

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALEXANDRE WELTER PREISSLER

**ESTRATÉGIA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS COM A DIMINUIÇÃO DO NÚMERO DE SENSORES**

Alegrete

2018

ALEXANDRE WELTER PREISLER

**ESTRATÉGIA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS COM A DIMINUIÇÃO DO NÚMERO DE SENSORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Jumar Russi

Alegrete

2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

P924e Preissler, Alexandre Welter

ESTRATÉGIA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA
PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM A DIMINUIÇÃO DO NÚ-
MERO DE SENSORES / Alexandre Welter Preissler.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Uni-
versidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,
2018.

"Orientação: Jumar Russi".

1. Eletrônica de potência. 2. Observador por Mo-
dos Deslizantes. 3. Energia solar fotovoltaica. 4.
MPPT perturba e observa. I. Título.

ALEXANDRE WELTER PREISSLER

**ESTRATÉGIA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
COM A DIMINUIÇÃO DO NÚMERO DE SENSORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

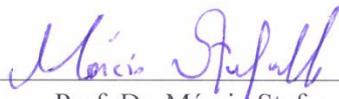
Área de Concentração: Eletrônica de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de junho de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Jumar Luís Russi
Orientador



Prof. Dr. Márcio Stefanello
UNIPAMPA



Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva
UNIPAMPA

*Aos meus pais, Sildo e Marli,
À minha irmã Alessandra,
Pelo amor, dedicação e incentivo.*

*À minha companheira Renata,
Pelo carinho, amor e incentivo dedicados ao
longo dessa jornada.*

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente aos meus pais, Sildo e Marli, por todo o amor, incentivo, apoio e paciência para que meu sonho se tornasse realidade. Muito obrigado por não medirem esforços em garantir o meu estudo e felicidade.

À minha irmã, Alessandra, por todo amor e apoio doados a mim, que me escutou quando eu precisava desabafar e me deu conselhos quando eu mais precisei. Obrigado por ser a melhor irmã que alguém poderia ter.

À minha companheira Renata, que sempre esteve presente nas boas e más situações, sempre me incentivou a continuar mesmo quando eu achava que estava tudo perdido, sempre foi compreensiva, paciente e amorosa. Sem você esta jornada teria sido muito mais difícil.

Aos professores, Jumar e Guilherme, pelos seus ensinamentos durante a realização deste trabalho, sempre me auxiliando no que eu necessitava com paciência e clareza. E minha gratidão a todos os professores que conduziram o curso de forma que eu me tornasse um bom profissional.

Aos meus amigos e colegas, Andryan, Ana Paula, Jacqueline, Henrique e Paulo César, que sempre estiveram comigo, tanto na hora do estudo, quanto na hora de celebrar, obrigado por sempre me ouvir e por me darem conselhos; ao Philipe que esteve em parceria comigo durante a caminhada da pesquisa e deste trabalho; às demais amigas que fiz durante a graduação que sempre me apoiaram e estavam presentes nas horas que eu mais necessitava; aos meus amigos de São Gabriel, pela amizade e apoio; e um agradecimento especial ao meu amigo Richard de Taquara, que constantemente me mostra o verdadeiro valor de uma amizade.

Eu não quero acreditar, eu quero saber.

Carl Sagan

A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último melhorar a humanidade.

Nikola Tesla

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo e simulação de um sistema fotovoltaico em que o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) é realizado a partir de um observador por modo deslizante, a fim de se diminuir o número de sensores empregados no sistema. Inicialmente, é realizada uma revisão bibliográfica, na qual são estudadas as células e painéis fotovoltaicos, conversores e inversores usualmente utilizados e as estratégias de MPPT. Com base nesse estudo é definido o 3TSolar – 260Wp como o painel a ser utilizado, o conversor *Boost* elevador de tensão, a estratégia perturba e observa (P&O) de MPPT e, principalmente, o observador por modo deslizante que será o foco do trabalho. São realizadas todas definições de parâmetros do painel, calculados os valores de todos os elementos do conversor, é elaborado o algoritmo da estratégia P&O, é realizada uma análise pelo modelo em espaço de estados para validar o sistema e, com isso, desenvolveu-se o observador por modo deslizantes, no qual considera-se o erro entre os valores medidos e observados. Em seguida são apresentados os resultados, que são divididos em três partes: (i) topologia do conversor e modelo em espaço de estados; (ii) topologia do conversor com observador por modos deslizantes; (iii) simulação da topologia completa, isto é, conversor com observador por modos deslizantes, incluindo a estratégia P&O de MPPT. Finalmente, pode ser concluído que o observador funcionou com êxito.

Palavras-Chave: Modo Deslizante, *Boost*, MPPT, Perturba e Observa, Fotovoltaico.

ABSTRACT

This undergraduate thesis presents a study and simulation of a photovoltaic system which the maximum power point tracking (MPPT) is traced from a sliding mode observer, in order to reduce the number of sensors used in the system. Initially, a bibliographic review is fulfilled, in which the photovoltaic cells and panels, converters and inverters usually used and MPPT strategies were studied. Based on this study, the 3TSolar - 260Wp is defined as the panel to be used, the Boost voltage converter, the MPPT perturbation and observation (P&O) strategy, and, especially, the sliding mode observer that will be the focus of this work. All parameter settings are performed on the panel, the values of all the inverter elements are calculated, the P&O strategy algorithm is elaborated, a state-space model analysis is performed to validate the system and, with that, the observer was developed by sliding mode, that considers the error between the measured and observed values. Then, the results are presented, which are divided into three parts: (i) topology of the converter and state-space model; (ii) topology of the converter with observer by sliding modes; and, for last, (iii) the complete topology simulation, which is, the converter with the sliding mode observer, including MPPT P&O strategy. Finally, it can be concluded that the observer performs as intended.

Keywords: Sliding Mode, Boost, MPPT, Perturb and Observe, Photovoltaic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade de geração do Brasil.	16
Figura 2 - Esquema fotovoltaico.	20
Figura 3 - Célula p-n.	21
Figura 4 – Células (a) monocristalina, (b) policristalina, (c) híbrido e (d) filmes finos.	22
Figura 5 - Associação em série.	24
Figura 6 - Associação em paralelo.	24
Figura 7 - Associação mista.	25
Figura 8 - Inversor central.	26
Figura 9 - Inversor <i>string</i>	27
Figura 10 - Inversor <i>multi-string</i>	28
Figura 11 - Inversor modular.	28
Figura 12 - Conversor <i>Buck</i>	29
Figura 13 - Conversor <i>Boost</i>	30
Figura 14 - Inversor <i>Full-bridge</i>	31
Figura 15 - Inversor <i>Heric</i>	32
Figura 16 - Curvas por diferença de temperatura $I \times V$ (a) e $P \times V$ (b).	33
Figura 17 - Curvas por diferença de irradiação $I \times V$ (a) e $P \times V$ (b).	33
Figura 18 - Fluxograma do algoritmo P&O.	35
Figura 19 - Fluxograma do algoritmo IC.	36
Figura 20 - Curvas características (a) $I \times V$ e (b) $P \times V$	39
Figura 21 - Esquemático da topologia completa.	41
Figura 22 - Estágios de operação do <i>Boost</i> : (a) estágio de condução da chave S e (b) estágio de bloqueio da chave S	42
Figura 23 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados.	50
Figura 24 - Gráfico de corrente no indutor medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados.	50
Figura 25 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados com perturbação de $-10V$	51
Figura 26 - Gráfico de corrente no indutor medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados com perturbação de $-10V$	51

Figura 27 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e modo deslizante.....	52
Figura 28 - Gráfico da corrente no indutor medida no conversor e modo deslizante.	53
Figura 29 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e modo deslizante com perturbação de $-10V$	54
Figura 30 - Gráfico da corrente no indutor medida no conversor e modo deslizante com perturbação de $-10V$	54
Figura 31 - Gráfico da corrente no indutor com uma queda de 50% do valor da indutância durante a simulação.	55
Figura 32 - Gráfico de tensão de saída com uma queda de 50% do valor da capacitância durante a simulação.	55
Figura 33 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor operando com MPPT e rastreado.	56
Figura 34 - Gráfico de corrente no indutor medida no conversor operando com MPPT e rastreado.....	57
Figura 35 - Gráfico da potência medida no painel e rastreada.	57
Figura 36 - Gráficos de potência para P&O com passo de ΔD de 0,001 e frequência de amostragem de (a) 500 Hz e (b) 1000 Hz.....	58
Figura 37 - Gráficos de potência para P&O com passo de ΔD de 0,005 e frequência de amostragem de (a) 500 Hz e (b) 1000 Hz.....	59
Figura 38 - Gráficos de potência para P&O com passo de ΔD de 0,01 e frequência de amostragem de (a) 500 Hz e (b) 1000 Hz.....	60
Figura 39 - Gráfico da potência medida no painel e rastreada com diminuição da irradiação para $800W/m^2$	61
Figura 40 - Gráfico da (a) potência medida no painel e rastreada com perturbação senoidal e (b) a razão cíclica.	62
Figura 41 - Gráfico da (a) potência medida no painel e rastreada com perturbação senoidal, respeitando os limites de operação e (b) a razão cíclica.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Preço de sensores de corrente de precisão usuais.....	18
Tabela 2 - Parâmetros do painel fotovoltaico 3TSolar - 260Wp.....	38
Tabela 3 - Resultados da ferramenta <i>Solar Module</i> do PSIM® a partir dos parâmetros do painel.	39
Tabela 4 - Especificações para o projeto do conversor.	39
Tabela 5 - Frequências de amostragem e passos de razão cíclica delta testados e simulados..	58

SUMÁRIO

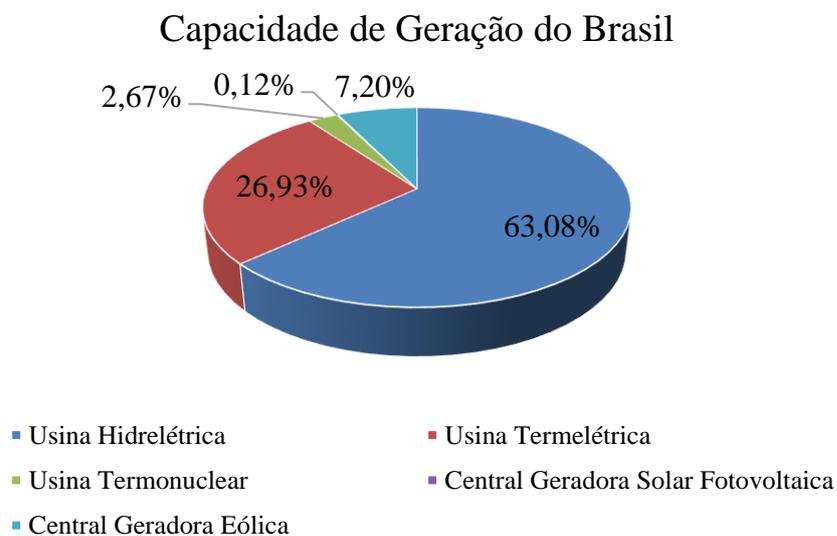
AGRADECIMENTO	7
RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS	13
SUMÁRIO	14
1 INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa.....	17
1.2. Objetivos	18
1.3. Estrutura.....	19
2 PROCESSAMENTO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	20
2.1. Célula fotovoltaica.....	20
2.2. Tipos de células fotovoltaicas	21
2.3. Associação dos painéis fotovoltaicos	23
2.3.1. Associação em série	23
2.3.2. Associação em paralelo	24
2.3.3. Associação mista.....	24
2.4. Arranjos de sistemas fotovoltaicos.....	25
2.4.1. Arranjo inversor central.....	25
2.4.2. Arranjo inversor <i>string</i>	26
2.4.3. Arranjo inversor <i>multi-string</i>	27
2.4.4. Arranjo inversor modular	28
2.5. Conversores e inversores	29
2.5.1. Conversor <i>Buck</i>	29
2.5.2. Conversor <i>Boost</i>	30
2.5.3. Inversor <i>Full-bridge</i>	30

2.5.4.	Inversor <i>Heric</i>	31
2.6.	Revisão das estratégias de MPPT	32
2.6.1.	Perturba e Observa (P&O).....	34
2.6.2.	Condutância Incremental (IC)	35
2.6.3.	Tensão Constante	36
2.7.	Conclusão	37
3	TOPOLOGIA E ESTRATÉGIA DE MPPT	38
3.1.	Topologia completa	38
3.2.	Princípio de funcionamento da topologia.....	41
3.2.1.	Modelo em espaço de estados	41
3.3.	Observador por modos deslizantes	45
3.3.1.	Projeto	46
3.4.	Estratégia de MPPT	47
3.4.1.	Projeto da estratégia de MPPT	48
3.5.	Conclusão	48
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	49
4.1.	Resultados da topologia do conversor e modelo em espaço de estados.....	49
4.2.	Resultados do conversor com observador por modos deslizantes.....	52
4.3.	Resultados da topologia completa.....	56
5	CONCLUSÕES.....	64
5.1.	Trabalhos futuros.....	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Há um crescente aumento na demanda de energia elétrica no mundo causado pelo aumento populacional, logo, há a necessidade de maior investimento no setor energético mundial, sendo no Brasil a mesma preocupação. Fontes como petróleo e carvão são exemplos de formas eficientes para a geração de energia elétrica, porém, estas trazem um problema que cada vez mais preocupa a comunidade internacional: a poluição. Conscientes dos problemas que a poluição pode acarretar, tem-se investido principalmente na produção de energia elétrica através de fontes limpas e renováveis, como é o caso da energia hídrica, principal matriz energética do Brasil, da eólica e da solar. O Brasil possui no total 7108 usinas e centrais geradoras em operação, totalizando 159,92 GW de potência instalada e está prevista uma adição de 18,65 GW na capacidade de geração do país para os próximos anos, proveniente de 210 novas usinas e centrais geradoras em construção e mais 402 com construção não iniciada (ANEEL, 2018). Na Figura 1 está representado a capacidade de geração do Brasil.

Figura 1 - Capacidade de geração do Brasil.



Fonte: Próprio autor com os dados fornecidos pela EPE, 2018.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018), ou EPE, a matriz energética do Brasil é predominantemente renovável, sendo a geração hidráulica correspondente à 63,08% da oferta interna. As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2018, p.31). As hidrelétricas, ainda que sejam consideradas uma fonte de energia renovável, são responsáveis por trazer alguns riscos ao meio ambiente, tais como o choque no habitat dos peixes da região, provocando uma

mudança de hábito das espécies atingidas, desmatamento da mata ciliar e desvios no curso do rio. Além disso, no Brasil, a exploração já atingiu a maior parte do seu potencial, excluindo a região da Amazônia, que ainda há um grande potencial hidrelétrico a ser explorado, mas a sua exploração causaria os mesmos danos ambientais citados anteriormente. Outro problema da exploração da energia hídrica é que em períodos de estiagem, faz-se necessário o uso das usinas térmicas para suprir a demanda, aumentando o preço da energia elétrica gerada e causando danos ao meio ambiente pela queima do carvão. Uma forma de substituir as termoelétricas é a utilização da energia eólica e solar fotovoltaica (PV - *Photovoltaic*) para suprir a demanda nos períodos de estiagem.

Por mais que em média a energia proveniente dos ventos é mais eficaz do que a solar, apresenta poluição visual, interfere em rotas migratória de aves e ocupam uma área muito grande. Por sua vez, a energia solar fotovoltaica apresenta menos riscos ao meio ambiente, por necessitar apenas de uma grande área descampada, além disso, os painéis fotovoltaicos podem ser instalados em telhados de prédios, casas ou de estacionamentos. É uma fonte muito promissora que apresenta grandes oportunidades de pesquisa científica em várias frentes como: tecnologia das pastilhas fotovoltaicas, aprimoramento dos conversores estáticos, desenvolvimento de algoritmos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) e desenvolvimento de arranjos de conversores mais eficientes. Dessa forma, o presente projeto busca principalmente o aumento da eficiência energética através do estudo e desenvolvimento de um observador para o MPPT por modos deslizantes. Sabendo disso, se observa a necessidade de otimização e adequação destes equipamentos.

A quantidade de energia solar captada é muito variável, pois depende da incidência de irradiação, temperatura e vento, além disso, o sistema elétrico utiliza a corrente alternada (CA) e os painéis fotovoltaicos convertem a energia solar em corrente contínua (CC). Para resolver estes problemas, os painéis são ligados a um conversor, que é responsável por fazer a transformação CC-CA, elevando a níveis aceitáveis para o sistema elétrico e transformando a tensão; o rastreamento do máximo ponto de potência (MPPT), que, como a energia captada varia com as condições climáticas, encontra o ponto de máxima potência através de técnicas de rastreamento e/ou comparação.

1.1. Justificativa

Diversas estratégias de MPPT são encontradas na literatura, como a de Tensão Constante, da Condutância Incremental (IC), da Perturbação e Observação (P&O) e outros métodos

baseados em temperatura e em inteligência artificial (DESAI; PATEL, 2007; ESRAM; CHAMPAN, 2007; FARANDA et al., 2008; PANDEY et al., 2007;). Porém cada técnica apresenta algumas dificuldades como pouca aplicabilidade, perdas de energia ou de potência e alto custo.

Dentre essas técnicas, será utilizada a técnica P&O, que apresenta diversos subtipos e modos de ser realizada, além de ser bastante eficiente e de uma facilidade razoável de implementação. Porém, a maior parte das estratégias de MPPT necessitam de dois ou mais sensores de tensão e de corrente, o que torna o projeto mais caro, principalmente para sistemas com microinversores e dependência na confiabilidade dos sensores.

Tabela 1 - Preço de sensores de corrente de precisão usuais.

Sensor de corrente de precisão	Preço (\$)	Preço (R\$)
LEM – LA 25-P	35,85	136,40
LEM – LA 100-P	29,90	113,76

Fonte: Próprio autor com os dados da Darrah electric Company (2018).

Uma forma de contornar este problema é adicionando um observador que possibilita remover um desses sensores e aumentar a confiabilidade do sistema, com o uso do observador por modos deslizantes, tornando menor o custo do projeto por diminuir o número de sensores do mesmo. Ao invés de medir a tensão e a corrente com sensores, como normalmente é feito, uma destas grandezas será obtida a partir do observador por modos deslizantes.

A técnica de observação por modos deslizantes consiste em reduzir o problema de um controle de um sistema genérico como, por exemplo, um sistema descrito por equações de estado com entradas descontínuas através de uma superfície definida no modelo em espaço de estados. A técnica por modos deslizantes é um projeto capaz de fazer com que todas as trajetórias do sistema converjam para a dada superfície, chamada superfície deslizante (BELKAID et al., 2016; LEVRON; SHMILOVITZ, 2013; VÁSQUEZ et al., 2015). Utilizando-se apenas um sensor (de corrente ou de tensão) é possível obter o valor da grandeza e, assim, torna-se possível o MPPT.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo o estudo da energia fotovoltaica, o conversor CC-CC *boost* utilizado, MPPT e o método de observador por Modo Deslizante, de modo a projetar uma estratégia de P&O utilizando Modo Deslizante para diminuir o número de sensores do sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. Obtém-se, assim, uma forma mais eficiente e com menor

custo para absorver a máxima potência que os painéis têm para oferecer. O sistema utilizará de um conversor Boost alimentado por painéis fotovoltaicos.

Objetivos específicos:

- Compreender o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos e as estratégias de MPPT existentes;
- Projetar um conversor e a estratégia de MPPT incluindo o método de Modos deslizantes para a diminuição do número de sensores;
- Analisar a eficiência do sistema.

1.3. Estrutura

Este trabalho será distribuído em cinco capítulos. No primeiro, já apresentado, contém a introdução ao assunto abordado, contextualizando de forma sucinta e apresentando a justificativa, objetivos e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo contém os conceitos iniciais sobre os sistemas fotovoltaicos e MPPT, demonstrando as variedades e vantagens e desvantagens de cada um.

No terceiro capítulo é apresentada a topologia do projeto e seu funcionamento e o projeto da estratégia MPPT utilizada.

