



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

FERNANDO HENRIQUE RIBEIRO WISNESCK

**Projeto de um regulador flyback bidirecional para aplicações
fotovoltaicas**

Guaratinguetá
2023

Fernando Henrique Ribeiro Wisnesck

**Projeto de um regulador flyback bidirecional para aplicações
fotovoltaicas**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Chagas Gouvêa

Guaratinguetá – SP

2023

W815p	<p>Wisneck, Fernando Henrique Ribeiro Projeto de um regulador flyback bidirecional para aplicações fotovoltaicas / Fernando Henrique Ribeiro Wisnesck – Guaratinguetá, 2023. 41 f : il. Bibliografia: f. 40-41</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Evaldo Chagas Gouvêa</p> <p>1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Células fotoelétricas.. 3. Energia solar. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.383.5</p>
-------	--


FERNANDO HENRIQUE RIBEIRO WISNESCK

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. EVALDO CHAGAS GOUVÊA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
UNESP-FEG


Prof.ª. Dr.ª. RAPHAELA CARVALHO MACHADO
UNESP-FEG

Janeiro 2023

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial à minha família que acreditou nos meus sonhos e nos momentos de grande dificuldade sempre se mostrou presente, como um grande pilar de sustentação, para apoiar meu crescimento e me dar segurança em todos os momentos.

Aos amigos que fiz durante esta jornada na universidade, que trouxeram leveza, alegria e conselhos em todas as etapas acadêmicas e na vida longe de casa.

Ao prof. Dr. Evaldo, que além de ser a pessoa que proporcionou a ideia do trabalho, se mostrou um orientador incrível, sendo sempre paciente, educado, atencioso e exemplos de profissional e profissionalismo a serem seguidos.

A todos professores, alunos e funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá com quem pude conviver ao longo dos anos de maneira amigável e respeitosa e que, de certa forma, contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

O sombreamento parcial em painéis fotovoltaicos acarreta em grandes problemas para o sistema de geração de energia, como a redução considerável na captação energética, surgimento de *hotspots* (pontos quentes) e o aparecimento de múltiplos pontos de potência máxima (MPPs) nas placas. Assim, para reduzir os impactos do sombreamento, este trabalho apresenta uma arquitetura de processamento de potência diferencial (DPP) de porta isolada, o *flyback* bidirecional, como uma solução eficaz e barata (por conta do pequeno número de componentes) para o problema. Todos os testes e simulações foram realizados utilizando o *software* computacional *LTSpice*, o qual é gratuito e se mostrou muito eficaz. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a estrutura desenvolvida diminui e a perda de energia em um sistema fotovoltaico parcialmente sombreado, em condições leves de sombreamento. Sendo assim, o sistema projetado demonstrou ser útil para se economizar tanto em recursos naturais como em financeiros, já que otimiza o sistema fotovoltaico.

PALAVRAS-CHAVE: Regulador *Flyback*; *LTSpice*; Sombreamento parcial; Painéis Fotovoltaicos.

ABSTRACT

Partial shading in photovoltaic panels leads to major problems for the power generation system, such as considerable reduction in energy harvesting, emergence of hot spots and the appearance of multiple maximum power points (MPPs) on the panels. Thus, to reduce the impacts of shading, this paper presents an isolated gate differential power processing (DPP) architecture, the bidirectional flyback, as an effective and inexpensive (because of the small number of components) solution to the problem. All tests and simulations were performed using the LTSpice computer software, which is free and proved to be very effective. The results obtained in this work showed that the developed structure reduces the energy loss in a partially shaded photovoltaic system under light shading conditions. Therefore, the designed system has proven to be useful for saving both natural and financial resources, as it optimizes the photovoltaic system.

KEY WORDS: Flyback Regulator; LTSpice; Partial Shading; Photovoltaic Panels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes	14
Figura 2 – Exemplo da composição de uma célula fotovoltaica	15
Figura 3 – Circuito de um diodo para uma célula fotovoltaica	15
Figura 4 – Símbolo do módulo fotovoltaico	16
Figura 5 – Módulos conectados em série (a) e em paralelo (b).....	17
Figura 6 – Módulos conectados em série e em paralelo	17
Figura 7 – Módulo de um painel fotovoltaico sombreado parcialmente	19
Figura 8 – Curvas corrente por tensão (esquerda) e potência por tensão (direita) do módulo fotovoltaico parcialmente sombreado	19
Figura 9 – Otimizador DCPO.....	20
Figura 10 – Arquitetura dos conversores DPP, PV – PV(a), PV – NIP(b), PV – IP(c).....	21
Figura 11 – Arquitetura básica conversor flyback.....	22
Figura 12 – Passagem de corrente com a chave S fechada	23
Figura 13 – Passagem de corrente com a chave S aberta.....	23
Figura 14 – Flyback com múltiplas saídas	23
Figura 15 – Circuito básico de controle	24
Figura 16 – Forma Padrão de Onda PWM.....	25
Figura 17 – Formação do Sinal PWM	26
Figura 18 – Princípio de operação de um flyback bidirecional.....	27
Figura 19 – Modelo de Célula Fotovoltaica no LTSpice	29
Figura 20 – Características elétricas do Módulo Solar Policristalino.....	31
Figura 21 – Símbolo criado para a Célula Fotovoltaica no LTSpice.....	32
Figura 22 – Montagem do primeiro flyback no sistema no LTSpice	33
Figura 23 – Montagem do segundo flyback no sistema no LTSpice.....	34
Figura 24 – Montagem das células fotovoltaicas no sistema no LTSpice	34
Figura 25 – Sinal PWM.....	35
Figura 26 – Sinal V(ctrl)	35
Figura 27 – Forma de onda da corrente no secundário	36
Figura 28 – Comparativo entre as potências fornecidas à carga	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre potências	37
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LMPP	<i>Local Maximum Power Point</i> – Ponto de Máxima Potência Local
GMPP	<i>Global Maximum Power Point</i> – Ponto de Máxima Potência Global
PV	<i>Photovoltaic Panels</i> – Paineis Fotovoltaicos
DCPO	<i>Direct Current Power Optimizers</i> – Otimizadores de Potência de Corrente Contínua
DPP	<i>Differential Power Processing</i> – Processadores Diferenciais de Potência
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação por Largura de Pulso
IP	<i>Isolated Port</i> – Porta Isolada
NIP	<i>Not Isolated Port</i> – Porta não Isolada
BEN	Balanco Energético Nacional
ARCE	Agência Reguladora do Estado do Ceará
MMGD	Geração Centralizada e Micro e Minigeração Distribuída
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	UM BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR.....	10
1.2	A IMPORTÂNCIA E OS DESTAQUES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL E NO MUNDO	11
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO	12
2	ASPECTOS CONCEITUAIS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	13
2.1	CÉLULA FOTOVOLTAICA E SEU CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE	15
2.2	TIPOS DE LIGAÇÕES ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	16
3	PROCESSADORES DIFERENCIAIS DE POTÊNCIA	20
3.1	CONVERSOR FLYBACK.....	22
3.1.1	Circuito de Controle	24
3.1.2	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)	25
3.1.3	Flyback Bidirecional	27
4	PROJETO DE UM REGULADOR <i>FLYBACK</i>	28
4.1	PROJETO E SIMULAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO	28
5	RESULTADOS	35
6	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica, desde os primórdios de sua utilização, é condição fundamental para os desenvolvimentos social e econômico das nações. Porém, a necessidade de utilização de recursos naturais para suas transformações e os impactos ambientais causados, com o passar do tempo, fizeram com que cada vez mais os sistemas tradicionais de geração de energia dessem espaço para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, que apresentam menor taxa de emissão de carbono e são viáveis economicamente.

De forma particular, neste cenário, destaca-se a geração de energia elétrica a partir do uso da radiação solar, por intermédio de painéis fotovoltaicos, pois é fonte de energia limpa, renovável e tem evoluído muito com o passar do tempo. Seu aprimoramento, cada vez mais, tem gerado, entre outros benefícios, um aproveitamento mais satisfatório no fornecimento de energia.

1.1 UM BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR

A necessidade de se aproveitar o sol para além de sua luminosidade e calor diretos é vista desde os tempos antigos. No passado, gregos e romanos já desenvolviam arquiteturas que possibilitavam espaços internos de suas construções se aquecer e se iluminar, basicamente construindo ao sul a parte mais importante de suas casas. (CARVALHO; CALVETE, 2010).

Em 1839, o físico francês, Edmond Becquerel, através de observações, notou que quando duas placas de latão estavam imersas em um eletrólito líquido produziam eletricidade quando expostas à radiação solar. Em 1883, o inventor americano chamado Charles Fritts, desenvolveu com folhas de selênio a primeira bateria solar. À época, a bateria foi vista com muita desconfiança, pois não se acreditava que era possível a geração de energia sem a queima de combustíveis (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Em 1973, a Crise do Petróleo, criou a necessidade em muitos países de se investir em fontes alternativas e renováveis de energia e o Brasil foi um deles. Neste contexto é correto dizer que a energia renovável que o Brasil mais investiu foi a hidráulica, apesar de saber do impacto ambiental por ela causado e do seu alto investimento inicial (EPE, 2014).

Somente em 2011 a primeira usina solar foi instalada no Brasil, no município de Tauá no interior do Ceará, com capacidade no fornecimento de energia para mais de mil famílias, segundo a Agência Reguladora do Estado do Ceará (ARCE), um forte indício de que o investimento no setor funcionaria.

1.2 A IMPORTÂNCIA E OS DESTAQUES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL E NO MUNDO

Para atender ao alto consumo de energia elétrica da população e ao mesmo tempo mitigar os impactos ambientais causados por fontes poluidoras, os sistemas fotovoltaicos têm sido uma das soluções mais utilizadas e desenvolvidas no mundo.

Juntas, energias solar e eólica, somam 70% da capacidade de expansão global até 2024 e uma das principais razões é o aumento da eficiência da conversão da energia, o que leva a uma queda dos custos da tecnologia envolvida e das características inerentes aos sistemas, o que, no caso da energia solar, tem permitido o desenvolvimento de projetos não apenas em larga escala, mas também em pequena escala, como no uso doméstico (de Freitas, 2022).

Esta característica em particular contribuiu para que sistemas fotovoltaicos correspondessem, no Brasil em 2021, à geração de 16,8 TWh de energia elétrica (geração centralizada e Micro e Minigeração Distribuída - MMGD), um aumento de 55,9% em relação ao ano anterior (BEN, 2022). Nos últimos três anos, sua capacidade global alcançou a marca de 1 TW e em abril de 2022 a previsão gerada foi de dobrar para 2,3 TW em 2025, como mostra o *Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026* (2022).

