

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Karla Keitianne Ferreira de Sousa

**Controle da Tensão do Barramento CC pelo Inversor Monofásico
Ponte Completa em um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
Elétrica**

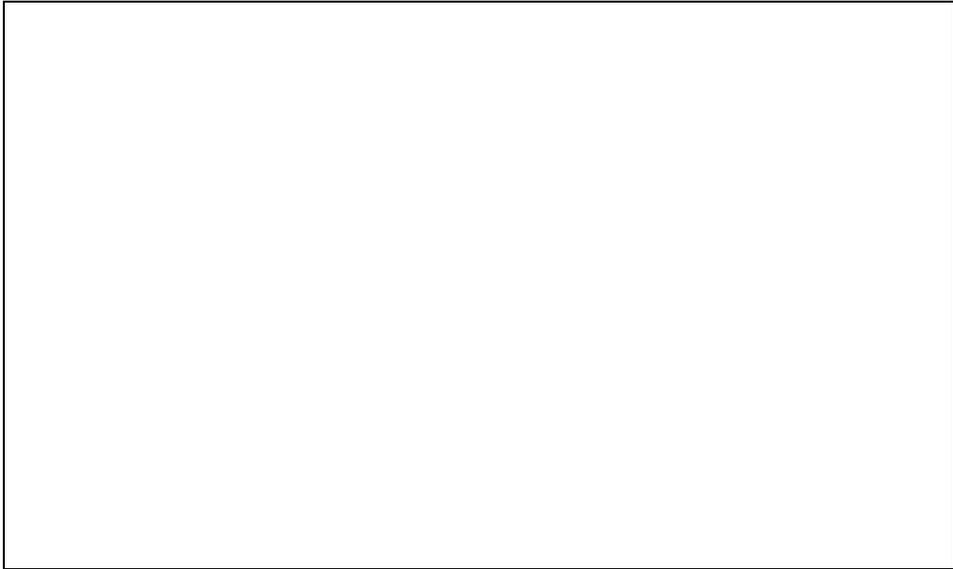
João Pessoa – PB
Abril de 2016

KARLA KEITIANNE FERREIRA DE SOUSA

**CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO CC PELO INVERSOR
MONOFÁSICO PONTE COMPLETA EM UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica
como um dos pré-requisitos para a obtenção
do título de Engenheira Eletricista sob
orientação dos Profs. Rogério Gaspar de
Almeida e Darlan Alexandria Fernandes*

João Pessoa - PB
Abril de 2016



KARLA KEITIANNE FERREIRA DE SOUSA

CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO CC PELO
INVERSOR MONOFÁSICO PONTE COMPLETA EM UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do título de
Engenheira Eletricista.*

Aprovado em: ____/____/____

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Darlan Alexandria (Co-orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nady Rocha (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa, Paraíba
Abril de 2016

Dedico este trabalho à minha mãe Rosevanda Ferreira de Sousa, por toda confiança e amor que me ofereceu durante toda minha vida, sem a mesma eu não teria alcançado tamanha conquista.

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento é, e sempre, será para meu Deus por ter me dado forças nos momentos mais difíceis em minha vida acadêmica e, principalmente, pessoal.

Agradeço especialmente a minha mãe dona Rosevanda Ferreira de Sousa e meus irmãos Katarina Ferreira, Marcelo Filho e Davi Daniel por terem acreditado em mim, nunca me deixando enfraquecer nesta importante e árdua jornada.

Ao meu namorado Gustavo da Cás Fetter pelo seu amor e dedicação. Pois desde sua entrada em minha vida vem me fazendo a mulher mais feliz deste mundo. Eu o agradeço por acreditar em meus sonhos e vivê-los junto comigo. Agradeço, novamente, a Deus por tê-lo colocado em minha vida, por nos dar sabedoria e cada vez mais amor para construir um relacionamento tão sólido e verdadeiro. Estendo meu agradecimento aos meus sogros dona Rosane da Cás Fetter e Maurício José Fetter pela forma com que me acolherem em seus corações, os quais considero como minha segunda família.

Aos meus orientadores (e mais inteligentes Doutores) Rogério Almeida e Darlan Alexandria por terem me dado a honra de trabalharmos juntos e me ajudarem na realização deste trabalho. Até mesmo pelos momentos divertidos que tornaram a realização deste TCC mais leve nos momentos de stress. Eu os agradeço pela dedicação e comprometimento ímpar para com este projeto e para comigo. Bem como, ao corpo docente do departamento de Engenharia Elétrica pela dedicação em formar profissionais multidisciplinares e aptos ao mercado de trabalho.

Por último, e igualmente importante para esta conquista, agradeço à banca examinadora deste Trabalho composta pelo Professores Doutores Nady Rocha e Alexandre César de Castro. Pois mais que admiração profissional, dedico a eles também meu carinho pelas pessoas incríveis que são. Com os quais sempre pude contar durante toda a formação e sempre torceram pelo meu sucesso. Os agradeço também pelas valiosas sugestões que enriqueceram este Trabalho de Conclusão.

“Porque assim como os céus são mais altos do que a terra, assim são os meus caminhos mais altos do que os vossos caminhos, e os meus pensamentos mais altos do que os vossos pensamentos.”

Isaías 55-

9.

RESUMO

Este trabalho pretende implementar via simulação e modelização computacional, o controle da tensão do barramento CC pelo inversor monofásico *ponte completa* em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Foi utilizado os parâmetros do modelo do painel fotovoltaico *Kyocera KD 325 GX - LPB* em um arranjo série e paralelo para obtenção da tensão e corrente adequadas para o conversor CC-CC do tipo *Boost* e inversor monofásico ligado à rede. Serão abordados ainda, a técnica de chaveamento empregada para o controle do inversor monofásico além da modelagem da rede elétrica e de uma carga residencial genérica. Todas as simulações foram realizadas através do software comercial MATLAB/Simulink[®].

Palavras-Chaves: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Controle. Inversor *Ponte Completa* Monofásico.

