estava o sinal PWM que fará o controle de chaveamento do MOSFET de acordo com a figura 15.



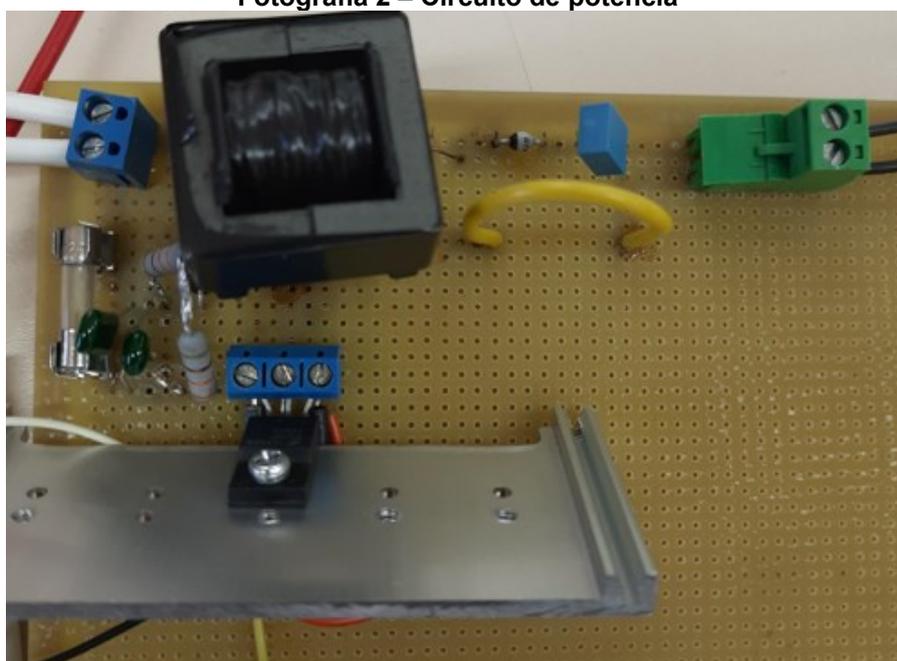
Fonte: Autoria própria

A fotografia 1 mostra a placa do comando responsável pelo PWM acima, onde o controlador de largura de pulso SG3524 (*Regulating Pulse Width Modulator*), comanda o tempo em que a chave ficará conduzindo. Os potenciômetros possuem a função de ajustar razão cíclica e frequência. A placa de comando foi montada conforme o diagrama eletrônico do *datasheet* do controlador apresentado no Anexo A.

