



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - (UFERSA)
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO – (PROGRAD)
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS - (CMPF)
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA – (BCT)

ANTÔNIA DAIARA DE ALMEIDA MELQUÍADES

**CONVERSÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE ELÉTRICA: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA
MONOFÁSICO DE DOIS ESTÁGIOS**

Pau dos Ferros-RN, 14 de Março de 2019

ANTÔNIA DAIARA DE ALMEIDA MELQUÍADES

**CONVERSÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE ELÉTRICA: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA
MONOFÁSICO DE DOIS ESTÁGIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido como
parte dos requisitos necessários para a obtenção
do Grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Cecilio Martins de Sousa
Neto.

Pau dos Ferros, 2019.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M517c Melquiades, Antonia Daiara de Almeida Melquiades.
Conversão de Energia em Sistemas Fotovoltaicos
Conectados à Rede Elétrica: Avaliação da Eficiência
de um Sistema Monofásico de Dois Estágios /
Antonia Daiara de Almeida Melquiades Melquiades. -
2019.
40 f. : il.

Orientador: Cecílio Martins de Sousa Neto Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2019.

1. Sistemas Fotovoltaicos. 2. Rede Elétrica.
3. Conversão de Energia. 4. Energia Renovável. I.
Neto, Cecílio Martins de Sousa Neto, orient. II.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANTÔNIA DAIARA DE ALMEIDA MELQUÍADES

CONVERSÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE ELÉTRICA: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA MONOFÁSICO
DE DOIS ESTÁGIOS

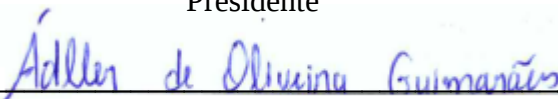
Monografia apresentada como requisito para a
obtenção do Grau de Bacharel em Ciência e
Tecnologia pela Universidade Federal Rural do
Semi-Árido.

Defendida em: 14 / 03 / 2019.

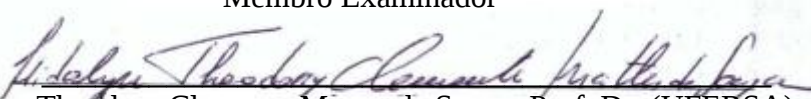
BANCA EXAMINADORA



Cecilio Martins de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Adller de Oliveira Guimaraes, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Hidalyn Theodory Clemente Mattos de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico este trabalho à minha mãe, a minha avó e a titia, que durante toda a sua trajetória, se fizeram gigantes frente à todas as dificuldades, para nos mostrar que se um ser humano é capaz de superar qualquer dificuldade, assumir vários papéis, ganhar o mundo e ainda assim se recolher a sua mais singela humildade perante ele. Aos meus irmãos, para que saibam que fiz o máximo possível para lhes dar um bom exemplo.

Em Memória de Lúcia Ferreira De Lima.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, pela oportunidade de enfrentar essa jornada que me permitiu tantas descobertas e um imenso engrandecimento pessoal.

Ao meu orientador Cecílio, pela paciência e pelo compromisso, pois sem sua ajuda e seus valiosos conselhos e ensinamentos, este momento não seria possível.

À minha família, que sempre me apoiou e me amparou, independentes das dificuldades.

Aos meus queridos amigos, que tive a oportunidade de conhecer e que me proporcionaram momentos inesquecíveis.

À Danielle, que além de tão especial, é uma das principais responsáveis pela minha vontade de seguir em frente.

Á Marcos Vinícius, por todo o conhecimento que nos doou enquanto professor, pela paciência, ajuda e todos os valiosos conselhos que nos deu enquanto amigo, e por hoje ser um dos exemplos para que sigamos em frente.

À Fernando Henrique, que nos ensinou que experiência se ganha com compromisso, responsabilidade e carinho, e que hoje, é por mim considerado uma das pessoas mais queridas e de quem sinto tanta saudade.

Á meu grande amigo Carequinha por ter me ajudado tanto durante todo esse tempo e por ter me ensinado que na engenharia da vida não se faz necessário um diploma.

Obrigada!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o processo de conversão de energia em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) e sua relevância para a micro e minigeração distribuída. Os conceitos utilizados abordam temas como geração de energia e os tipos de esquemas mais empregados, com ênfase para os sistemas fotovoltaicos. Dessa forma, a pesquisa se embasa teoricamente em Barreto (2014), Rocha (2015), dentre outros. Para tanto, tem-se como objeto de estudo o grau de eficiência desse tipo de sistema em função dos fatores que influenciam nas perdas associadas ao processo de conversão de energia, onde seu caráter é comprovado através da análise comparativa entre valores de potência gerada e potência entregue a rede elétrica. Os dados são extraídos por intermédio de gráficos de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica, projetado e simulado em ambiente *Software for Power Eletronics Simulation* – PSIM. Os resultados do estudo propõe uma alternativa para a geração de energia elétrica limpa e renovável através do uso do recurso solar, visando uma possível redução do uso das hidrelétricas, o que pode permitir uma minimização dos impactos ambientais e sociais acarretados pelo uso desse tipo de sistema.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos. Rede Elétrica. Conversão de Energia. Energia Renovável.

ABSTRACT

This work aims to analyze the process of energy conversion in photovoltaic systems connected to the grid (SFGR) and its relevance to the micro and distributed minigeneration. The concepts used address issues such as power generation and the types of schemes most used, with emphasis on photovoltaic systems. In this way, the research is theoretically based on Barreto (2014), and Rocha (2015), among others. In order to do so, the object of study is the degree of efficiency of this type of system in function of the factors that influence the losses associated to the process of energy conversion, where its character is proved through the comparative analysis between values of generated power and power delivered to the power grid. The data are extracted by means of graphs of a monophasic photovoltaic system connected to the grid, designed and simulated in environment (Software for Power Electronics Simulation - PSIM). The results of the study propose an alternative for the generation of clean and renewable electricity through the use of the solar resource, aiming at a possible reduction of the use of hydroelectric plants, which may allow a minimization of the environmental and social impacts caused by the use of this type of system.

Keywords: Photovoltaic systems. Electrical network. Energy Conversion. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira.....	1
Figura 2 - Participação de Fontes Renováveis na Geração de Energia Elétrica.....	2
Figura 3 - Consumo de Energia por Microgeração Distribuída	3
Figura 4 - Representação Gráfica do Efeito Fotovoltaico	6
Figura 5 - Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	7
Figura 6 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica	8
Figura 7 - Sistema de Conversão com Um Estágio.....	10
Figura 8 - Sistema de Conversão de Dois Estágios.....	10
Figura 9 - Gráfico Corrente x Tensão em Função da Irradiância Solar	12
Figura 10 - Divergência do Algoritmo P&O em Torno do MPPT	14
Figura 11 - Sistema Fotovoltaico Simulado em Ambiente PSIM	15
Figura 12 - Características do Arranjo Fotovoltaico Simulado.....	16
Figura 13 - Circuito Equivalente do Conversor <i>Boost</i>	16
Figura 14 - Conversor <i>Boost</i> com a Chave <i>S</i> em Condução.....	17
Figura 15 - Conversor <i>Boost</i> com a Chave <i>S</i> Aberta.....	19
Figura 16 - Valores Gerados Pelo Arranjo Fotovoltaico.....	22
Figura 17 - Tensões de Entrada e Saída Referentes ao Primeiro Estágio de Conversão.....	23
Figura 18 - Tensão de Saída Referente ao Segundo Estágio de Conversão.....	23
Figura 19 - Potência da Rede Elétrica Antes e Após a Conexão do SFV	24

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitor
Cte	Constante
D	Diodo de Bloqueio
Ia	Corrente da Rede
I _{CC}	Corrente de Saída do Barramento CC
I _d	Corrente no Diodo
I _L	Corrente do Indutor
I _{max}	Corrente Máxima
I _p	Corrente de Pico
I _{pv}	Corrente Gerada
I _{sc}	Corrente de Curto Circuito
kWp	Kilo Watts de Pico
L	Indutor
P _{in}	Potência de Entrada
P _{max}	Potência Máxima
I _L	Resistência Oferecida Pelo Indutor
R _o	Carga
R _s	Resistência Oferecida Pela Chave
S	Chave
V	Volts
V _a	Tensão da Rede
V _A	Volt - Ampére
V _{ar}	Volt – Ampére Reativo
V _c	Tensão do Capacitor
V _{cc}	Tensão de Saída do <i>Boost</i>
V _{in}	Fonte de Tensão
V _{in}	Tensão de Entrada
V _L	Tensão no Indutor
V _{max}	Tensão Máxima
V _o	Tensão de Circuito Aberto
V _p	Tensão de Pico
V _{pv}	Tensão Gerada pelos Módulos Fotovoltaicos
V _{ref}	Tensão de Referência
W	Watts
W _p	Potência de Pico

LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio S. Brito
GTES	Grupo de Trabalho de Energia Solar
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões
MCC	Modo de Condução Contínua
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	Perturba e Observa
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSIM	<i>Software for Power Electronics Simulation</i>
PV	Painel Fotovoltaico
PWM	Pulse Width Modulation
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SFV	Sistema Fotovoltaico
SPPM	Seguimento do Ponto de Máxima Potência
VSI	<i>Inversor Fonte de Tensão</i>
VSIF	<i>Inversor Fonte de Tensão com Filtro</i>

LISTA DE EQUAÇÕES

$$\bar{I}_L = \frac{V_{in}}{R_o} \frac{1}{(1-D)^2}$$

Corrente média no indutor

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} - \frac{(r_L - r_S)}{L}$$

Corrente no indutor

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} - \frac{r_L I_L}{L} - \frac{V_C}{L}$$

Tensão no indutor

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_L}{C} - \frac{V_C}{R_o C}$$