ABSTRACT

This work intends to implement via simulation and computational modeling, the control of the DC link voltage for a single-phase *Full Bridge* inverter in a photovoltaic system connected to the grid. It was used the parameters of the PV panel model Kyocera KD 325 GX- LPB in an arrangement in series and parallel to obtain the appropriate voltage and current for the DC-DC converter *Boost* and the grid connected single-phase inverter. It will also be addressed, the switching technique used for the control of single-phase inverter and it will be presented the power grid and a residential load modeling. All simulations will be performed using the commercial software MATLAB/ Simulink®.

Keywords: Photovoltaic System. Control. Single-Phase Full Bridge Inverter.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede..... | 4 |
| Figura 2.2 – Sistema Fotovoltaico Real..... | 5 |
| Figura 2.3 – Conversor CC-CC do tipo Boost (elevador de tensão). | 5 |
| Figura 2.4 – Conversor CC-CC do tipo Buck- Boost (abaixador e elevador de tensão). | 6 |
| Figura 2.5 – Conversor CC-CC isolado do tipo Push-Pull (elevador de tensão). | 6 |
| Figura 2.6 – Estrutura básica de um inversor ponte completa com carga resistiva..... | 7 |
| Figura 2.7 – Sistema Fotovoltaico conectado à Rede Geral..... | 9 |
| Figura 2.8 – Sistema Fotovoltaico clássico sem o uso do transformador..... | 10 |
| Figura 2.9 - Inversor centralizado..... | 10 |
| Figura 2.10 – Tecnologia com inversor descentralizado..... | 11 |
| Figura 2.11 - Tecnologia com inversor Multi-String. | 11 |
| Figura 2.12 - Sistema fotovoltaico conectado à rede com controle do barramento CC..... | 12 |
| Figura 2.13 - Conversor CC bidirecional. | 13 |
| Figura 2.14 - Inversor Monofásico Ponte Completa. | 13 |
| Figura 2.15 - Controle proposto para o inversor monofásico ponte completa pelos autores ... | 14 |
| Figura 2.16 - Sistema Fotovoltaico proposto pelos autores. | 15 |
| Figura 2.17 - Controle proposto da potência ativa e reativa a ser injetada na rede pelo inversor monofásico ponte completa. | 16 |
| Figura 2.18 - Estratégia de controle do inversor proposta por Freitas D.N.S, (2013)..... | 16 |
| Figura 2.19 - Modelo da técnica de anti-islanding descrito pelos autores | 17 |
| Figura 2.20 - Sistema com filtro LCL e com inversor com amortecimento ativo..... | 18 |
| Figura 3.1 - Circuito equivalente de uma célula solar..... | 21 |
| Figura 3.2 - Modelo da corrente fotogerada..... | 24 |
| Figura 3.3 - Modelo da corrente de saturação..... | 25 |
| Figura 3.4 - Modelo do painel fotovoltaico..... | 25 |
| Figura 3.5 - Bloco do modelo do painel fotovoltaico..... | 26 |
| Figura 3.6 - Fluxograma da técnica Perturba e Observa. | 28 |
| Figura 3.7 - Bloco da técnica P&O de rastreamento do ponto máximo do painel. | 29 |
| Figura 3.8 - Destaque da chave de entrada do conversor Boost..... | 30 |
| Figura 3.9 - Circuito equivalente conversor Boost com chave fechada..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.10 - Circuito equivalente conversor Boost com chave fechada | 31 |
| Figura 3.11 - Modelo do conversor CC/CC Boost no ambiente <i>SimPowerSystem</i> | 35 |
| Figura 3.12 - Técnica de geração do PWM para o conversor Boost | 36 |
| Figura 3.13 - Modelo para o gerador do sinal PWM do Boost | 37 |
| Figura 3.14 - Bloco gerador do PWM para o conversor Boost..... | 37 |
| Figura 3.15 - Topologia clássica de um inversor ponte completa | 38 |
| Figura 3.16 - Diagrama do modelo para o inversor Ponte Completa monofásico | 40 |
| Figura 3.17 - Bloco do inversor monofásico ponte completa | 40 |
| Figura 3.18 - Controle do inversor | 41 |
| Figura 3.19 - Representação em blocos do Inversor Monofásico de Tensão..... | 42 |
| Figura 3.20 - Representação do inversor de tensão | 42 |
| Figura 3.21 - Diagrama de bloco do controlador de tensão..... | 42 |
| Figura 3.22 - Modelo do controlador de tensão | 43 |
| Figura 3.23 - Diagrama de blocos do controlador de corrente | 43 |
| Figura 3.24 - Modelo do controlador de corrente..... | 44 |
| Figura 3.25 - Modelo completo do controle de corrente do inversor monofásico | 44 |
| Figura 3.26 - Filtro RLC escolhido para o sistema proposto..... | 45 |
| Figura 3.27 - Modelo da rede elétrica junto com o transformador..... | 46 |
| Figura 3.28 - Modelo da rede elétrica junto com o transformador..... | 47 |
| Figura 3.29 - Carga residencial modelada por uma residência em série com indutância | 49 |
| Figura 4.1 - Curva característica da corrente versus tensão para diferentes níveis de irradiação..... | 51 |
| Figura 4.2 - Curva característica da potência versus tensão para diferentes níveis de irradiação..... | 51 |
| Figura 4.3 - Sistema fotovoltaico à rede proposto com irradiação variável | 53 |