Fotografia 1 – Circuito de comando

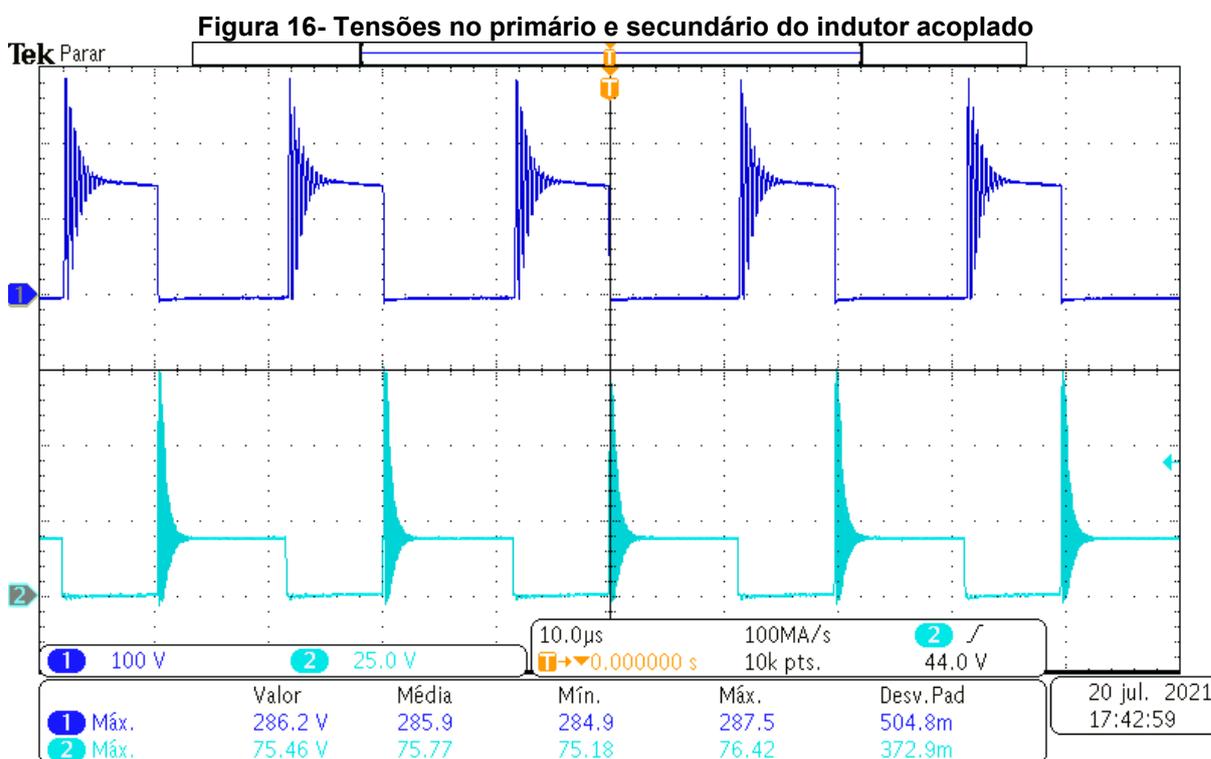
Fonte: Autoria própria

Como o comportamento do circuito de comando estava dentro do esperado nos testes, foi conectada o circuito de comando na chave do circuito de potência representado na Fotografia 2, segundo o diagrama eletrônico apresentado na figura 14.

Fotografia 2 – Circuito de potência

Fonte: Autoria própria

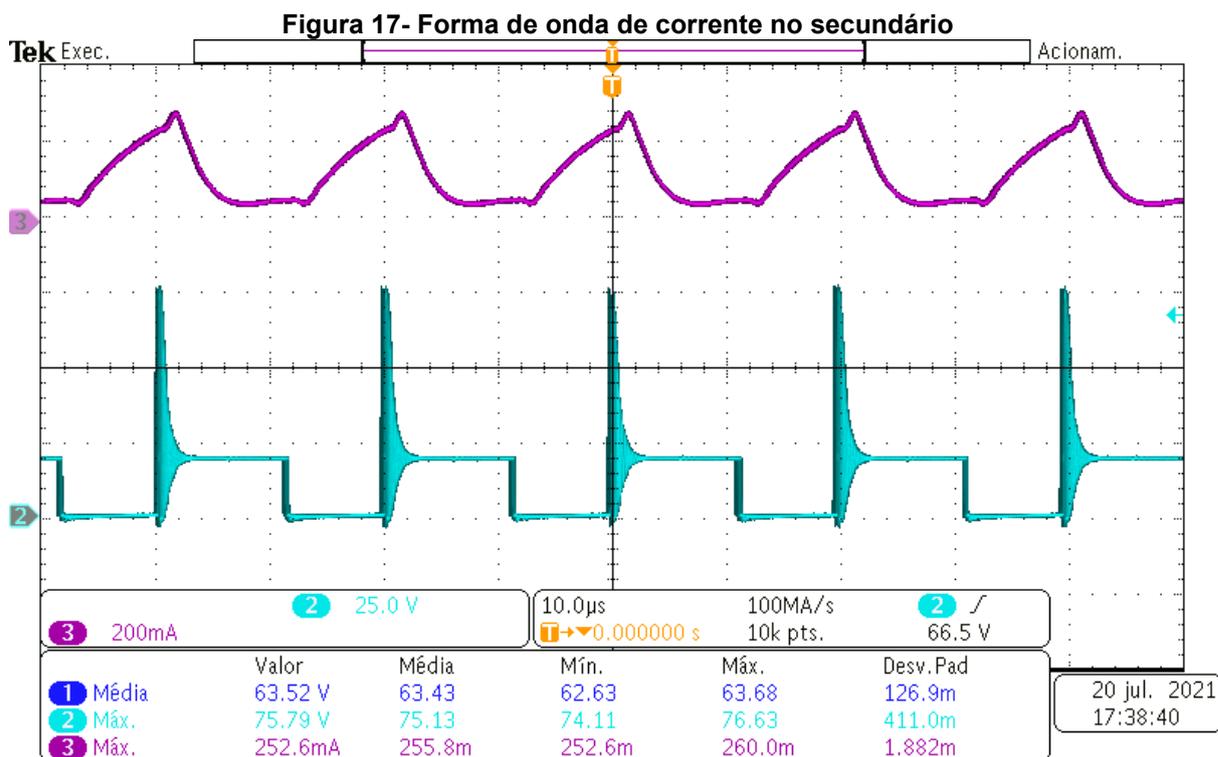
A Figura 16 representa através da linha azul escuro (1) a tensão entre dreno e source, que também pode ser chamada de tensão no enrolamento primário do indutor acoplado. Já a linha em azul claro (2) representa a tensão no enrolamento secundário do indutor acoplado.