Mesmo com os impactos causados pela pandemia de Covid-19 no mundo, o mercado de energia solar, em menos de quatro anos, deve instalar em capacidade nova o dobro da geração de eletricidade de França e Alemanha somadas. (Agência EPBR, 2022).

Em alta, este mercado, com o avanço da tecnologia, tem conduzido a produção dos painéis fotovoltaicos de maneira diversificada, com a criação de modelos novos e, com isso, diversos métodos de projetos de sistemas fotovoltaicos começaram a ser desenvolvidos, com diversas características inovadoras.

Dentre os vários benefícios trazidos por estas características, destacam-se melhoras e resoluções de problemas sérios no fornecimento de energia, com ideias, muitas vezes, econômicas e eficazes. Um exemplo a ser citado seria o caso dos problemas gerados pelo sombreamento parcial em painéis fotovoltaicos, que costuma ter como causa as nuvens em dias chuvosos ou mais nublados, poeira, vegetação, construções próximas, antenas, caixas d'água ou qualquer outro objeto próximo ao local da instalação.

Um método simples, eficaz e relativamente barato que surge como uma solução para mitigar os impactos causados pelo sombreamento parcial em painéis fotovoltaicos, como redução na captação de energia, pontos de calor excessivo e o surgimento de múltiplos pontos

de potência máxima, consiste na utilização de mecanismos de processamento diferencial de potência de porta isolada, contando com o uso da arquitetura do conversor Flyback Bidirecional.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desse trabalho é verificar se o processamento diferencial de potência com Flyback Bidirecional aumenta a eficiência na captação de energia de painéis fotovoltaicos em condições adversas de iluminação.

2 ASPECTOS CONCEITUAIS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O painel fotovoltaico é formado basicamente por dois componentes fundamentais, as células e os módulos fotovoltaicos.

As células são, em suma, unidades básicas projetadas para produzir uma conversão direta de energia solar em elétrica. Os módulos são unidades formadas pela junção de células, que ao serem interligadas eletricamente e encapsuladas da maneira correta, geram eletricidade. Um único módulo ou a interligação elétrica adequada de mais módulos fotovoltaicos, formando uma estrutura única, denomina-se painel fotovoltaico.

Na natureza os materiais que são caracterizados por terem uma banda de valência sem elétrons à 0 K, comportando-se como isolantes. Os materiais que, em situações cotidianas de temperatura, possuem banda de valência totalmente preenchida por elétrons denominam-se semicondutores.

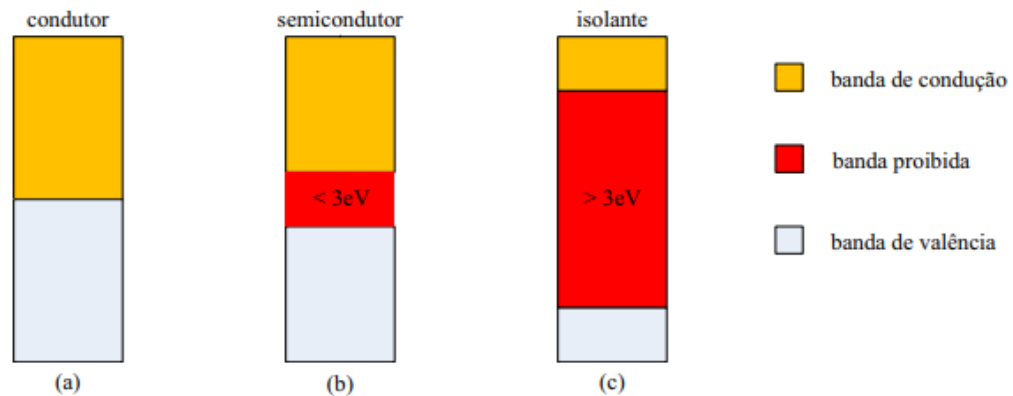
Os grupos 14 e 16 da Tabela Periódica contém a maior parte dos elementos semicondutores, contemplando o Carbono (C), Silício (Si), Germânio (Ge), Arsênio (As), Fósforo (P), entre outros.

Um material semicondutor diferencia-se dos demais por conta da separação entre duas de suas bandas de energia permitidas e esta separação pode atingir uma energia de até 3eV. A Figura 1 ilustra um comparativo entre as bandas de energia de materiais condutores, semicondutores e isolantes.

Por conta das bandas de energia, um material semicondutor aumenta a sua condutividade de acordo com o aumento de temperatura, por causa da agitação dos elétrons que se movimentam da banda de valência para a de condução.

Uma propriedade essencial para o funcionamento das células fotovoltaicas é a de que os fótons, advindos da luz solar, geram uma excitação nos elétrons até a banda de condução, caso a energia recebida seja maior do que a da banda de valência do material. Esta propriedade, por si só, não garante que as células fotovoltaicas funcionem, há a necessidade de que haja uma estrutura adequada para coletar os elétrons agitados e gerar uma corrente útil.

Figura 1 – Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes



Fonte: Pinho, Galdino (2014)

O Silício é o semicondutor mais utilizado, pois seus átomos com quatro elétrons de ligação formam rede cristalina quando se ligam aos vizinhos. O fósforo por exemplo, quando inserido, por ter cinco elétrons de ligação, deixará um em excesso, com ligação fraca ao seu átomo de origem, fazendo com que pouca energia térmica seja necessária para que este elétron se movimente entre bandas até a de condução. Neste caso, por esta característica, o Fósforo denomina-se como dopante *n* ou impureza *n*.

Seguindo a mesma lógica, ao se adicionar o boro, por ter três elétrons de ligação, um ficará faltante. Tal falta recebe o nome de lacuna ou buraco, fazendo com que com pouca energia térmica a lacuna se desloque pela movimentação de um elétron do local vizinho até sua posição. Por esta característica o Boro é chamado de *aceitador de elétrons* ou *dopante p* (GPEA; USP, 2014).

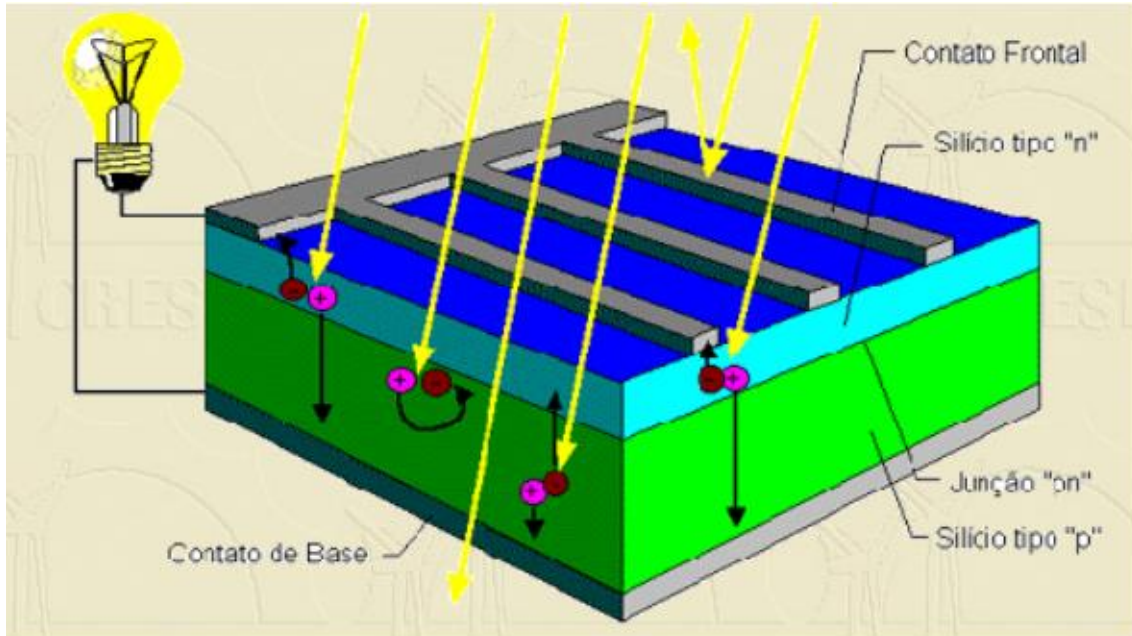
Partindo destes conceitos, ao se adicionar proporcionalmente átomos de Boro e de Fósforo em Silício puro, será formado o que se denomina *junção pn*, como pode ser observado na Figura 2.

Na *junção pn* o excedente de elétrons da região *n* se movimenta para a região *p*, fazendo com que na região *n* haja um acúmulo de cargas positivas e na região *p* negativas. Os elétrons que vão do lado *n* para o *p* encontram as lacunas, fazendo com que a região *n* fique com cargas negativas fixas.

Essa difusão de elétrons se interrompe quando o excesso de cargas positivas e negativas das regiões produz um campo elétrico que impede a passagem das lacunas da região *p* para *n* e dos elétrons da região *n* para *p*. Este fato, após equilíbrio estabelecido, cria uma zona

de cargas negativas e positivas chamada de zona de depleção ou de carga espacial.

Figura 2 – Exemplo da composição de uma célula fotovoltaica



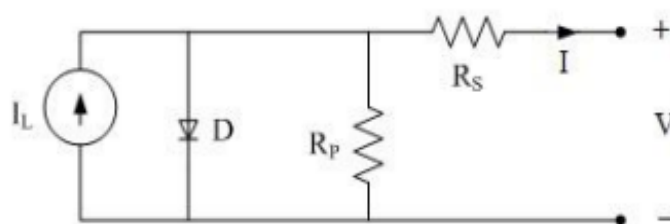
Fonte: GPEA, USP (2014)

Com a quantidade de energia necessária sobre a junção pn , pares de elétron-lacuna serão formados e uma corrente elétrica irá surgir onde o campo elétrico é diferente de zero, o que dará origem a uma diferença de potencial chamada de Efeito Fotovoltaico.

2.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA E SEU CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

O modelo com um único diodo do circuito elétrico equivalente ao funcionamento de uma célula fotovoltaica pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Circuito de um diodo para uma célula fotovoltaica

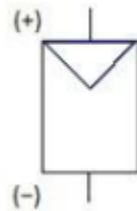


Fonte: Pinho, Galdino (2014)

Onde de R_p e R_s são resistências em paralelo e em série respectivamente, D representa o diodo, I_L é a corrente gerada pela radiação solar, I é a corrente nos terminais de saída e V é a tensão entre os terminais.