| Figura 4.4 - Potência entregue ao sistema pelo arranjo fotovoltaico..... | 54 |
| Figura 4.5 - Tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico para as irradiações apresentadas.... | 54 |
| Figura 4.6 - Corrente que sai do arranjo fotovoltaico para as irradiações apresentadas. | 55 |
| Figura 4.7 - Tensão no barramento CC | 56 |
| Figura 4.8 - Tensão nos terminais de saída do inversor CC/CA | 57 |
| Figura 4.9 - Corrente de saída do inversor | 57 |
| Figura 4.10 - Corrente da carga | 58 |
| Figura 4.11 - Corrente da rede..... | 58 |
| Figura 4.12 - Vista detalhada das correntes da carga, da rede e do inversor..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.13 - Correntes do inversor e da rede para irradiações de 600 e 800 W ² , respectivamente. | 60 |
| Figura 4.14 - Tensão da rede e corrente do inversor | 61 |
| Figura 4.15 - Tensão da rede e Corrente do inversor em maiores detalhes..... | 61 |
| Figura 4.16 - Tensão da rede e Corrente da carga | 62 |
| Figura 4.17 - Tensão e corrente da rede | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Parâmetros do painel Kyocera KD 325 GX-LPB..... | 28 |
| Tabela 2 – Parâmetros do conversor CC/CC Boost. | 36 |
| Tabela 3 – Ganhos dos controladores de tensão e corrente..... | 46 |
| Tabela 4 – Parâmetros da carga..... | 50 |
| Tabela 5 - Valores de tensão, corrente e potência nos pontos de máximo das curvas características obtidas para o painel fotovoltaico..... | 54 |
| Tabela 6 – Valores de corrente de pico para cada intervalo de nível de irradiação apresentados na figura 4.9..... | 59 |
| Tabela 7 - Valores de corrente eficaz da rede para cada intervalo de nível de irradiação apresentados na figura 4.13. | 61 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 2 |
| 1.2.1 | Objetivos Específicos | 2 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 2 |
| 2 | EMBASAMENTO TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 | SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA | 4 |
| 2.2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 2.2.1 | Diferentes Topologias de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica | 8 |
| 2.2.2 | Topologias e Métodos de Controle do Inversor Monofásico Ponte Completa utilizado em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede | 13 |
| 3 | COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE E CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO CC PELO CONVERSOR CC/CA | 21 |
| 3.1 | PAINEL FOTOVOLTAICO | 21 |
| 3.1.1 | Modelagem da célula fotovoltaico pelo seu circuito equivalente | 21 |
| 3.1.2 | Desenvolvimento do Modelo no Simulink® | 25 |
| 3.2 | TÉCNICA DE RASTREAMENTO PERTURBA E OBSERVA (P&O) | 29 |
| 3.2.1 | Modelagem da técnica do Perturba e Observa (P&O) no Simulink® | 31 |
| 3.3 | CONVERSOR CC/CC <i>BOOST</i> | 31 |
| 3.3.1 | Etapas de funcionamento e equações que modelam o Conversor CC/CC <i>Boost</i> | 32 |
| 3.3.2 | Desenvolvimento do conversor CC/CC do tipo <i>Boost</i> no Simulink® | 37 |
| 3.3.3 | Chaveamento do conversor CC/CC <i>Boost</i> | 38 |
| 3.4 | CONVERSOR CC/CA OU INVERSOR <i>PONTE COMPLETA</i> MONOFÁSICO | 39 |
| 3.4.1 | Desenvolvimento do inversor <i>Ponte Completa</i> Monofásico no Simulink® | 41 |
| 3.4.2 | Controle do inversor <i>Ponte Completa</i> Monofásico | 43 |
| 3.5 | FILTRO R-L-C PARA CONEXÃO COM A REDE | 47 |
| 3.6 | REDE ELÉTRICA | 48 |
| 3.7 | CARGA | 48 |
| 3.8 | SISTEMA COMPLETO | 50 |
| 4 | ANÁLISE DE RESULTADOS | 52 |
| 4.1 | CURVAS CARACTERÍSTICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO | 52 |
| 4.2 | FUNCIONAMENTO DO SISTEMA PARA COM VARIAÇÃO NO NÍVEL DE IRRADIAÇÃO | 54 |
| 4.2.1 | Comportamento da Potência, Tensão e Correntes nos Terminais do Arranjo Fotovoltaico | 55 |
| 4.2.2 | Comportamento da Tensão de Saída ou do Barramento CC do Conversor CC/CC <i>Boost</i> | 57 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.3 | Comportamento da Tensão e Corrente nos Terminais de Saída do Inversor CC/CA <i>Ponte Completa</i> Monofásico | 58 |
| 4.2.4 | Comportamento da Tensão e Corrente da Carga e da Rede Elétrica..... | 60 |
| 4.2.5 | Análise da Defasagem ou Fator de Potência entre a Tensão da Rede e Corrente do Inversor, da Carga e da Rede | 62 |
| 5 | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 65 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da demanda energética, e considerando o acentuado desgaste do meio ambiente, torna-se imprescindível a utilização adequada de fontes alternativas de energia. Em especial, pode-se destacar a solar fotovoltaica, pois a mesma vem se apresentando como uma importante fonte alternativa para geração de eletricidade, em particular, pela sua versatilidade e por não poluir o meio ambiente.