Fonte: Autoria própria

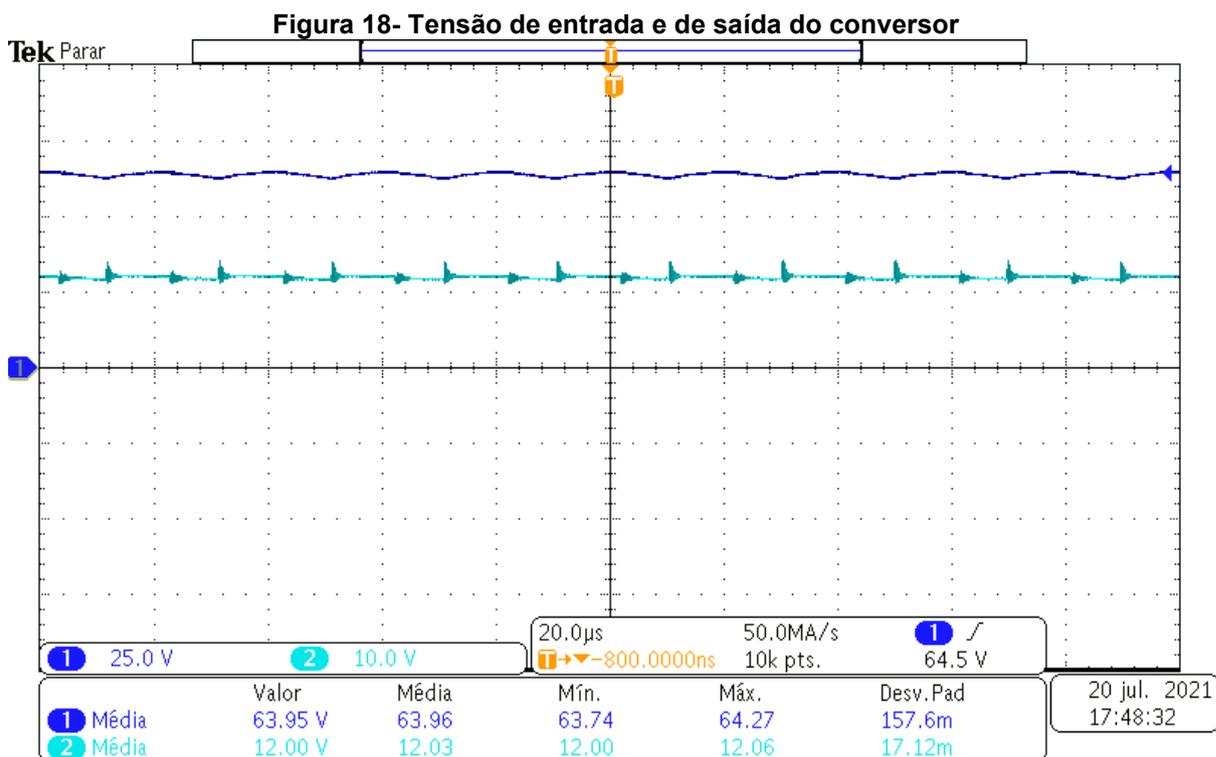
Nota-se um pico de tensão em ambos os casos, no primeiro em azul escuro (1) a tensão de pico aproxima-se de 300V, no segundo em azul claro (2) a tensão de pico aproxima-se de 75V, causados por indutâncias parasitas presente no circuito (trilhas, soldas, cabos, conexões, etc.). Além, do próprio indutor acoplado. Como a tensão de pico não ultrapassou a máxima tensão da chave de 300V, não houve problemas. Na simulação também ocorreu os picos de tensão em menor proporção, pois o circuito em software não possui indutâncias parasitas.