Tensão no capacitor

$$\frac{dV_C}{dt} = - \frac{V_C}{C R_o}$$

Corrente no capacitor

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}$$

Ganho estático do conversor

$$\Delta V_C = \Delta V_o = \frac{\bar{I}_o * D}{f_S * C}$$

Valor de ondulação de tensão no capacitor

$$C = \frac{\bar{I}_o * D}{f_S * \Delta V_C}$$

Capacitância

$$L = \frac{V_{in} * D}{f_S * \Delta I}$$

Indutância

$$M = \frac{v_o}{v_{in}}$$

Ganho estático do conversor *boost*

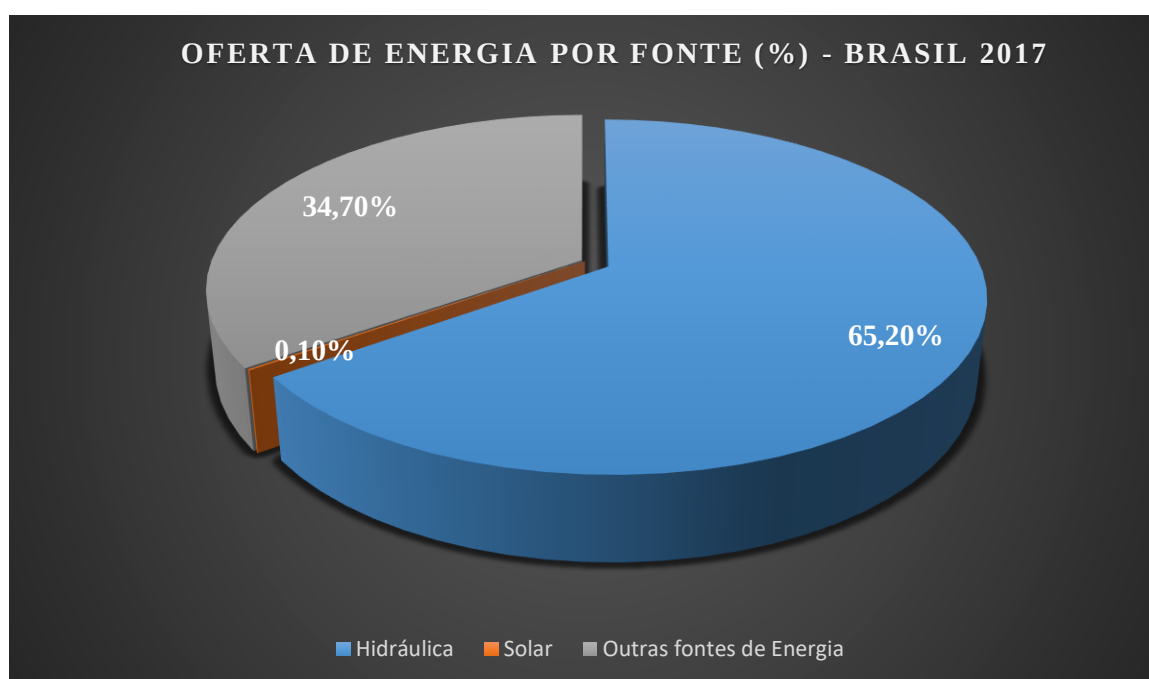
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 METODOLOGIA	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA	8
2.1.1 Sistema de Conversão com Um Estágio (CC/CA)	9
2.1.2 Sistema de Conversão com Dois Estágios (CC/CC e CC/CA).....	10
2.2 FILTRO DE CONEXÃO	11
2.3 RASTREADOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA	11
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	15
3.1.1 Arranjo Fotovoltaico	16
3.1.2 Conversor <i>Boost</i>	16
3.1.3 Inversor Fonte de Tensão	21
3.1.4 Filtro LCL	21
4 CONCLUSÕES	25
4.1 TRABALHOS FUTUROS.....	25
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é bastante diversificada, sendo composta principalmente por fontes hidráulicas, gás natural, eólica, solar, biomassa, combustíveis fósseis, energia nuclear, carvão e seus derivados, conforme ilustrado na Figura 1. O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para as fontes hídricas, eólicas e solar fotovoltaica que correspondem a um total de 72,13% da oferta interna (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2018).

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira

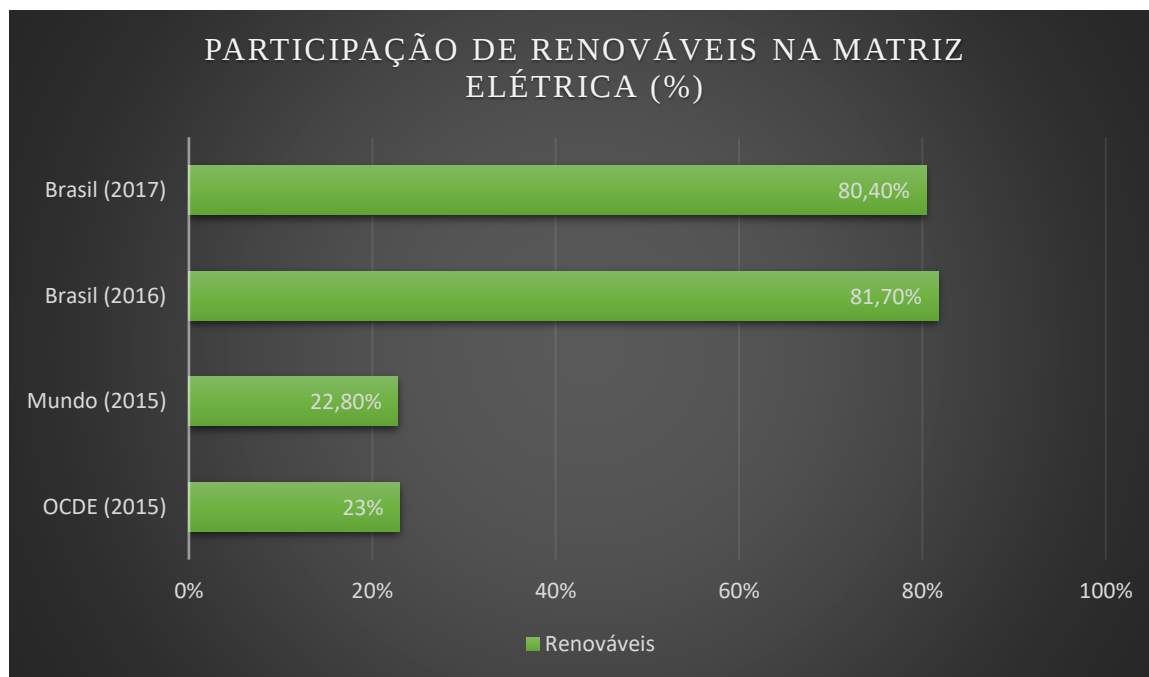


Fonte: Adaptada. Balanço Energético Nacional –BEN, 2018.

Dentre as diversas formas de energia existentes, boa parte é proveniente da radiação solar, tais como a energia gerada através dos ventos, a própria energia hidráulica e as correntes marinhas. Essas são denominadas de fontes renováveis de energia, pois são imediatamente repostas pela natureza. Nos últimos anos, os sistemas de geração baseados em fontes renováveis, tornaram-se mais populares devido ao aumento da demanda e a escassez das reservas energéticas (GOLDEMBERG, 2006-2007). No cenário atual as fontes renováveis atuam em conjunto com o sistema de geração convencional e desempenham um papel

fundamental na composição da matriz energética brasileira, conforme apresentado na Figura 2 (BENEDITO, 2009).

Figura 2 - Participação de Fontes Renováveis na Geração de Energia Elétrica



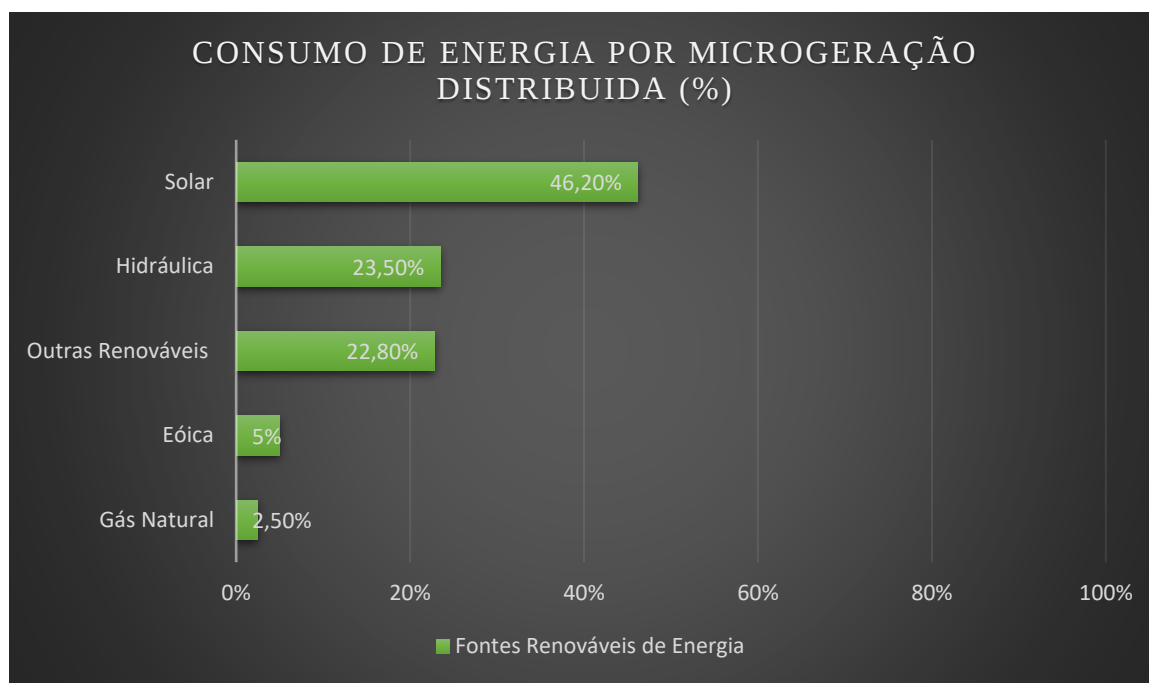
Fonte: Adaptada. Balanço Energético Nacional - BEN, 2017.