Antes da implementação prática deste tipo de sistemas faz-se necessário dispor de modelos computacionais. Os mesmos apresentam-se como ferramentas importantes no que diz respeito a simulação e testes de como se comportaria um sistema real antes mesmo da aquisição dos componentes que fazem parte do sistema. Portanto, mesmo sem dispor de condições climáticas favoráveis para o correto funcionamento desse sistema, todos os testes podem ser realizados previamente em laboratório.

Os sistemas fotovoltaicos apresentam várias opções de utilização como, por exemplo, alimentar um sistema de bombeamento de água em zonas rurais ou áreas afastadas (o que consiste em um sistema fotovoltaico isolado). Como também pode ser usado como fonte de geração de energia elétrica auxiliar quando o sistema é projetado para operar conectado à rede.

Este trabalho, em específico, abordará um sistema de geração fotovoltaico ligado à rede elétrica monofásica, tendo em conta a definição de estratégias de controle que objetivam tanto regular a tensão no barramento CC, bem como de conduzir o sistema fotovoltaico a operar em seu ponto de máxima potência.

1.1 Motivação

Face ao exposto, fez-se necessário compreender um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, sobretudo, a forma com que se relacionam as correntes e tensões deste sistema e de uma rede elétrica monofásica, respectivamente, de modo a alimentar a carga durante todo o tempo de operação do sistema. Para tal feito, um dos principais pontos a realizar, é o controle

adequado do inversor CC/CA monofásico de modo a controlar a tensão do barramento CC¹, além do dimensionamento dos demais componentes que constituem o sistema proposto.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa implementar, a partir de modelização e simulação computacional, o controle da tensão do barramento CC pelo inversor monofásico *Ponte Completa* em um sistema fotovoltaico interligado à uma rede elétrica monofásica. Com efeito, torna-se necessário realizar o estudo da modelagem do painel fotovoltaico e dos componentes que conectam o painel à rede antes da elaboração do controle anteriormente citado.

1.2.1 Objetivos Específicos

Neste trabalho pretende-se desenvolver designadamente:

- Projeto e utilização de um conversor CC/CC tipo *Boost* para a devida adequação de tensão e corrente entre o conjunto de painéis e o inversor monofásico;
- A implementação do modelo associado ao controle do barramento CC pelo inversor monofásico *Ponte Completa* no ambiente computacional MATLAB/SIMULINK[®];
- Representação da rede elétrica e da carga monofásicas conectadas aos terminais do inversor monofásico;
- Avaliação do desempenho do sistema proposto a partir de distintos cenários de simulação.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho organiza-se 4 capítulos, descritos conforme a ordem abaixo:

¹ Tensão entre o conversor CC/CC e o inversor CC/CA.

- No Capítulo 2 serão apresentadas a Fundamentação teórica e a revisão bibliográfica. Com efeito, serão apresentados os principais trabalhos da especialidade que fundamentaram o assunto desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso.
- O Capítulo 3 trata dos elementos que compõe o sistema fotovoltaico proposto e as adequações relativas às conexões desses elementos para o correto funcionamento do sistema.
- No Capítulo 4 são apresentadas as discussões dos resultados obtidos para diferentes cenários de atuação, com a finalidade de validar o sistema proposto.
- Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões referentes aos resultados obtido com este trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as principais abordagens referentes aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Assim como, os trabalhos literários que serviram como base para consolidar o embasamento teórico para construção deste trabalho. Estas obras literárias abordam também as principais configurações dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede e o controle do barramento CC pelo Inversor Monofásico CC/CA.

2.1 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em quatro subgrupos: sistemas isolados residenciais, sistemas isolados não residências (geralmente voltado para uma aplicação como o bombeamento de água em zonas rurais), sistemas distribuídos conectados à rede elétrica e sistemas centralizados conectados à rede. Além dos painéis fotovoltaicos, são utilizados componentes diferentes para cada aplicação para a qual o sistema será empregado (Abella, 2005).

Nos sistemas distribuídos e centralizados conectados à rede, os dois principais equipamentos pertencentes aos sistemas mencionados são o gerador fotovoltaico e o inversor conectado à rede que converte a energia elétrica gerada em CC pelos painéis para CA, de forma adequada à conexão na rede de distribuição de energia (IEA, 2006).

Na figura 2.1 é mostrado um esquema simplificado de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Já na figura 2.2 é ilustrado um exemplo real da implementação deste tipo de sistema.

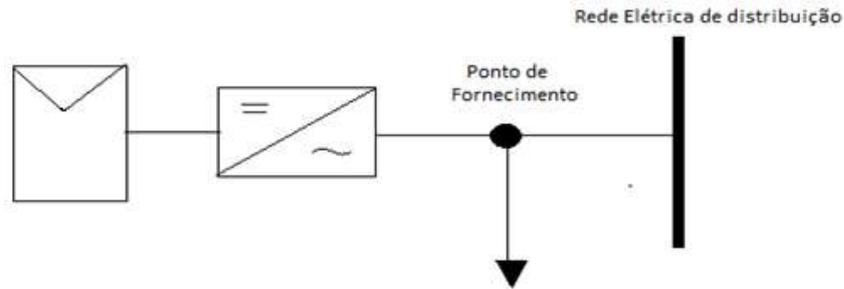


Figura 2.1 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.

Fonte: Da autora



Figura 2.2 – Sistema Fotovoltaico real.

Fonte: www.energiapura.com

Dependendo da aplicação, os componentes que constituem os sistemas fotovoltaicos podem mudar. Diferentemente dos sistemas isolados, nos sistemas distribuídos conectados à rede elétrica, não há elementos de armazenamento de energia (banco de baterias). Pois toda a geração é entregue ao consumidor e/ou rede elétrica.

Como mencionado anteriormente, entre os principais exemplos de elementos dos sistemas fotovoltaicos distribuídos e conectados à rede elétrica, pode-se citar as células ou módulos fotovoltaicos, agrupados em arranjos, e os inversores CC/CA que conectam esses módulos à rede elétrica. Por outro lado, outros equipamentos podem ser utilizados em algumas topologias como a inclusão de conversores CC/CC, geralmente do tipo *Boost*, *Buck-Boost* ou *Push-Pull*, conforme ilustrados nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5, respectivamente.

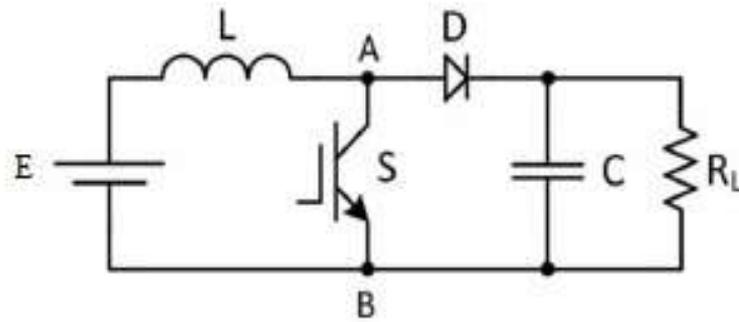


Figura 2.3 – Conversor CC-CC do tipo Boost (elevador de tensão).

Fonte: Da autora.