Na figura 17, observa-se na cor roxa a forma de onda da corrente no secundário operando em condução descontínua.



Fonte: Autoria própria

A figura 18, representa em azul claro o valor da tensão de entrada no conversor alimentado pela fonte do laboratório, em azul escuro a tensão de saída do conversor. Podemos constatar que o valor da tensão de saída ficou próximo do projetado de 64Vcc. Ocorre uma oscilação dentro da normalidade de aproximadamente 1,5% na tensão de saída de acordo com a escala do osciloscópio, por conta de o conversor flyback operar em condução descontínua, sendo o capacitor de saída o responsável por diminuir a oscilação, assim como ocorre nesta situação.



Fonte: Autoria própria

Além das medições com o osciloscópio, foram realizadas medições com voltímetro e amperímetro na saída do conversor. Onde o projetado é $V_{out}=64V$ e $I_{out}=300mA$. A fotografia 3 apresenta os valores medidos em bancada.

Fotografia 3 – Medições em bancada

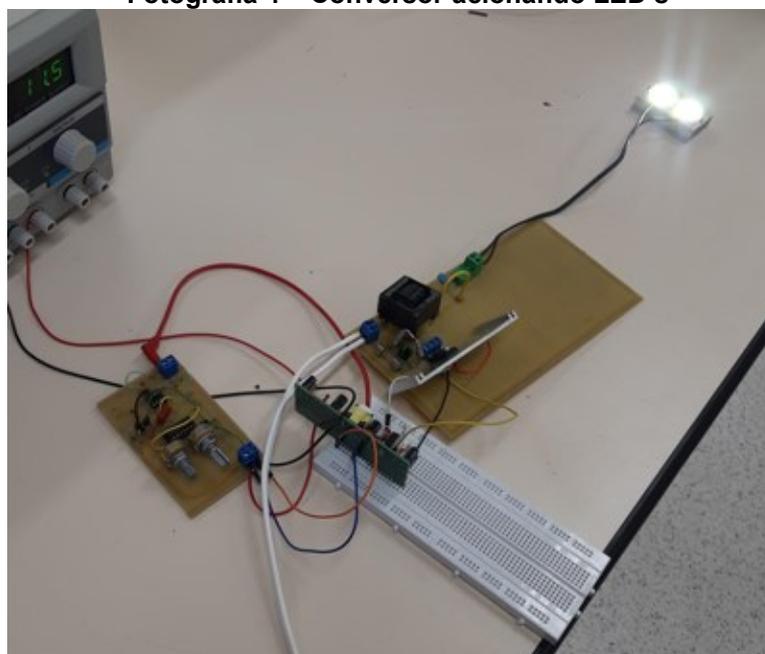


Fonte: Autoria própria

Nota-se uma pequena diferença nas medições realizadas, quando comparado os valores do voltímetro e osciloscópio, isso ocorre por fatores, como: desvios, sensibilidade, limite de erro, ruído e tolerância, fatores comuns em instrumentos de medição. Porém, não foi evidenciado inconsistências fora da tolerância.

Podemos ver na Fotografia 4 o conversor operando e acionando dois LED's COB de 10W 32Vcc ligados em série na alimentação de 64Vcc do conversor totalizando 20W de potência.