De acordo com a figura 2, em 2016 tivemos 81,7% da energia gerada a partir de fontes renováveis e em 2017, onde houve um recuo com relação ao ano anterior, onde cerca de 80,4% da energia gerada foi oriunda de fontes renováveis. (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN, 2017). Essa notável contribuição se deve a inclusão dos sistemas de minigeração e microgeração distribuídos, que consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais que utilizam como base fontes renováveis de energia, que são conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2014).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, em 2017 os sistemas de geração distribuída apresentaram um aumento de 245% de contribuição na matriz energética brasileira, passando de 104 GWh para 359 GWh de energia gerada. Em 2017, aproximadamente 46,2% da energia gerada e cerca de 174,5 MW de toda a capacidade instalada no Brasil, nos sistemas de geração distribuída, são oriundas de usinas solar. Em posse desses dados, tem-se que as usinas solares fotovoltaicas são fundamentais para a

composição da matriz energética brasileira. A Figura 3 apresenta a participação de cada fonte na geração distribuída para o ano de 2017.

Figura 3 - Consumo de Energia por Microgeração Distribuída



Fonte: Adaptada. Balanço Energético Nacional - BEN, 2018.

Em geral, os sistemas fotovoltaicos em micro ou minigeração distribuída operam conectados à rede elétrica, concessionária de energia local, por meio de um conversor de potência. Para realizar a conexão desses sistemas à rede elétrica é necessário seguir os critérios estabelecidos pela norma 1547 do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – IEEE. Os padrões estabelecidos pela norma dizem respeito às características de sincronismo, ilhamento e taxa de distorção harmônica. O sincronismo estabelece que a tensão produzida pelo sistema fotovoltaico apresente características de frequência, amplitude e sequência de fases semelhantes às da rede elétrica. Por outro lado, a condição de ilhamento ocorre quando a rede elétrica é interrompida ou quando seu nível de tensão é alterado de forma significativa, o que não impede que o sistema fotovoltaico mantenha o funcionamento de energia. O critério de taxa de distorção harmônica estabelece que a mesma apresente um valor máximo de 5% para uma potência de 0 a 500 kVA, variação de frequência de 0,3 Hz e 10 V de tensão.

No Brasil, a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica é normalizada pela agência nacional de energia elétrica - ANEEL, cujos procedimentos e índices são

estabelecidos pelo documento: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

Com base nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos surgem como uma alternativa eficaz na continuidade e manutenção do sistema elétrico brasileiro e, conseqüentemente, no desenvolvimento econômico do país. Além disso, o acesso a energia elétrica oriunda de sistemas fotovoltaicos possibilita o incremento da qualidade de vida e contribui na redução de impactos socioambientais, do efeito estufa e do aquecimento global (ROCHA, 2015).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar o processo de conversão de energia solar em energia elétrica por meio de simulações afim de analisar os fatores associados a esse processo.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Analisar o conversor utilizado na conversão de corrente contínua para corrente contínua¹;
- Analisar o conversor utilizado na conversão de corrente contínua para corrente alternada;
- Analisar o funcionamento do rastreador do ponto de máxima potência (MPPT);
- Analisar os fatores que influenciam na eficiência do processo.

1.2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo com a seguinte metodologia:

- Levantamento bibliográfico do estado da arte dos principais esquemas de controle para a conversão de energia solar em energia elétrica através sistemas fotovoltaicos conectados à rede;

¹ Conversor utilizado para aumentar ou diminuir o valor da tensão CC na saída do gerador fotovoltaico referente a topologia que adota dois estágios para conversão de energia solar em energia elétrica.

- Simulação e análise de desempenho de um sistema fotovoltaico monofásico operando conectado à rede elétrica;
- Avaliação dos resultados de simulação obtidos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

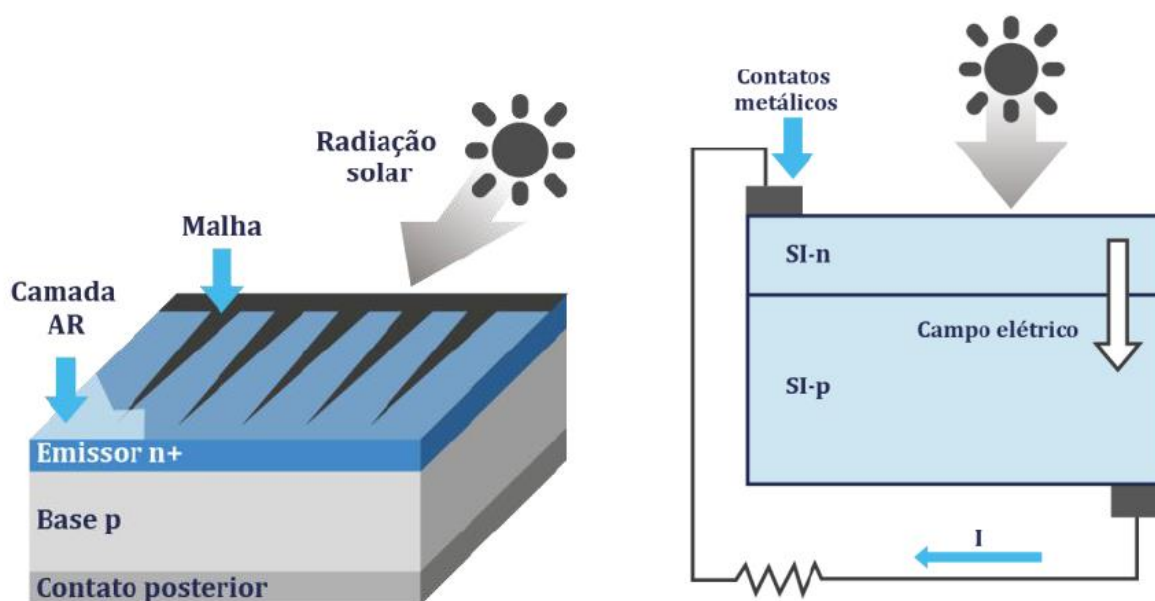
O presente trabalho está organizado da seguinte maneira:

- O capítulo 2 apresenta um levantamento do estado da arte referente aos elementos que constituem um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica;
- O capítulo 3 apresenta uma descrição do sistema fotovoltaico simulado no PSIM;
- O capítulo 4 apresenta os resultados de simulação obtidos;
- O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com a realização deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A geração de energia solar é feita através de um Sistema Solar Fotovoltaico (SFV) e é dada pela captação de raios solares através de módulos que são constituídos de materiais semicondutores de silício, sendo mais utilizado o do tipo monocristalino, que dentre os três tipos (monocristalino, policristalino e amorfo) é o de maior eficiência para a conversão de energia solar em eletricidade (RÜTHER et al., 2004). Os átomos desses materiais são caracterizados por possuírem quatro elétrons que formam uma rede cristalina, passando por um processo denominado dopagem, onde são adicionadas impurezas do tipo p e n. A captação da energia é feita através da absorção de raios solares que ao entrar em contato com os módulos de silício devidamente dopados, geram uma diferença de potencial dada pelo efeito fotovoltaico que faz com que os elétrons migrem da camada de valência para a banda de condução, gerando com isso uma corrente elétrica, conforme ilustrado na figura 4 (CEPEL-CRESESB, 2014).

Figura 4 - Representação Gráfica do Efeito Fotovoltaico



Fonte: <http://blog.cursoeletricaecia.com.br>.

Dentre alguns fatores que podem influenciar na geração de energia, podemos destacar algumas causas geográficas, tais como: estações do ano, rotação e translação solar, solstícios e

equinócios, que modificam a duração dos dias. Porém, os principais fatores que interferem na geração de energia são a temperatura e a irradiância solar² (GALDINO et al., 2014).

Os Sistemas Fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos: Sistemas Fotovoltaicos Isolados – SFI e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica – SFCR, conforme ilustrado na Figura 5. Os SFI requerem um dispositivo de armazenamento para reter a energia que foi gerada durante o dia, esse tipo é mais frequentemente usado em residências e em zonas rurais onde não há acesso à eletricidade convencional e são empregados em sistemas de irrigação, bombeamento de água e aquecimento de grãos (CEPEL-CRESESB, 2014). Já os SFCR não necessitam do uso de dispositivos de armazenamento, pois toda a energia por eles gerada é entregue diretamente à rede elétrica. São mais frequentemente usados em empresas e comércios de pequeno a médio porte.

Figura 5 - Tipos de Sistemas Fotovoltaicos



Fonte: Adaptada. (NASCIMENTO, 2017).

Uma dificuldade associada a esse tipo de sistema está relacionada ao alto valor inicial necessário para a implementação do SFV e a baixa eficiência com relação a quantidade de energia convertida em eletricidade quando em comparação com a quantidade de energia gerada. Em contrapartida, esse sistema tem como principais vantagens a durabilidade dos dispositivos que o compõe, garantia de retorno de investimento e redução significativa de impactos ambientais (GALDINO, et al., 2014).

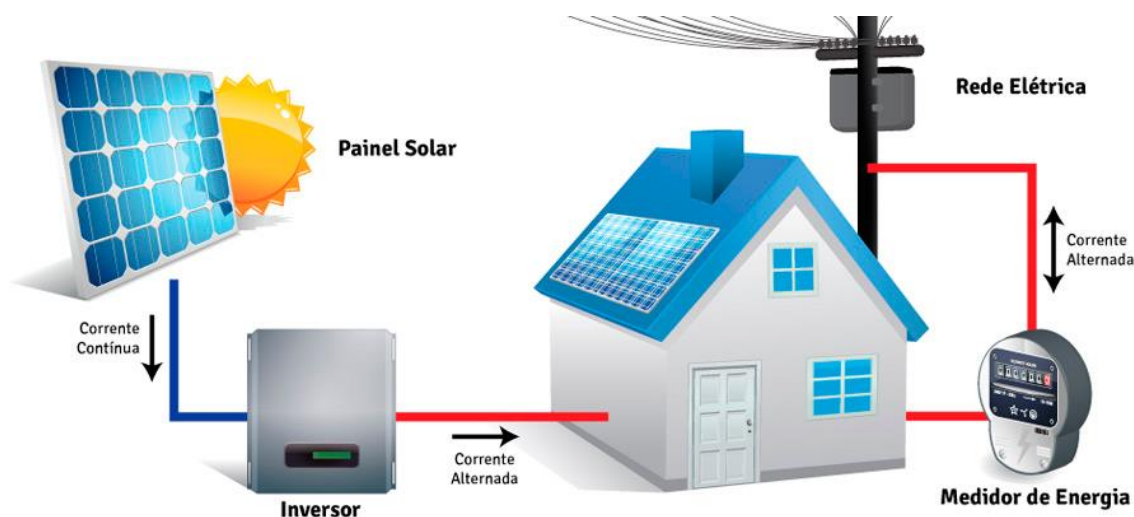
² De acordo com o Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES/CRESESB, (2004), um aumento na temperatura do módulo implica em uma diminuição na tensão, assim como a diminuição dos raios solares influencia diretamente na corrente elétrica, resultando em dissipação de energia.