De acordo com a norma NBR10899, um conjunto de células fotovoltaicas formam, quando interligadas de maneira correta, uma unidade básica chamada módulo fotovoltaico que normalmente é representada pela imagem ilustrada pela Figura 4.

Figura 4 – Símbolo do módulo fotovoltaico



Fonte: Pinho, Galdino (2014)

2.2 TIPOS DE LIGAÇÕES ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

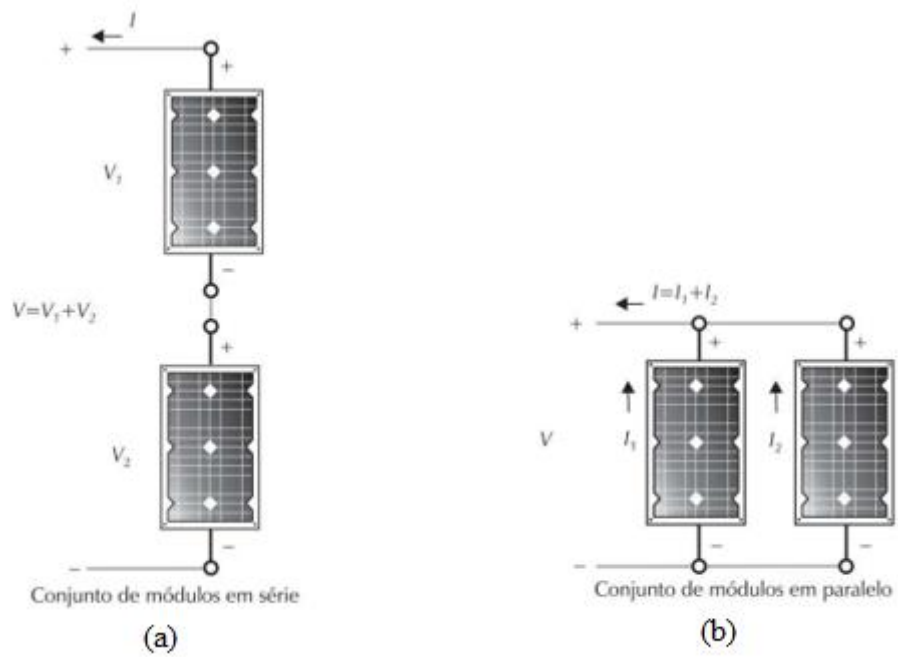
Há duas possibilidades muito utilizadas de se conectar módulos fotovoltaicos, são elas: em série ou em paralelo. A escolha de como ligá-los está atrelada ao que está conectado a eles, se o objetivo final é entregar alta tensão ou corrente.

Com a conexão em série, chamada de *array* (arranjo), a tensão das placas se soma e a corrente permanece a mesma, mas caso seja necessário que a corrente elétrica seja elevada, ligam-se em paralelo fazendo com que as correntes se somem e a tensão permaneça a mesma. A Figura 5 ilustra módulos conectados em série e em paralelo.

Ainda existe mais uma possibilidade de ligação entre módulos denominada mista, caracterizada por possuir ligações em série e em paralelo no mesmo conjunto, em que tensão de saída e corrente do sistema são somadas. Esse conjunto pode ser observado na Figura 6.

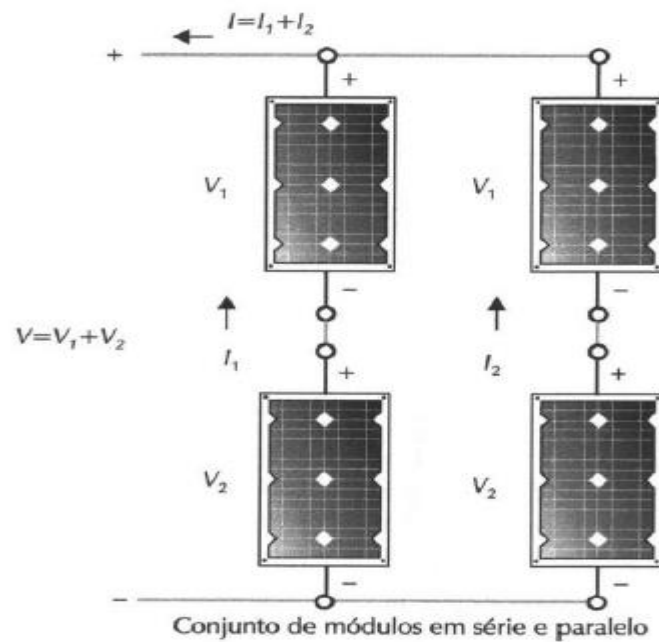
Desta forma os módulos formarão os painéis, que por sua vez farão parte de algo mais abrangente denominado sistema fotovoltaico.

Figura 5 – Módulos conectados em série (a) e em paralelo (b)



Fonte: adaptado de Villalva (2019)

Figura 6 – Módulos conectados em série e em paralelo



Fonte: Villalva (2019)

Em termos de conversão energética, atualmente, todos os sistemas fotovoltaicos possuem alta eficiência, porém, quando sujeitos a situações não ideais do dia a dia, suas capacidades de captação de energia são significativamente afetadas.

A falta de correspondência entre as células fotovoltaicas é a principal razão que afeta tais capacidades, sendo que, sua causa se dá, principalmente, por fatores internos, como o processo de degradação das células fotovoltaicas e por fatores externos, como poeira acumulada, diferença de ângulos e sombreamento parcial.

Com a incompatibilidade das células fotovoltaicas a perda de energia não será o único problema, poderá haver o efeito de *hotspots* (pontos quentes), que tendem a diminuir a vida útil dos módulos fotovoltaicos e afetar a confiabilidade do sistema como um todo.

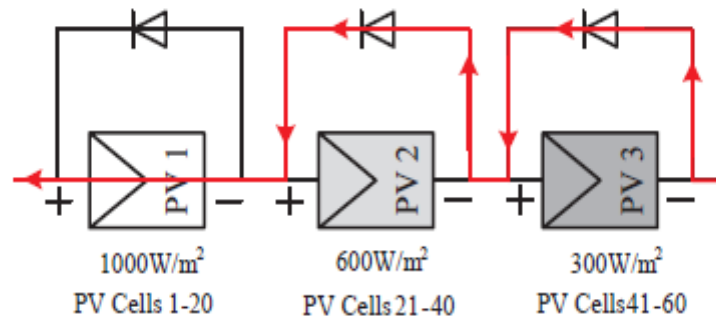
Diodos de *bypass* (desvio) são normalmente utilizados para prevenir as falhas advindas dos *hotspots*, porém sua proteção costuma ser limitada a um módulo fotovoltaico com no máximo vinte e quatro células e, ainda assim, apesar da proteção, a redução da potência de saída será significativa, já que uma célula fotovoltaica com diodo *bypass* não será capaz de funcionar corretamente e a corrente elétrica, com um pequeno número de células fotovoltaicas sombreadas, será significativamente afetada.

A Figura 7 ilustra um exemplo de um painel fotovoltaico, com destaques para o caminho do fluxo de corrente, três diodos de *bypass* em paralelo e uma simulação de sombreamento parcial os módulos PV2 e PV3 recebem menor irradiação solar, $600W/m^2$ e $300W/m^2$ respectivamente, quando comparados ao módulo PV1 com $1000W/m^2$.

Através dos métodos convencionais a potência de saída é prejudicada devido ao fato do sombreamento e, conseqüentemente, a curva de potência por tensão (P-V) apresentará três picos, sendo dois pontos de potência máxima locais (LMPPs) e um ponto de potência máxima global (GMPP), como ilustrado pela Figura 8.

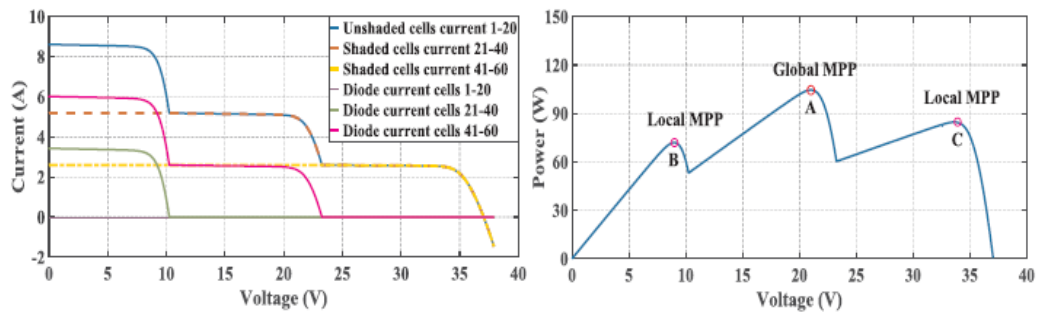
É possível observar também pela Figura 8 o gráfico de corrente por tensão (I-V) do painel fotovoltaico da Figura 7, deixando bem visível o quão grande pode ser o impacto do sombreamento parcial no fornecimento de energia.

Figura 7 – Módulo de um painel fotovoltaico sombreado parcialmente



Fonte: Chua et al. (2017)

Figura 8 – Curvas corrente por tensão (esquerda) e potência por tensão (direita) do módulo fotovoltaico parcialmente sombreado



Fonte: Chua et al. (2017)

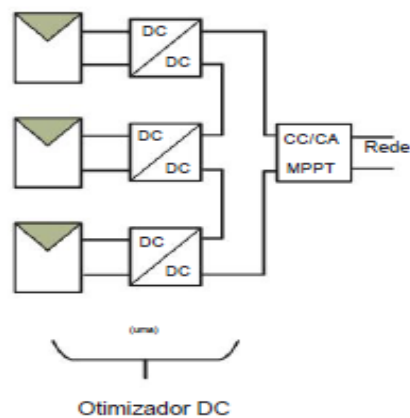
3 PROCESSADORES DIFERENCIAIS DE POTÊNCIA

Algumas técnicas clássicas de rastreamento de pontos de máxima potência não são capazes de detectar GMPP e LMPPs com facilidade, além disso, sob influência dos diodos de bypass, as células fotovoltaicas não conseguem disponibilizar energia adequadamente, fazendo com que a potência não seja recuperada pelos algoritmos dos rastreadores de GMPPs.

Como soluções para estes tipos de problemas são criadas arquiteturas como otimizadores de potência de corrente contínua (DCPO) e processadores diferenciais de potência (DPP).

O otimizador DCPO tem por função fazer com que um painel fotovoltaico continue trabalhando em seu máximo ponto de potência para diminuir o resultado da incompatibilidade entre as células fotovoltaicas. São conversores de nível conectados em cascata e são necessários para processar toda potência fornecida por cada painel a eficiência do sistema depende da eficiência de cada DCPO, como ilustrado pela Figura 9.