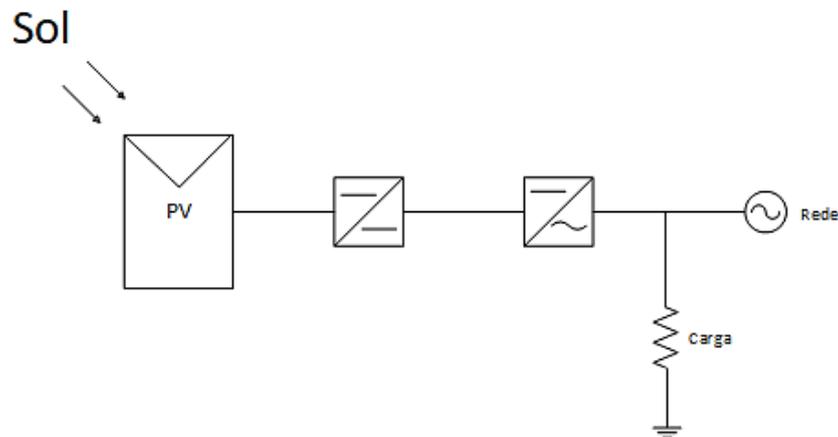
Seguindo ao quarto capítulo, são mostrados os resultados das simulações da topologia, realizados através do *software* utilizado, comprovando-a.

Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões e observações sobre o projeto.

2 PROCESSAMENTO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O sistema solar fotovoltaico é composto por vários elementos, como demonstrado de forma resumida na Figura 2. Os módulos fotovoltaicos são compostos por células de diferentes tecnologias, conectados em série e/ou paralelo, e os painéis são organizados em diferentes tipos de arranjos, além disso, são usados diferentes tipos de conversores com diversas estratégias de MPPT.

Figura 2 - Esquema fotovoltaico.



Fonte: Próprio autor.

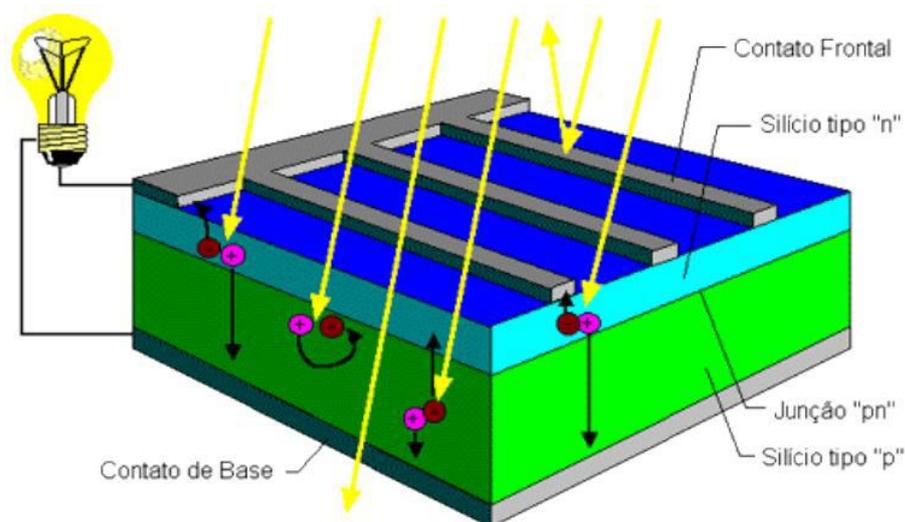
Neste capítulo será apresentado como é composto um módulo fotovoltaico, as tecnologias de células presentes no mercado, assim como, a forma de associação entre as células (série, paralela e mista), as estratégias de rastreamento MPPT e do observador por modos deslizantes utilizadas atualmente. E, ao final, uma breve conclusão feita do capítulo.

2.1. Célula fotovoltaica

O sistema fotovoltaico é composto por painéis, ou módulos, fotovoltaicos, que capta a energia solar através de células tipo “p-n” que a convertem para energia elétrica CC. Estas células são formadas por duas camadas semicondutoras, a camada p e a camada n, conforme o esquemático da Figura 3. A camada n apresenta elétrons livres e na camada p há falta de elétrons na sua estrutura. Juntando as duas camadas semicondutoras ocorre a difusão dos elétrons livres do semicondutor n para o semicondutor p, este processo é chamado de junção semicondutora. Essa junção gera um campo elétrico, chamado de barreira de potencial, que é contrário ao movimento dos portadores de carga. Quando os semicondutores p-n são expostos à luz solar, a

energia dos fótons provoca uma quebra nas ligações entre os elétrons das camadas, como é mostrado na Figura 3 (PEREIRA, 2016). Os elétrons libertados são conduzidos para a camada n e as lacunas seguem em sentido contrário para a camada p novamente, transformando, assim, a energia solar em energia elétrica a partir de uma diferença de potencial.

Figura 3 - Célula p-n.



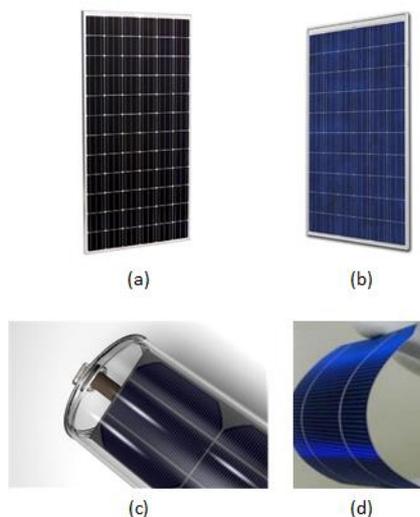
Fonte: PEREIRA, 2016.

Hoje, mais de 80% das células fotovoltaicas são baseadas em alguma variação do silício. Para estas células, a eficiência dos mesmos depende da pureza do silício, isso por que, quanto mais alinhadas estiverem as moléculas de silício, maior é a capacidade de conversão de luz solar em energia elétrica. Por outro lado, a eficiência não é a única preocupação dos pesquisadores, há também o tamanho, a durabilidade e o custo do painel, lembrando que o processo de tratamento de purificação do silício é caro.

2.2. Tipos de células fotovoltaicas

Cerca de 95% de todas as células fabricadas e comercializadas no mundo são de silício (VILLALVA, 2015). A Figura 4 apresenta os quatro tipos mais comuns na literatura. A mais antiga das tecnologias de célula é o silício monocristalino (m-Si). É um dos mais caros por ser composto de cristal de silício ultrapuro, estes são aquecidos a altas temperaturas e passam por um processo para a formação de cristais chamado de método de Czochralski, o que também o faz muito eficiente até mesmo com pouca luz, que varia entre 15% e 22% de eficiência. Por essa pureza, com o conjunto das células, o painel é de cor azul escuro uniforme e ocupa menos espaço do que outras tecnologias (DIENSTMANN, 2009; VILLALVA, 2015, p. 67).

Figura 4 – Células (a) monocristalina, (b) policristalina, (c) híbrido e (d) filmes finos.



Fonte: Adaptada pelo autor.

Há também o silício policristalino (p-Si), neste os cristais de silício são fundidos em um bloco, formando múltiplos cristais. Este bloco é cortado em quadrados e fatiado em células, fazendo com que o seu processo de produção seja mais simples e mais barato, porém, por não passar pelo mesmo tratamento do que o m-Si, o p-Si é mais impuro e, por isso, tem uma menor eficiência que varia entre 13% e 18% (DIENSTMANN, 2009; VILLALVA, 2015, p. 67).

Outra tecnologia que vem sendo aplicada a vários tipos de materiais diferentes, são as células fotovoltaicas de filme fino (TFPV), que são fabricadas baseadas na ideia de depositar uma ou várias camadas finas de material fotovoltaico sobre um substrato. Os principais tipos são: silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), cobre, índio e gálio seleneto (CIS/CIGS), células solares fotovoltaicas orgânicas (OPV). A produção desta tecnologia é, em geral, mais simples em comparação com a tecnologia cristalina, o que faz dele mais barato; esteticamente os painéis que utilizam desta tecnologia tem uma aparência homogênea mais agradável; tem mais possibilidades de aplicação, pois o material pode ser flexível; e altas temperaturas e sombras tem menos impacto sobre o desempenho do painel solar de filme fino. Porém, ocupam mais espaço para produzir a mesma quantidade de energia que outras tecnologias; e se degradam mais rapidamente do que os painéis solares de células cristalinas (DIENSTMANN, 2009; VILLALVA, 2015, p. 67).

Por último, existe uma tecnologia de célula solar híbrido (HJT) que ainda não está no mercado brasileiro, também conhecida por Heterojunção. A eficiência dos painéis que utilizam esta tecnologia é de mais de 20%. A fabricação possui um processo de passivação com camada de a-Si e é similar ao processo das células fotovoltaicas m-Si. Esta tecnologia funciona muito

bem com altas temperaturas e produz mais energia por metro quadrado, então, pode-se dizer que esta tecnologia seria ideal para o Brasil (DIENSTMANN, 2009; VILLALVA, 2015, p. 67).

Estas células sozinhas produzem baixa tensão elétrica e pouca energia, mas se agrupadas (ligadas em série) de modo a formar painéis, ou módulos, fotovoltaicos podem gerar uma grande quantidade de energia elétrica e com tensão mais elevada. Os contatos da célula são ligados de forma que a parte frontal (polo negativo) da célula seja conectado à parte posterior (polo positivo) da célula seguinte. Não são somente das células que os painéis são construídos, há também uma primeira camada de caixilho, que é alumínio anodizado que lhe dá proteção mecânica; uma camada de vidro, que protege a célula de impactos mecânicos e permite a passagem da luz solar; duas películas de etileno acetato de vinilo (EVA) antes e depois das células, que garante o isolamento elétrico das mesmas; e, por fim, o isolante térmico, que protege a parte posterior do painel e evita a entrada de líquidos e gases.

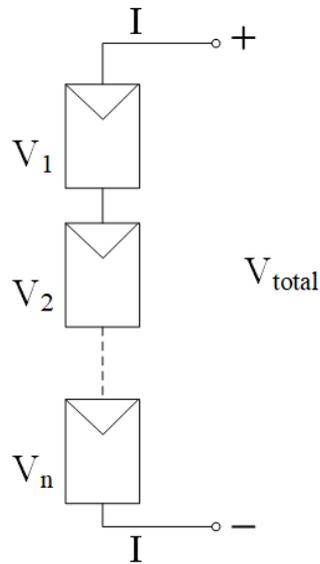
2.3. Associação dos painéis fotovoltaicos

Um painel sozinho é capaz de suprir a demanda de equipamentos específicos, como postes de luz urbano, radares rodoviários, estação de monitoramento d'água, etc. Porém, para suprir demandas maiores os painéis devem ser interligados a fim de se conseguir aumentar a potência do sistema, dito isso, há três maneiras de se fazer estas ligações: série, paralela e mista.

2.3.1. Associação em série

Para a associação em série os conectores inferiores de um painel são conectados nos conectores superiores do seguinte e, assim, sucessivamente, formando uma “fileira” de “n” painéis, conforme o esquemático da Figura 5. A associação em série de painéis fotovoltaicos permite obter tensões mais elevadas, mantendo a corrente estipulada do painel. A associação em série também pode ser chamada de *string* (CARNEIRO, 2010; VILLALVA, 2015, p. 86).

Figura 5 - Associação em série.

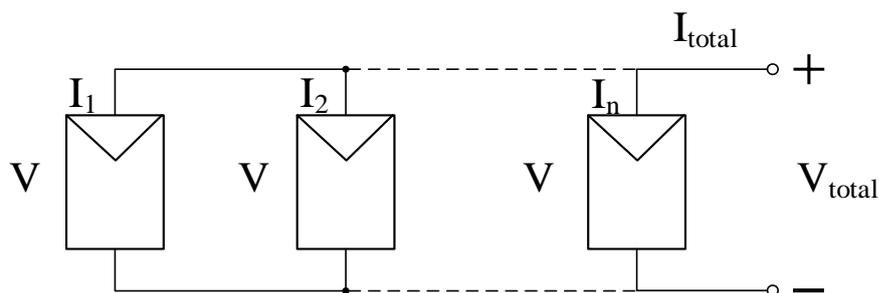


Fonte: Próprio autor.

2.3.2. Associação em paralelo

Já para associação em paralelo dos painéis fotovoltaicos são conectados os conectores superiores aos conectores na parte superior do painel seguinte e os conectores inferiores aos inferiores do seguinte e, assim, sucessivamente, formado por n painéis, conforme mostra a Figura 6. A associação em paralelo é utilizada quando necessita-se aumentar a corrente do sistema, mas mantendo a tensão do painel (CARNEIRO, 2010; VILLALVA, 2015, p. 87).

Figura 6 - Associação em paralelo.



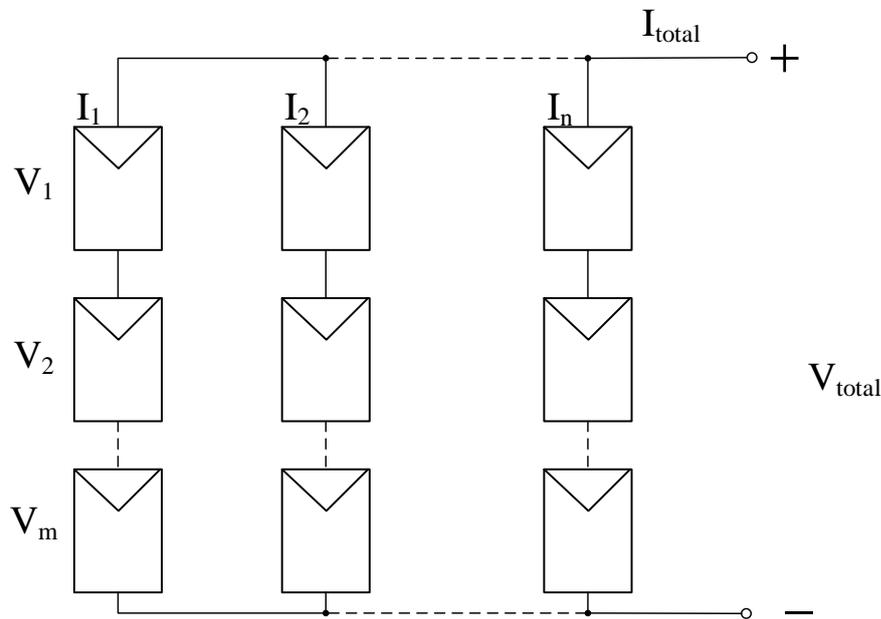
Fonte: Próprio autor.

2.3.3. Associação mista

Na associação mista de painéis, como o próprio nome já diz, são associadas várias fileiras ligadas em paralelo. Nesta associação obtêm-se as características de ambas associações série e paralela, obtendo valores maiores de corrente e tensão. Na Figura 7 é apresentado um exemplo

de associação mista, onde “n” são os painéis associados em paralelo e “m” são os painéis associados em série (CARNEIRO, 2010; VILLALVA, 2015, p. 89).

Figura 7 - Associação mista.



Fonte: Próprio autor.

2.4. Arranjos de sistemas fotovoltaicos

O modo como os painéis fotovoltaicos serão conectados está relacionado diretamente com a forma como os mesmos serão conectados aos inversores. Para cada implementação há uma necessidade diferente de arranjos para se obter melhor custo-benefício, por exemplo, um sistema de painéis pode ser conectado a diversos conversores/inversores, com suas saídas conectadas ao sistema em paralelo (monofásico) ou que cada conjunto de painéis e conversores/inversores, chamado de subsistema fotovoltaico, em um único ponto (polifásico).

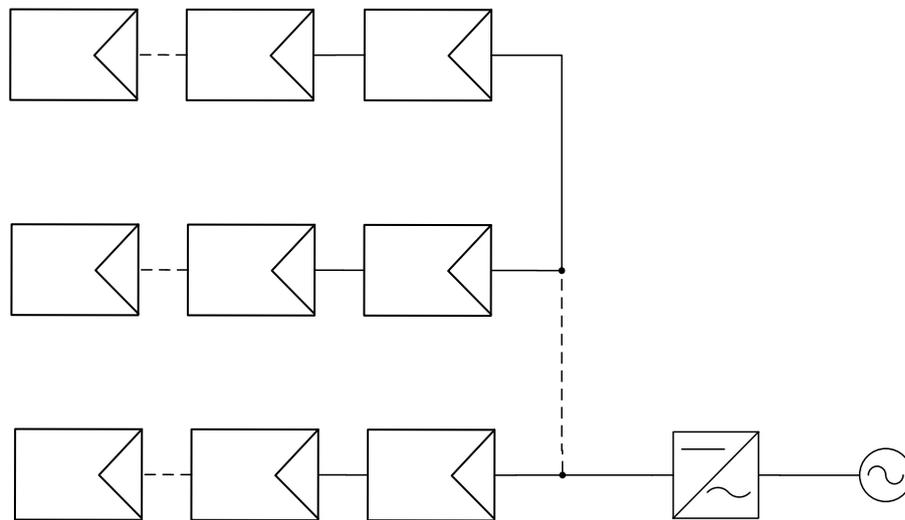
A literatura aponta algumas arquiteturas de sistemas (ALMEIDA, 2012; DESCONZI, 2011; RAMPINELLI et al., 2013), citando suas vantagens e desvantagens, sendo os quatro principais tipos de arranjos: inversor central, inversor *string*, inversor *multi-string* e inversor modular.

2.4.1. Arranjo inversor central

A configuração do tipo central, representada na Figura 8, é a mais comum por ter um baixo custo e ser de fácil manutenção. Esta consiste em uma *string* e estes conjuntos são conectados em paralelo entre si para obter o nível de tensão desejado, todos ligados a um mesmo inversor conectado à rede ou à carga. Porém, esta configuração traz uma baixa confiabilidade,

pois, em caso de falha em algum painel ou no próprio inversor, toda a instalação fica comprometida, além disso, este arranjo impede que o rastreamento do MPP seja independente para cada conjunto de painéis em série. A seguir é apresentado um exemplo de inversor central (ALMEIDA, 2012; DESCONZI, 2011; RAMPINELLI et al., 2013).

Figura 8 - Inversor central.



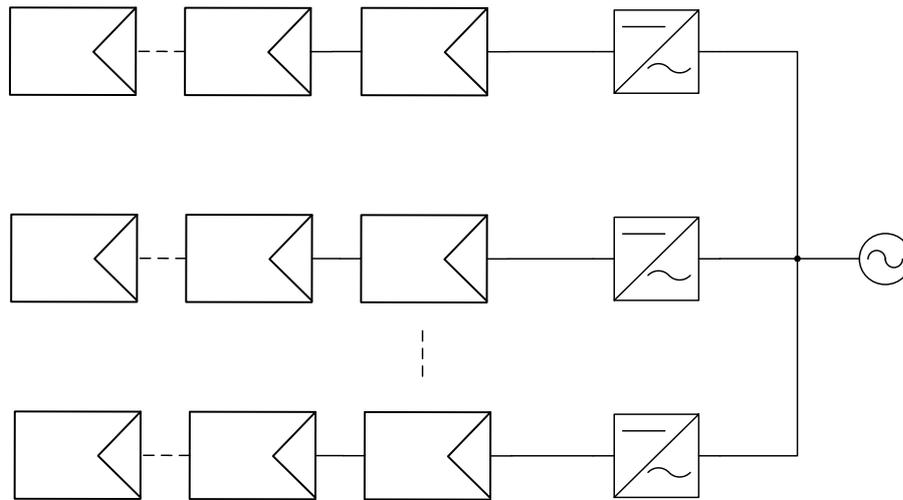
Fonte: Próprio autor.

2.4.2. Arranjo inversor *string*

Quando os painéis são conectados em série, os que apresentam algum defeito se comportam como uma carga, diminuindo a potência total. Dito isso, algumas configurações foram propostas visando impedir ou reduzir estes problemas, garantindo um aumento na eficiência energética, além de possuir uma característica modular, facilitando a integração de conversores.

Na configuração inversor *string*, como mostra a Figura 9, cada conjunto *string* é conectado a um único inversor. Esta configuração diminui as perdas por sombreamento e por diodos de bloqueio e reduz a probabilidade de ocorrer acoplamentos defeituosos, além disso, o rastreamento de MPP é mais confiável por ter um inversor para cada conjunto de painéis. Isso aumenta a eficiência energética e a confiabilidade do sistema. Por outro lado, esta configuração se torna mais cara por ter mais custos com inversores. A seguir é apresentado um exemplo de inversor *string* (ALMEIDA, 2012; DESCONZI, 2011; RAMPINELLI et al., 2013).

Figura 9 - Inversor *string*.



Fonte: Próprio autor.