2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCRs) podem ser classificados como de grande porte, referente às centrais fotovoltaicas, ou podem ser de pequeno porte, que são as instaladas em edificações nas zonas urbanas (CÂMARA, 2011). Os SFCRs são constituídos basicamente por módulos fotovoltaicos e conversores de potência (CULLEN, 2002). As principais vantagens desse tipo de sistema são: a elevada produtividade, toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada, e a ausência do conjunto de baterias, elo frágil no SFI devido à baixa vida útil se comparado aos módulos fotovoltaicos e conversores de potência (URBANETZ, 2010, p. 37).

A conversão de energia solar em elétrica ocorre quando o conversor de potência recebe a energia gerada pelos módulos, em Corrente Contínua (CC) e que é posteriormente convertida em Corrente Alternada (CA) para que possa ser entregue à rede elétrica, conforme ilustrado na figura 6 (ZEINELDIN et al., 2007). Em geral o conversor de potência tem por objetivo garantir a operação dos módulos fotovoltaicos no ponto de máxima potência (*Maximum Point Power Tracking* - MPPT) além de serem responsáveis por fornecer toda a potência para a rede elétrica. Basicamente, os sistemas de conversão podem ser divididos de acordo com a quantidade de estágios, podendo ser de um ou dois estágios (ROCHA, 2015).

Figura 6 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



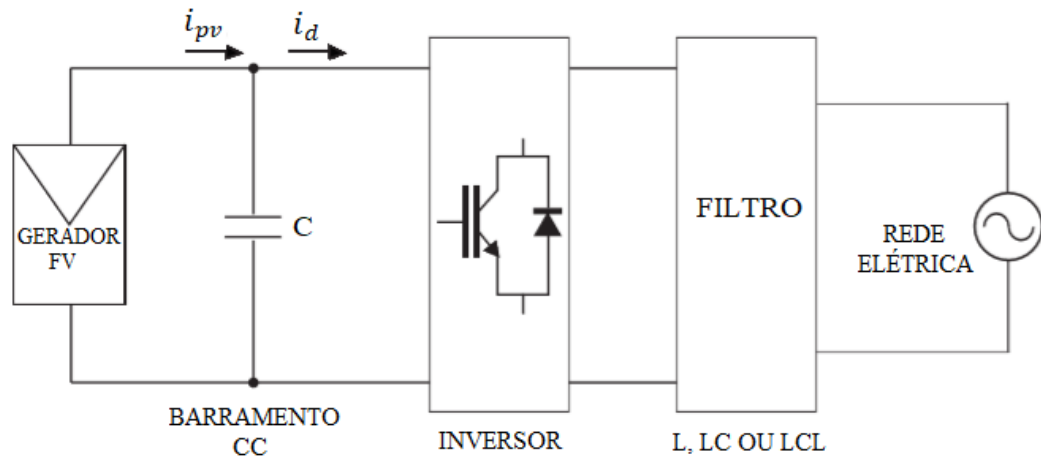
Fonte: Universorsolar.com

2.1.1 Sistema de Conversão com Um Estágio (CC/CA)

No sistema de conversão de um estágio o painel fotovoltaico é conectado diretamente ao banco de capacitores do barramento CC, conforme ilustrado na Figura 6 (CAMPANHOL, 2017, p. 46 - 47 apud YEONG-CHAN et al., 2003; YANG; SMEDLEY, 2004; FEI et al., 2008). Já que esse tipo de sistema não necessita do uso de conversores do tipo CC/CC, toda a potência ativa³ gerada pelos módulos fotovoltaicos é injetada na rede apenas pelo uso dos conversores CC/CA. A vantagem da utilização do sistema de simples estágio é a redução de custos de implementação e uma maior eficiência no processo de conversão de energia, com menos componentes chaveados e menos perdas durante o processo (CAMPANHOL, p. 47 apud LIANG et al., 2001; JAIN e AGARWAL, 2007; WU et.al., 2011). Nesse caso, o conversor CC/CA também funciona com Seguidor do Ponto de Potência Máxima, ou do inglês (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT) para rastrear o ponto onde a potência gerada é máxima (CAMPANHOL, 2017). Uma desvantagem associada ao uso dessa topologia é dada pela quantidade mínima necessária de módulos que devem ser usados e a dependência com a associação empregada. Isso se deve pela ausência de um conversor elevador de tensão na saída do módulo, requerendo uma tensão mínima para que a potência gerada possa ser entregue à rede (ROCHA, 2015). A figura 7 traz a topologia descrita acima.

³ Segundo Albuquerque, (2009), a capacidade de se produzir trabalho em função do tempo é chamada de potência elétrica, que em corrente alternada, pode ser classificada em três tipos: Potência Aparente, que é dada pelo produto da tensão e a corrente, dada em Volt-Ampére (VA), Potência Ativa, que é a potência que realmente é transformada em trabalho, dada em Watts (W) e Potência Reativa, que é a parte da potência aparente fornecida ao circuito, tendo por função compor o circuito magnético nas bobinas e um campo elétrico nos capacitores, dada em Volt-Ampére reativo (Var).

Figura 7 - Sistema de Conversão com Um Estágio

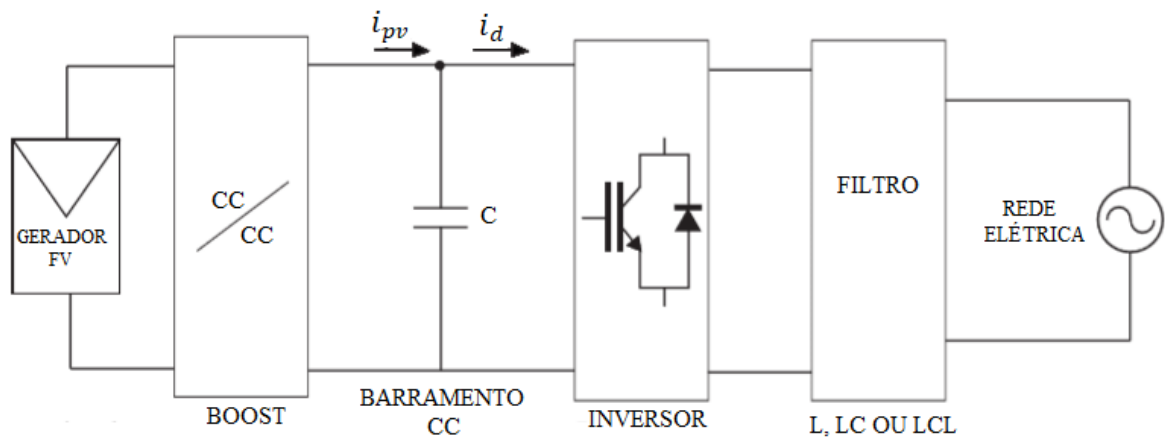


Fonte: ROCHA, 2015.

2.1.2 Sistema de Conversão com Dois Estágios (CC/CC e CC/CA)

A Figura 8 esboça a estrutura de um sistema fotovoltaico com estágio duplo onde é utilizado tanto o conversor CC/CA como também o CC/CC⁴ (CAMPANHOL, 2017, p. 46).

Figura 8 - Sistema de Conversão de Dois Estágios



Fonte: (ROCHA, 2015).

⁴ Conversores CC/CC (Corrente Contínua/Corrente Contínua) são os responsáveis por conter o controle do rastreador do ponto de máxima potência (SPPM), e também podem atuar como transformadores de tensão, elevando (conversor *boost*) ou abaixando (conversor *buck*) quando se deseja um valor de saída diferente daquele fornecido pelo gerador fotovoltaico (GALDINO et al., 2014).

Para essa topologia temos o arranjo fotovoltaico conectado ao conversor CC/CC no primeiro estágio do sistema, que contém o controle do MPPT e que também atua elevando a tensão à níveis adequados para o uso do conversor CC/CA, sendo chamado também de conversor *boost* ou conversor elevador de tensão e sua utilização permite uma maior flexibilidade na faixa de tensão de entrada, ocasionando uma redução na eficiência devido a maior quantidade de componentes chaveados que dissipam energia. (GALDINO et. al., 2014).

O segundo estágio do sistema, assim como no caso de estágio simples, tem a função de injetar a potência na rede elétrica por meio do conversor CC/CA (CAMPANHOL, 2017).

2.2 FILTRO DE CONEXÃO

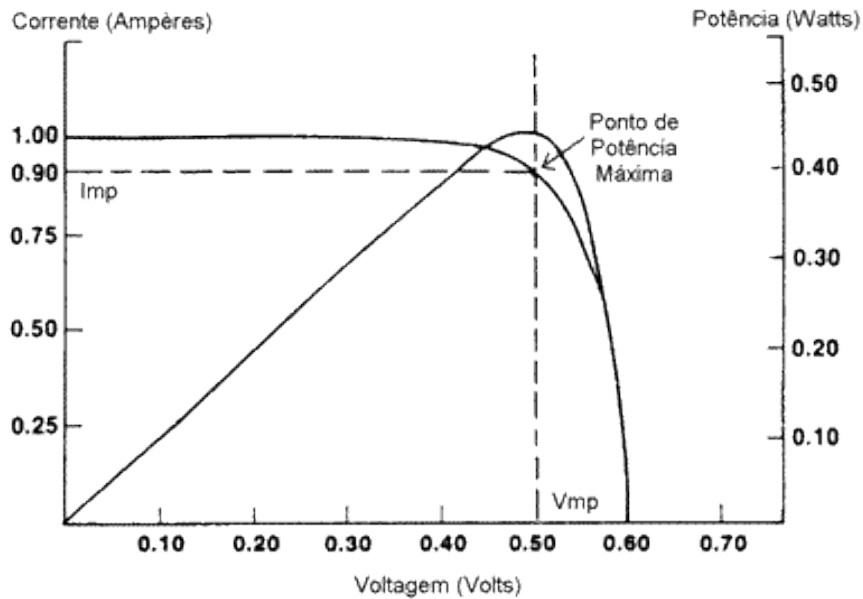
O filtro de conexão é utilizado para suavizar os harmônicos de ordem elevada introduzidos pelo inversor de tensão nas correntes de saída. Para suavizar estes harmônicos são utilizados filtros de conexão implementados por circuitos L, LC ou LCL (H. CHA and T. VU, 2010; J. M. SOSA et al., 2014). Em geral, o filtro L é utilizado em sistemas de pequeno porte e que necessitam de uma alta frequência de comutação. Para sistemas de grande porte é necessário um indutor com alto valor de indutância, o que ocasiona um elevado tamanho físico e um aumento do custo de fabricação (H. CHA; VU, 2010; J. M. SOSA et al., 2014).