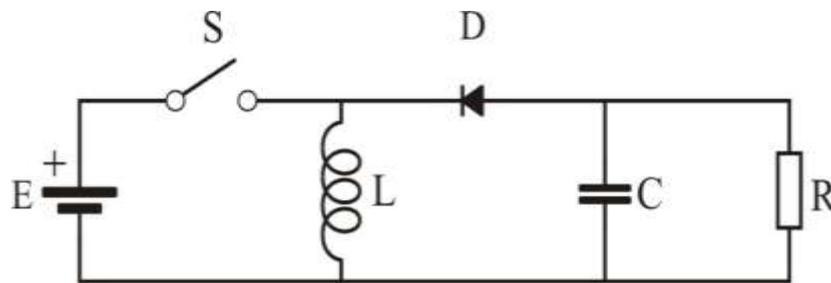


Figura 2.4 – Conversor CC-CC do tipo Buck-Boost (abaixador-elevador de tensão).

Fonte: VEIRA L. M., 2015.

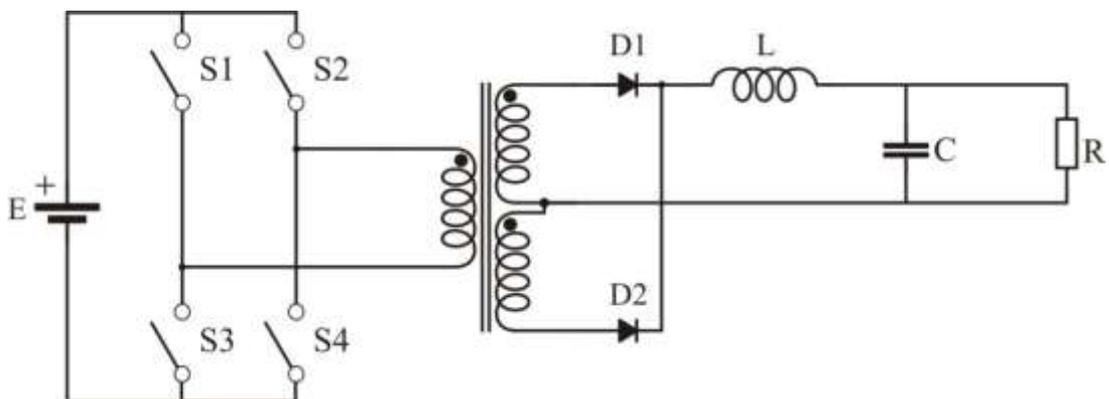


Figura 2.5 - Conversor CC-CC isolado do tipo Push-Pull (elevador de tensão).

Fonte: VEIRA L. M., 2015.

A utilização de conversores CC-CC, anteriormente citados, em conjunto com o inversor CC-CA, possibilita, em certos casos, uma economia de módulo de painéis fotovoltaicos, pois, em geral, esses conversores CC-CC amplificam a tensão de saída produzida pelo arranjo de módulos fotovoltaicos para um valor adequado ao inversor CC-CA conectado à rede elétrica

Todavia, em todas as demais estruturas mencionadas anteriormente, o controle do barramento CC é de fundamental importância para o adequado funcionamento de um sistema fotovoltaico como um todo, seja o mesmo isolado ou não. Uma vez que, o painel (ou o conjunto de painéis) é submetido à diferentes irradiações (incidência dos raios solares sobre o painel fotovoltaico), tal fato faz com que a tensão na saída do conjunto painel-conversor CC/CC apresente uma variação considerável. Por outro lado, a variação de carga alimentada pelo sistema fotovoltaico também conduz a variação da tensão do barramento CC. Sendo assim, o controle do barramento CC é imprescindível, e tem como principal função deixar fixa a tensão CC que será a tensão de entrada para inversor CC-CA.

Existem vários mecanismos para obter o controle da tensão do barramento CC, tanto utilizando métodos de controle analógico como através de algoritmos em controles baseados em DSPs (do inglês, *Digital Signal Processors*) (Egan M.G. (2007).

Quanto às possibilidades existentes para o inversor de um sistema fotovoltaico, este trabalho abordará, especificamente, o Inversor Monofásico *Ponte Completa*, cuja topologia simplificada pode ser constatada na figura 2.6. Contudo, em aplicações práticas, a estrutura de um inversor monofásico é mais sofisticada (conforme será abordado neste trabalho), pois são usados transistores de potência, como MOSFETs ou IGBTs, nos lugares das chaves ideais, e a carga pode ser do tipo RL ou a própria rede elétrica, por exemplo.

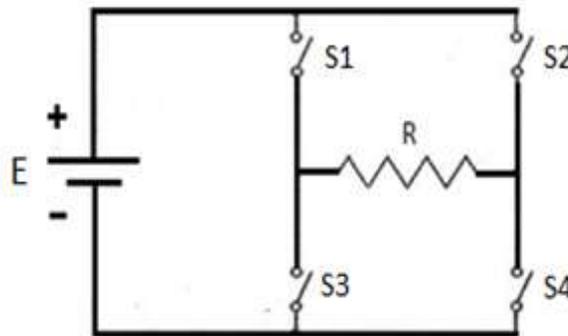


Figura 2.6 – Estrutura básica de um inversor ponte completa com carga resistiva.

Fonte: Da autora.

O inversor monofásico pode apresentar diferentes técnicas de controle dependendo da topologia adotada para o projeto do sistema fotovoltaico. Por exemplo, no caso em que não há a presença de um conversor CC-CC, o inversor pode ser controlado tanto para conduzir o arranjo de módulos fotovoltaicos a operar com máxima potência, bem como controlar, simultaneamente, a tensão do barramento CC. Por outro lado, quando há a presença do conversor CC-CC, o inversor, em geral, controla apenas a tensão CC. Vale ressaltar que

existem diversas técnicas de controle proposta para o inversor na literatura da especialidade, contudo, algumas dessas técnicas, no âmbito de sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica monofásica, foram selecionadas neste trabalho e serão apresentadas a seguir.