Figura 9 – Otimizador DCPO



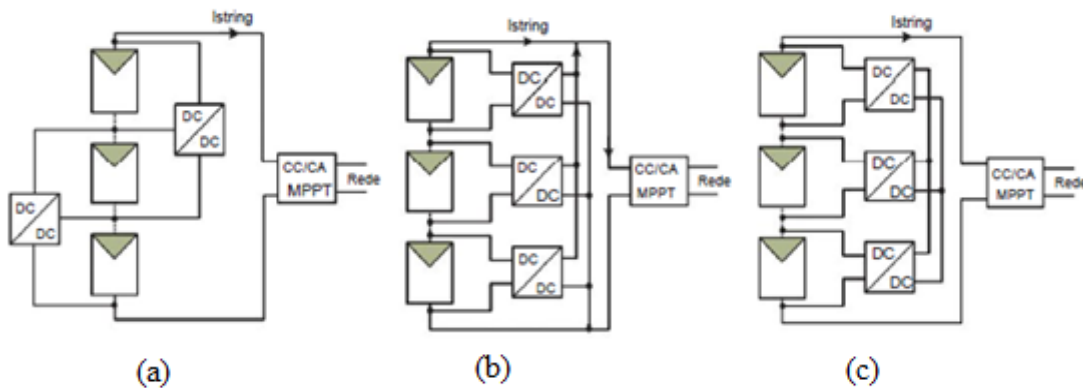
Fonte: Chua et al. (2017)

O processador diferencial de potência DPP tem como propósito capacitar cada componente conectado em série do PV (painel fotovoltaico) a operar em máxima potência, de forma semelhante ao DCPO. Quando não há incompatibilidade entre as células fotovoltaicas há a possibilidade do conversor DPP ficar desligado, não ocasionando em perda de energia. Quando a incompatibilidade existe, o DPP processa apenas parte da energia; como a maior

parte da potência flui pelos módulos, o DPP pode melhorar em muito a eficiência do sistema e reduzir custos de hardware.

As arquiteturas dos conversores DPP basicamente são divididas em três: conexão PV – PV, PV – para barramento de porta não isolado (PV-NIP) e PV – para porta isolada (PV-IP), como ilustrado pela Figura 10 respectivamente.

Figura 10 – Arquitetura dos conversores DPP, PV – PV(a), PV – NIP(b), PV – IP(c)



Fonte: adaptado de Chua et al. (2017)

Quando comparado ao DCPO, o conversor DC – DC (corrente contínua – corrente contínua) na arquitetura DPP necessita somente processar a potência diferencial que sofre a influência do sombreamento parcial, o que é um excelente ponto favorável em sua utilização.

Dentro das arquiteturas DPP ilustradas na Figura 10 destaca-se a PV – IP, pois as portas secundárias do conversor são conectadas em paralelo fazendo com que surja a formação de uma porta isolada, sendo assim, a tensão poderá ser selecionada de modo independente da tensão do módulo fotovoltaico. Esta característica traz flexibilidade, o que diminui o tamanho do circuito e a perda de potência no nível de módulo do conversor.

Sistemas DPP têm os conversores DC – DC como o aspecto principal, sendo que são amplamente discutidos e nomeados como equalizadores PV e balanceadores PV. Dentre as principais topologias utilizadas estão os conversores *buck-boost*, capacitores comutados e os conversores *flyback* (CHUA et al., 2017).

Para o desenvolvimento deste projeto o conversor *flyback* bidirecional é utilizado pois é um circuito com design prático (poucos componentes), baixo custo, alta eficiência e isolamento de tensão.

3.1 CONVERSOR FLYBACK

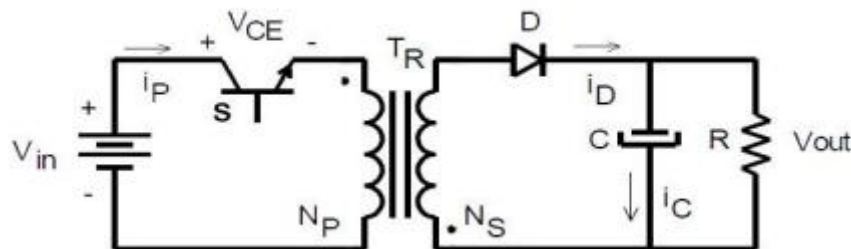
De certa forma o conversor CC-CC pode ser entendido como um sistema, pois é formado por semicondutores e por elementos passivos, como indutores e capacitores, em que a principal função é controlar o fluxo da potência da fonte de entrada para a fonte de saída.

Flyback é um modelo de conversor que pode ser usado tanto em conversões CC – CC como AC – CC (corrente alternada – corrente contínua), e tem semelhanças na arquitetura com o conversor buck-boost, mas, como vantagem, possui um transformador entre a entrada e a saída, sendo isolado galvanicamente.

Dentre os reguladores de tensão isolados, o flyback é o mais simples, pois usa o menor número de componentes. Seus enrolamentos do primário e do secundário do transformador devem sempre estar em sentidos opostos para que seu funcionamento ocorra de forma adequada.

A Figura 11 apresenta um conversor *flyback* em sua arquitetura básica.

Figura 11 – Arquitetura básica conversor *flyback*



Fonte: Bona, Garcia, Füllgraf (2010)

Baseado na Figura 11, quanto ao funcionamento do conversor *flyback*, pode-se dizer que:

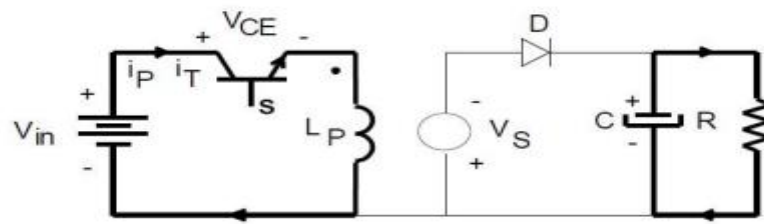
Quando a chave *S* estiver fechada, irá circular uma corrente pela chave e pelo primário do transformador, fazendo com que haja um armazenamento de energia no primário, mas que não será transferida para o secundário de imediato, por conta dos sentidos opostos dos enrolamentos. Deste modo, o diodo *D* fica polarizado inversamente.

Quando a chave *S* se abre, a energia que fica armazenada no primário do transformador, depois da inversão de polarização, passa para o secundário; o diodo *D* fica polarizado diretamente, o capacitor *C* é carregado e a carga *R* será alimentada.

Em um terceiro momento quando a chave S é fechada novamente, o enrolamento primário é carregado com energia magnética e como o capacitor C já está carregado, ele irá se descarregar sobre a carga na tentativa de manter tensão de saída V_{out} constante.

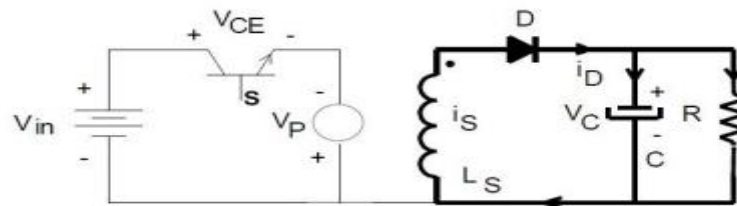
As Figuras 12 e 13 ilustram a passagem de corrente com a chave S fechada e aberta respectivamente.

Figura 12 – Passagem de corrente com a chave S fechada



Fonte: Bona, Garcia, Füllgraf (2010)

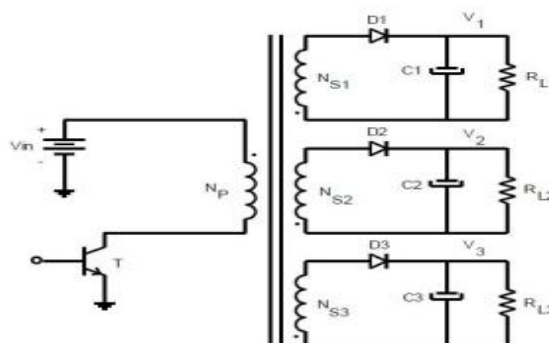
Figura 13 – Passagem de corrente com a chave S aberta



Fonte: Bona, Garcia, Füllgraf (2010)

O conversor *flyback*, através apenas da divisão dos secundários do transformador, possibilita uma montagem com várias saídas de tensão, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – *Flyback* com múltiplas saídas



Fonte: Bona, Garcia, Füllgraf (2010)

As maiores vantagens do conversor *flyback* são:

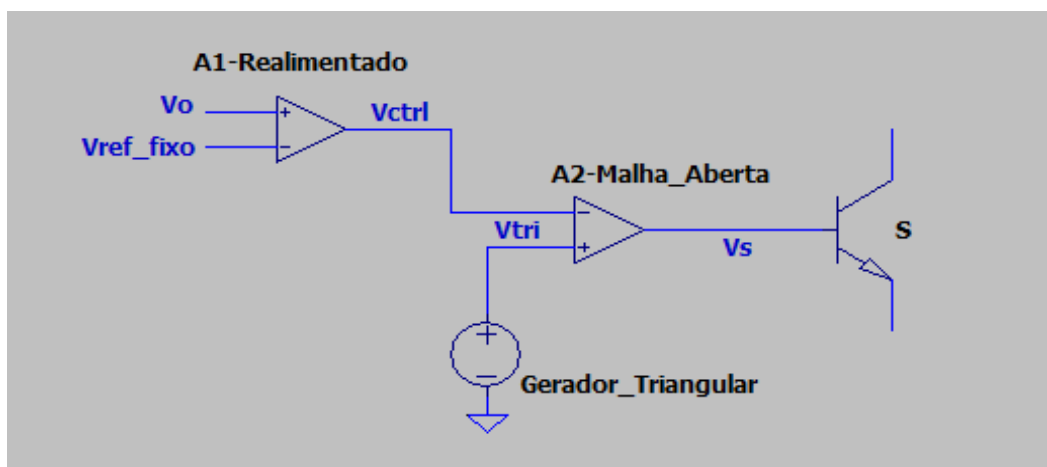
- Baixo Custo;
- Variação grande na corrente de saída;
- Resposta rápida a transientes;
- Diodos lentos nas saídas;
- Tensões nas saídas maiores que as tensões de entrada;
- As maiores desvantagens do conversor *flyback* são:
- Transformador de alta potência dependendo do circuito no qual o *flyback* estiver instalado;
- Problemas de instabilidade no circuito do filtro que podem ocorrer quando é instalado em série ao diodo do sistema um indutor extra.