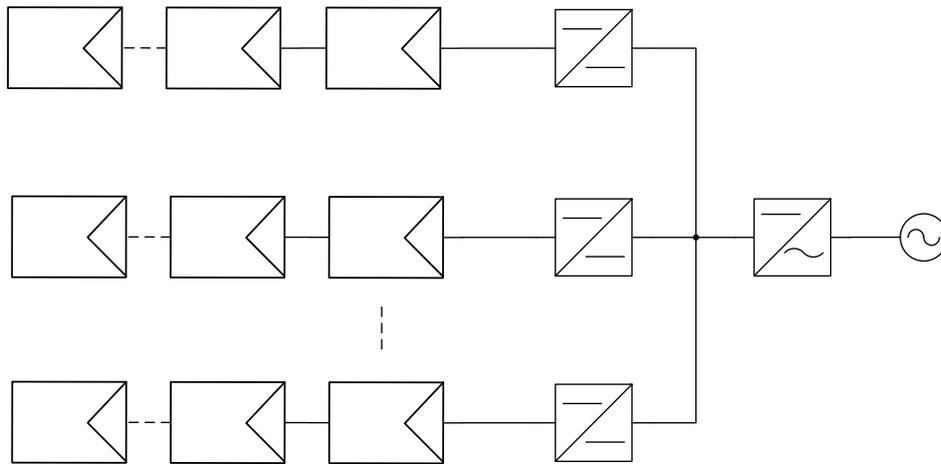
2.4.3. Arranjo inversor *multi-string*

O arranjo *multi-string*, como pode ser visto na Figura 10, difere por utilizar conversores CC-CC conectados em cada uma das *strings*, que por sua vez são conectados em paralelo entre si, e estes conectados em um único inversor CC-CA ligado à carga ou à rede.

Esta configuração traz uma redução de rendimento da energia gerada, por outro lado, a utilização de um conversor CC-CC elevador (*Boost*), por exemplo, garante um ganho de tensão que é necessário para que o arranjo possa ser conectado à rede, ao invés de conectar mais painéis em série. Com essa topologia, também, é possível obter um método de controle e manutenção simplificadas, e, assim como no arranjo inversor *string*, a possibilidade de rastrear o MPP independentemente de cada conjunto (ALMEIDA, 2012; DESCONZI, 2011; RAMPINELLI et al., 2013).

Nas topologias onde os painéis são diretamente conectados ao inversor de saída, se o capacitor de alimentação da entrada do inversor não estiver bem dimensionado, pode ocorrer uma ondulação de potência indesejada pelas harmônicas da forma de onda de saída. Com o conversor CC-CC pode-se reduzir o capacitor do barramento, fazendo com que as ondulações sejam minimizadas. A seguir é apresentado um exemplo de inversor *multi-string*.

Figura 10 - Inversor *multi-string*.

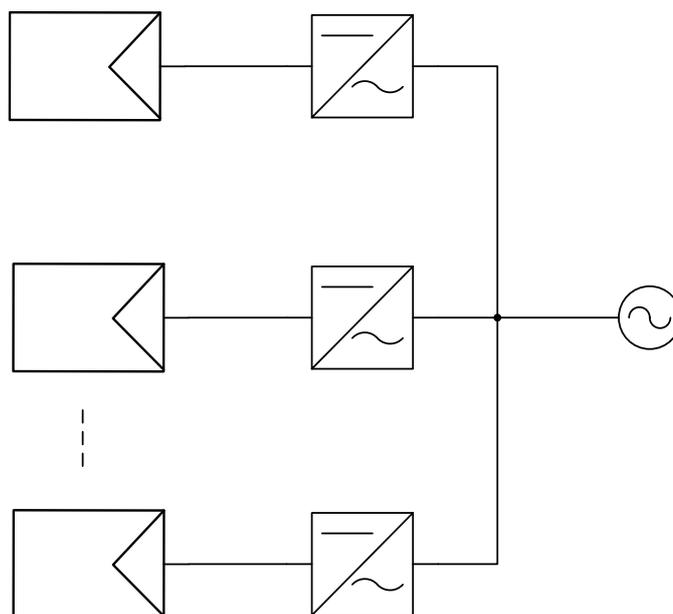


Fonte: Próprio autor.

2.4.4. Arranjo inversor modular

O arranjo dos inversores com módulos integrados (inversor modular), ou módulo c.a., é constituído por um único inversor para cada painel instalado, como mostra a Figura 11, por este motivo não há perdas por associação de painéis. Esta configuração foi empregada para sistemas de baixa potência nos anos 1990, ou seja, com poucos painéis instalados. Com o surgimento de sistemas maiores, esta configuração desapareceu do mercado por passar a ser inviável economicamente, além de que a confiabilidade e vida útil dos microinversores empregados naquela época era baixa e de alto custo. A seguir é apresentado um exemplo de inversor modular (ALMEIDA, 2012; DESCONZI, 2011; RAMPINELLI et al., 2013).

Figura 11 - Inversor modular.



Fonte: Próprio autor.

2.5. Conversores e inversores

As topologias de inversores para sistemas PV conectados à rede elétrica podem operar com ou sem transformador. A função do transformador é prover o isolamento dos módulos PV da rede. Os transformadores quando utilizados para operar na frequência da rede (baixa frequência) são grandes e pesados, o que aumenta o custo no sistema, além de provocar a diminuição da eficiência. Há também os transformadores utilizados em alta frequência, que operam a partir de alguns estágios, proporcionando uma diminuição da eficiência e tornam o sistema mais complexo (GENZLER, 2015).

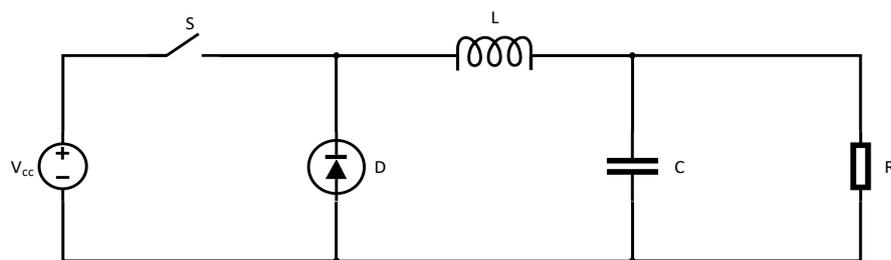
Chaves de potência controlam as topologias de conversor, que é comumente controlado por PWM (*Pulse Width Modulation*), que é obtido a partir de um sinal modulante comparado com uma onda triangular ou dente de serra para produzir uma forma de onda chaveada de frequência fixa. O controle do conversor é feito de maneira que a tensão de saída possa ser controlada, em função da variação do ciclo de trabalho da chave (PADILHA, 2011).

Nesse capítulo serão apresentados sucintamente os conversores estudados para o auxílio na execução do projeto, são eles: *Buck*, *Boost*, *Full-bridge* e *Heric*.

2.5.1. Conversor *Buck*

O conversor Buck, conforme apresentado na Figura 12, é um dos mais elementares encontrados na literatura. O mesmo é usado para reduzir a tensão de saída.

Figura 12 - Conversor *Buck*.



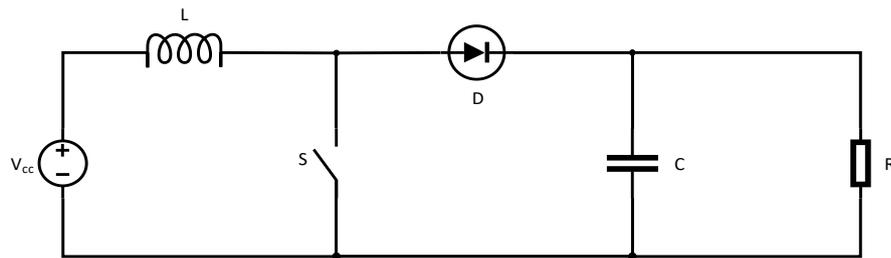
Fonte: Próprio autor.

Quando a chave está fechada, a energia é transferida da fonte para o indutor e para o capacitor. Quando a chave desliga, o diodo conduz, dando continuidade à corrente do indutor. A energia armazenada em L é entregue ao capacitor e à carga. Enquanto o valor instantâneo da corrente pelo indutor for maior do que a corrente da carga, a diferença carrega o capacitor. Quando a corrente for menor, o capacitor se descarrega, suprindo a diferença a fim de manter constante a corrente da carga (MOHAN, 1995; DA SILVA, 2018).

2.5.2. Conversor *Boost*

O conversor Boost, apresentado na Figura 13, é outro conversor bastante elementar. Este conversor é usado para a elevação de tensão de saída, para correção de fator de potência por erros, que podem ser causados por outros conversores e distorções da rede, e para o rastreamento de MPP. Portanto, é o mais utilizado para sistemas fotovoltaicos.

Figura 13 - Conversor *Boost*.



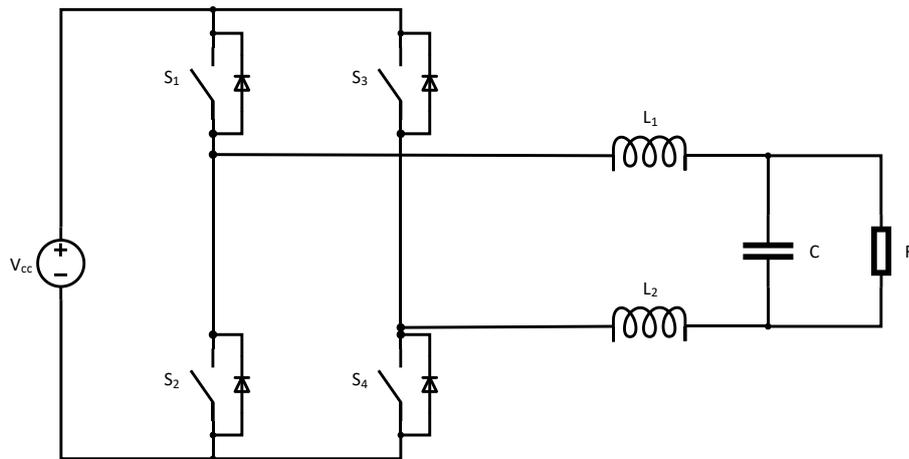
Fonte: Próprio autor.

Quando a chave do conversor está aberta a fonte carrega o indutor armazenando corrente e, com o diodo conduzindo, armazena tensão no capacitor. Quando a chave é fechada o diodo deixa de conduzir e o capacitor descarrega sua energia à carga (MOHAN, 1995; DA SILVA, 2011; GENZLER, 2015).

2.5.3. Inversor *Full-bridge*

O inversor *Full-bridge* CC-CA, representado na Figura 14, utiliza quatro chaves e inverte a corrente contínua para alternada e seu desempenho depende muito da modulação utilizada, podendo ser modulado em dois níveis ou então em três níveis (MOHAN, 1995; DA SILVA, 2018; GENZLER, 2015).

Figura 14 - Inversor *Full-bridge*.

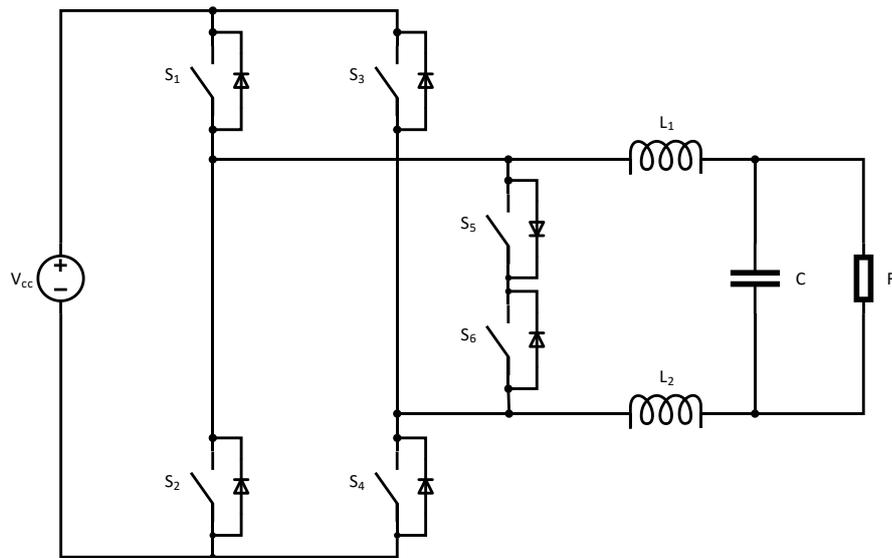


Fonte: Próprio autor.

O funcionamento do *Full-bridge* com modulação de dois níveis é obtido pela comutação das chaves em diagonal. Isto é, as chaves S_1 e S_4 são fechadas, enquanto S_3 e S_2 estão abertas para gerar uma tensão positiva, e as chaves S_3 e S_2 são fechadas, enquanto S_1 e S_4 estão abertas para gerar uma tensão negativa. Desta forma, a tensão CA pode ser gerada. Assim, os braços A e B são comutados de forma simultânea na diagonal em alta frequência e com a mesma referência senoidal. Ainda, com modulação de três níveis, pode-se comutar S_1 simultaneamente com S_3 e S_2 simultaneamente com S_4 , a fim de criar a etapa de roda-livre, onde a corrente remanescente volta para a fonte.

2.5.4. Inversor *Heric*

De acordo com Araújo (2010) “A topologia HERIC foi desenvolvida pela empresa alemã *Sunways*, e cujo nome significa *Highly Efficient Reliable Inverter Concept* (Conceito de Inversor Altamente Confiável e Eficiente)”. A topologia *Heric*, representada na Figura 15 é derivada da topologia *Full-bridge*, com a adição de duas novas chaves em paralelo com a saída, comutando na frequência de rede (baixa frequência). Estas chaves proporcionam um caminho alternativo durante as etapas de roda-livre para que a corrente da rede convertida não retorne ao painel fotovoltaico e evitando perdas.

Figura 15 - Inversor *Heric*.

Fonte: Próprio autor.

A chave S_5 permanece fechada durante todo o primeiro semiciclo, neste período as chaves S_1 e S_4 estão acionadas e enquanto S_2 , S_3 e S_6 estão inativas, a corrente circula do painel para a rede, e quando estas estão desativadas, a corrente circula através da chave S_5 e do diodo D_6 (etapa de roda-livre).

No segundo semiciclo a chave S_6 permanece fechada; neste período as chaves S_2 e S_3 estão acionadas e as chaves S_1 , S_4 e S_5 permanecem desativadas. Durante a etapa de roda-livre o processo é semelhante ao semiciclo positivo, com a diferença que agora a corrente circula através da chave S_6 e do diodo D_5 .

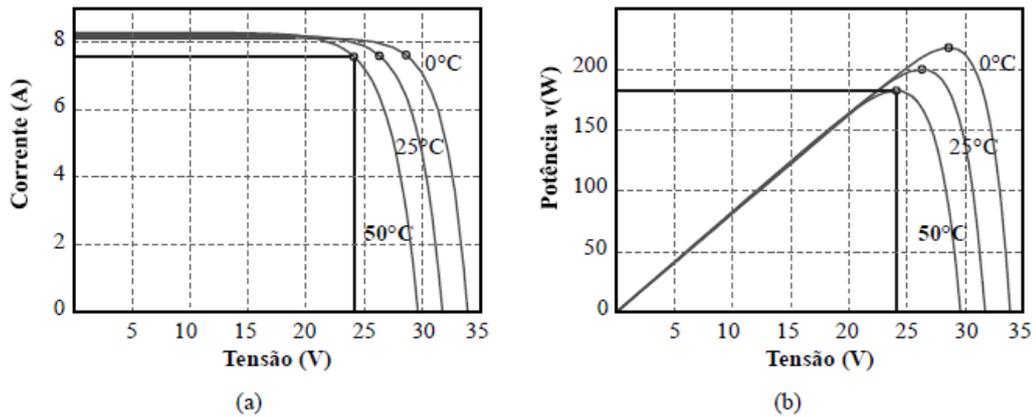
2.6. Revisão das estratégias de MPPT

A potência gerada por um painel não é constante, por não se comportar como uma fonte de energia elétrica convencional, como uma bateria. A corrente depende da tensão e vice-versa. A tensão e a corrente no painel dependem da carga inserida em seus terminais, portanto será variável, mesmo que a potência gerada no painel seja de 100 W, por exemplo. Se conectarmos uma carga em seus terminais de corrente elevada, a tensão tenderá a cair. Por outro lado, se conectarmos uma carga de pouca corrente, a sua tensão tenderá a subir.

Essa relação de tensão, corrente e potência pode ser mostrada pelas curvas $I \times V$ e $P \times V$. Os gráficos a seguir, apresentados na Figura 16 (MARANGONI, 2012) e na Figura 17 (MARANGONI, 2012), foram obtidos a partir de uma simulação realizada por Marangoni (2012) no *software* MATLAB através do desenvolvimento de um script baseado na modelagem matemática do painel, que utiliza informações da folha de dados do painel KC200GT da empresa

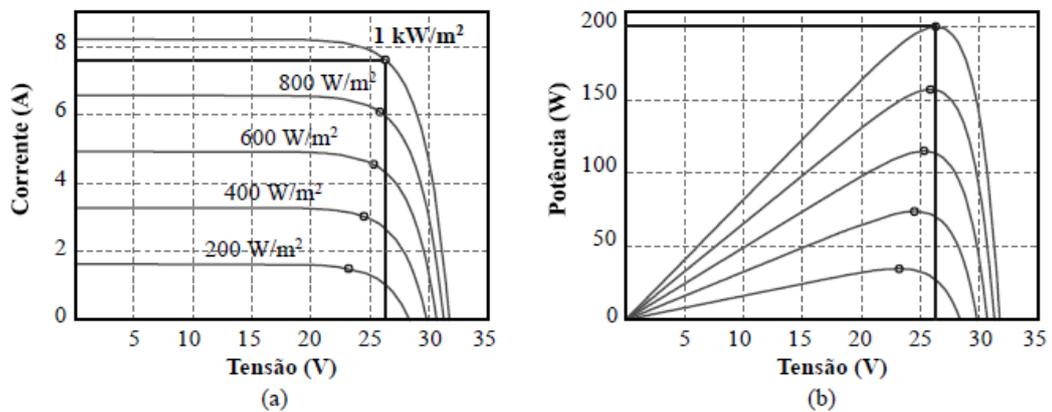
Kyocera para traçar as curvas, para três valores de temperatura distintas, mantendo-se constante a irradiação solar em 1 kW/m^2 e para três valores de irradiação, mantendo-se a temperatura de 25°C . Com o aumento da temperatura, ocorre uma pequena redução do valor da tensão nos terminais do painel.

Figura 16 - Curvas por diferença de temperatura $I \times V$ (a) e $P \times V$ (b).



Fonte: MARANGONI, Filipe (2012).

Figura 17 - Curvas por diferença de irradiação $I \times V$ (a) e $P \times V$ (b).



Fonte: MARANGONI, Filipe (2012).

Para obter maior aproveitamento da energia que o sistema fotovoltaico instalado pode gerar, utilizam-se estratégias de rastreamento do ponto de máxima potência do painel. Há três classes de algoritmos de MPPT, são eles: algoritmos baseados em modelo, que utilizam de um modelo matemático para calcular a corrente e a tensão do MPP e os métodos que utilizam aproximações referentes às características do PV; algoritmos baseados em treinamento, que utilizam inteligência artificial, são algoritmos de resposta rápida e precisa sem a necessidade de conhecimento do sistema fotovoltaico por parte da estratégia, porém seu custo é elevado; e algoritmos MPPT heurísticos, que medem a corrente e tensão da saída do painel para a tomada de decisão de aumento ou diminuição da razão cíclica sem a necessidade de conhecimento do sistema

fotovoltaico por parte da estratégia, sendo os mais utilizados, pois são de fácil implementação e alto desempenho (MOÇAMBIQUE, 2012; PINHEIRO, 2016).