O filtro LC apresenta uma melhor capacidade de filtragem de harmônicos quando comparado ao filtro L, no entanto, apresentam um pico de ressonância quando conectado à rede elétrica em virtude de possíveis variações na impedância da rede, além disso, a depender do amortecimento, se faz necessária a utilização de indutores com alto valor de indutância (H. CHA and T. VU, 2010; J. M. SOSA et al., 2014). Com base nisso, a utilização do filtro LCL é a mais indicada, pois os indutores utilizados possuem valores de indutância bem menores se comparado aos filtros L e LC (H. CHA and T. VU, 2010; J. M. SOSA et al., 2014).

2.3 RASTREADOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Segundo Galdino, et al., (2014), um gerador fotovoltaico submetido a irradiância solar uniforme e sem defeitos em suas células fotovoltaicas, possui um gráfico Corrente x Tensão (I-V) em que em apenas um ponto, dado pelo produto da tensão e a corrente, obtém-se seu valor máximo, conforme ilustrado na figura 9.

Figura 9 - Gráfico Corrente x Tensão em Função da Irradiância Solar



Fonte: (CEPEL-CRESESB, 2014).

A corrente produzida pelas células fotovoltaicas é diretamente proporcional a irradiância solar, sendo pouco afetada pela temperatura dos módulos, porém, a tensão decresce significativamente com o aumento da temperatura, e em consequência disso, há uma redução na eficiência do sistema (HODGE, 2011). Por esse motivo, é ideal que exista um dispositivo capaz de monitorar a variação da curva do gráfico I-V com a finalidade de reduzir as perdas originadas pela variação na tensão ou corrente (PALZ, 2002).

Em geral, o rastreamento da máxima potência é realizado por meio de Seguidores do Ponto de Potência Máxima (*Maximum Point Power Tracking* - MPPT), sendo este um dispositivo responsável por monitorar as modificações nos parâmetros de tensão e corrente para que atue de forma a corrigi-los para que possam manter os módulos fotovoltaicos operando nos parâmetros correspondentes aos valores de máxima potência, evitando perdas nas células ocasionados por fatores diversos (GALDINO et al., 2014).

O MPPT pode ser dividido em dois blocos: um para a sessão de condicionamento de potência, onde encontra-se o conversor CC/CC em modo chaveado e outro para a parte de controle, que é responsável por polarizar a tensão do gerador fotovoltaico por meio de algoritmos que operam sobre os conversores. O MPPT atua por meio do ajuste periódico dos valores de tensão e corrente: ($P_{MAX} = V_{MAX} \times I_{MAX}$), sendo os valores de tensão (V_{MAX}) e

corrente (I_{MAX}) valores conhecidos, obtidos por meio de ensaios de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto⁵ (ROSENTHAL, 2015, p. 94).

Em geral, os métodos de MPPT são divididos em diretos e indiretos: os métodos diretos, como por exemplo os métodos de tensão fixa e de circuito aberto e a aproximação da curva de potência, utilizam sinais de referência para estimar a máxima potência do sistema, estando estes sujeitos a imprecisões e incapacidades de detectar efeitos de sombreamento (GALDINO et al., 2014). Por outro lado, os métodos indiretos, como por exemplo o Perturba e Observa (P&O) e condutância incremental, utilizam medições de tensão e corrente, em tempo real, para obter a máxima potência do sistema, além disso, não necessitam de informações prévias dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos (GALDINO et al., 2014).

Dentre os diversos métodos existentes na literatura, o perturba e observa é a técnica mais utilizada em SFCRs, devido a sua simplicidade de implementação e desempenho satisfatório (BARRETO 2014). O método P&O consiste em causar uma perturbação na tensão do arranjo fotovoltaico e observar o que acontece com a potência de saída. Caso a potência continue a mesma, a perturbação deve proceder na mesma direção, caso contrário, a perturbação deve mudar de direção.

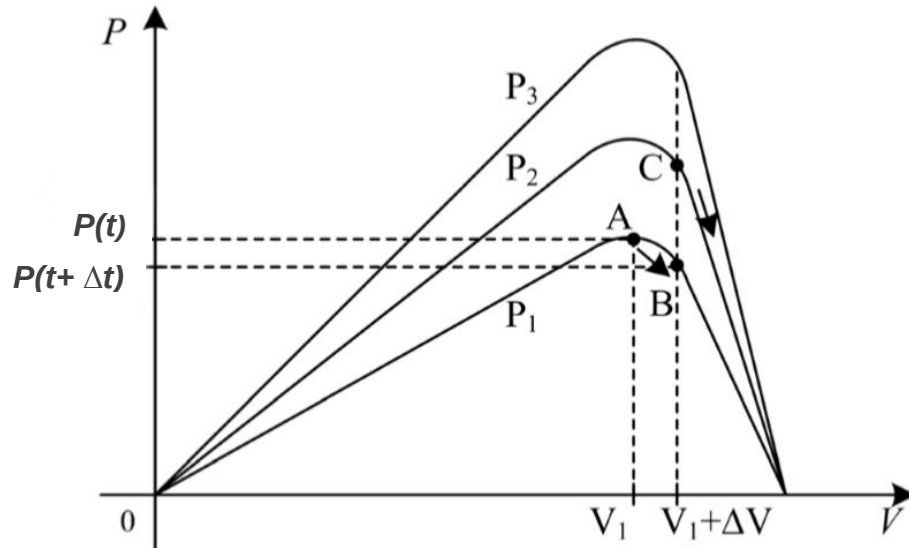
A perturbação colocada tem valor fixo de alguns Volts (V), que dependem da tensão de saída do painel (caso seja maior que 1% do valor de tensão na entrada - V_{ref}) e ocorre a cada vez que o processo se repete. Este modo de operação causa uma oscilação constante do ponto de funcionamento em torno do ponto MPPT devido as variações na tensão de entrada, o que implica em perdas na potência. Esta situação torna-se evidente quando as condições de radiação solar variam lentamente, todavia em casos de variações bruscas nas condições atmosféricas o sistema pode falhar, perdendo a sua posição na curva P-V (CARVALHO, 2011, p. 27). A Figura 10 ilustra o procedimento do método P&O.

Supondo que o sistema está em funcionamento no ponto A, uma perturbação é introduzida, causando uma variação na tensão (ΔV) e levando o sistema para operar no ponto B, o que induz que no próximo ciclo a perturbação deve ser introduzida no sentido oposto, dado que $P(t+\Delta t) < P(t)$. Todavia, se a curva de potência passar de P_1 para P_2 fará com que a variação passe do ponto B para o ponto C. O controlador enxerga esse aumento de potência

⁵ Corrente de curto-circuito (I_{sc}) é a corrente produzida quando a tensão é nula, podendo ser medida com um amperímetro ligado diretamente à saída do módulo fotovoltaico, onde seu valor depende da superfície das células e da radiação solar captada. Tensão de circuito aberto (V_o) é a tensão máxima final quando não há carga acoplada ao módulo e sua medição é feita ligando um voltímetro diretamente aos bornes da placa fotovoltaica, onde seu valor varia cerca de 0,5 V por célula da placa, em que a tensão total depende do número de células do sistema. (SIMULADOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA ESF 70142, item 3.2)

devido à nova curva P_2 , que indica a orientação correta da perturbação e, caso a situação continue e passe a estar em jogo uma nova curva P_3 , o sistema continuará divergindo do seu ponto de máxima potência (ROCHA, 2015).

Figura 10 - Divergência do Algoritmo P&O em Torno do MPPT



Fonte: Adaptada. (WALKER, 2016).

As desvantagens do método Perturba e Observa, é que caso ocorram mudanças bruscas na radiação e temperatura, a resposta dinâmica é considerada muito lenta, porém, este método possui grande eficiência e tem por vantagem a não dependência com o tipo do painel (WALKER, 2016 apud MOÇAMBIQUE, 2012, p. 24).