2.2 Revisão Bibliográfica

Esta seção está dividida em duas subseções onde a primeira aborda as diferentes topologias de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e a segunda, apresenta as principais características e técnicas de controle do inversor monofásico *ponte completa*. Como mencionado na seção 2.1, um sistema fotovoltaico completo conectado à rede pode conter vários componentes, sendo os principais dele o painel fotovoltaico e o conversor CC/CA.

2.2.1 Diferentes Topologias de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Nos últimos anos vem crescendo outros tipos de instalações fotovoltaicas que são denominadas de instalações conectadas à rede de distribuição. Estes sistemas têm experimentado uma grande evolução devido a redução dos custos dos componentes dos sistemas fotovoltaicos, assim como o aumento de seu rendimento, confiabilidade e excluindo a necessidade do uso de bateria, o que os torna mais atrativos quanto à preservação do meio ambiente e quanto ao mercado financeiro do setor (CONELEC, 2014).

Devido à crescente demanda das energias renováveis entre os anos de 2001 e 2015, observou-se um aumento exponencial da produção de energia fotovoltaica, duplicando-se este aumento a cada dois anos aproximadamente (Roper L. D., 2011). Em 2014, a potência fotovoltaica total instalada no mundo (conectada à rede) chegou a 180 GW (Orlandi, 2014).

Sendo o setor residencial o segundo maior consumidor de energia, a política atual de incentivo às energias renováveis vem se adequando à questão da eficiência energética. Por isto, a energia fotovoltaica vem se destacando pela sustentabilidade, viabilidade e rentabilidade econômica, entre outros, com resultados que pressupõem boas expectativas para a aplicação deste tipo de tecnologia no cotidiano (Morocho R., & Ríos S.K., 2015).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede convencional podem alimentar as cargas domésticas ou industriais durante o período do dia em que há incidência de raios solares suficiente para este fim. Caso a energia produzida seja maior que a energia consumida, pode-se direcioná-la para carregar baterias ou injetar este excesso na rede elétrica. (Cupeprino, A. *at al*, 2012).

A eficiência de um sistema fotovoltaico conectado à rede convencional depende, em grande parte, das perdas do inversor CC-CA que são intrínsecas à sua operação, topologia e a capacidade do controle para incrementar a conversão de energia solar em energia elétrica. Os pontos mais relevantes que devem ser analisados no inversor são: a operação no ponto de máxima potência, o rendimento, o controle da potência injetada à rede, o melhoramento do fator de potência, a redução da distorção harmônica e a capacidade da rede elétrica para absorver a energia excedente (Carrascal C. E. *at al*, 2012].

Abella (2005) exhibe um sistema fotovoltaico geral onde a conexão entre o inversor e a rede exige uma impedância para filtrar o conteúdo harmônico da corrente e/ou tensão superior ao sinal fundamental. O filtro utilizado, dependerá do tipo de modulação realizada. Na maioria das aplicações conectadas à rede elétrica convencional, onde o nível de potência é considerável, utiliza-se um transformador entre o inversor e a rede, permitindo a elevação dos níveis de potência e o isolamento galvânico da fonte. Porém a adição do transformador aumenta consideravelmente o custo, o peso e o volume da instalação. Na figura 2.7 é ilustrado o sistema fotovoltaico descrito.

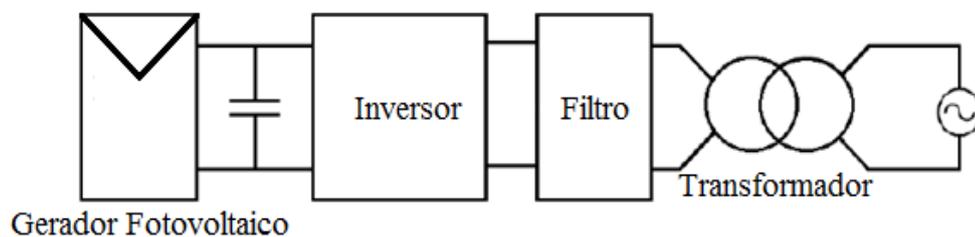


Figura 2.7 – Sistema fotovoltaico conectado à rede geral.

Fonte: Abella, 2005.

O autor também afirma que para eliminar a necessidade de um transformador neste tipo de sistema, pode-se introduzir um conversor CC/CC entre a fonte e o inversor, para assegurar o nível de tensão segundo os níveis de potência a ser injetada na rede. Neste tipo de

topologia, o conversor CC/CC tem a função de produzir uma tensão de entrada para o inversor CC/CA de acordo com o valor requisitado pela fonte de alimentação.

Julean (2009) afirma que o acoplamento à rede sem o uso do transformador é uma alternativa de crescente interesse, onde novas tecnologias são estudadas com o fim de obter arquiteturas de estado sólido, atenuar problemas relacionados com a conexão galvânica entre a rede e o gerador fotovoltaico, redução de tamanho e desgaste físico dos equipamentos. A topologia deste sistema pode ser observada na figura 2.8.

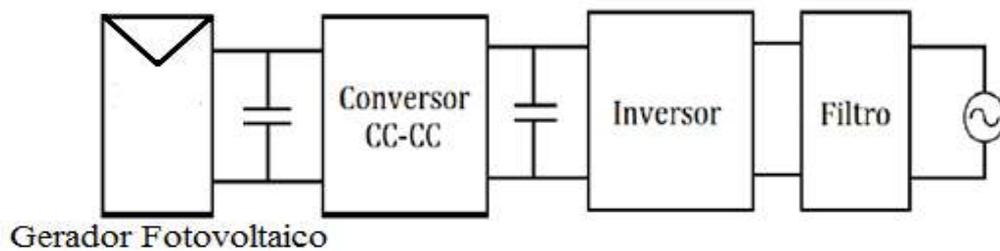


Figura 2.8 – Sistema fotovoltaico clássico sem uso de transformador.

Fonte: Julean, 2005.