3.1.1 Circuito de Controle

Além de precisar dos componentes discretos o conversor *flyback* também precisa de um circuito de controle que vai fazer a lógica de realimentação, ou seja, vai variar o tempo em que fica ligada e desligada a chave do transistor *S*, ilustrada nas Figuras 12 e 13, de forma a manter a tensão de saída estabilizada mesmo que haja variação na tensão de entrada.

O circuito de controle mais simples possível para se operar um regulador chaveado é ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Circuito básico de controle



Fonte: Elaborado pelo Autor

Primeiramente tem-se o amplificador operacional A1-realimentado que tem a tensão de saída do circuito com o *flyback*, V_o , em sua entrada não inversora, uma tensão de referência

fixa, V_{ref_fixo} , em sua entrada inversora. A tensão de controle V_{ctrl} é baseada na diferença de V_o e V_{ref_fixo} , sendo assim, quanto maior a diferença entre as tensões nas entradas do amplificador realimentado, maior será a tensão de controle gerada em sua saída

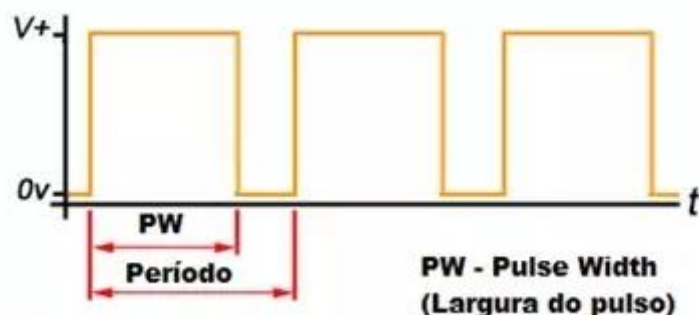
A saída do A1-realimentado, V_{ctrl} , é a entrada negativa de outro amplificador operacional A2-malha_aberta. Na entrada positiva do A2-malha_aberta há uma tensão triangular advinda de um gerador de forma de onda triangular, formando por fim, na saída do amplificador operacional. A2-malha_aberta, V_s , uma tensão binária, ou seja, é zero ou um valor de tensão V_{cc} . Desta forma pode ser feito o controle de chaveamento do transistor que faz parte da composição de um regulador *flyback* usando a modulação PWM.

3.1.2 Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)

A técnica PWM é muito utilizada em eletrônica, principalmente em fontes chaveadas, mas também pode ser utilizada para controlar luminosidade, velocidade de motores, entre outras funções.

O funcionamento do PWM, entre outras técnicas, está atrelado ao circuito de controle da Figura 15 por ser seu sinal de saída, sendo que seu formato de onda padrão pode ser observado na Figura 16.

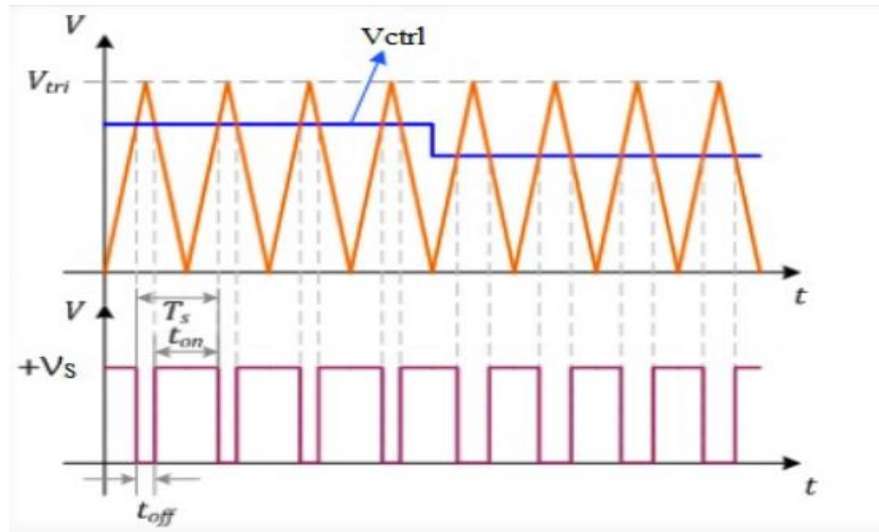
Figura 16 – Forma Padrão de Onda PWM



Fonte: Mundo da Elétrica (2022)

Este formato padrão do sinal PWM, que faz o controle de chaveamento de “liga” e “desliga” no circuito do *flyback*, é obtido analogicamente conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Formação do Sinal PWM



Fonte: adaptado de eltgeral (2022)

Desta forma é possível entender que o tempo de chaveamento ligado, t_{on} , e desligado, t_{off} , depende diretamente da tensão de controle V_{ctrl} , pois quanto maior seu valor, menor será t_{off} e maior será t_{on} , sendo que o contrário também é verdadeiro. É importante notar também que o período T_s não muda porque está diretamente atrelado ao período de onda triangular.

A partir das condições descritas anteriormente surge uma relação fundamental entre períodos chamada de *Duty Cycle* (Ciclo de Trabalho), que funciona como um parâmetro de controle da tensão de saída e é demonstrada de acordo com a equação (1):

$$\partial = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (1)$$

Sendo:

∂ = *Duty Cycle*;

T_s = Período;

t_{on} = Tempo ligado.

A equação (2) é característica de operação de um circuito *flyback*:

$$V_{out} = \frac{V_i}{N} \times \frac{\partial}{1 - \partial} \quad (2)$$

Sendo:

V_{out} = Tensão de saída;

V_i = Tensão de entrada;

N = Relação entre espiras do primário e secundário do transformador.

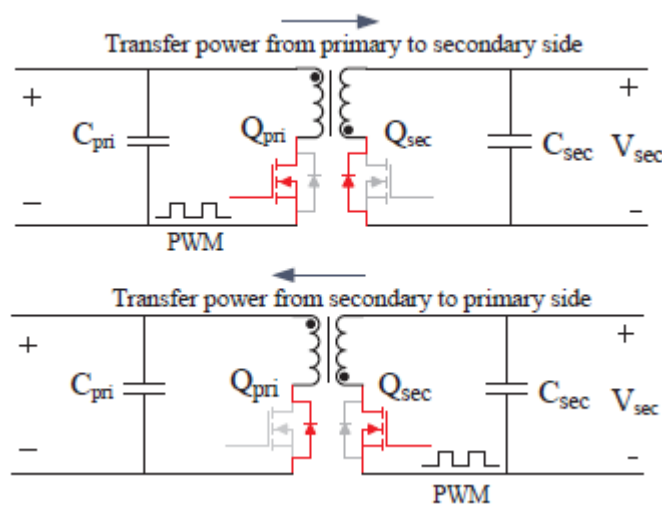
3.1.3 Flyback Bidirecional

Normalmente as topologias unidirecionais formam as bidirecionais quando adicionado mais um transistor ao circuito, fazendo com que tanto o primário quanto o secundário do transformador estejam conectados a transistores.

A operação do *Duty Cycle* é variável quando atua para equilibrar desajustes de tensão gerados por condições de incompatibilidade. Sua arquitetura DPP e o princípio de funcionamento para balanceamento de tensão podem ser observados na Figura 18.

Para que a energia seja transferida do primário do transformador para o secundário em um conversor *flyback* bidirecional, a chave do primário recebe o sinal PWM e a chave do secundário fica totalmente desligada. Se a transferência de energia for reversa a operação dos conversores será simétrica, característica esta que faz com que este tipo de conversor seja uma escolha muito boa para solucionar problemas de desequilíbrio de tensão em sistemas fotovoltaicos vulneráveis ao sombreamento parcial.

Figura 18 – Princípio de operação de um *flyback* bidirecional



Fonte: Chua et al. (2017)

4 PROJETO DE UM REGULADOR *FLYBACK*

Antes da montagem física de um circuito, a simulação por computador pode ser fundamental para a economia de recursos com a detecção de possíveis erros e inconsistências, o que permite que ajustes sejam feitos e posteriormente a validação.

Montar um circuito equivalente ao do *flyback* bidirecional e testá-lo em funcionamento em um sistema fotovoltaico com condições simuladas de sombreamento foi possível de maneira prática e eficiente graças ao uso do *software* de simulação computacional *LTSpice*.

4.1 PROJETO E SIMULAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

Para a montagem de um modelo de painel fotovoltaico que atingisse características similares às de um modelo real, foi desenvolvido um padrão de referência através da equação (3) para painéis fotovoltaicos no *LTSpice*:

$$.subckt PVstd irr v+ v- params \quad (3)$$

Sendo:

PVstd: o painel fotovoltaico *standard* (padrão);

irr: irradiação de entrada;

v+: terminal positivo de saída;

v-: terminal negativo de saída.

A temperatura de operação do painel fotovoltaico é a própria temperatura da simulação e ela é ajustada com uma diretiva *.temp*.

O circuito que representa uma célula do painel fotovoltaico pode ser observado na Figura 19 com os parâmetros presentes nas equações (4) à (8):

$$B1 = I = I_{ph} * V(irr)/1000 \quad (4)$$

$$D1 = DiodoPV \quad (5)$$

$$R1 = R = R_{sht} \quad (6)$$

$$R2 = R = R_{st} \quad (7)$$

$$R3 = 100Meg \quad (8)$$

Sendo:

R_{sht} : resistor em paralelo;

R_{st} : resistor em série;

$D1$: diodo;

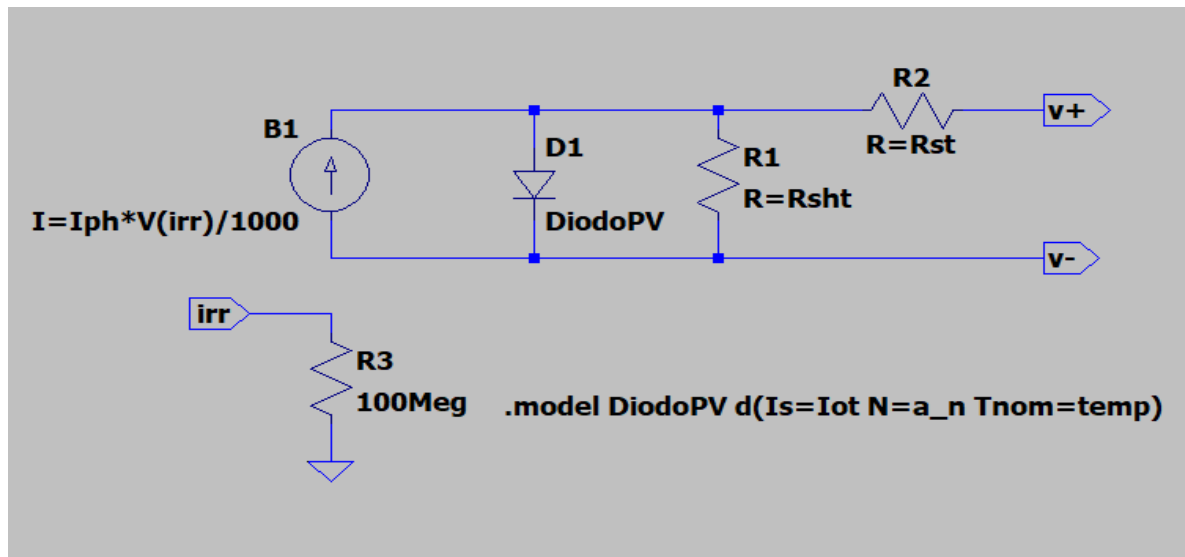
$R3$: resistor em série com o que representa a irradiação solar (irr);

$B1$: fonte de corrente;

I_{ph} : corrente elétrica proveniente da irradiação solar;

$V(irr)$: tensão proveniente da irradiação solar.