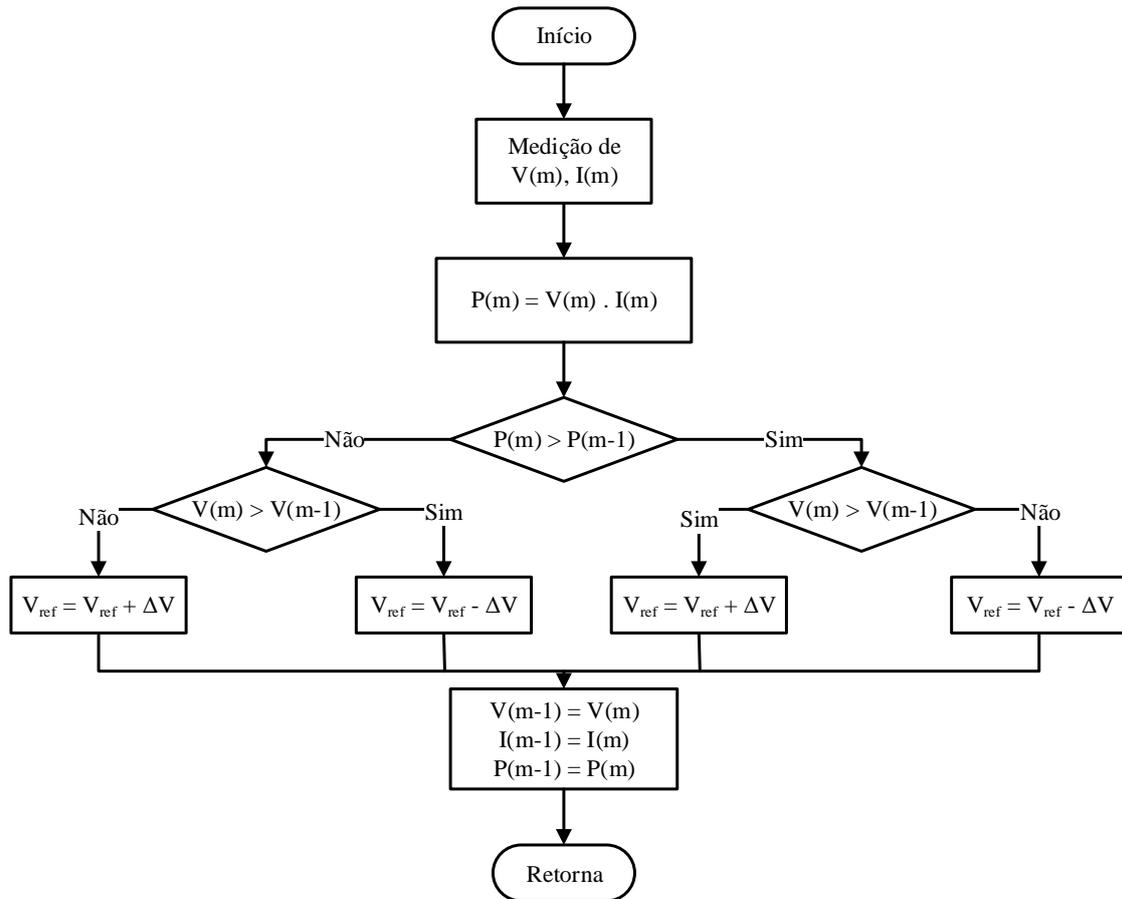
A seguir serão apresentados os três principais métodos da classe baseada em algoritmos MPPT heurísticos.

2.6.1. Perturba e Observa (P&O)

O algoritmo baseia-se, como o nome já diz, em uma perturbação positiva ou negativa na tensão, ou na corrente, e observação da potência para tomada de decisão do próximo passo para encontrar a MPP. Caso a perturbação cause um aumento na potência, o algoritmo mantém o mesmo sentido de perturbação, por outro lado, se a perturbação ocasionar em um decréscimo da potência o algoritmo irá mudar o sentido de perturbação. O algoritmo mantém essa variação da potência em baixa frequência (frequência de MPPT deve ser menor que a frequência de modulação) até atingir valores bem próximos ao do MPP. O passo de variação da tensão ou da corrente deve ser pequeno para obter maior precisão e eliminar grandes oscilações, porém, se o passo for muito pequeno, o algoritmo fica mais lento, o que compromete a eficiência quando há variações atmosféricas (BRITO, 2013; LOBATO, 2015; PINHEIRO, 2016).

Na Figura 18 é apresentado um fluxograma do funcionamento padrão do algoritmo P&O, em que $V(m)$ (igual a V_{ref}) e $I(m)$ são variáveis medidas na iteração atual do algoritmo, $V(m-1)$ e $I(m-1)$ são os seus valores medidos na iteração anterior e ΔV a variação da tensão.

Figura 18 - Fluxograma do algoritmo P&O.



Fonte: Adaptada pelo autor.

2.6.2. Condutância Incremental (IC)

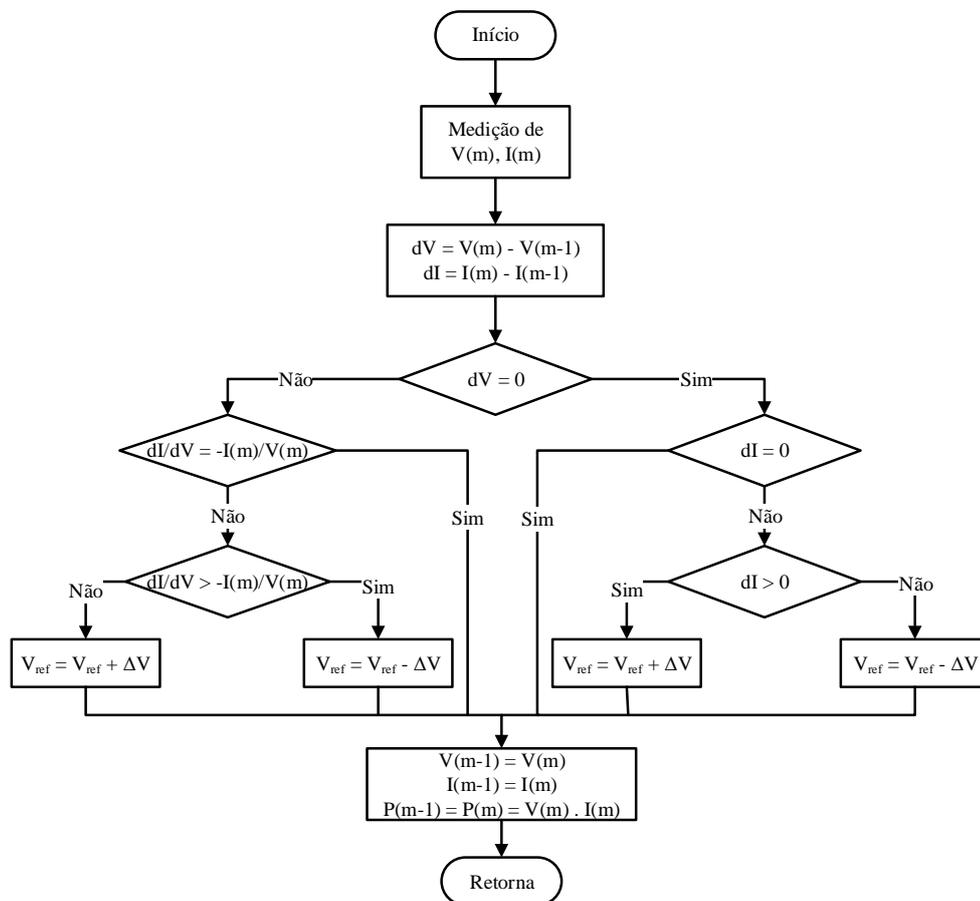
O método muito similar ao P&O é o de condutância incremental (IC) (controlado pela tensão), ou impedância incremental (controlado pela corrente), que possibilita obter menores variações próximas ao MPP e mais rapidez na taxa de convergência ao comparar com a P&O. O método é baseado no princípio de que as derivadas em relação à tensão ou corrente das curvas características $P \times V$ e $I \times V$ é zero no MPP, derivada de valor positivo à esquerda do MPP e derivada de valor negativo à direita do MPP.

Assumindo dI e dV como, respectivamente, a variação da corrente e a variação de tensão do sistema e baseado na derivada da potência em relação à tensão, pode-se obter a relação para o rastreamento por tensão apresentado em (1) (BRITO, 2013; LOBATO, 2015):

$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} = -\frac{I(m)}{V(m)}, \text{ no MPP} \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{I(m)}{V(m)}, \text{ à esquerda do MPP} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I(m)}{V(m)}, \text{ à direita do MPP} \end{cases} \quad (1)$$

Com base no funcionamento do método e pelo grupo de equações (1), pode-se montar um fluxograma do algoritmo IC, apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Fluxograma do algoritmo IC.



Fonte: Adaptada pelo autor.

2.6.3. Tensão Constante

O algoritmo do método de tensão constante é baseado na construção de uma malha fechada em tensão convencional, no qual o erro entre a tensão de referência e a tensão medida no painel é a entrada de um compensador que estabelece a razão cíclica do conversor. Com isto o controle altera a razão cíclica até atingir a tensão de referência. Este método é de fácil aplicação

e diminui custos por ser necessária apenas a medição da tensão, contudo, o algoritmo não considera a variação de temperatura que influencia diretamente na mudança do ponto de MPP. Isto causa uma grande perda de eficiência, visto que em um sistema real a temperatura muda constantemente. Para obter melhores resultados, seria necessário um algoritmo ou controle auxiliar para a medição da temperatura e alteração da tensão de referência, o que faria o método tensão constante obsoleto, já que há outros métodos que consideram essa variável (GRUNDEMANN, 2017).

2.7. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais elementos de um sistema fotovoltaico, desde a célula fotovoltaica, passando pelos modos de arranjo e disposição dos painéis, até chegar no modo de conversão e rastreamento do ponto de máxima potência. Todos esses elementos serão necessários para desenvolvimento dos próximos capítulos, nos quais o projeto em si será apresentado e desenvolvido.

3 TOPOLOGIA E ESTRATÉGIA DE MPPT

Neste capítulo será abordada toda metodologia utilizada para a obtenção dos resultados. Será apresentada toda topologia, o seu princípio de funcionamento por modelo em espaço de estados, o observador por modos deslizantes e a estratégia de MPPT utilizada.

3.1. Topologia completa

Para o desenvolvimento do trabalho foi escolhido o painel fotovoltaico comercial 3TSolar – 260Wp, a fim de utilizar seus parâmetros para as simulações. A seguir serão apresentadas na Tabela 2 as características do painel obtidos a partir da folha de dados do mesmo, fornecido pelo fabricante. Não havia alguns dos parâmetros na folha de dados, por essa razão estes foram substituídos pelos valores padrões do *software* PSIM®.

Tabela 2 - Parâmetros do painel fotovoltaico 3TSolar - 260Wp.

Característica	Grandeza	Valor
Número de células	N_s	60
Potência máxima nominal	P_{max} (W)	260
Tensão de pico nominal	V_{pmax} (V)	30,7
Corrente de pico nominal	I_{pmax} (A)	8,47
Tensão de circuito aberto	V_{ca} (V)	38,1
Corrente de curto-circuito	I_{cc} (A)	9,14
Coeficiente de temperatura de P_{max}	(%/°C)	-0,44
Coeficiente de temperatura de V_{ca}	(%/°C)	-0,3
Coeficiente de temperatura de I_{cc}	(%/°C)	0,04

Fonte: 3T Solar: Energia Renovável (2018).

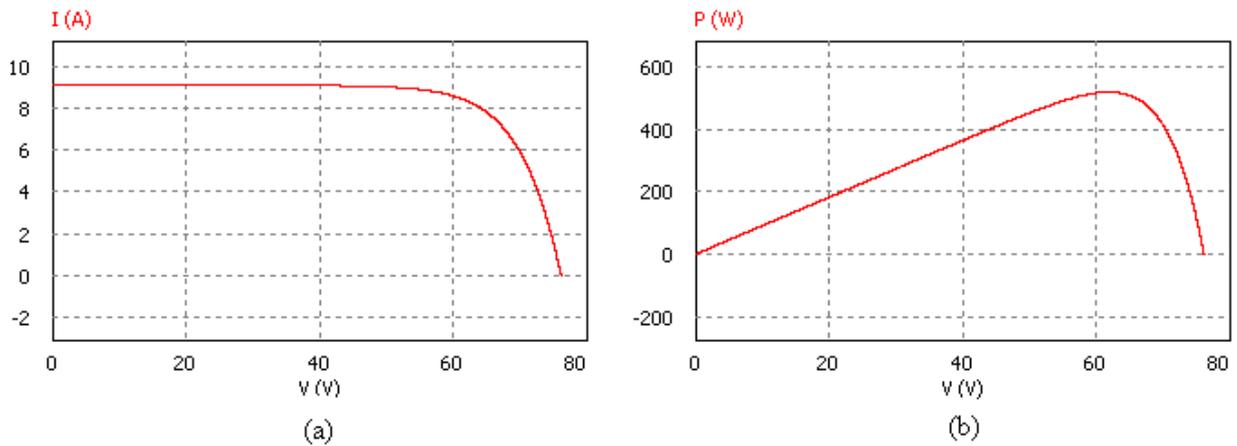
A partir destes parâmetros é possível obter as curvas características, $I \times V$ e $P \times V$ com a ferramenta chamada *Solar Module (physical model)* do *software* PSIM®. Esta ferramenta simula um painel fotovoltaico real, gerando os dados necessários para a simulação, como na Tabela 3, e as curvas características, apresentadas na Figura 20. Foram utilizados dois painéis em série a fim de se obter uma maior tensão e uma maior potência nos terminais do arranjo.

Tabela 3 - Resultados da ferramenta *Solar Module* do PSIM® a partir dos parâmetros do painel.

Característica	Grandeza	Valor
Potência máxima nominal	P_{max} (W)	520,83
Tensão de pico nominal	V_{pmax} (V)	61,95
Corrente de pico nominal	I_{pmax} (A)	8,41
Corrente de saturação	(μ A)	5,58
Coefficiente de temperatura	(A/°K)	0,003656

Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Curvas características (a) $I \times V$ e (b) $P \times V$.



Fonte: Próprio autor.

Para processar a energia fornecida por esse painel optou-se por utilizar um conversor *Boost* CC-CC conectado a uma carga. Foram utilizados os parâmetros de tensão de entrada e potência do painel e definiu-se uma tensão de saída desejada, de forma que garanta uma boa faixa de operação, e a frequência de comutação do chaveamento, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações para o projeto do conversor.

Característica	Grandeza	Valor
Potência máxima no painel nominal	P_{pv-max} (W)	520
Tensão de entrada	V_{pv} (V)	61,4
Tensão de saída	V_o (V)	220
Frequência de chaveamento	f_s (kHz)	40

Fonte: Próprio autor.

Com estes dados pode-se calcular os valores dos elementos do conversor. A resistência (ou a carga) pode ser obtida conforme a lei de Ohm, conforme equação (2), e tendo as tensões de entrada e saída pode-se, também, calcular a razão cíclica com a equação (3) (MOHAN, 1995):

$$R = \frac{V_o^2}{P_{\max}} = 93,08 \Omega \quad (2)$$

$$D = \frac{V_o - V_{pv}}{V_o} = 0,72 \quad (3)$$

Com a resistência pode-se calcular a corrente média no indutor na equação (4), que, por sua vez, será necessária para calcular a indutância:

$$I_{L-med} = \frac{V_o^2}{V_{pv}R} = 8,47 \text{ A} \quad (4)$$

Pode-se utilizar as equações (5) e (6) para calcular a indutância e a capacitância do conversor (MOHAN, 1995; DA SILVA, 2011):

$$L = \frac{V_{pv}D}{f_s \Delta I_L} = 1,31 \text{ mH} \quad (5)$$

Onde, $\Delta I_L = I_{L-med} 10\%$

$$C = \frac{V_o D}{R f_s \Delta V_o} = 1,936 \mu\text{F} \quad (6)$$

Onde, $\Delta V_o = V_o 10\%$

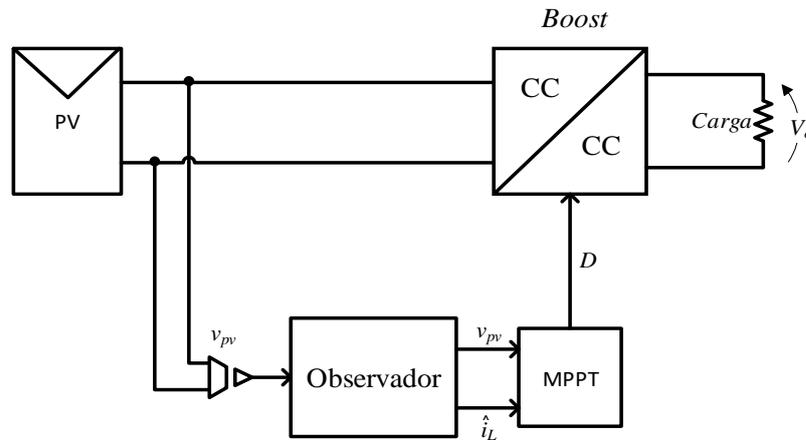
Com a determinação da resistência podemos calcular também o ângulo de operação, que deve ser superior ao arco tangente de um (1) sobre a resistência, como descrito na equação (7) (COELHO, 2008):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{R} \right) = 0,6155 \text{ rad} = 35,26^\circ \quad (7)$$

Assim, o conversor opera entre o ângulo de $35,26^\circ$ e 90° na curva característica $I \times V$.

A razão cíclica apresentada anteriormente foi calculada com base dos parâmetros de saída e entrada desejados para o sistema e em uma situação ideal de temperatura de 25°C e de irradiação de 1000 W/m^2 . Porém, a temperatura e irradiação incidindo no sistema variam conforme o tempo passa, conforme visto na Figura 16 e na Figura 17. Então, faz-se necessária a utilização de uma estratégia de MPPT e um observador das variáveis de entrada e saída para variar a razão cíclica a fim de se obter a máxima potência que o sistema pode proporcionar. Na Figura 21 é apresentado um esquemático da topologia completa, sendo i_L a corrente no indutor.

Figura 21 - Esquemático da topologia completa.



Fonte: Próprio autor.

No decorrer deste capítulo será apresentado o funcionamento da topologia, como o observador foi obtido e a construção do algoritmo da estratégia de MPPT.

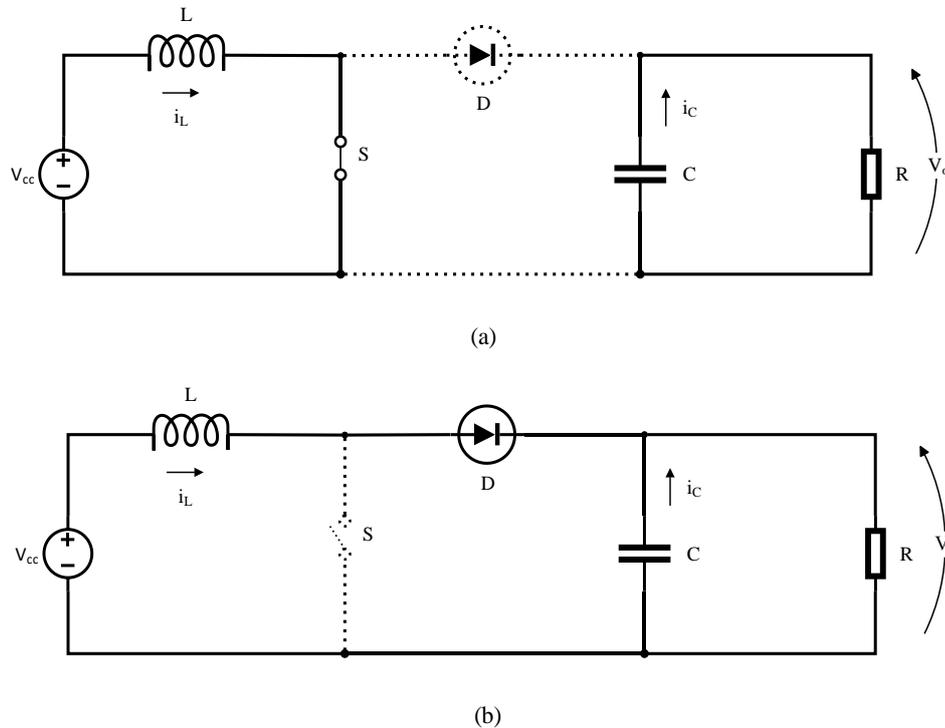
3.2. Princípio de funcionamento da topologia

Como consideramos uma carga constante nos terminais do conversor, pode-se controlar a tensão de saída com o aumento ou diminuição da corrente de entrada. Além disso, a tensão de entrada é uma fonte independente do sistema (depende da irradiação incidida no painel), então pode-se reescrever o que foi dito anteriormente como a necessidade de que a corrente do indutor como variável (I_L) e a tensão de saída do conversor como variável (V_o) sejam controladas a fim de se obter um equilíbrio de potências. Para isto, foi adotada a técnica de modelo em espaços de estados, e com esse modelo pode-se relacionar a corrente de entrada com a razão cíclica do conversor e relacionar a tensão de saída com a corrente de entrada do conversor. Essa modelagem será vista no tópico seguinte.