O autor destaca que os inversores que permitem a conexão à rede sem a necessidade do transformador, podem ter diversas configurações e classificam-se segundo os respectivos níveis de potência que vão injetar na rede. São eles: *inversor centralizado*, *descentralizado* e *multi-string*. Sobre as classificações de inversor anteriormente citadas, o autor ressalta ainda que o *inversor centralizado* é a interface entre um grande número de painéis fotovoltaicos e à rede, onde os painéis subdividem-se em ramos conectados em série (*strings*) e cada ramo gera um nível de tensão suficientemente elevado. Estes ramos podem também ser conectados em paralelo para atingir níveis de corrente e potência que vão de 5kW até 250kW. Como a elevação de tensão e corrente já é feita pela associação série e paralelo dos painéis, tem-se uma alternativa para não empregar o transformador. A tecnologia do *Inversor Centralizado* é ilustrada na figura 2.9.

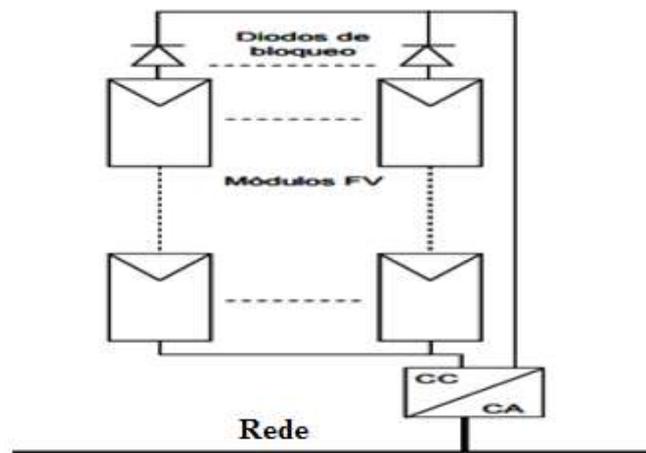


Figura 2.9 – Inversor Centralizado.

Fonte: Julean, 2005.

Em Carrascal C. E., *at al* (2012), é abordado a tecnologia do *inversor descentralizado*, conforme ilustrado pela figura 2.10. Os autores descrevem este tipo de tecnologia como sendo conversores CC/CA conectados em ramos ou *strings*. Pode-se notar que esta topologia é uma configuração ampliada do inversor centralizado. Uma vantagem a ser destacada, reside no fato de que se pode obter um melhor controle devido ao fato de cada ramo ter um inversor independente. Por outro lado, há a desvantagem quanto ao aumento relevante do custo, do tempo de implementação e manutenção.

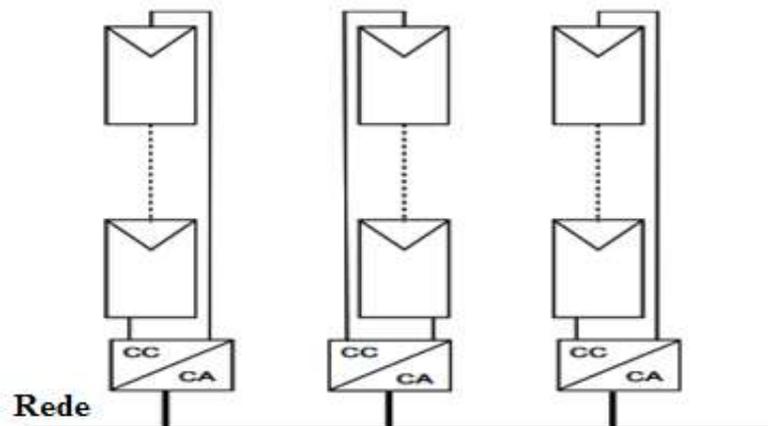


Figura 2.10 – Tecnologia com inversor descentralizado.

Fonte: Carrascal C. E., *at al*, 2012.

Os autores ainda destacam a tecnologia *multi-string* exibida na figura 2.11. Esta topologia é obtida conectando um inversor a ramos de painéis fotovoltaicos, ou seja, o conjunto de ramos é conectado à um inversor comum através de um conversor CC/CC específico em cada um dos ramos.

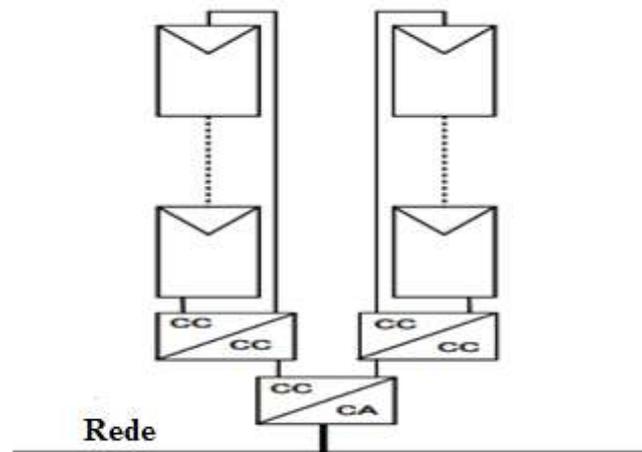


Figura 2.11 – Tecnologia com inversor multi-string.

Fonte: Carrascal C. E., et al, 2012.

Em Egan M.G. (2007) é apresentado um sistema fotovoltaico conectado à rede onde o foco é voltado para o controle do barramento CC, como mostra a figura 2.12.

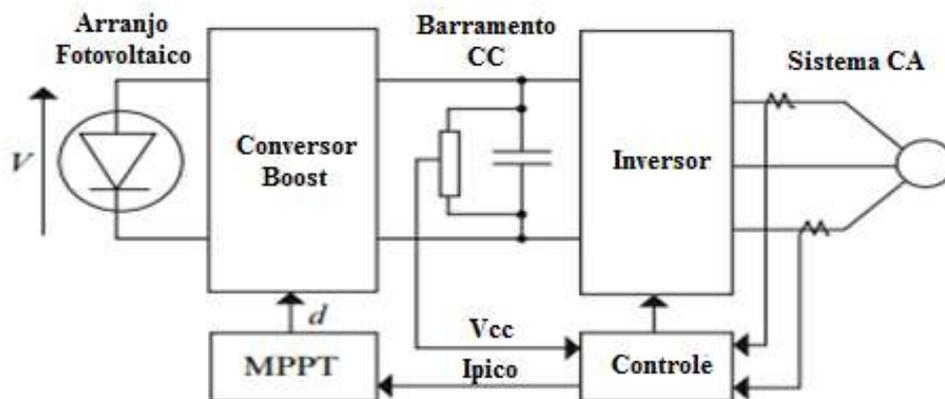


Figura 2.12 – Sistema fotovoltaico conectado à rede com controle do barramento CC.