Figura 19 – Modelo de Célula Fotovoltaica no LTSpice



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os cálculos para o modelo apresentado na Figura 19 são:

As constantes físicas (9) e (10) a serem consideradas:

$$KB = 1.38e - 23 \quad (9)$$

$$q = 1.6e - 19 \quad (10)$$

Sendo:

q : carga do elétron.

KB : constante de Boltzmann;

Os parâmetros (11) à (14) corrigidos pela temperatura de simulação:

$$Voct = Voc * (1 - tk_voc * (25 - temp)) \quad (11)$$

$$Isct = Isc * (1 - tk_isc * (25 - temp)) \quad (12)$$

$$Vmpt = Vmp * (1 - tk_voc * (25 - temp)) \quad (13)$$

$$Impt = Imp * (1 - tk_isc * (25 - temp)) \quad (14)$$

Sendo:

Voc: tensão de circuito aberto;

Voct: tensão de circuito aberto corrigido pela temperatura;

Isc: corrente de curto-circuito;

Isct: corrente de curto-circuito corrigido pela temperatura;

Vmp: tensão no ponto de máxima potência;

Vmpt: tensão no ponto de máxima potência corrigido pela temperatura;

Imp: corrente no ponto de máxima potência;

Impt: corrente no ponto de máxima potência corrigido pela temperatura;

tk_voc: coeficiente de variação da tensão *Voc* (e *Vmp*) com a temperatura;

tk_isc: coeficiente de variação da corrente *Isc* (e *Imp*) com a temperatura;

temp: temperatura de simulação.

As equações (15) à (21) do modelo, baseado no trabalho de Cubas, Pinado e Victoria (2014):

$$a = 1.3 \quad (15)$$

$$a_n = a * Voc/0.7 \quad (16)$$

$$Rst = (Voct - Vmpt)/(16 * Impt) \quad (17)$$

$$Rsht = (5 * Vmpt)/(Isct - Impt) \quad (18)$$

$$Iph = Isct * (Rsht + Rst)/Rsht \quad (19)$$

$$vt = KB * (273 + temp)/q \quad (20)$$

$$Iot = ((Rst + Rsht) * Isct - Voct)/(Rsht * exp(Voct/(a_n * vt))) \quad (21)$$

Sendo:

a: ideality factor (fator de idealidade);

a_n: fator de idealidade para células fotovoltaicas dependendo da tensão de circuito aberto (*Voc*);

v_t : tensão térmica;

I_{ot} : dark saturation current (corrente de saturação escura) corrigida pela temperatura.

Na equação (22) o modelo do diodo:

$$.model\ DiodoPV\ d(Is = I_{ot} N = a_n T_{nom} = temp) \quad (22)$$

Baseado em algumas características elétricas, observáveis na Figura 20, do Módulo Solar Policristalino (300W – 320W) da SUNCECO, foram adotados os parâmetros (23) à (28) para as células do painel fotovoltaico:

$$V_{oc} = 44.71\ V \quad (23)$$

$$I_{sc} = 8.947\ A \quad (24)$$

$$V_{mp} = 37.23\ V \quad (25)$$

$$I_{mp} = 8.06\ A \quad (26)$$

$$tk_{voc} = -0.0034\ 1/^{\circ}C \quad (27)$$

$$tk_{isc} = 0.0005\ 1/^{\circ}C \quad (28)$$

Figura 20 – Características elétricas do Módulo Solar Policristalino

Electrical Characteristics

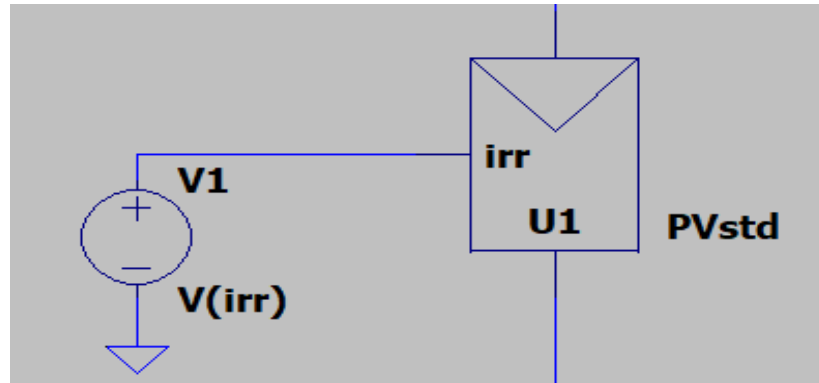
SOLAR CELLS	POLY-CRYSTALLINE 156 × 156 MM 72 PCS. (6×12) – 4 BUS BARS				
Maximum Power (Pmax)	300 Wp	305 Wp	310 Wp	315 Wp	320 Wp
Voltage at Pmax (Vmp)	37.23 V	37.24 V	37.32 V	37.46 V	37.62 V
Current at Pmax (Imp)	8.06 A	8.19 A	8.31 A	8.41 A	8.51 A
Open-Circuit Voltage (Voc)	44.71 V	44.72 V	44.76 V	44.82 V	44.84 V
Short-Circuit Current (Isc)	8.947 A	9.094 A	9.234 A	9.371 A	9.515 A
Maximum System Voltage (V DC)	1000 V (iec), 600 V (UL)				
Cell Efficiency	17.46 %	17.75 %	18.05 %	18.34 %	18.63 %
Module Efficiency	15.46 %	15.72 %	15.98 %	16.23 %	16.49 %
Number of By-pass Diodes	6				
Maximum Series Fuse	15 A				
Temperature Coefficient of Pmax	- 0.45 % / °C				
Temperature Coefficient of Voc	- 0.34 % / °C				
Temperature Coefficient of Isc	- 0.05 % / °C				
Nominal Operating Cell Temperature	47 ± 2 °C				

Fonte: SUNCECO (2022)

O painel fotovoltaico escolhido para este trabalho serve apenas como exemplo, sendo que todas as equações utilizadas também são válidas para outros modelos, bastando apenas mudar os dados obtidos do *datasheet* do fabricante.

Após finalizados os cálculos e adotados todos os parâmetros, um símbolo de visual mais simples e direto, como ilustrado pela Figura 21, foi criado na biblioteca do *LTSpice* para representar as células fotovoltaicas do projeto.

Figura 21 – Símbolo criado para a Célula Fotovoltaica no *LTSpice*



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com o término da elaboração das células, partiu-se para do desenvolvimento e incorporação do *flyback* ao projeto. Para tal, foi adotado um sinal PWM com *Duty cycle* de 0,5, frequência de chaveamento de 10 *kHz*, para um pulso com pico em 15 *V* e tempos de subida e descida de 1 *ns*.

O transformador do *flyback* foi configurado em uma relação 1:1 de espiras com indutância de 1,5 *mH* e, a princípio, para a simplificação de testes, a direção de chaveamento é manual, controlada por fontes controladoras de direção e fontes controladas por expressão matemática (*behavioural sources*) com comandos *if* que, de um lado seguem a lógica da equação (29) e do outro a lógica da equação (30).

$$V = \text{if}(v(\text{ctrl}) > 0.5, v(\text{PWM}), 0) \quad (29)$$

$$V = \text{if}(v(\text{ctrl}) < 0.5, v(\text{PWM}), 0) \quad (30)$$

Sendo:

$v(\text{ctrl})$: sinal da fonte controladora;

$v(\text{PWM})$: sinal PWM.

Sobre a equação (29), se a tensão da fonte controladora de direção, $v(\text{ctrl})$, for maior que 0.5 a chave está fechada e o sinal PWM está atuante, caso contrário, a chave está aberta e o sinal é zero. A equação (30) para o lado oposto do *flyback* basicamente segue a mesma

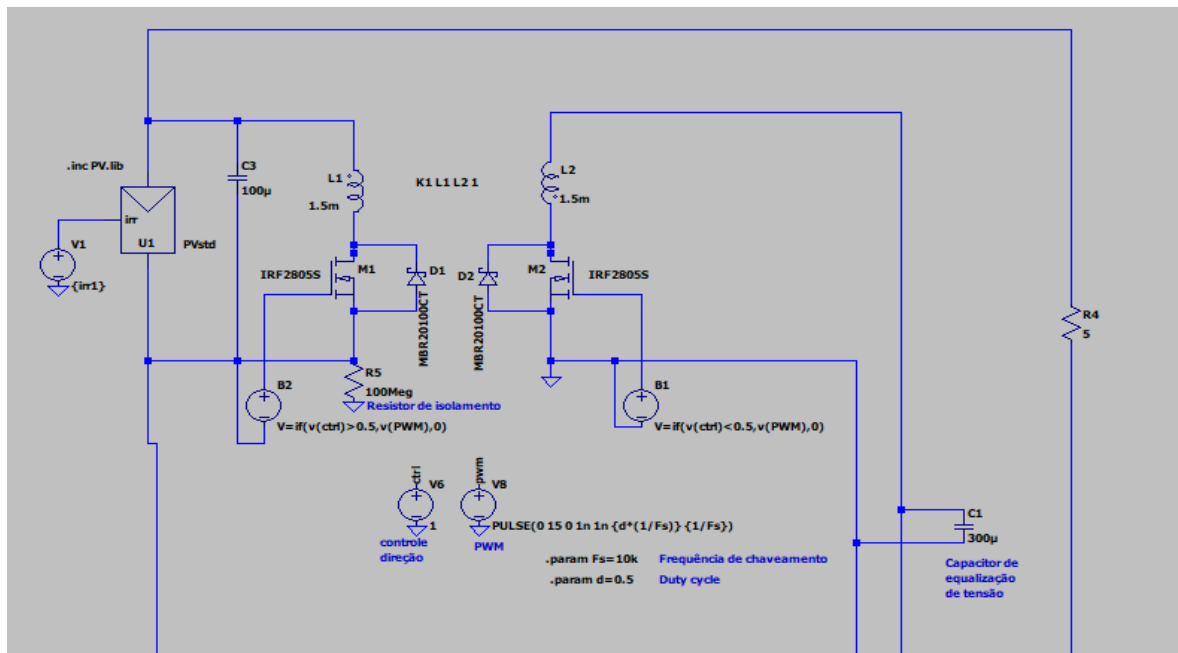
ideia: se a tensão da fonte controladora de direção $v(ctrl)$ for menor que 0.5 a chave está fechada e o sinal PWM está atuante, caso contrário, a chave está aberta e o sinal é zero.