Fotografia 4 – Conversor acionando LED's

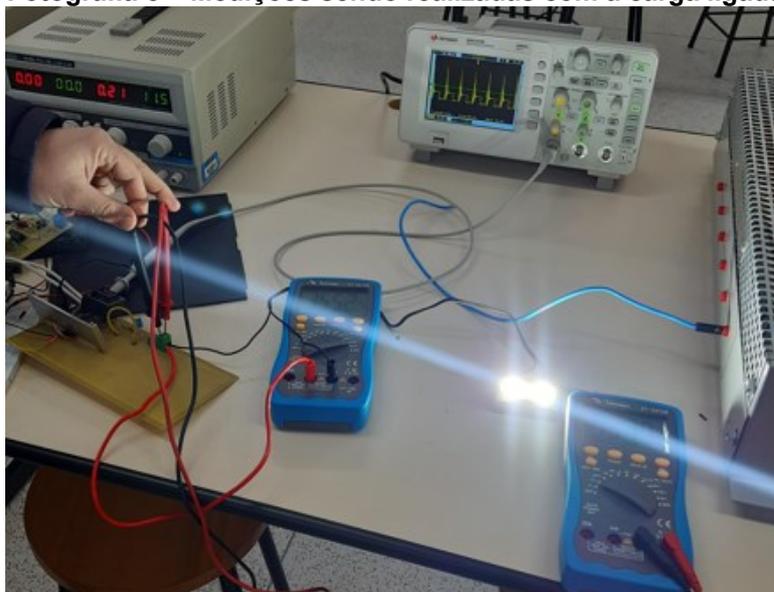


Fonte: Autoria própria

Percebe-se uma placa adicional entre a placa de comando e o MOSFET, conhecido como *driver* PWM com isolamento, cuja sua função é isolar o sinal PWM diminuindo os ruídos do sinal, uma vez que temos cargas indutivas associadas ao circuito. Este *driver* foi recomendado e cedido pelo orientador do trabalho.

A fotografia 5 mostra o momento onde foi executado as medições do circuito de potência com a carga de 20W dos LED's.

Fotografia 5 – Medições sendo realizadas com a carga ligada



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs apresentar a contextualização da energia fotovoltaica ressaltando sua importância no cenário das energias renováveis, onde foi analisado o panorama de energia solar no Brasil e abordado sobre os tipos de geração de sistemas fotovoltaicos.

A partir disto, foi evidenciado que para a aplicação da energia solar se faz necessário a utilização de conversores para elevar ou abaixar a tensão de módulos ou baterias. Além disso, foi discutido as diferentes topologias de conversores CC-CC auxiliando na escolha do flyback por sua versatilidade de ser abaixador e elevador de tensão e possuir a saída isolada da fonte.

Em seguida, realizado o dimensionamento e simulações do conversor flyback, onde foi determinado os parâmetros do projeto. Em laboratório foi implementado na prática a fabricação do indutor acoplado e montagem do protótipo do conversor flyback.

Por fim, na fase de testes e coleta de resultados constatou-se que o conversor operou de modo satisfatório acionando os LED's, atingindo o objetivo proposto no projeto. Com a ressalva do pico de tensão na chave causada por indutâncias parasitas, porém, é algo que não comprometeu o resultado final. Entretanto, observou-se que os valores calculados e simulados, de maneira geral se aproximam dos valores vistos na prática, através de medições com o osciloscópio, onde foi registrado as formas de onda, o que valida o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

BALFOUR, John; SHAW, Michael; NASH, Nicole Bremer. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações**. 4ª Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

CABRAL, Isabelle; VIEIRA, Rafael. **Viabilidade econômica x viabilidade ambiental do uso de energia fotovoltaica no caso brasileiro: uma abordagem no período recente**. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2012.

VILLALVA, Marcelo G. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 2ª Ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2015.

RÜTHER, Ricardo et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em 09 de junho de 2019.

MACHADO, Carolina T; MIRANDA, Fabio S. **Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão**. Revista virtual de química, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2014.

DA ROSA, Antonio Robson Oliveira; GASPARIN, Fabiano Perin. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

DO NASCIMENTO, Cássio Araújo. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Diss. Universidade Federal de Lavras, 2004.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 1º Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000.