3.2.1. Modelo em espaço de estados

Segundo Da Silva (2011), a modelagem do sistema com *Boost* considera os dois estágios do conversor, sendo o primeiro estágio com a chave S conduzindo (fechada) e o segundo estágio com a chave S bloqueada (aberta), como apresentado na Figura 22 (a) e (b).

Figura 22 - Estágios de operação do *Boost*: (a) estágio de condução da chave *S* e (b) estágio de bloqueio da chave *S*.



Fonte: Próprio autor.

Para a modelagem em espaço de estados consideram-se as equações diferenciais dos elementos que acumulam energia no sistema, são eles o indutor e o capacitor. Assim, pode-se definir como variáveis independentes do sistema a corrente do indutor ($I_L(t)$) e a tensão de saída no capacitor ($V_o(t)$), que pode-se representar, na equação (8), como um vetor de estados. Como a tensão de entrada ($V_{pv}(t)$) é uma fonte independente do sistema, também podemos incluí-la como um vetor de entrada, representado na equação (9). Na equação (10) tem-se a corrente do indutor como o vetor de saída, uma vez que o objetivo é relacionar a tensão de saída com a corrente do indutor e este com a razão cíclica, conforme visto na Figura 21 e na seção 3.2 (ERICKSON, 2001).

$$x(t) = \begin{bmatrix} I_L(t) \\ V_o(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$u(t) = [V_{pv}(t)] \quad (9)$$

$$y(t) = [I_L(t)] \quad (10)$$

No primeiro estágio, como visto na Figura 22 (a), a chave semicondutora S está em condução, sendo o tempo de condução expresso por $0 \leq t < DT_S$, sendo que $T_S = 1/F_S$. Aplicando a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), obtêm-se o conjunto de equações diferenciais expressas em (11).

$$1^\circ \text{ estágio} = \begin{cases} L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{pv}(t) \\ C \frac{dV_o(t)}{dt} = -\frac{V_o(t)}{R} \end{cases} \quad (11)$$

De acordo com Erickson (2001), podem-se expressar as equações que descrevem os estágios relacionando os vetores de estados e de entrada e vetores de saída pelas equações (12).

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A_1 x(t) + B_1 u(t) \\ y(t) &= H_1 x(t) \end{aligned} \quad (12)$$

Assim, aplicando as equações de 11 em 10 podem-se definir os valores das matrizes A_1 , B_1 e H_1 nas equações (13), (14) e (15), onde A é definido como o ganho dinâmico e B é o ganho de entrada.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1/RC \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$H_1 = [1 \quad 0] \quad (15)$$

No segundo estágio, como visto na Figura 22 (b), a chave semicondutora S está bloqueada, sendo o tempo de condução expresso por $DT_S \leq t < T_S$. Aplicando a LKT, obtêm-se o conjunto de equações diferenciais expressas em (16).

$$2^\circ \text{ estágio} = \begin{cases} L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{pv}(t) - V_o(t) \\ C \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - \frac{V_o(t)}{R} \end{cases} \quad (16)$$

Podem-se expressar as equações que descrevem os estágios relacionando os vetores de estados e de entrada e de saída pelas equações de (17).

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_2 x(t) + B_2 u(t) \quad (17)$$

$$y(t) = H_2 x(t)$$

Do mesmo modo que no primeiro estágio, aplicando as equações de (16) em (15) podem-se definir os valores das matrizes A_2 , B_2 e H_2 nas equações (17), (18) e (19).

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$H_2 = [1 \quad 0] \quad (19)$$

Obtendo as equações dos estágios do conversor, pode-se encontrar uma equação de equilíbrio do sistema para que, finalmente, se possa obter o modelo em espaço de estados. Conforme Erickson (2001), para obter a modelagem é necessário que o modelo em espaço de estado esteja em regime permanente. Isso só é possível se a frequência de variação das grandezas que compõe a entrada do sistema for muito menor do que a frequência de chaveamento da chave semicondutora, o que é válido, visto que a entrada é CC e a comutação da chave é de 40 kHz.

Para a obtenção do modelo, o vetor de estados em regime permanente e o vetor de saída em regime permanente podem ser solucionados a partir das equações (20) e (21).

$$\begin{aligned} X &= -A^{-1}BU \\ Y &= (-HA^{-1}B)U \end{aligned} \quad (20)$$

Onde:

$$\begin{aligned} A &= A_1D + A_2D' \\ B &= B_1D + B_2D' \\ H &= H_1D + H_2D' \\ U &= [V_{pv}] \end{aligned} \quad (21)$$

Assim, substituindo as equações (12)-(14) e (17)-(19) em (21) e (21) em (20), tem-se as equações (22), (23) e (24).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & D-1/L \\ 1-D/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (22)$$

$$\dot{I}_L = \frac{D-1}{L} V_o + \frac{V_{pv}}{L} \quad (23)$$

$$\dot{V}_o = \frac{1-D}{C} - \frac{1}{RC} \cdot V_o \quad (24)$$

3.3. Observador por modos deslizantes

Nesta seção será apresentado o observador do conversor por modos deslizantes, com modelagem e desenvolvimento em tempo contínuo. A proposta do uso de observador por modos deslizantes é a possibilidade de reduzir o número de sensores, uma vez que pode-se eliminar a necessidade de medir um dos parâmetros utilizados pelo MPPT.

Proposta, inicialmente, por Emelyanov (1967) e sua equipe na década de 1950, a teoria de sistemas de estrutura variável (SEV) é baseada na utilização de um modelo matemático com uma malha fechada com realimentação descontínua. Dentre as aplicações da teoria SEV, as estratégias de observação são utilizadas para obter os estados de um determinado sistema, onde a realimentação descontínua permite que a trajetória dos estados fique confinada em uma superfície de deslizamento (EMELYANOV, 1967; UTKIN, 1993).

Um sistema opera em modo deslizante quando uma das entradas do sistema é uma função descontínua, onde a frequência da descontinuidade pode ser teoricamente infinita (UTKIN, 1993). Utilizando um sistema de primeira ordem relacionando os vetores de estado e de entrada, tal como expresso na equação (12) para rastrear o estado $x(t)$, pode-se obter a equação (25), adicionando uma função de chaveamento na equação (12), assim tem-se:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + Of(t) \quad (25)$$

Onde O é o vetor de ganhos do observador, $\hat{x}(t)$ é o vetor de estados observado e $f(t)$ é a função de chaveamento.

A função de chaveamento tem por objetivo que o erro $\tilde{x}(t)$ entre o estado medido $x(t)$ e o estado observado $\hat{x}(t)$ seja nulo, de modo a tornar a derivada do estado observado positiva ou negativa, ou seja, fazendo com que $\hat{x}(t)$ convirja para $x(t)$. Essa relação entre o estado observado e o estado medido é chamada de superfície de deslizamento, que pode ser expressa pela equação 26.

$$\tilde{x}(t) = \hat{x}(t) - x(t) \quad (26)$$

O observador por modo deslizante deve operar na superfície de deslizamento em que $\tilde{x}(t)$ é teoricamente nulo, para isso o ganho do observador associado ao estado $x(t)$ deve ser projetado adequadamente. A convergência do estado observado para o estado medido pode ser garantida quando a derivada do erro quadrático é negativa, como mostra a equação (27) (DA SILVA, 2017).

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\tilde{x}^2(t)}{2} \right] = \tilde{x}(t) \frac{d\tilde{x}(t)}{dt} < 0 \quad (27)$$

3.3.1. Projeto

A partir das equações (22)-(27) e do conceito de observador por modos deslizantes apresentados anteriormente, obtém-se a equação (28) que pode ser detalhado através das equações (29) e (30).

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{I}_L(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{V}_o(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & D-1/L \\ 1-D/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_L(t) \\ \hat{V}_o(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv}(t) + \begin{bmatrix} |\tilde{V}_o| k_i \\ 1 \end{bmatrix} \mu(t) \quad (28)$$

$$\frac{d\hat{I}_L(t)}{dt} = \frac{D-1}{L} \hat{V}_o(t) + \frac{V_{pv}(t)}{L} + |\tilde{V}_o(t)| k_i \mu(t) \quad (29)$$

$$\frac{d\hat{V}_o(t)}{dt} = \frac{1-D}{C} \hat{I}_L(t) - \frac{1}{RC} \hat{V}_o(t) + \mu(t) \quad (30)$$

Onde, $\hat{I}_L(t)$ é a corrente no indutor observada, $\hat{V}_o(t)$ é a tensão do capacitor de saída observada, k_i é o ganho do observador de corrente e $\mu(t)$ é a função de chaveamento do observador, dada por (31):

$$\mu(t) = K_v \text{sign}(V_o(t)) \quad (31)$$

Onde, k_v é o ganho da função chaveada e $\tilde{V}_o(t)$ é o erro entre a corrente observada e a medida.

O termo $\tilde{V}_o(t)$ da equação (29) foi incluído de modo a atingir um melhor desempenho em regime transitório da corrente observada, uma vez que a velocidade de convergência aumenta proporcionalmente com o termo $\tilde{V}_o(t)$. Quando o observador possuir elevado erro de corrente, a velocidade de convergência aumentará proporcionalmente e quando o observador se aproximar dos valores nominais a velocidade de convergência diminuirá. Devido a atuação da função de chaveamento $\mu(t)$ o observador, em regime permanente, indicará a existência de pequenos erros de tensão $\tilde{V}_o(t)$.

As provas de estabilidade dos observadores das tensões equivalentes são desenvolvidas no domínio do tempo contínuo com base em uma análise através de Lyapunov. A função de Lyapunov e a sua derivada são dadas a seguir:

$$V(t) = \frac{1}{2} (\tilde{V}_o(t)^2 + \tilde{I}_L(t)^2) \quad (32)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{d\tilde{V}_o(t)}{dt} \tilde{V}_o + \frac{d\tilde{I}_L(t)}{dt} \tilde{I}_L \quad (33)$$

Visto que o erro de corrente \tilde{I}_L e o de tensão \tilde{V}_o , baseados na equação (26), são dados pelas equações (34) e (35).

$$\frac{d\tilde{I}_L(t)}{dt} = \frac{d\hat{I}_L(t)}{dt} - \frac{dI_L(t)}{dt} \quad (34)$$

$$\frac{d\tilde{V}_o(t)}{dt} = \frac{d\hat{V}_o(t)}{dt} - \frac{dV_o(t)}{dt} \quad (35)$$

Substituindo as equações (23) e (29) em (34) e as equações (24) e (30) em (35), obtém-se:

$$\frac{d\tilde{I}_L(t)}{dt} = \frac{D-1}{L} \tilde{V}_o(t) + |\tilde{V}_o(t)| k_i \mu(t) \quad (36)$$

$$\frac{d\tilde{V}_o(t)}{dt} = \frac{1-D}{C} \tilde{I}_L(t) - \frac{1}{RC} \tilde{V}_o(t) + \mu(t) \quad (37)$$

Substituindo as equações (36) e (37) na equação (33) e considerando (31), obtemos a seguinte função:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \left(\frac{1-D}{C} + \frac{D-1}{L} + k_i k_v \right) \tilde{I}_L \tilde{V}_o + k_v |\tilde{V}_o| - \frac{1}{RC} \tilde{V}_o^2 \quad (38)$$

Deve ser garantido que $\frac{dV(t)}{dt} < 0$. Se analisarmos a equação 36, o erro da tensão $\tilde{V}_o(t)$ depende diretamente do erro de corrente $\tilde{I}_L(t)$. Esta relação indica que um aumento no erro de corrente $\tilde{I}_L(t)$ causa um aumento no erro de tensão $\tilde{V}_o(t)$, o que contribui para o aumento do termo $k_v |\tilde{V}_o|$. Desta forma, a operação em modos deslizantes com $\frac{dV(t)}{dt} < 0$ é garantida para k_v grande o suficiente e negativo e k_i deve ser pequeno o suficiente e positivo, onde a função chaveamento compensa os termos referentes às variações paramétricas e dinâmicas não modeladas.

3.4. Estratégia de MPPT

A estratégia de MPPT escolhida para o projeto foi a P&O por ser dotada de uma resposta de boa qualidade e confiável, de ser de fácil implementação e razoável esforço computacional. A seguir é mostrado como foi construído o algoritmo e seus dados.

3.4.1. Projeto da estratégia de MPPT

A programação do algoritmo do P&O foi baseado no fluxograma apresentado na Figura 18. Os parâmetros de frequência de amostragem e passo de variação cíclica delta (ΔD) do algoritmo foram escolhidos empiricamente e os valores são, respectivamente, 500 Hz e 0,005. Para se chegar nesse valor foram avaliados os resultados com outras frequências de amostragem e outros passos de variação cíclica delta, que estão apresentados na Tabela 5 e os resultados dos testes serão demonstrados no capítulo seguinte. Vale frisar que a estratégia MPPT não é o foco do trabalho e, sim, o observador por modos deslizantes.

3.5. Conclusão

Neste capítulo foram especificados todos os parâmetros do painel fotovoltaico, calculados todos os elementos do conversor, desenvolvido o modelo em espaço de estados, assim como, e principalmente, o observador por modos deslizantes e, por fim, o algoritmo da estratégia de MPPT. O projeto foi desenvolvido com êxito baseado na literatura pesquisada e o conhecimento adquirido ao longo da graduação.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

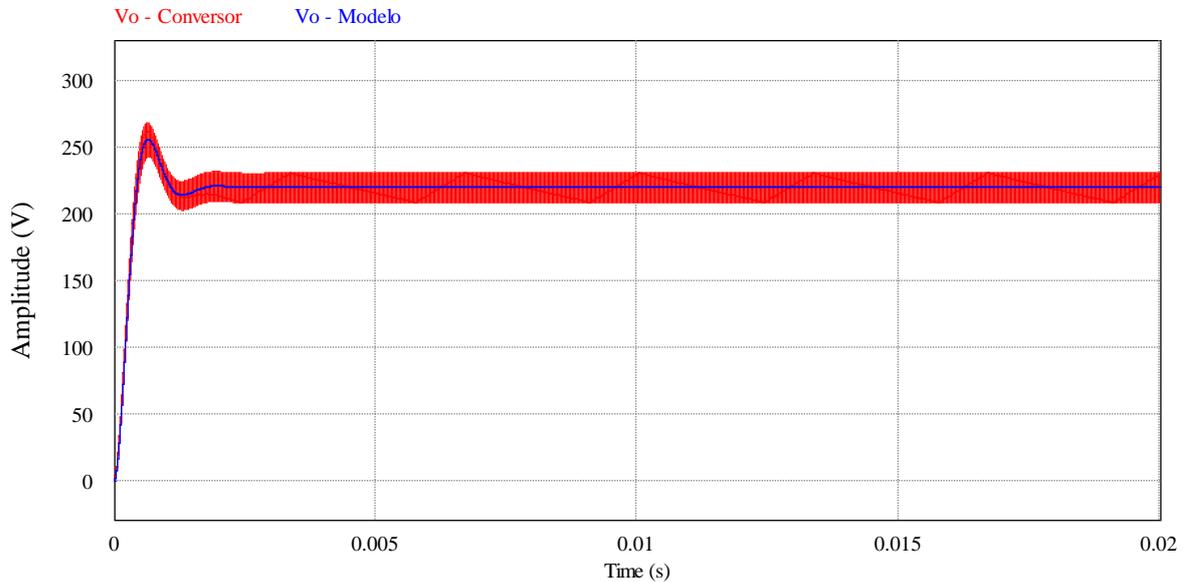
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no *software PSIM®*. Estes resultados são referentes a três circuitos distintos: o conversor com o modelo em espaço de estados, para que se valide o modelo em espaço de estados deduzido no capítulo 3.2.1; o modelo com o observador por modos deslizantes, onde será apresentado o observador por modos deslizantes em operação; e, por fim, a topologia completa, apresentando o conversor com o observador e a estratégia MPPT em operação. Os resultados serão apresentados em forma de gráfico de tensão, corrente e potência e também serão apresentados resultados com perturbações no painel. Destaca-se que, não foi utilizado a ferramenta *módulo solar (modo físico)* e, sim, a ferramenta *módulo solar (modo funcional)* do *software PSIM®* durante as simulações das seções 4.1 e 4.2, pois para a validação do modelo em espaço de estados e do observador por modos deslizantes, não é necessário o painel fotovoltaico com todos os seus elementos. A ferramenta *módulo solar (modo físico)* será utilizada na seção em que será apresentado a topologia completa.

4.1. Resultados da topologia do conversor e modelo em espaço de estados

Os resultados a seguir são referentes a topologia do conversor com modelo em espaço de estados, simulados em um tempo total de simulação de 0,02 segundos. Nestas simulações o modelo não influencia de nenhuma forma no conversor em si, apenas será visto a comparação dos valores rastreados pelo modelo e os medidos no conversor com $D = 0,72$ (razão cíclica) fixo, como calculado no capítulo 3.1.

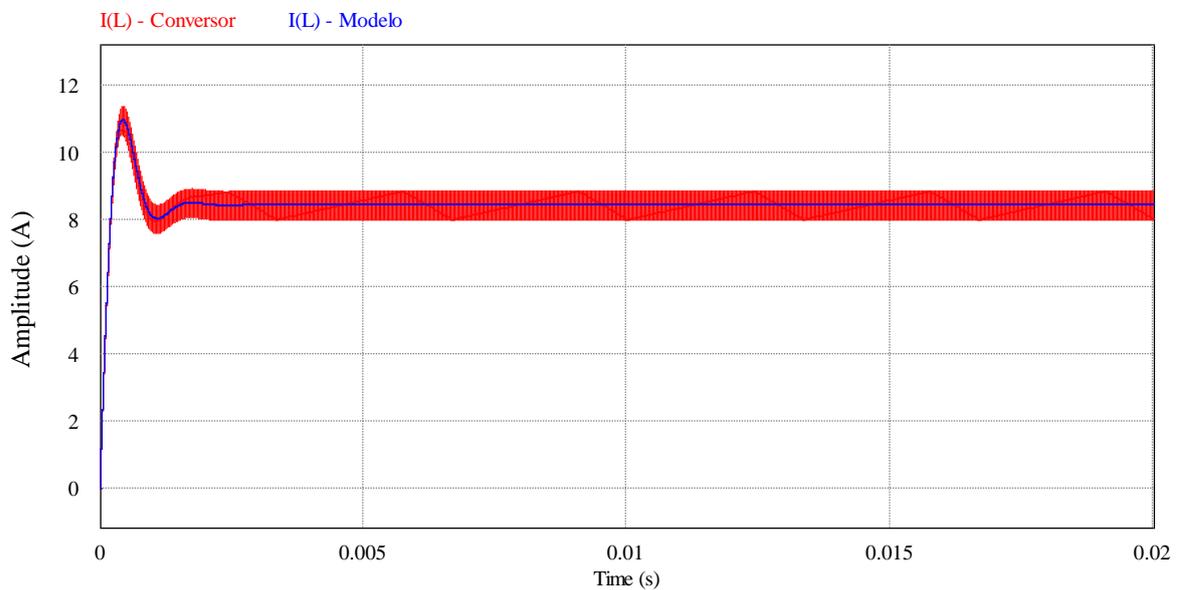
Na Figura 23 e na Figura 24 são apresentados, respectivamente, a tensão de saída medida no conversor (vermelho) e a tensão de saída observada pelo modelo (azul) e a corrente do indutor medida no conversor (vermelho) e a corrente do indutor observada pelo modelo (azul).

Figura 23 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados.



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Gráfico de corrente no indutor medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados.