Foram utilizados dois *flybacks* bidirecionais, ambos com capacitores de filtro de $100\ \mu F$ e um único capacitor de equalização de tensão de $300\ \mu F$ entre eles. Para simular o sombreamento parcial nas células fotovoltaicas foram adotados dois níveis de irradiação solar diferentes, uma, *irr1*, com valor de $1000\ W/m^2$ alimentando um *flyback* e a outra, *irr2*, com valor variável e inicialmente fixado em $700\ W/m^2$ alimentando o outro *flyback*.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram retirados dos *flybacks* os circuitos de realimentação, pois a simulação estava muito lenta e conseqüentemente estava muito difícil de se tirar resultados. Outro ponto importante a se destacar é que, apesar da configuração dos *flybacks* ser em tese isolada, foi necessário ligá-la ao terra, uma vez que a simulação continuava muito lenta e, após o procedimento, ficou em tempo viável.

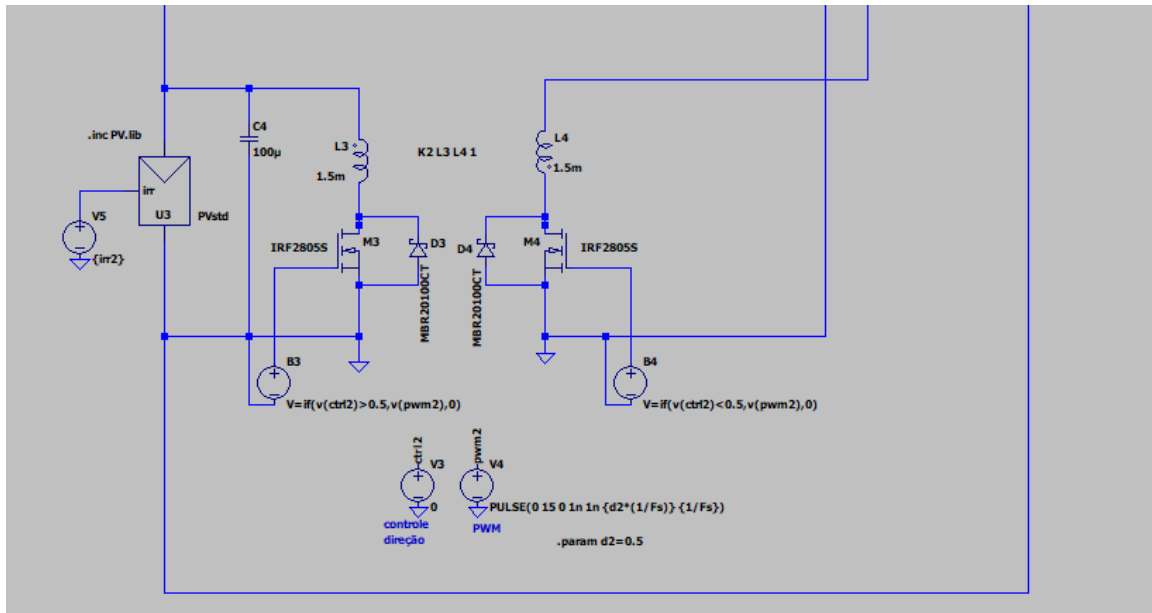
A Figuras 22, 23 e 24 ilustram como ficou a montagem do sistema.

Figura 22 – Montagem do primeiro *flyback* no sistema no LTSpice



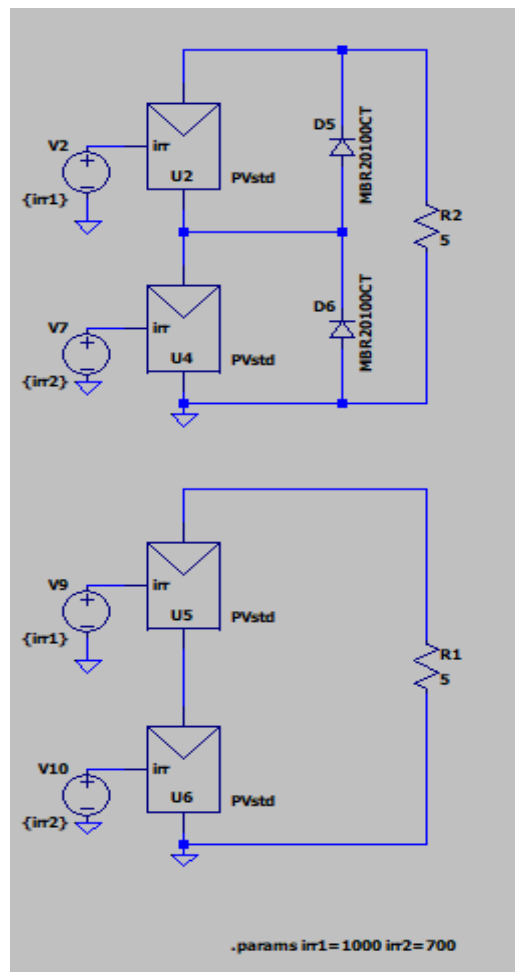
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 23 – Montagem do segundo *flyback* no sistema no *LTSpice*



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 24 – Montagem das células fotovoltaicas no sistema no *LTSpice*

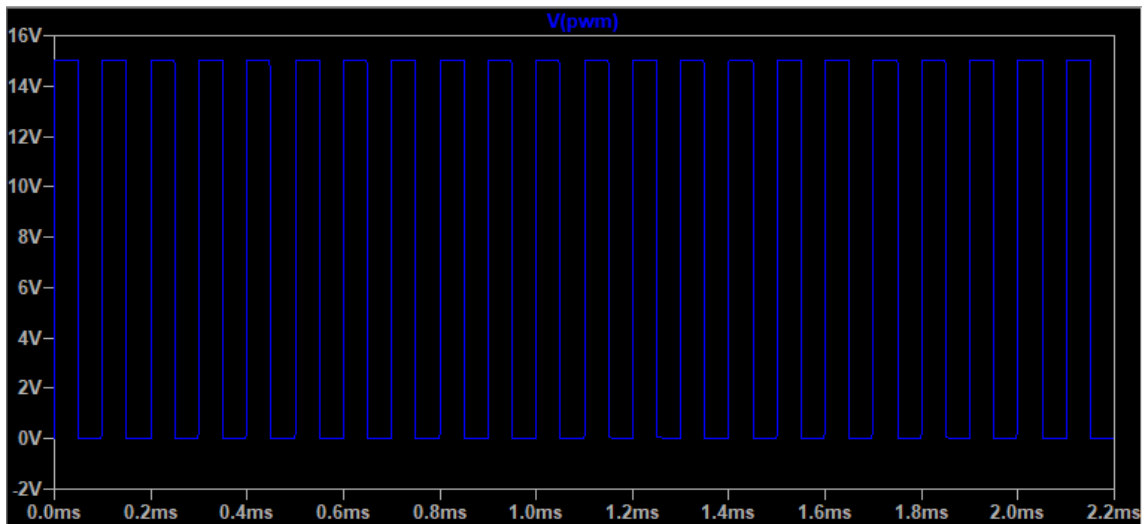


Fonte: Elaborado pelo Autor

5 RESULTADOS

Após a montagem do circuito ilustrado no Capítulo 5 foi elaborada sua simulação. As primeiras verificações feitas foram com relação aos sinais PWM e da tensão de controle ($V(ctrl)$) no chaveamento dos *flybacks*. Ambos os sinais, com comportamentos ilustrados nas Figuras 25 e 26, estavam em conformidade com o que fora programado para o projeto, ou seja, sinal PWM alimentando o lado do *flyback* com chaveamento fechado e 0V indicando chaveamento aberto do outro lado.

Figura 25 – Sinal PWM



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 26 – Sinal $V(ctrl)$

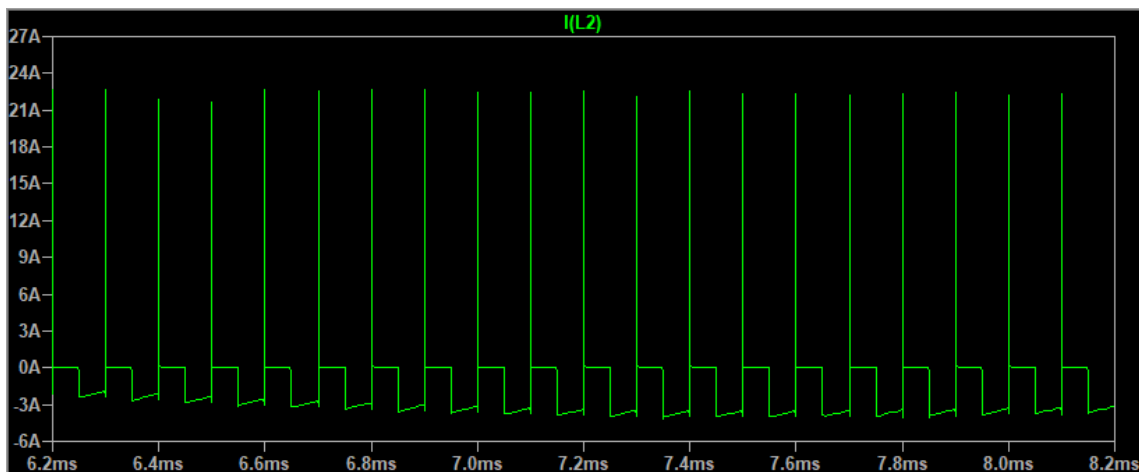


Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor

O primeiro *flyback* conectado à célula fotovoltaica com irradiação solar simulada de 1000 W/m^2 transfere a energia recebida do primário do transformador para o secundário, alimentando assim, a carga de 5Ω conectada no final do circuito. O segundo *flyback*, que recebe a energia advinda do painel com irradiação de 700 W/m^2 , faz o processo inverso para equilibrar o fornecimento de energia do sistema, transferindo energia do secundário do transformador para o primário, fazendo com que a menor produção de energia do PV com menor irradiação seja compensada, em vez de limitar a produção total de energia do arranjo fotovoltaico.