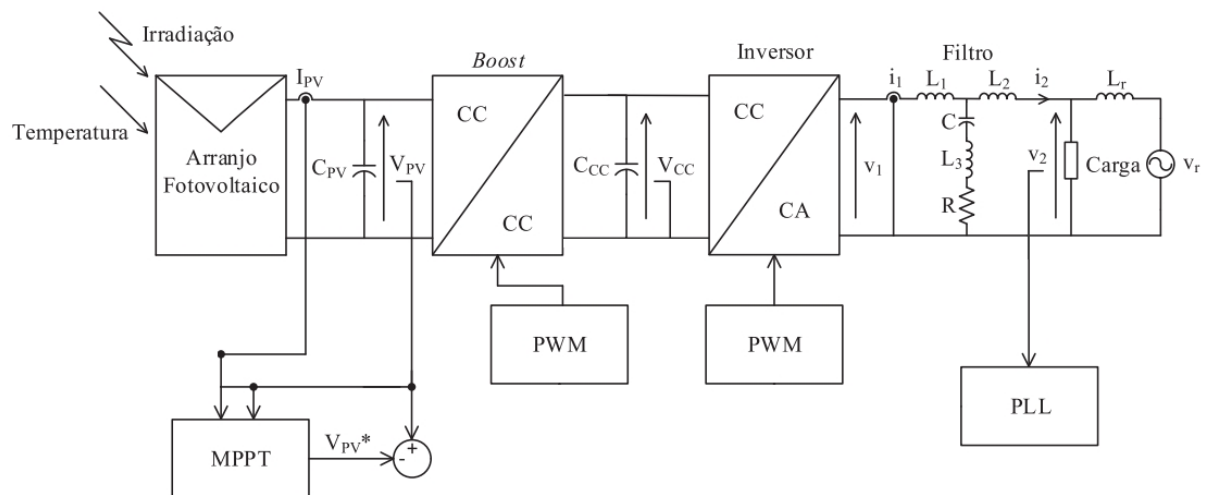
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar o processo de conversão de energia em sistemas fotovoltaicos operando conectado com a rede elétrica, um estudo de simulação foi desenvolvido por meio do *software* PSIM, que possui ferramentas matemáticas voltadas para a análise de eletrônica de potência e conexão com outros *softwares*. As estruturas utilizadas, neste trabalho, são detalhadas por um diagrama elétrico que ilustra a conexão do sistema fotovoltaico com a rede.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Figura 11 apresenta o diagrama de blocos simplificado do sistema fotovoltaico monofásico utilizado neste trabalho. De acordo com o diagrama, o sistema analisado é composto por três blocos principais: o arranjo fotovoltaico, um conversor do tipo *boost*, um inversor, um filtro LCL e o MPPT.

Figura 11 - Sistema Fotovoltaico Simulado em Ambiente PSIM



Fonte: (CUNHA, 2016).

3.1.1 Arranjo Fotovoltaico

O arranjo fotovoltaico simulado possui as seguintes características, conforme ilustrado na figura 12:

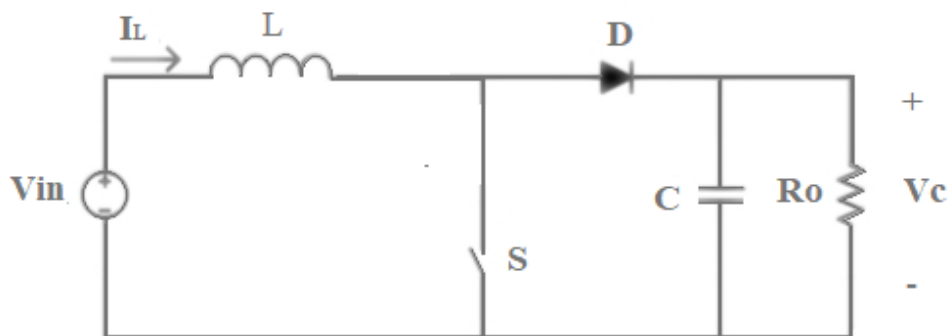
ARRANJO FOTOVOLTAICO	CARACTERÍSTICAS
Dois Módulos	Associação em Série
Potência Total	1KWp
Índice de Irradiação	$S_0 = 1000 \text{ W/m}^2$
Temperatura de Referência	$T_{ref} = 25^\circ\text{C}$
Nº de Células em Série	$N_s = 288$
Resistência em Série	$R_s = 0,008\Omega$
Resistência em Paralelo	$R_{sh} = 1k\Omega$
Corrente de Curto – Circuito	$I_{sc} = 3,8A$
Corrente de Saturação	$I_s = 2,16 \cdot 10^{-8}$

Figura 12 - Características do Arranjo Fotovoltaico Simulado.

3.1.2 Conversor Boost

O conversor *Boost*, também denominado de elevador de tensão, é responsável pelo primeiro estágio de conversão (CC/CC), ou seja, é utilizado para elevar a tensão de saída do painel fotovoltaico. Além disso, neste mesmo conversor é implementado o componente MPPT (SILVA, 2015, p. 8 apud HART, 2010). O circuito equivalente do conversor elevador *Boost* encontra-se representado na Figura 13.

Figura 13 - Circuito Equivalente do Conversor *Boost*



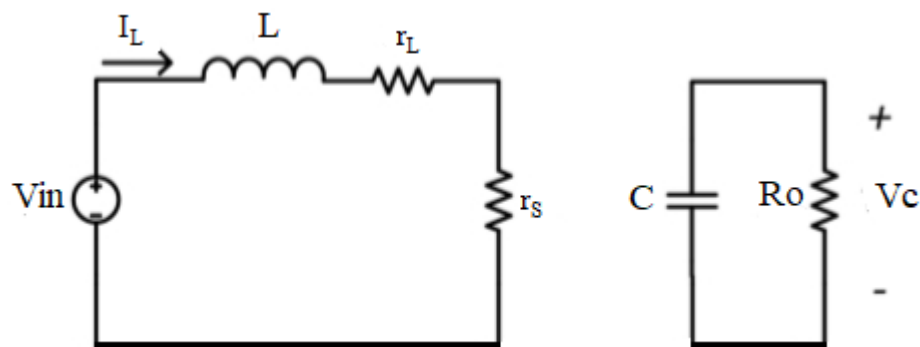
Fonte: Adaptada. (FUZATO, 2015, p. 50).

O funcionamento do conversor *Boost* em modo de condução contínua (MCC)⁶ se dá em duas etapas e pode ser analisado em relação à condução da chave (S) e do diodo de bloqueio (D). (WALKER, 2016, p. 33 apud MELLO, 2011)

a) PRIMEIRA ETAPA: CHAVE S FECHADA

De acordo com a figura 14, quando a chave *S* encontra-se fechada a energia da fonte V_{in} é transferida e armazenada no indutor L enquanto o diodo D é bloqueado reversamente, assumindo-se que a tensão de saída V_c é maior que a tensão da fonte e, com isso, impedindo a passagem de corrente. (WALKER, 2016). Nesta fase, o capacitor C descarrega-se na carga R_o de acordo com a figura 12 (FUZATO, 2015).

Figura 14 - Conversor *Boost* com a Chave *S* em Condução



Fonte: Adaptada. FUZATO, 2015, p. 50.

Aplicando-se a Lei de Kirchhoff das Tensões⁷ na malha do indutor, obtemos que a tensão do indutor é dada por:

$$V_{in} - V_L - r_L I_L - r_S I_L = 0 \quad (1)$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2)$$

⁶ Condição onde admite-se que não há perdas no sistema. Nesse caso, o valor médio da tensão no indutor e o valor médio da corrente no capacitor é nulo (BATSCHAUER, 2012).

⁷ A Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), anuncia que: a soma das tensões em um caminho fechado em um circuito é igual a zero (HALLIDAY et al., 2009).

Substituindo [2] em [1], temos que a corrente do indutor é:

$$V_{in} - L \frac{dI_L}{dt} - r_L I_L - r_S I_L = 0$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{in} - (r_L + r_S) I_L$$

$$\boxed{\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} - \frac{(r_L + r_S)}{L} I_L} \quad (3)$$

Para a corrente no capacitor, temos:

$$-I_C - \frac{V_C}{R_o} = 0 \quad (4)$$

Sabemos que a corrente no capacitor é dada por:

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (5)$$

Substituindo a equação [5] em [4], temos:

$$-C \frac{dV_C}{dt} - \frac{V_C}{R_o} = 0$$

Isolando o termo $\frac{dV_C}{dt}$, obtém-se:

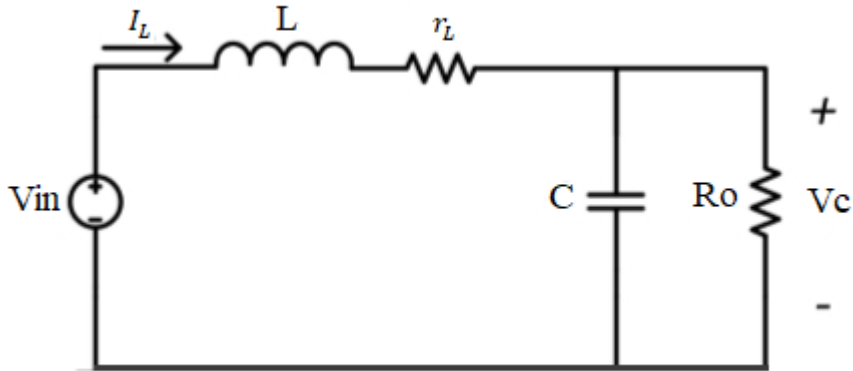
$$\boxed{\frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{C R_o}} \quad (6)$$

b) SEGUNDA ETAPA: CHAVE S ABERTA

Na segunda etapa de funcionamento, a chave encontra-se aberta impedindo que a corrente circule pela mesma, o diodo é então polarizado diretamente, permitindo a condução da corrente e a energia inicialmente armazenada no indutor carrega o capacitor.

(URBANETZ, 2010). Quando a chave é fechada novamente, volta a conduzir e o indutor é novamente carregado, com a energia armazenada no capacitor sendo enviada para a carga. A figura 15 ilustra o funcionamento do conversor *boost* com o modo chave *S* aberta. (WALKER, 2016

Figura 15 - Conversor *Boost* com a Chave *S* Aberta



Fonte: Adaptada. FUZATO, 2015, p. 51

Aplicando LKT na malha no indutor, temos:

$$V_{in} - V_L - r_L I_L - V_c = 0 \quad (7)$$

Substituindo [2] e [5] em [7], obtém-se que a tensão no indutor é:

$$\boxed{\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} - \frac{r_L I_L}{L} - \frac{V_c}{L}} \quad (8)$$

Da mesma forma temos que a corrente do capacitor é dada por:

$$\boxed{\frac{dV_c}{dt} = \frac{I_L}{C} - \frac{V_c}{R_o C}} \quad (9)$$

Para o modo de condução contínuo (MCC), admitimos que não há perdas no sistema e a potência de entrada P_{in} é igual a potência de saída, P_{out} , logo, as resistências parasitas do indutor e da chave são consideradas desprezíveis. (WALKER, 2016, p.34 apud BARBI, 2008). Em MMC a corrente no indutor não vai a zero durante sua descarga, pois a chave *S*

realiza a condução antes que isso ocorra e o indutor é novamente carregado. (LIBERT, 2015 apud BARBI, 2000)

Quando a chave S encontra-se conduzindo, a tensão no indutor V_L é igual a tensão da fonte V_{in} , e quando a chave encontra-se fechada e o diodo conduz, a tensão no indutor vale $(V_{in} - V_o)$. O ganho estático⁸ do conversor é dado pela razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada, considerando os intervalos de tempo de condução da chave e do diodo. (BATSCHAUER, 2016). Segue a equação do ganho estático:

$$\boxed{\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}} \quad (10)$$

Temos que o indutor é carregado com a corrente média de entrada, logo, é possível obter a corrente média no indutor através da equação:

$$\boxed{\bar{I}_L = \frac{V_{in}}{R_o} \frac{1}{(1-D)^2}} \quad (11)$$

O ripple⁹ da corrente do indutor é dado por:

$$\Delta I = \frac{V_{in} * D}{f_s * L} \quad (12)$$

Em que: $f_s = \frac{1}{T_s}$ e representa a frequência de chaveamento.