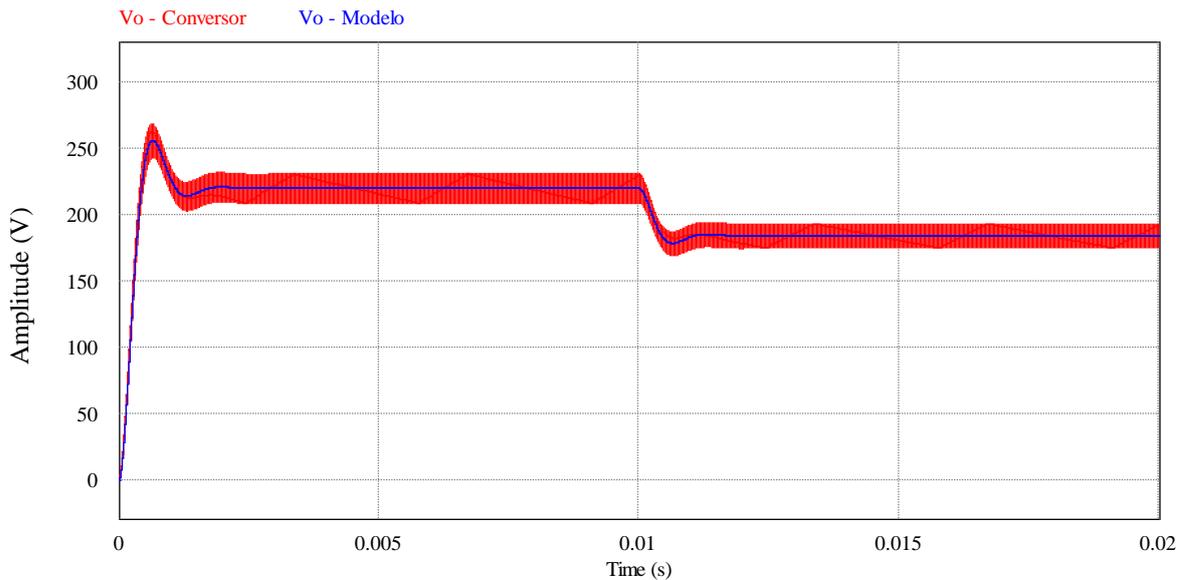


Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que o conversor teve o comportamento esperado, considerando sua oscilação de tensão e corrente previstas pelas equações do capítulo 3.1. Além disso, o modelo em espaço de estado mostrou-se eficaz, visto que foram observados os valores nominais quase que com exatidão.

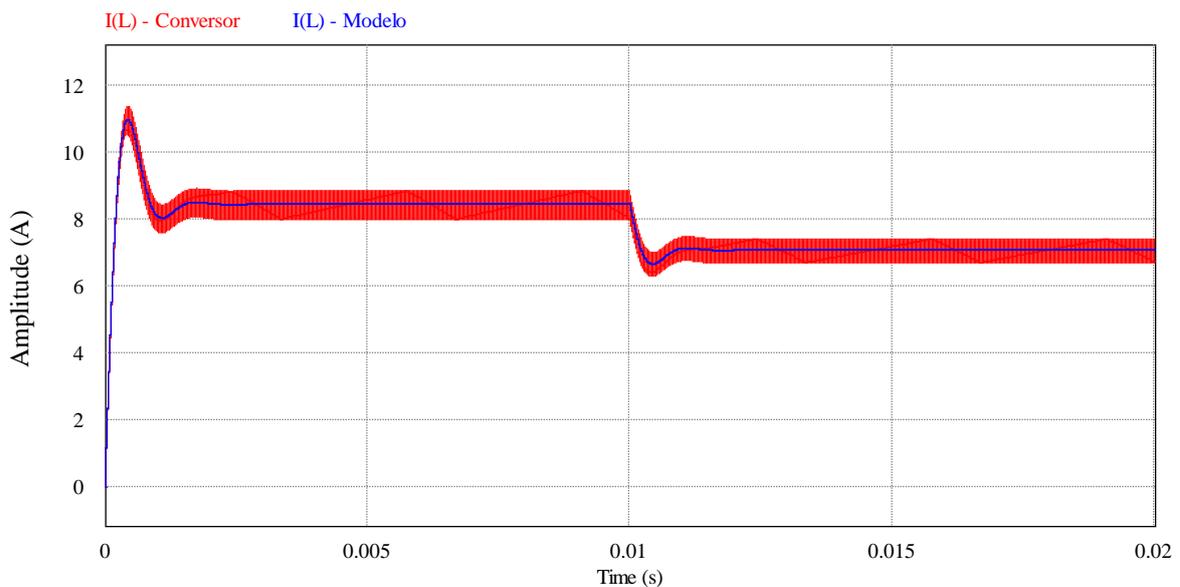
Para comprovar o modelo, foi inserido um degrau de tensão na entrada do conversor, a fim de simular uma perturbação na fonte. Na Figura 25 e na Figura 26 são apresentados os mesmos resultados das figuras anteriores, porém agora com uma perturbação em 0,01s de -10 V.

Figura 25 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados com perturbação de $-10V$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Gráfico de corrente no indutor medida no conversor e observado pelo modelo em espaço de estados com perturbação de $-10V$.



Fonte: Próprio autor.

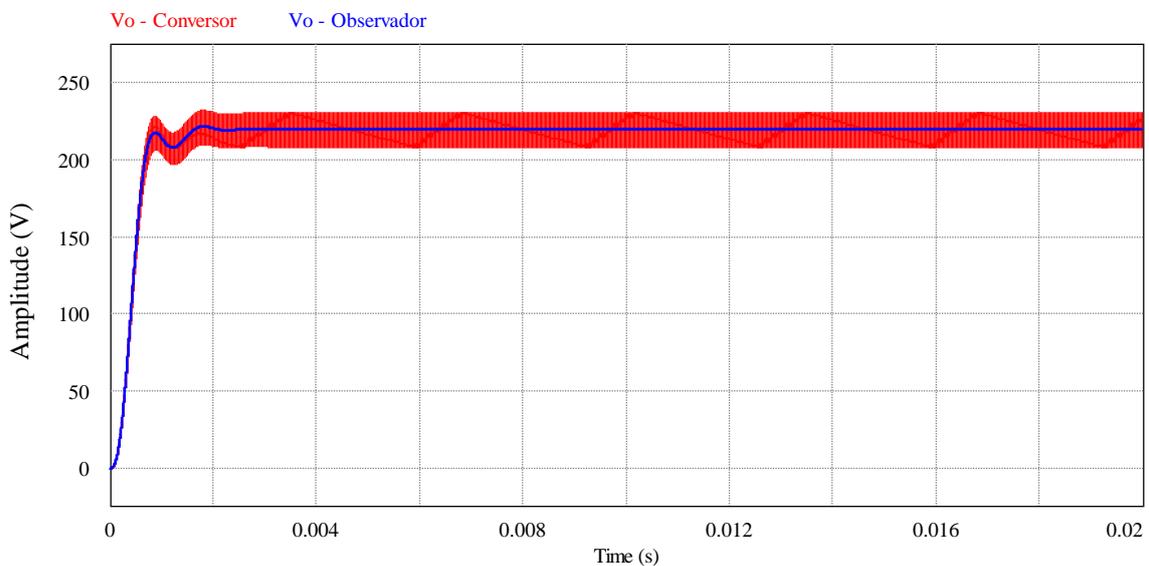
Logo pode-se perceber que, ainda que houvesse uma perturbação na fonte do conversor, o modelo em espaço de estados continua observando a tensão e a corrente sem a ocorrência de erro. Com isso, conclui-se que o modelo foi validado pelas simulações.

4.2. Resultados do conversor com observador por modos deslizantes

Os resultados a seguir são referentes à topologia do conversor com observação por modos deslizantes, simulados em um tempo total de simulação de 0,02 segundos. Nestas simulações o modelo não influencia de nenhuma forma no conversor em si, apenas será apresentada a comparação dos valores rastreados pelo modelo e os medidos no conversor com $D = 0,72$ (razão cíclica) fixa, como calculado na seção 3.1.

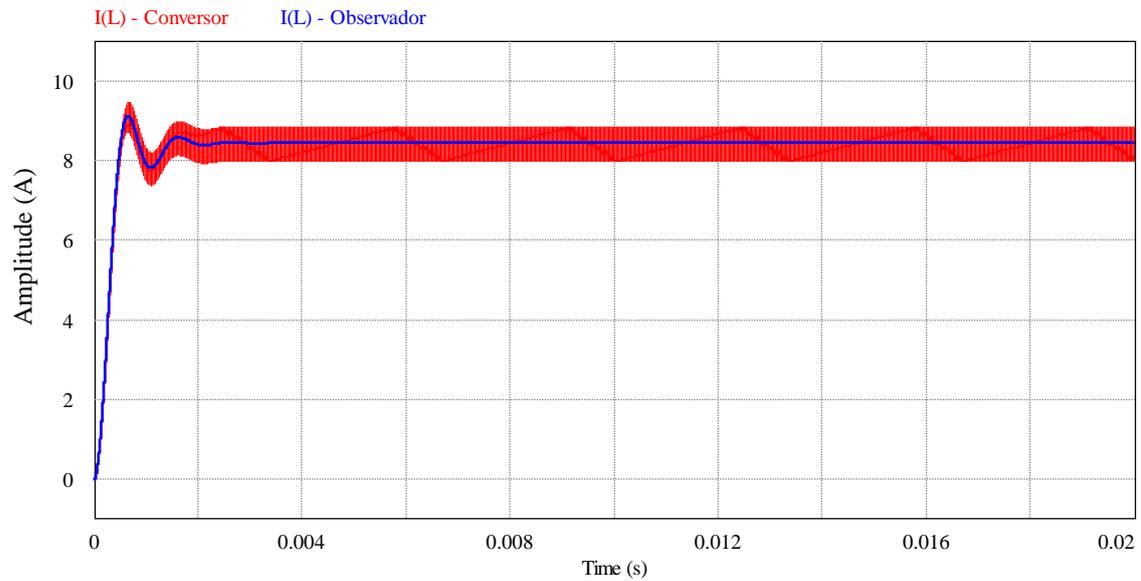
Na Figura 27 e na Figura 28 são apresentados, respectivamente, a tensão de saída medida no conversor (vermelho) e a tensão de saída observada modo deslizante (azul), e a corrente do indutor medida no conversor (vermelho) e a corrente do indutor observada modo deslizante (azul).

Figura 27 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e modo deslizante.



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 - Gráfico da corrente no indutor medida no conversor e modo deslizante.

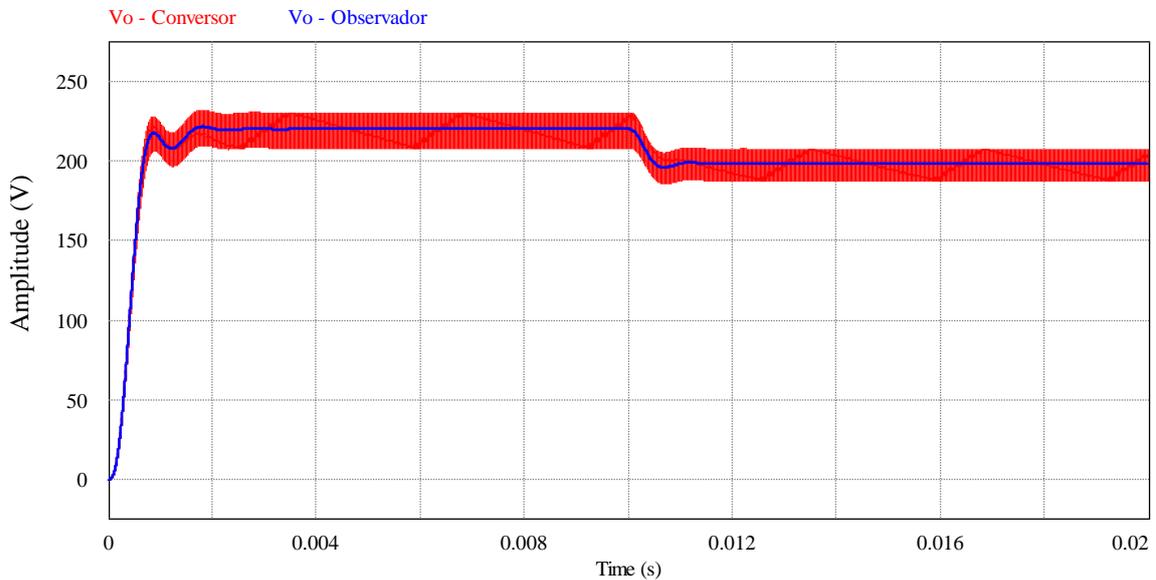


Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que o observador por modo deslizante teve êxito em observar a tensão e a corrente e que, em comparação com o modelo em espaço de estados, teve uma leve melhora em termos de oscilação. Isso deve-se ao fato de que o método por modos deslizantes leva em consideração o erro entre o medido e o observado e um ganho k_i que não é considerado no modelo em espaço de estados.

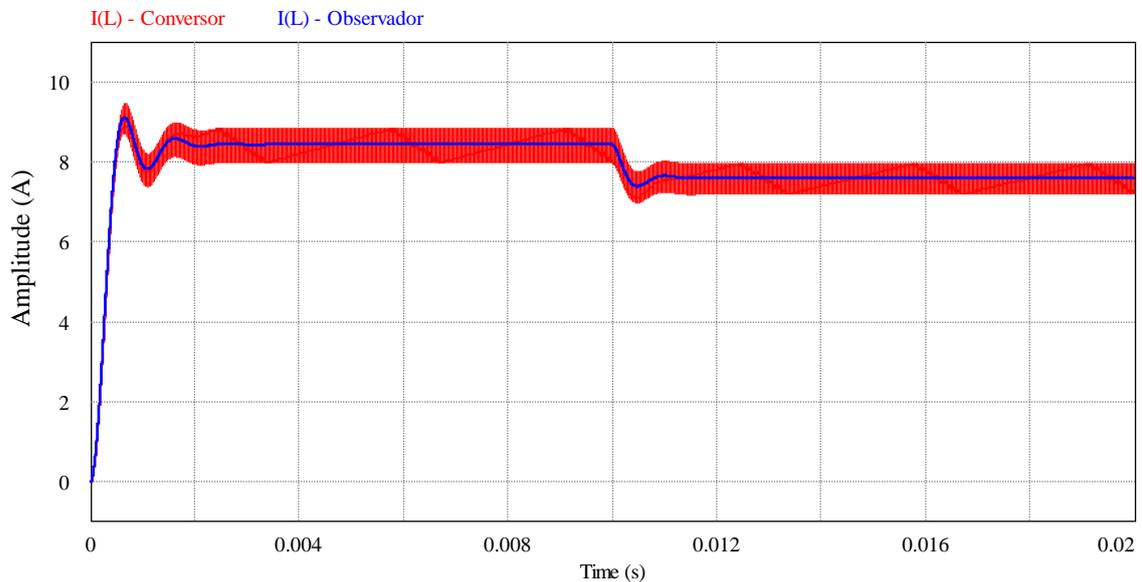
Novamente, inclui-se um degrau de $-10V$ na fonte para verificar se o observador continua a exercer sua função na mesma eficiência. Os resultados obtidos estão na Figura 29 e na Figura 30.

Figura 29 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor e modo deslizante com perturbação de $-10V$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 30 - Gráfico da corrente no indutor medida no conversor e modo deslizante com perturbação de $-10V$.



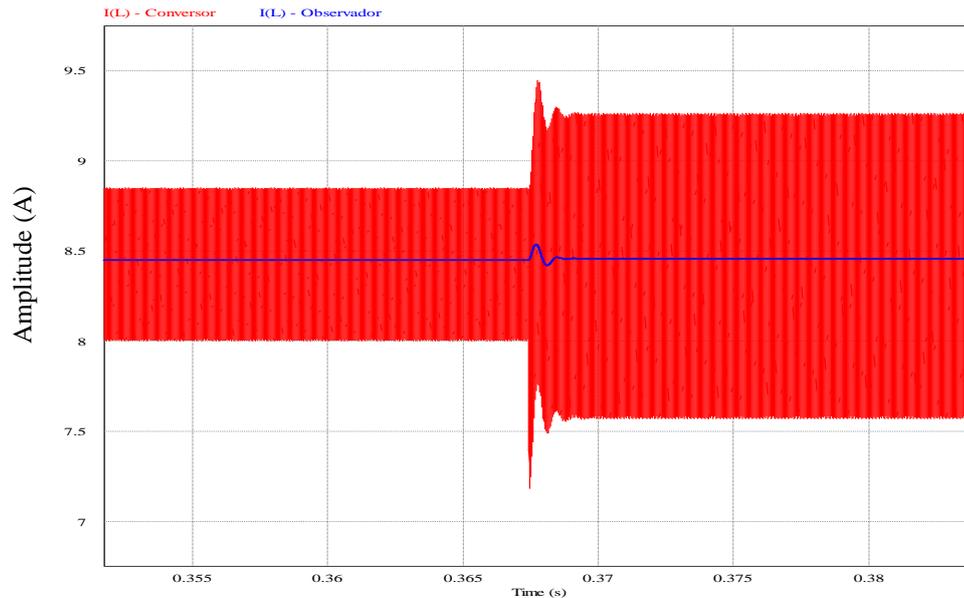
Fonte: Próprio autor.

Nota-se que, ainda que houvesse uma perturbação na fonte do conversor, o observador por modos deslizantes continua observando a tensão e a corrente.

Também foram realizadas simulações com variação paramétrica de modo a simular um sistema conectado à rede, considerando as perturbações que ocorrem na indutância e capacitância do conversor e para demonstrar que, mesmo com distúrbios nesses parâmetros, o observador

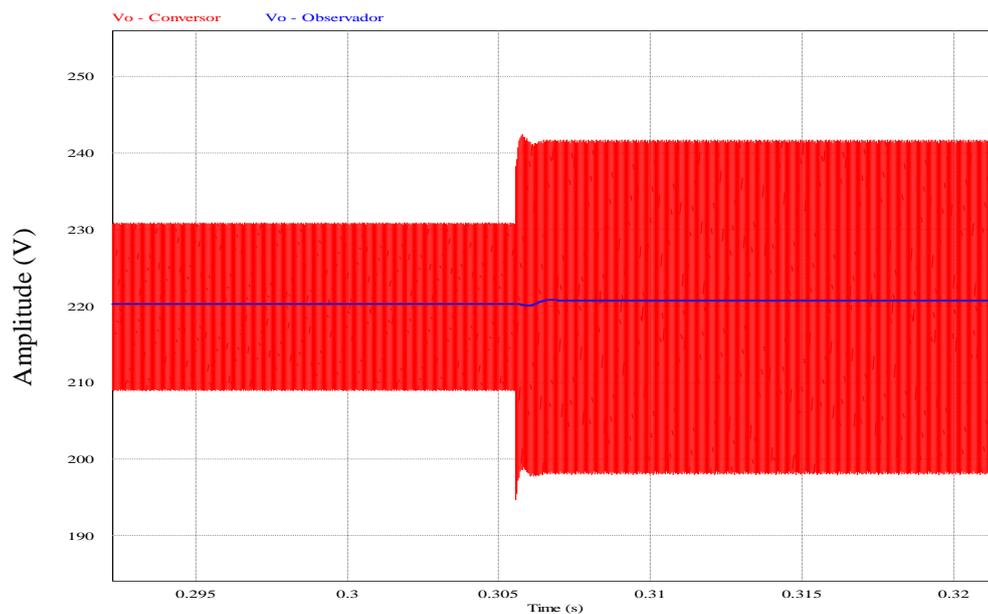
funciona com êxito. O gráfico com uma queda de 50% do valor da indutância durante a simulação conforme Figura 31 e, na Figura 32, está o gráfico com uma queda de 50% do valor da capacitância durante a simulação. Em ambas as simulações a região de interesse é mostrada em detalhe.

Figura 31 – Gráfico da corrente no indutor com uma queda de 50% do valor da indutância durante a simulação.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Gráfico de tensão de saída com uma queda de 50% do valor da capacitância durante a simulação.



Fonte: Próprio autor.

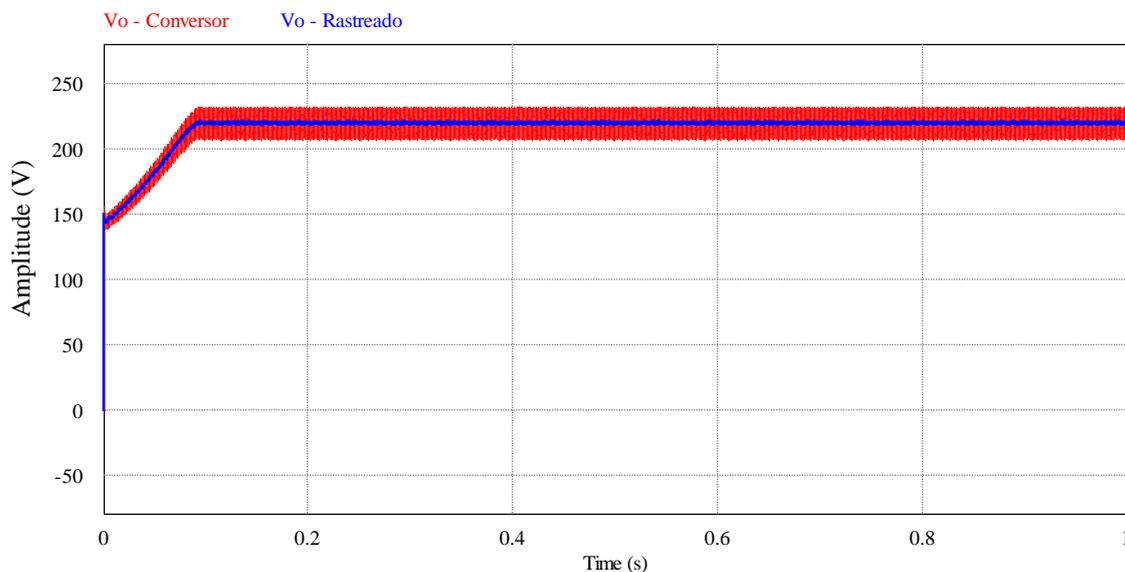
Nota-se que quando há uma queda na indutância do sistema o que ocorre é um aumento do ripple na corrente medida do indutor, porém o valor médio observado ainda é correspondente ao valor médio medido. Quando há uma queda na capacitância do sistema o resultado é semelhante, ocorrendo um aumento do ripple na tensão de saída medida, porém o valor médio observado ainda é o mesmo valor médio medido.