Na Figura 27 observa-se o formato de onda da corrente no enrolamento secundário do transformador do primeiro *flyback* operando em condução descontínua, pois, quando a energia durante a condução no indutor chega ao fim, ou seja, a corrente vai a zero, fica configurado o modo de condução descontínuo.

Figura 27 – Forma de onda da corrente no secundário do transformador

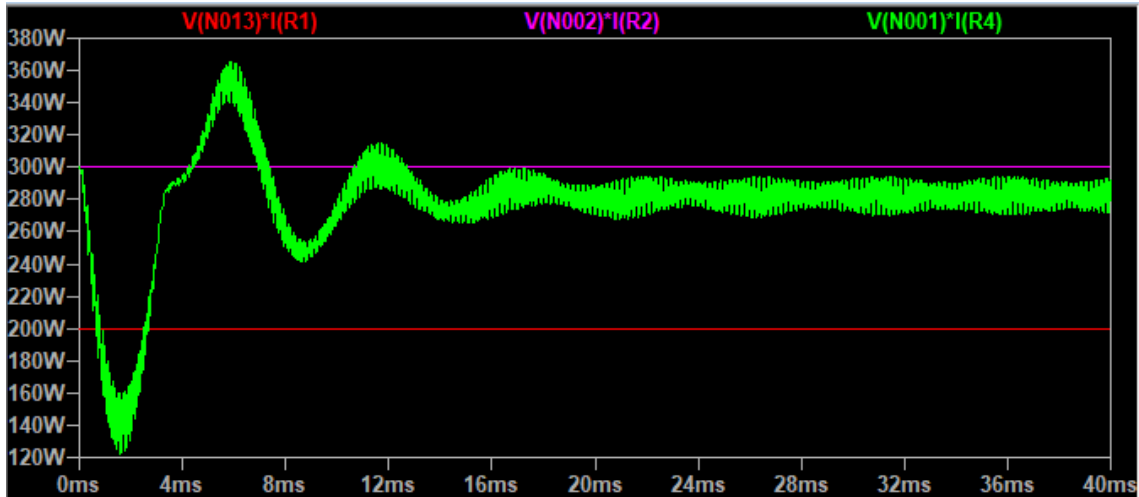


Fonte: Elaborado pelo Autor

Por conta da atuação conjunta do sistema, foi possível entregar à carga uma potência sem perdas consideráveis, pois, como ilustra o comparativo da Figura 28, as células fotovoltaicas sem diodos de proteção e sem processadores diferenciais de potência apresentaram um fornecimento de energia de aproximadamente 200 W . Separadamente, só com a adição dos diodos (MBR20100CT), como ilustrado pela Figura 24, o fornecimento de energia chegou próximo aos 300 W , muito similar ao caso da adição dos *flybacks*, pois o fornecimento de energia ficou próximo dos 293 W .

Na Figura 28, em vermelho, estão a forma de onda da potência fornecida à carga sem os diodos e sem os *flybacks*, em rosa, somente com os diodos e, em verde, com os circuitos dos *flybacks* inseridos.

Figura 28 – Comparativo entre as potências fornecidas à carga



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para deixar os resultados mais claros quanto ao funcionamento e eficácia do *flyback*, foram elaboradas comparações com diferentes níveis de irradiação *irr 2* nas células fotovoltaicas que alimentavam os *flybacks* e nos circuitos com e sem os diodos. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo entre Potências

Irradiação (W/m^2)	Potência na carga (W)		
	Circuito sem diodos	Circuito com diodos	Circuito <i>flyback</i>
900	324,18	324,18	354,01
800	258,17	301,49	324,28
750	227,88	301,05	305,31
700	199,44	300,74	293,47
600	148,21	300,31	266,21
500	104,54	299,99	234,82

Fonte: Elaborado pelo Autor

Como pode ser notado, os circuitos com os diodos e com os *flybacks* conseguiram, em condições de menores irradiações, fornecer muito mais potência à carga quando comparados ao circuito sem diodos e sem o auxílio de processadores diferenciais de potência.

Na análise comparativa é possível perceber o quão eficaz se mostra o desempenho da simples adição diodos de proteção em circuito parcialmente sombreado, porém há importante perda de energia a ser considerada em modelos a serem implementados na prática, pois os diodos são componentes passivos, portanto, grandes dissipadores de energia, já os processadores de diferenças de potência são circuitos ativos e se ajustam à condição de sombreamento dos painéis fotovoltaicos.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho o problema de incompatibilidade entre células fotovoltaicas, causado por módulos de painéis fotovoltaicos parcialmente sombreados, foi tratado com o uso da funcionalidade de processadores diferenciais de potência de porta isolada, neste caso, o *flyback* bidirecional.

O *software* de simulação usado para o desenvolvimento do trabalho, o *LTSpice*, é gratuito, se mostrou simples, eficaz e suportou a simulação com os recursos computacionais disponíveis, sendo um importante sinal da simplicidade de relações e de componentes exigidos pelo *flyback*.

O maior desafio do projeto foi estabelecer os parâmetros adequados, através das equações, para que fossem desenvolvidas no *LTSpice*, células fotovoltaicas que tivessem características próximas às da realidade, uma vez que diversas condições, como o ajuste por temperatura de simulação, tiveram que ser levadas em consideração, mas, de maneira geral, o projeto se demonstrou simples, fácil de implementar, de baixo custo (por ter poucos componentes) e adequado para compensar sombreamentos parciais.

Como resultado do trabalho, pela comparação feita dos dados da Tabela 1, foi possível perceber que o processador diferencial de potência é melhor até cerca 20 a 30% de diferença entre luminosidades, já quando as diferenças são grandes, com mais de 30% (700 W/m² ou menos), ele fica pior que os diodos, porém a grande vantagem em se utilizar os *flybacks* é que, apesar do circuito com diodos de proteção terem se saído bem sob condições de sombreamento parcial, os *flybacks* se ajustam à condição de sombreamento dos painéis fotovoltaicos, diferentemente do circuito somente com a adição de diodos de proteção, que dissipa muita energia.

Pode-se perceber pela realização deste trabalho, que os resultados obtidos se conformarem com o que era esperado, ou seja, os resultados do uso da ferramenta computacional e dos conceitos inerentes ao projeto agregarem substancialmente na redução do impacto do sombreamento parcial.

Em trabalhos futuros um bom desenvolvimento seria, após a verificação teórica do funcionamento do sistema, colocá-lo em prática, colhendo dados laboratoriais do projeto conectado a um sistema fotovoltaico real parcialmente sombreado. Outro ponto interessante seria o de elaborar comparações entre os sistemas com conexões PV – PV, PV-NIP e PV-IP, extraindo informações sobre qual seria a mais eficiente e adequada às funções fotovoltaicas propostas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA EPBR. **Capacidade global de energia solar deve chegar a 2,3 TW em 2025**, [2022]. Disponível em: <https://epbr.com.br/capacidade-global-de-energia-solar-deve-chegar-a-23-tw-em-2025/>. Acesso em: 27 out. 2022.
- AGÊNCIA REGULADORA DO ESTADO DO CEARÁ (ARCE). **Usina localizada em Tauá é pioneira na geração de energia fotovoltaica**, [2022]. Disponível em: <https://www.arce.ce.gov.br/2015/10/16/usina-localizada-em-taua-e-pioneira-na-geracao-de-energia-fotovoltaica/>. Acesso em: 03 jul. 2022.
- CARVALO, E. F. A.; CALVETE, M. J. F. Energia solar: um passado, um presente... um futuro auspicioso. **Revista virtual de química**, v. 2, n. 3, 2010.
- CHU, G. *et al.* Bidirectional flyback based isolated-port submodule differential power processing optimizer for photovoltaic applications. **Solar Energy**, v. 158. p. 929–940, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.053>>. Acesso em: 06 Jun. 2022.
- CHU, G. *et al.* Y. Actively clamped bidirectional flyback converter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 47. p. 770-779, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/41.857957>. Acesso em: 04 Jun. 2022.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Energia solar princípios e aplicações**, [2016]. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 02 jun. 2022.
- CUBAS, J.; PINDADO, S.; VICTORIA, M. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior, **Journal of Power Sources**, v. 247, p. 467-464, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.008>. Acesso em: 03 Nov. 2022.
- DE FREITAS, B. M. R. What's driving solar energy adoption in Brazil? Exploring settlement patterns of place and space. **Energy Research & Social Science**, v.89, p. 102660, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102660>. Acesso em: 26 Oct. 2022
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota técnica DEA 26/14: eficiência energética e geração distribuída para os próximos 10 anos (2014 – 2023)**, 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2026%20Efici%C3%AAncia%20Energ%C3%A9tica%20e%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa%20para%20os%20pr%C3%B3ximos%2010%20anos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.
- ERICKSON, R. W.; MAXIMOVIC, D. **Fundamentals of power electronics**. 2nd ed. New York: Klumer Academic Publishers, 2001.
- FADIGAS, E. A. F. A. Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo (GPEA)**, 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 19 set. 2022.
- CENÁRIOS SOLAR. **Global market outlook for solar power (2022-2026)**, [2022]. Disponível em: <https://cenariosolar.editorabrasilenergia.com.br/global-market-outlook-for-solar-power-2022-2026/>. Acesso em: 22 ago. 2022.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126 – 143, 2015.

MUNDO DA ELÉTRICA. **PWM – O que é e para que serve?**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/pwm-o-que-e-para-que-serve/>. Acesso em 03 out. 2022.

ELETRÔNICA GERAL. **O que é PWM?**. Disponível em: <https://eltgeral.com.br/o-que-e-pwm/>. Acesso em: 03 out. 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **CEPEL/CRESESB**, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 12 ago. 2022.

RANSOLIN, I. R. **Estudo, reprodução e análise de um conversor flyback operando em malha fechada para carga lenta em baterias de nobreak's**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6040/2/conversorflybackbateriasnobreak.pdf>. Acesso em: 23 set. 2022.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN), **Relatório Síntese**, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 17 ago. 2022.

SUNCECO, **300 W – 320 W Poly-crystalline solar module**, [2022]. Disponível em: <http://sunceco.com/wp-content/uploads/2017/01/SEP300-320.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2022.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, sistemas isolados e conectados à rede**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2019.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.