O capacitor do circuito apresenta um determinado valor de ondulação de tensão que depende do valor da capacitância, sendo que quanto maior for este valor, menor será a ondulação de tensão, tornando-se aproximadamente constante, ($V_o = \text{cte}$). (COELHO, 2006).

O valor dessa ondulação pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\boxed{\Delta V_c = \Delta V_o = \frac{\bar{I}_o * D}{f_s * C}} \quad (13)$$

⁸ É a relação entre o valor médio da tensão de saída e o valor médio da tensão de entrada do conversor, dado pela equação $M = \frac{V_o}{V_{in}}$. Quando $M > 1$ temos um conversor elevador (*boost*), quando $M < 1$, trata-se de um conversor abaixador (*buck*). (BATSCHAUER, 2016)

⁹ Máxima variação desejada para a corrente de entrada. (RUSTOM, 2003)

Onde I_o é a corrente média da carga.

Os valores da indutância (L) e da capacitância (C) podem ser obtidos através das equações [12] e [13]. Isolando os termos L e C , obtemos:

$$L = \frac{V_{in} * D}{f_s * \Delta I} \quad (14)$$

$$C = \frac{\overline{I_o} * D}{f_s * \Delta V_c} \quad (15)$$

O conversor *Boost* utilizado na simulação é composto por um indutor ($L = 2mH$) e um capacitor ($C = 4700\mu F$) cujos valores escolhidos foram baseados em ROCHA, 2015.

3.1.3 Inversor Fonte de Tensão

O inversor de fonte de tensão (ou do inglês, *Voltage Source Inverter* - VSI) é um conversor utilizado para conseguir um sinal AC (onda quadrada) com características ajustáveis para valores máximos a partir de uma fonte constante. (OLIVEIRA, 2017).

Considerando o caso de aplicações em sistemas monofásicos, o VSI pode ser classificado considerando-se o número de chaves utilizadas, onde um par de chaves recebe o nome de Meia Ponte (tensão na carga com metade da tensão do barramento CC) e Ponte Completa (tensão na carga igual à tensão do barramento CC). (WALKER, 2016, p.35 apud HART, 2012). Escolha conforme literatura (ROCHA, 2015).

3.1.4 Filtro LCL

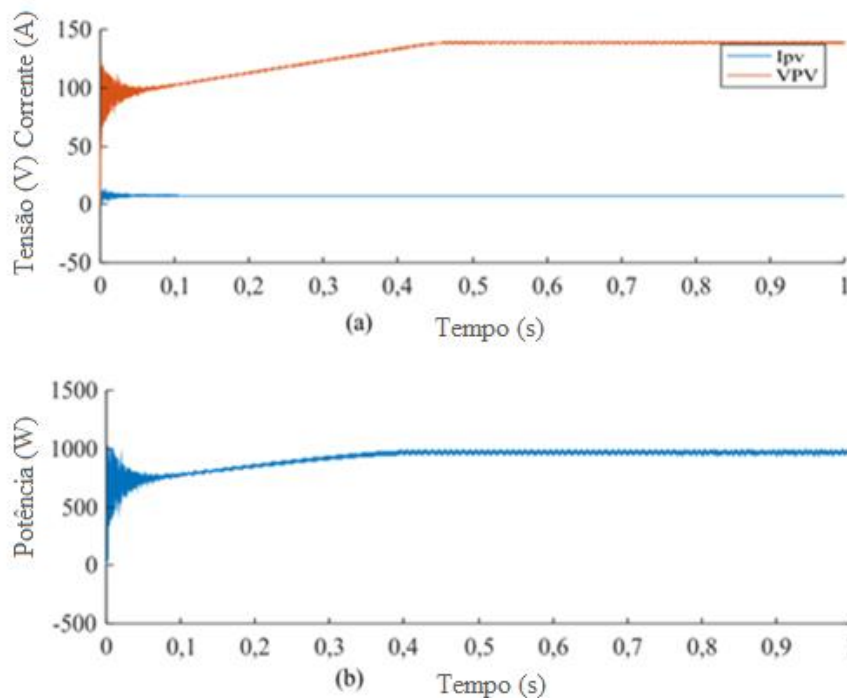
Para conexão do sistema fotovoltaico com à rede elétrica foi utilizado um filtro LCL. O filtro implementado é composto por um indutor $L_1 = 1mH$ do lado do VSI, um capacitor $C = 7,5\mu F$ e um indutor $L_2 = 500\mu H$. No ponto de acoplamento comum foi adicionada uma carga composta pela associação em série de um indutor ($L_l = 5mH$) e um resistor ($R_l = 60\Omega$). Escolha conforme literatura (ROCHA, 2015).

3.2 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados de simulações são importantes para verificar o comportamento do sistema e servem como base para implementações experimentais. Com base nisso, foi desenvolvido um estudo de simulação de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica por meio de conversores de potência.

Na Figura 16 são apresentados os sinais de corrente, tensão e de potência gerados pelo sistema fotovoltaico em função do tempo, onde a tensão (V) é dada em Volts, a corrente (I) em Amperes, a potência (P) em Watts e o tempo (t) em segundos.

Figura 16 - Valores Gerados Pelo Arranjo Fotovoltaico

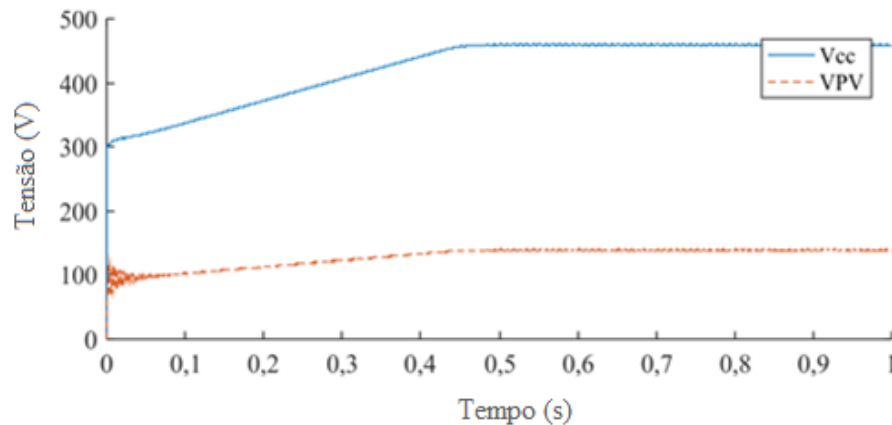


De acordo com a Figura 16(a), para uma irradiância constante de 1000 W/m^2 , temos que a tensão gerada pelo sistema fotovoltaico é de aproximadamente 139,1V, em corrente contínua. Por outro lado, a corrente do sistema para essas condições é de aproximadamente 7,2 A, também em corrente contínua. Com base nisso, baseando-se na Figura 16(b), a potência do sistema fotovoltaico para as condições acima citadas é de aproximadamente 1kW.

De acordo com a Figura 11, o sistema de conversão de energia fotovoltaica utilizado neste trabalho é de dois estágios (CC-CC e CC-CA). O primeiro estágio de conversão utiliza um conversor Boost para realizar a conversão CC-CC e a implementação do MPPT. Na Figura 16 são apresentadas a tensão de entrada e de saída do conversor *Boost*, onde, de acordo

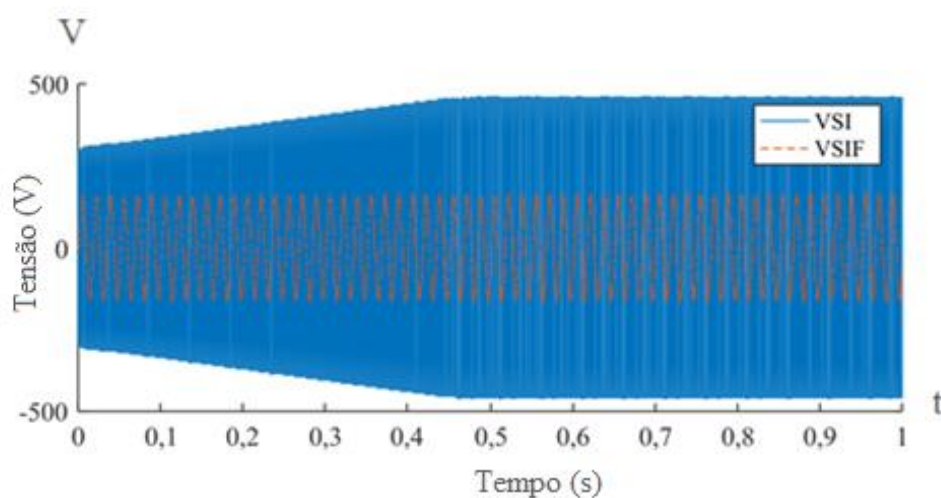
com a Figura, a tensão de entrada do conversor *Boost*/Tensão de saída do sistema fotovoltaico, é de aproximadamente 139,1 V. O sistema de controle do Boost foi projetado para que a tensão de saída fosse controlada em 450 V, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Tensões de Entrada e Saída Referentes ao Primeiro Estágio de Conversão



O segundo estágio de conversão (CC/CA), é realizado por meio de um VSI, conforme ilustrado na Figura 11. Na Figura 18 são apresentados os sinais de tensão de saída com e sem o filtro do VSI. O gráfico da tensão filtrada foi obtido por meio de um filtro passa-baixa com uma frequência de corte de 100 Hz. De acordo com a Figura, a tensão média de saída do VSI apresenta características equivalentes a rede elétrica, ou seja, mesma fase e frequência e (60 Hz), possibilitando a conexão do sistema fotovoltaico a rede elétrica.