4.3. Resultados da topologia completa

A seguir serão apresentados os resultados das simulações da topologia completa, isto é, incluindo os painéis fotovoltaicos com todos seus parâmetros, utilizando a ferramenta *módulo solar (modo físico)* do software *PSIM®*, o conversor, o observador por modo deslizante e o algoritmo da estratégia P&O de MPPT. Como a estratégia de MPPT, como visto no capítulo 3.4.1, utiliza uma frequência de amostragem baixa em relação à frequência de chaveamento do sistema e um baixo valor de passo de ΔD , o que deixa o sistema mais lento, o tempo total de simulação foi alterado de 0,02 segundos para 1 segundo.

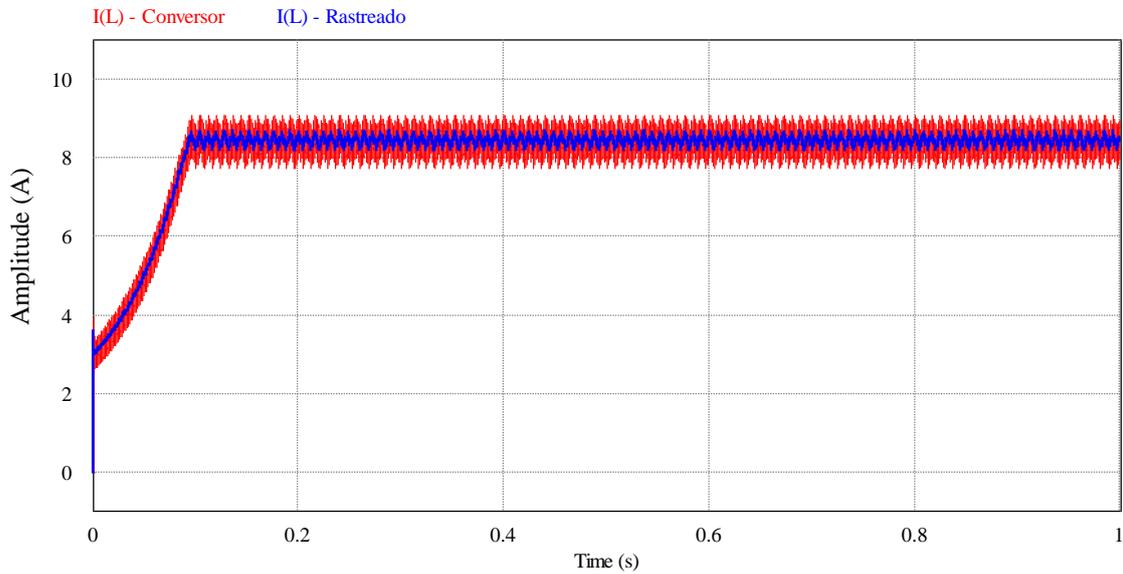
Na primeira simulação é considerado o painel fotovoltaico recebendo uma irradiação constante de $1000W/m^2$ e uma temperatura também constante de $25^\circ C$. Estas simulações resultaram nos gráficos representados na Figura 33 e na Figura 34 que, respectivamente, é a tensão de saída medida no conversor (vermelho) e a tensão de saída observada modo deslizante (azul), e a corrente do indutor medida no conversor (vermelho) e a corrente do indutor observada modo deslizante (azul).

Figura 33 - Gráfico de tensão de saída medida no conversor operando com MPPT e rastreado.



Fonte: Próprio autor.

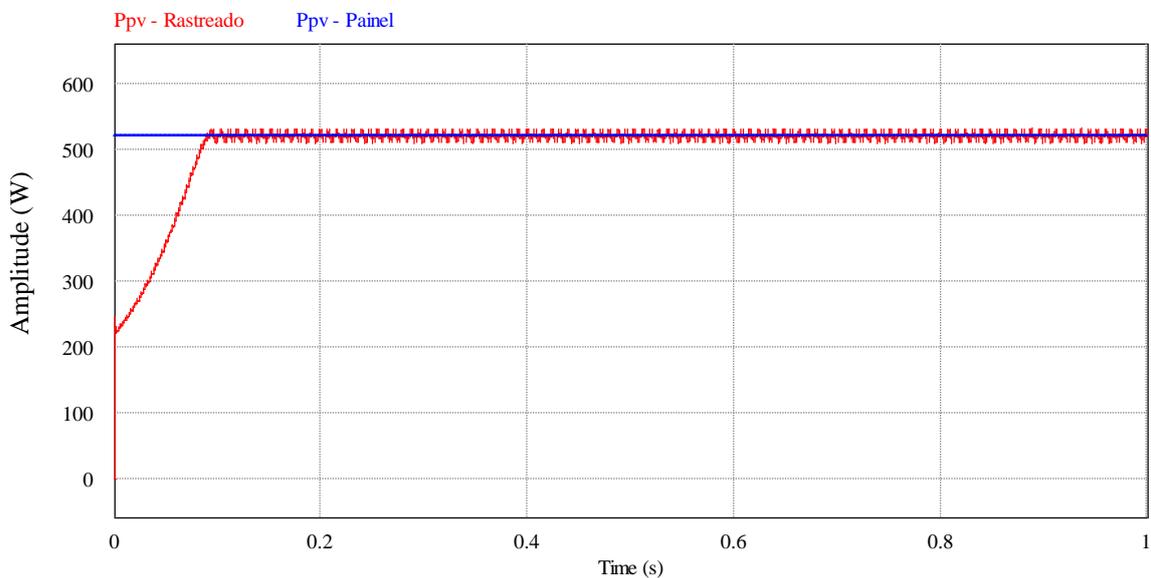
Figura 34 - Gráfico de corrente no indutor medida no conversor operando com MPPT e rastreado.



Fonte: Próprio autor.

A principal motivação de realizar a simulação com o painel fotovoltaico é rastrear sua potência. O resultado é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Gráfico da potência medida no painel e rastreada.



Fonte: Próprio autor.

Ainda que a potência leve cerca de $90ms$ para encontrar o ponto de máxima potência na dada circunstância, o sistema consegue manter o rastreamento indefinidamente.

Conforme Tabela 5, foi realizado simulações com outras frequências de amostragem e passo de Δt que serão apresentados na Figura 36, na Figura 37 e na Figura 38. A escolha destes

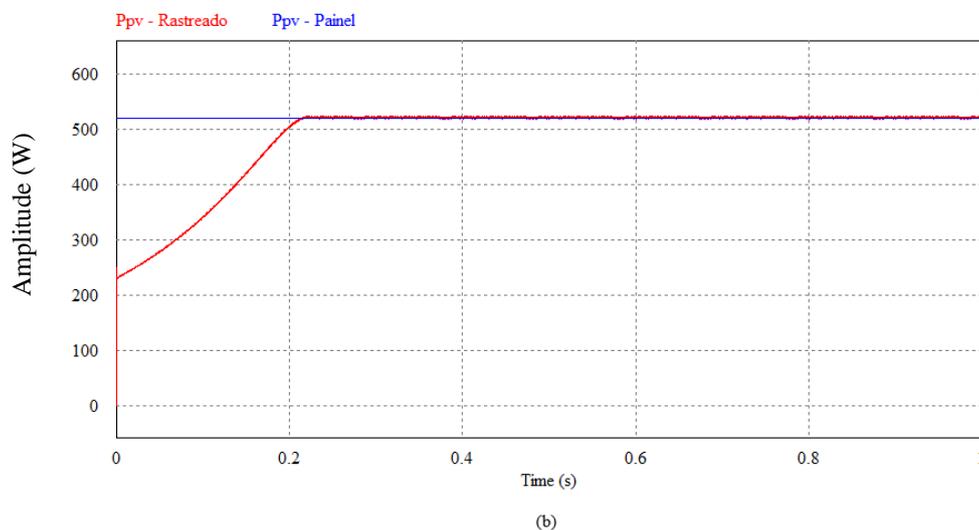
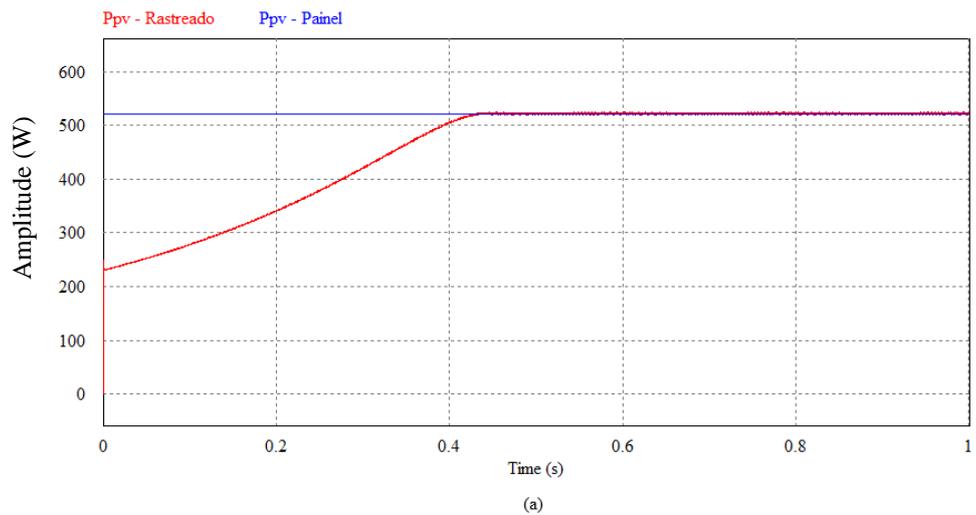
parâmetros se baseou no menor tempo de resposta de convergência para o ponto de máxima potência relacionado com a menor média de oscilação

Tabela 5 - Frequências de amostragem e passos de razão cíclica delta testados e simulados.

Frequência de amostragem (Hz)	ΔD
500	0,001
1000	
500	0,005
1000	
500	0,01
1000	

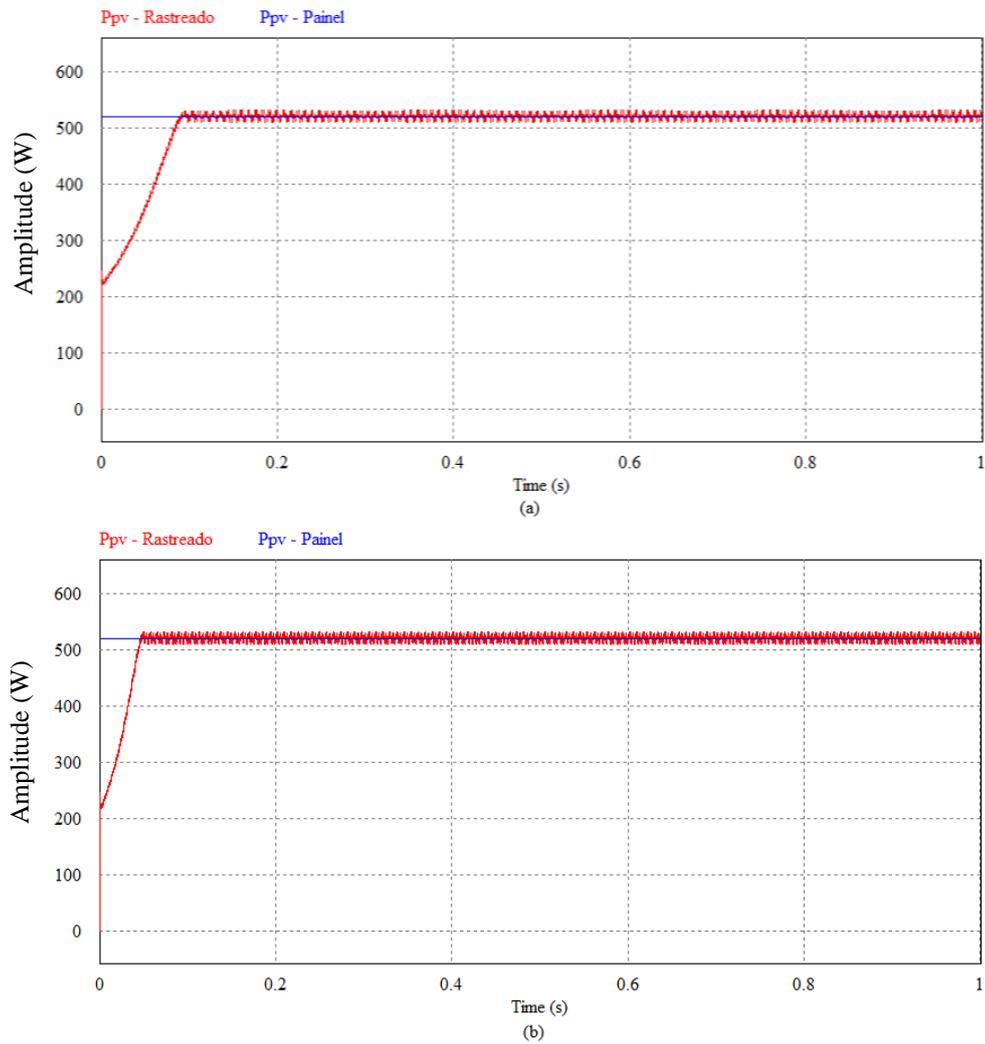
Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Gráficos de potência para P&O com passo de ΔD de 0,001 e frequência de amostragem de (a) 500 Hz e (b) 1000 Hz.



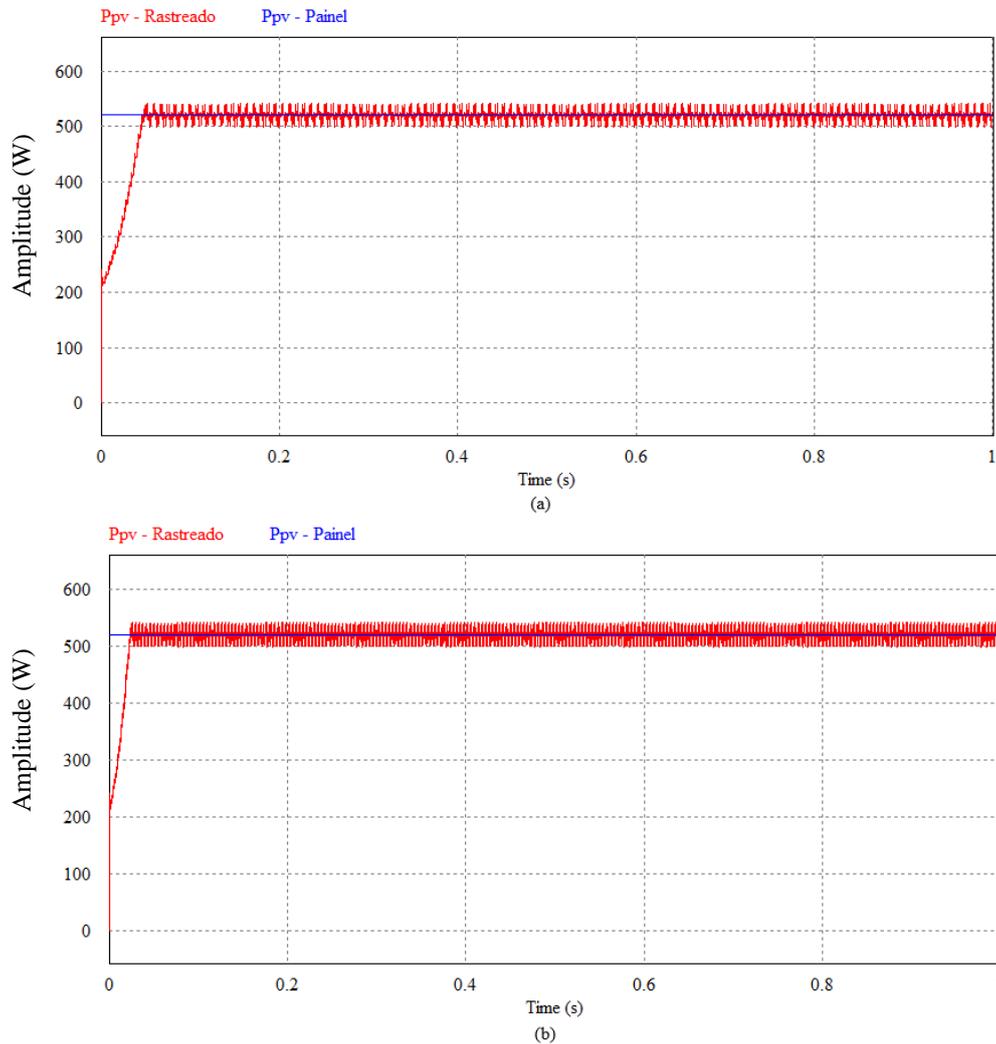
Fonte: Próprio autor.

Figura 37 - Gráficos de potência para P&O com passo de ΔD de 0,005 e frequência de amostragem de (a) 500 Hz e (b) 1000 Hz.



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Gráficos de potência para P&O com passo de ΔD de 0,01 e frequência de amostragem de (a) 500 Hz e (b) 1000 Hz.

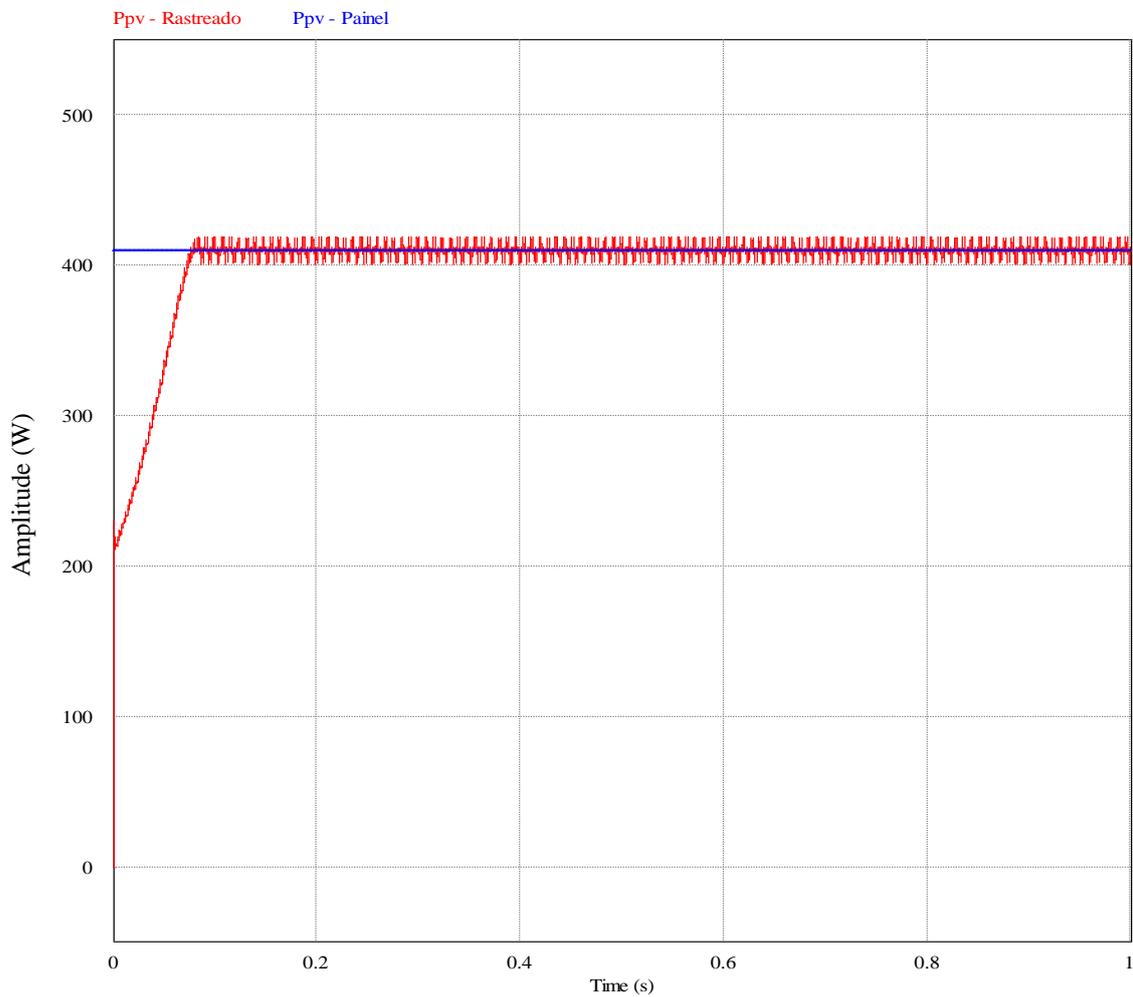


Fonte: Próprio autor.