SANTOS, Heron A; CARNEIRO, Tatiane C; ANTUNES, Fernando L. M. **Conversor para interligação de sistema de geração fotovoltaico à rede elétrica**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, 2018.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONCALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S., ALVES, A. R. **"Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná"**. 1a Edição. Curitiba: UTFPR, 2017.

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Conversores CC-CC básicos não isolados**. Florianópolis. Editoração do Autor, 2000.

ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIC, Dragan. **Fundamentals of power electronics**. Springer Science & Business Media, 2007.

MARTINS, Denizar C; BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: Conversores CC-CC básicos não isolados**. Florianópolis. 2° Edição. Editoração do Autor, 2006.

PETRY, Clóvis Antônio. **Introdução aos Conversores CC-CC**. Florianópolis: INEP/EEL – UFSC 2001.

PETRY, Clóvis Antônio. **Introdução aos Conversores CA-CA**. Florianópolis: INEP/EEL – UFSC 2001.

PINTO, Rafael Adaime et al. **Projeto e implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (LEDs)**. 2008.

ANEXO A - Datasheet e diagrama eletrônico do controlador SG3524.



SG2524, SG3524

SLV8077E – APRIL 1977 – REVISED JANUARY 2015

www.ti.com

8 Parameter Measurement Information

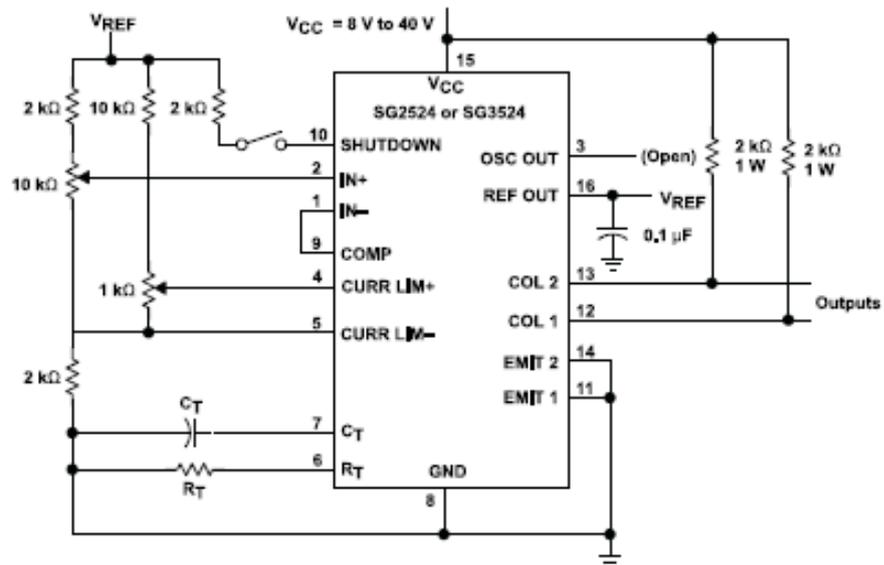


Figure 3. General Test Circuit

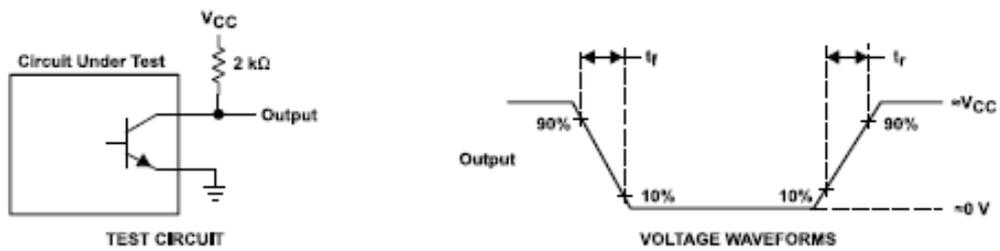


Figure 4. Switching Times

Fonte: Texas Instruments. Disponível em:

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sg3524.pdf?ts=1670777051136&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSG3524>