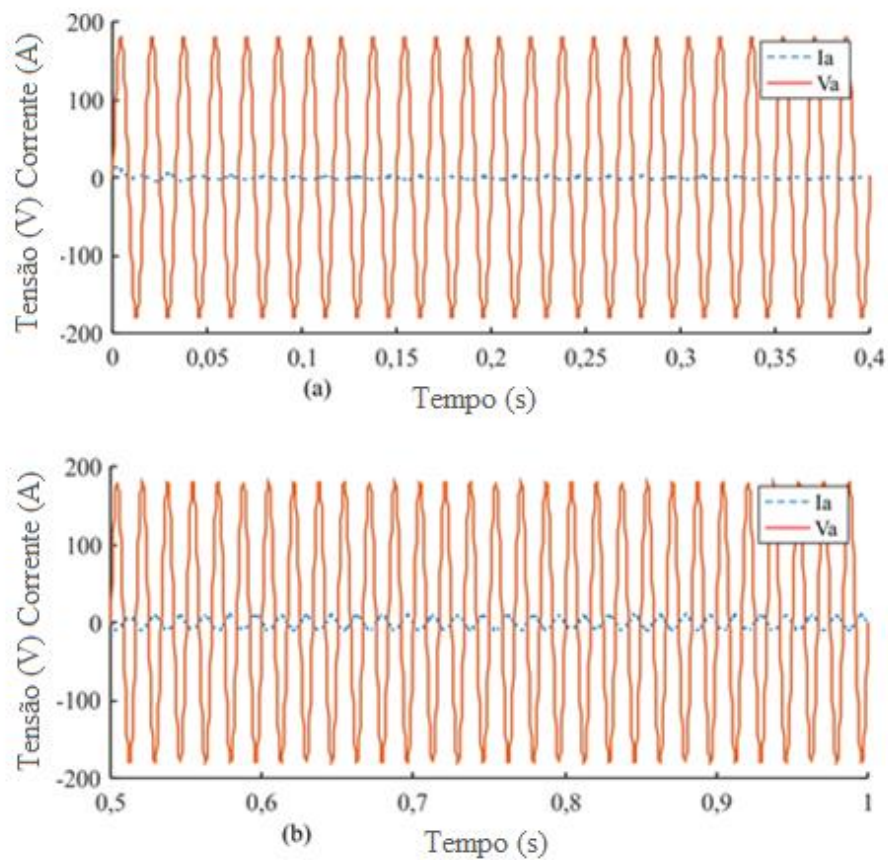
Figura 18 - Tensão de Saída Referente ao Segundo Estágio de Conversão



Na Figura 19 são apresentados os sinais de corrente e tensão da rede elétrica antes e após a conexão do sistema fotovoltaico. Quando o sistema entra em operação, como não

existe carga conectada ao ponto de acoplamento, a potência gerada pelo sistema é inteiramente fornecida à rede elétrica. Há também uma inversão na polaridade e aumento da frequência do sinal da corrente, conforme ilustrado na Figura 19 (b). A potência do sistema é fornecida com um fator de potência unitário, onde apenas a potência ativa é fornecida a rede elétrica.

Figura 19 - Potência da Rede Elétrica Antes e Após a Conexão do SFV



4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o processo de conversão de energia solar em energia elétrica em sistemas fotovoltaicos conectados à rede por meio de dois estágios, onde o primeiro estágio realizou a conversão CC/CC e contou com um conversor boost, responsável por elevar a tensão gerada pelo arranjo fotovoltaico e pela busca do ponto de máxima potência, denominado MPPT, enquanto o segundo estágio realizou a conversão CC/CA por meio de um inversor e o qual foi responsável pelo fornecimento da corrente de saída do sistema. O arranjo fotovoltaico foi conectado à rede por meio de um filtro LCL e os resultados obtidos no trabalho foram satisfatórios para a aplicação utilizada.

Foram descritos os componentes utilizados para o processo de conversão e seu princípio de funcionamento, bem como suas limitações e critérios para dimensionamento. Os resultados de simulação demonstram que para o sistema proposto, toda a potência gerada foi entregue à rede elétrica, evidenciando a eficiência dos componentes que constituem o sistema e reforçando o funcionamento do MPPT, que independente da variação da incidência solar, sempre localiza o ponto onde a potência é máxima para aquele valor de irradiância.

Os resultados obtidos apresentaram como principais vantagens do SFV conectado à rede sua fácil implementação e fácil projeto, a garantia de que o gerador fotovoltaico sempre fornece ao sistema seu máximo valor de potência diante de determinados parâmetros, reforçando a ideia de que a implementação desse sistema é uma alternativa para a geração da sua própria energia, fazendo uso de um recurso inesgotável, limpo e renovável.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do estudo realizado neste trabalho de conclusão de curso, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- 1) Avaliar o sistema de conversão de um estágio;
- 2) Analisar outras metodologias de algoritmo de MPPT;
- 3) Avaliar o sistema de controle de forma indireta.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM), IEEE Standard for “**Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**”, in *IEEE Std 1547.2-2008*, vol., no., pp.1-217, 15 April 2009].

ALBUQUERQUE, Rômulo Oliveira: “**Análise de circuitos em corrente contínua**”. São Paulo: Érica, 2009.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – PRODIST, qualidade da energia elétrica, módulo 8. 2014.

BARRETO, Rodrigo Lopes Barreto. **Contribuições ao Método de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPGEEC, Natal – RN, 2014.

BATSCHAUER, A. L. **Apostila da Disciplina de Controle de Conversores Estáticos**. 2012.

BENEDITO, Ricardo da Silva Benedito. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório**. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP/PPGE, São Paulo – SP, 2009.

CÂMARA, Carlos Fernando Câmara. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Lavras – UFL/PPGLSFAE, Lavras – MG, 2011.

CAMPANHOL, Leonardo Bruno Garcia Campanhol. **Sistema Fotovoltaico Trifásico de Único Estágio Conectado a Sistemas de Geração Distribuída Operando como Condicionador de Qualidade de Energia Unificado Usando uma Estratégia Dual de Compensação Ativa de Potência**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, USP/PPGEE, São Carlos – S, 2017.

CARVALHO, Domingos Miguel Sequeira Carvalho. **Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Elétrica**. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP/ PPGEEC, Porto, 2011.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES**. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2004.

CULLEN, N.; THORNYCROFT, J.; COLLINSON, A. IEA – International Energy Agency – **Photovoltaic Power Systems. Risk Analysis of Islanding of Photovoltaic Power Systems Within Low Voltage Distribution Networks**. Task 5 – Grid Interconnection of Building Integrated and Other Dispersed Photovoltaic Power Systems. 2002.

CUNHA, Rafael Bittencourt Aguiar: “**Proposta de sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica**”. Universidade Federal da Bahia – UFBA/PPGEE, Salvador - BA, 2016.

EPE - **Balanco Energético Nacional 2018**: Ano Base 2017. Rio de Janeiro, 2018. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. [<http://www.epe.gov.br>].

EPE - **Balanco Energético Nacional 2019**: Ano Base 2018. Rio de Janeiro, 2019. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. [<http://www.epe.gov.br>].

FUZATO, Guilherme Henrique Favaro Fuzato. **Análise de um Conversor Boost Interleaved com Multiplicador de Tensão para Sistemas de Geração Distribuída que Utilizam Células a Combustível como Fonte Primária**. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP/ PPGEE, São Carlos – SP, 2015.

GALDINO, M.; PINHO, J.; **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: ... Revista virtual de química. Niterói, RJ, vol. 7, n. 1.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energias Renováveis: Um Futuro Sustentável**. REVISTA USP, São Paulo, n.72, p. 6-15, dezembro/fevereiro 2006-2007.

H. Cha and T. Vu, "**Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter**," *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Palm Springs, CA, 2010.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física, 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009 vol 3.

J. M. Sosa, G. Escobar, P. R. Martínez-Rodríguez, G. Vázquez, M. A. Juárez and M. Diosdado, "**Comparative evaluation of L and LCL filters in transformerless grid tied converters for active power injection**," *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, 2014.

JUNIOR, Jair Urbanetz Junior. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes De Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise Dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/PPGEC, Florianópolis-SC 2010.

NASCIMENTO, Rodrigo Lima Nascimento. **Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas**. 2017. Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br/bd/handle/bdcamara/32259>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

PALZ, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas**. Curitiba: Hemus, 2002.

ROCHA, Thiago de Oliveira Alves Rocha. **Estratégia de Controle Robusto para Interconexão de Sistemas PV Trifásicos à Rede Elétrica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPGEEC, Natal – RN, 2015.

Rüther, Ricardo: “**Edifícios solares fotovoltaicos : o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**”, Florianópolis : LABSOLAR, 2004.

SÁ, Nuno Rafael Silva Sá. **Sistema de Conversão de Energia Solar Fotovoltaica para Carregamento de um Veículo Elétrico**. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL/DEEEA, Lisboa, 2017.

SILVA, Leonardo Rosenthal Caetano Silva. **Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia – UFU/PPGEE, Uberlândia – MG, 2015.

Universo Solar/Energia do Futuro: “**Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**”. Disponível em: < <https://universosolar.com/sistemas-fotovoltaicos-conectados-a-rede/>>. Acesso em 12 mar. 2019.

WALKER, Leonardo Fernando: “**Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída de Único e Dois Estágios em Conexão com a Rede de Distribuição de Energia Elétrica**”. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/DAEE, Campo Mourão – PR, 2016.

ZEINELDIN, H. H.; ABDEL-GALIL, T.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. **Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT**. Electric Power Systems Research. Issue 2, v.77, p.155-162, 2007.