Porém, para certificar-se de que o sistema funciona, pode-se incluir perturbações de irradiação ou de temperatura sobre o painel, afim de mudar o comportamento da curva. Observando pela literatura estudada, um aumento na temperatura causa uma diminuição da corrente produzida pelo painel, porém não é um efeito de valor muito alto, por isso, para as próximas simulações, foram realizadas mudanças apenas na irradiação incidente no painel.

Para a próxima simulação foi alterado o valor de irradiação de 1000 W/m^2 para 800 W/m^2 no intuito de observar a mudança na potência entregue ao conversor. Nesta simulação foi plotado apenas o gráfico da potência na justificativa de que é o fator mais interessante a ser observado e o resultado pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 - Gráfico da potência medida no painel e rastreada com diminuição da irradiação para $800\text{W}/\text{m}^2$.

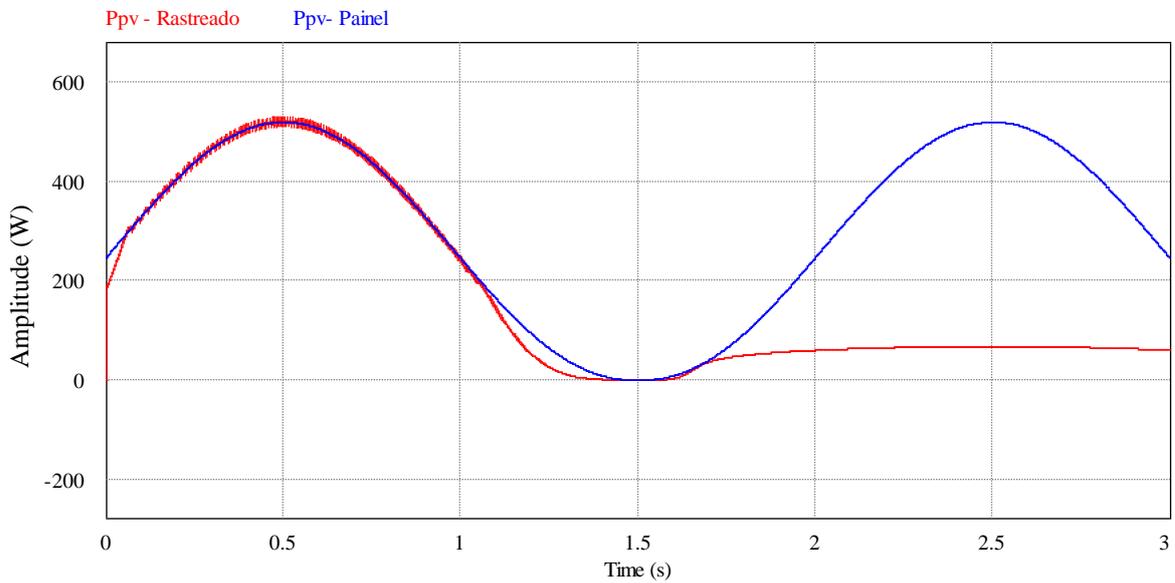


Fonte: Próprio autor.

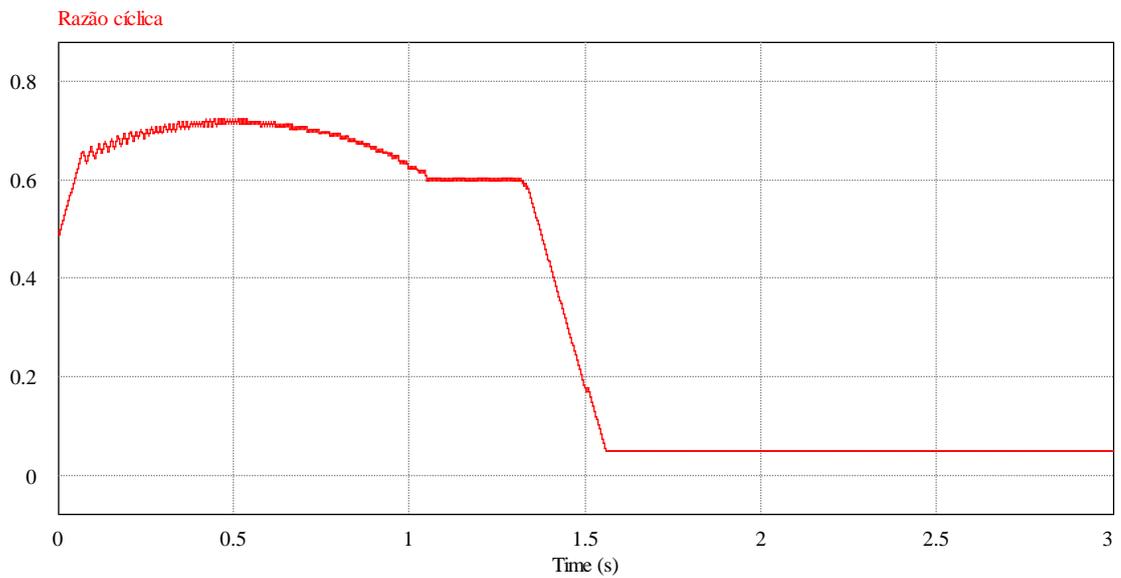
Observa-se que a potência continua sendo rastreada da mesma maneira, no entanto o valor da potência diminuiu consideravelmente.

Como última simulação para obter os resultados de observação frente as perturbações, foi inserida uma perturbação de forma de onda senoidal de $0,5\text{ Hz}$ de frequência a fim de se simular o ciclo de um dia de sol. Como a forma de onda senoidal é de baixíssima frequência teve que ser usado um tempo de simulação de 3 segundos e o seu resultado é mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Gráfico da (a) potência medida no painel e rastreada com perturbação senoidal e (b) a razão cíclica.



(a)



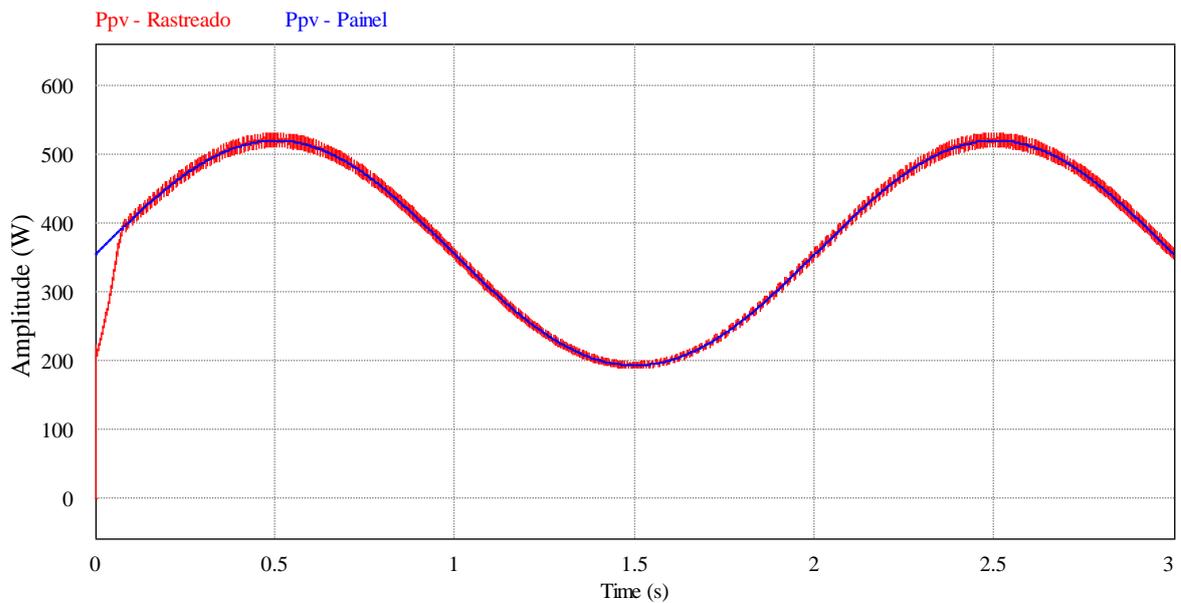
(b)

Fonte: Próprio autor.

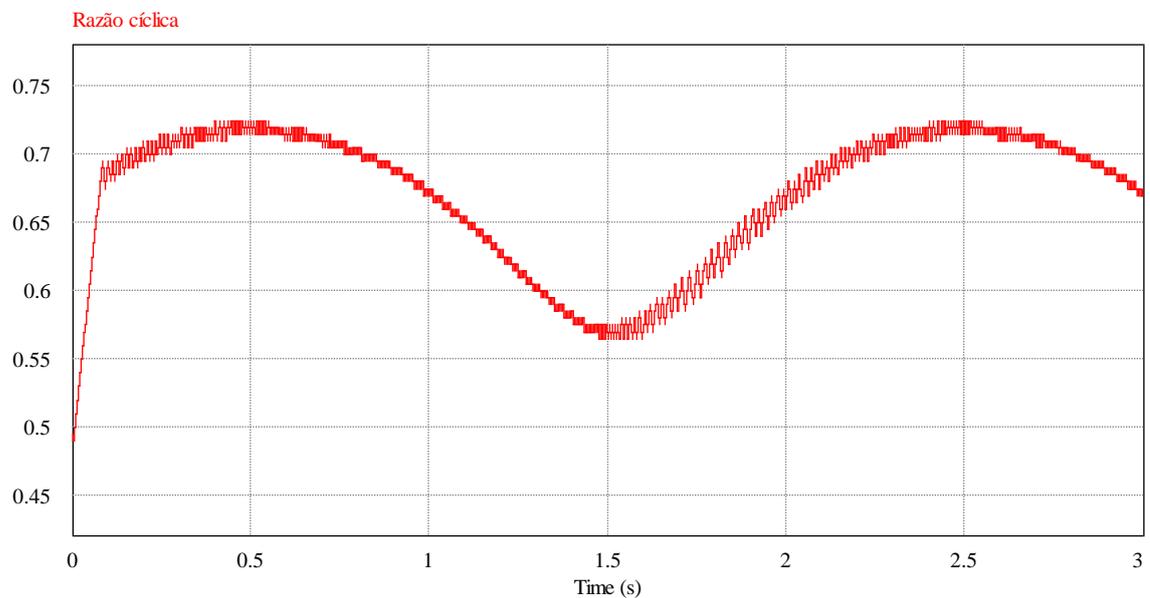
Percebe-se que o observador obtém êxito em seu objetivo de rastreamento. Por outro lado, pode-se observar que quando a irradiação decai a um valor muito baixo o rastreamento da potência é perdido e falha ao rastrear, porém, esse erro é justificado pela faixa de operação do conversor *boost*, essa faixa de operação θ é dada pela equação 7.

Logo, quando a irradiação fica menor que cerca de 36% do valor máximo o conversor para de operar. Sendo assim, a simulação mostrada na Figura 41 será realizada de forma que a irradiação se mantenha acima dessa faixa de operação.

Figura 41 - Gráfico da (a) potência medida no painel e rastreada com perturbação senoidal, respeitando os limites de operação e (b) a razão cíclica.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

É visto que o rastreamento não é perdido quando a irradiação não ultrapassa o limite mínimo de operação do conversor, fazendo com que o rastreamento não se perca.

5 CONCLUSÕES

Um dos maiores problemas enfrentados no investimento em sistemas fotovoltaicos é a baixa eficiência e o alto custo do sistema, dito isso, verifica-se a necessidade de diminuição dos custos dos elementos do sistema.

O estudo deste trabalho demonstrou que para a constituição de um sistema fotovoltaico é necessário o conhecimento prévio do funcionamento dos painéis, o funcionamento dos conversores e inversores e estratégias de MPPT. Sendo o foco do trabalho a técnica de observação por modo deslizante de forma a reduzir o custo do inversor e aumentar confiabilidade a partir da redução do número de sensores empregados ao sistema, foi desenvolvido um observador utilizando a técnica de modo deslizante, no qual utiliza-se apenas um sensor de tensão e as equações obtidas pelo modelo em espaço de estado juntamente com a função de chaveamento e a equação de Lyapunov, para enviar as informações de observação ao algoritmo P&O.

Através da definição de parâmetros, cálculo dos valores dos elementos do conversor, elaboração do observador por modo deslizante e do algoritmo da estratégia P&O de MPPT, foi realizado diversas simulações: (i) primeiramente, foi simulado o conversor com o modelo em espaço de estados, onde concluiu-se que, mesmo com perturbação na fonte, o mesmo é validado pelo êxito em obter-se as mesmas tensões e correntes que o medido diretamente no conversor nas simulações; (ii) seguida da simulação da topologia do conversor com observador por modos deslizantes, que, também, foi validada em suas simulações, mesmo com perturbação na fonte, pois as tensões e as correntes observadas pelo modo deslizante foram as mesmas medidas diretamente no conversor; e, por fim, (iii) foi simulado a topologia completa, isto é, conversor com observador por modos deslizantes, incluindo a estratégia P&O de MPPT, que realizou o rastreamento de máxima potência a partir da observação pelo modo deslizante, também foram realizadas simulações com perturbação da irradiação do painel e forma de onda senoidal, a fim de simular o comportamento do sistema durante um dia, nesta, verificou uma perda de rastreamento quando a irradiação fica muito baixa, este fato se dá pelo faixa de operação do conversor *boost*.

Pode-se concluir que o observador funciona perfeitamente, isso é validado pelas simulações nas quais percebe-se que a tensão e a corrente medidas no conversor são iguais as observadas em todos os casos. A potência também foi observada e rastreada com êxito utilizando a estratégia P&O de MPPT. A faixa de operação do conversor *boost* acaba limitando o sistema quando há uma diminuição na irradiação, porém pode ser contornado nas simulações.

5.1. Trabalhos futuros

Como sugestão para dar continuidade do trabalho, são sugeridas as seguintes ideias:

- Conectar um inversor em malha fechada, projetando-o e o seu controle para verificar o comportamento do observador com uma carga variável;
- Implementar um protótipo do sistema proposto;
- Comparar o funcionamento do observador com outras estratégias de rastreamento do ponto de máxima potência.

REFERÊNCIAS

3T SOLAR. **FOLHA DE DADOS Módulo Fotovoltaico 260Wp - Policristalino - 60 células**. Disponível em: <<http://www.3tsolar.eco.br/placa-260w-1>>. Acesso em 12 de Março de 2018.

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. São Paulo: USP, 2012.

ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. Brasília, 2018.

ARAÚJO, S. V.; ZACHARIAS, P.; MALLWITZ, R. **Highly Efficient Single-Phase Transformerless**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 57, n. 9, 2010.

BELKAID, Abdelhakim; GAUBERT, Jean-Paul; GHERBI, Ahmed. **An Improved Sliding Mode Control for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems**. CEAI, Vol.18, No.1 pp. 86-94, 2016.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2017: Ano base 2017. **Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro: EPE, 2018.

CARNEIRO, Joaquim. **Módulos Fotovoltaicos: Características e Associações**. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho, 2010.

COELHO, Roberto Francisco. **Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos**. Florianópolis: UFSC – INEP, 2008.

DA SILVA, Guilherme Sebastião. **Projeto e Análise Teórico-Experimental de um Retificador Monofásico com Correção do Fator de Potência**. Alegrete: UNIPAMPA, 2011.

DA SILVA, Guilherme Sebastião. **Conversores Multiníveis Modulares: Contribuições ao Estudo e ao Desenvolvimento de Sistemas de Controle Distribuídos**. Santa Maria: UFSM, 2017.

DARRAH ELETRIC COMPANY. **AC/DC Current Transducers**. Disponível em: <<http://www.darrahelectric.com/categories/current-transducers/ac-dc-current-transducers>>. Acesso em 10 de Junho de 2018.

DE BRITO, Moacyr Aureliano Gomes. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas**: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica. Ilha Solteira: UNESP, 2013.

DESAI, Hardik P.; PATEL, Himanshu K. **Maximum Power Point Algorithm in PV Generation**: An Overview. Bangkok, Thailand: Power Electronics and Drive Systems, 2007.

DESCONZI, Matheus Iesen. **Sistema Fotovoltaico Autônomo Utilizando Configuração Multi-String e Inversor Multinível**. Santa Maria: UFSM, 2011.

DIENSTMANN, Gustavo. **Energia Solar**. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

EMELYANOV, S. V. **Variable Structure Control Systems**. Moscow: Nauka (in Russian), 1967.

ESRAM, Trishan.; CHAPMAN, Patrick L. **Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques**. [S. l.]: IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, Issue: 2, 2007.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Eletronics**. 2ª Ed., Colorado, Kluwer Academics Publishers, 2001.

FARANDA, Roberto; LEVA, Sonia; MAUGERI, V. **MPPT Techniques for PV Systems: Energetic and Cost Comparison**. Pittsburgh, PA, USA: Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.

GENZLER, Jair. **Estudo Comparativo de Topologias de Inversores para a Conexão de Painéis Fotovoltaicos com a Rede Elétrica Sem o Uso de Transformador**. Alegrete: UNIPAMPA, 2015

GRUNDEMANN, Wagner Turchielo. **MPPT Perturba e Observa Aplicado ao Conversor Boost**. Alegrete: UNIPAMPA, 2017.

LEM. **FOLHA DE DADOS Current Transducer LA 25-P**. Disponível em: <https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_25-p.pdf>. Acesso em 10 de Junho de 2018.

LEM. **FOLHA DE DADOS Current Transducer LA 100-P**. Disponível em: <https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_100-p_e_.pdf>. Acesso em 10 de Junho de 2018.

LEVRON, Yoash; SHMILOVITZ, Doron. **Maximum Power Point Tracking Employing Sliding Mode Control**. [S.l.]: IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 60, No. 3, 2013.

LOBATO, Salatiel de Castro. **Análise Comparativa entre as Principais Técnicas de MPPT com Foco Experimental**. Juiz de Fora: UFJF, 2015.

MARANGONI, Filipe. **Inversores Monofásicos para Conexão de Sistemas Fotovoltaicos à Rede**. Pato Branco: UTFPR, 2012.

MOÇAMBIQUE, Nilton Eufrázio Martinho. **Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e Controladores Lineares e/ou Fuzzy para a Regulação da Tensão Terminal de Painéis Fotovoltaicos**. São Carlos: USP, 2012.

MOHAN, Ned. **Power Electronics: Converters, Application and Design**. 2ª ed. Canada. John Wiley & Sons, Inc, 1995.

PANDEY, Ashish; DASGUPTA, Nivedita; MUKERJEE, Ashok K. **A Simple Single-Sensor MPPT Solution**. [S. l.]: IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, Issue: 2, 2007.

PEREIRA, Jorge Daniel Martins. **Instalações Solares Fotovoltaicas para Autoconsumo: Análise e Perspetivas de Aplicação**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

PINHEIRO, Murilo Augusto. **Aplicação do Algoritmo de Busca de Ponto de Máxima Potência (P&O) e Controle PI para a Regulação da Tensão Terminal de Painéis Fotovoltaicos**. São Carlos: USP, 2016.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KRENZINGER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. **Descrição e Análise de Inversores Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos**. [S.l.]: Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol.15, No. 1, 2013.

UTKIN, V. I. **Sliding mode control design principles and applications to electric drives**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 40, n. 1, p. 23–36, Feb. 1993.

VÁSQUEZ, Nimrod; AZAF, Yuz; CERVANTES, Ilse; VÁSQUEZ, Eslí; HERNÁNDEZ, Claudia. **Maximum Power Point Tracking Based on Sliding Mode Control**. México: International Journal of Photoenergy, 2015.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Érica, 2015.