Fonte: Egan M.G., 2007.

O autor utiliza um conversor CC/CC do tipo Boost conectado ao painel e um Inversor Trifásico PWM para a conexão do sistema à rede. Para o controle da tensão do barramento CC deste sistema, o autor emprega técnicas de controle analógico convencionais. Modelando o capacitor correspondente ao capacitor do barramento como a planta. E através disto, realiza os cálculos correspondentes aos ganhos do controlador PI. Toda simulação de seu projeto utilizando a biblioteca *SimpowerSystems* presente no software MATLAB/Simulink[®].

2.2.2 Topologias e Métodos de Controle do Inversor Monofásico Ponte Completa utilizado em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Juléan (2009) apresenta, para um inversor conectado à rede elétrica local, o projeto de um filtro ressonante do tipo LCL, com amortecimento ativo. Pois o chaveamento em altas frequências do conversor possui a desvantagem de gerar harmônicos indesejáveis. O autor mostra também a sincronia dos controladores de corrente e tensão nos eixos síncronos.

Costa (2012) mostra uma estratégia chamada Phase Locked Loop (PLL), para a sincronia eficiente do Conversor CC/CA com a rede elétrica local a partir do rastreamento do ângulo de defasagem da tensão elétrica no ponto, no qual, o conversor será acoplado com a rede. O autor propõe ainda o controle da potência ativa e reativa de forma independente. Tal estratégia é realizada através de controle vetorial de corrente baseada nas componentes síncronas.

Para a tensão de entrada CC do conversor CC/CA, foi usado a modulação por largura de pulso vetorial (SVPWM). Esta técnica tem como principal vantagem o fato de não distorcer os sinais de corrente.

Rashid, M. H., Gonzalez, M., & Fernandez (2004) propõem uma estratégia de controle para o barramento CC em um sistema fotovoltaico com sistemas de acumulação de energia por baterias. Os autores criaram um princípio novo que chamaram de otimização da distribuição de potência. Trata-se de um conceito baseado na criação de um conversor CC/CC bidirecional com bateria para garantir uma alta e estável tensão CC na entrada do inversor utilizado. Todas as simulações também foram feitas pelo MATLAB/Simulink[®]. Na figura 2.13 é mostrado o circuito do conversor CC bidirecional e o barramento CC.

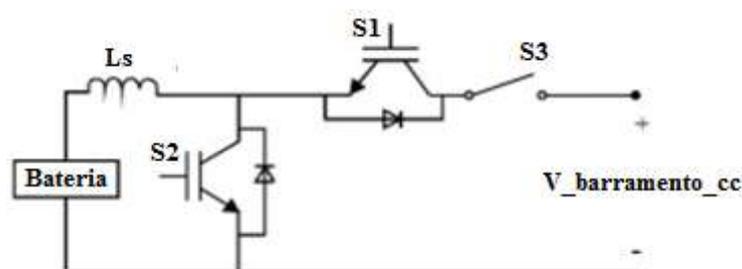


Figura 2.13 – Conversor CC bidirecional.

Fonte: Rashid, M. H., Gonzalez, M., & Fernandez, 2004.

Sumathi, Ashok Kumar & Surekha (2015) apresentam a topologia de um Inversor Monofásico Ponte Completa feito através do MATLAB/Simulink®. O circuito é operado pela operação dos transistores IGBT1_2, IGBT2_2, IGBT2_3 e IGBT2_4. Onde na primeira etapa de operação atuam as chaves S1 - S3 e posteriormente S2 e S4 com um duty cycle de 50%. A figura 2.14 ilustra o que foi proposto pelos autores.

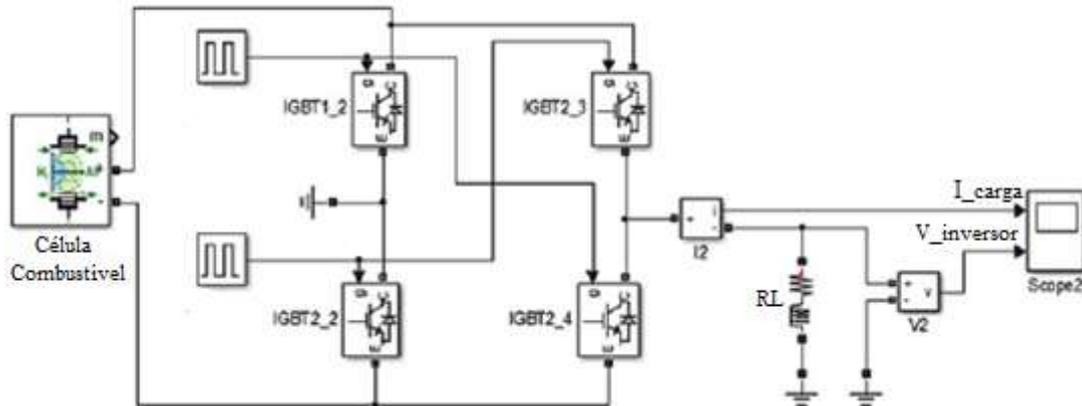


Figura 2.14 – Inversor Monofásico Ponte Completa.

Fonte: Sumathi, Ashok Kumar & Surekha, 2015.

Zhang., Ren L. Ren S., Ren J., Cheng B. & Zhang H. (2009) apresentam um sistema análogo ao ilustrado na figura 2.9 por Abella (2005), onde não é utilizado o conversor CC/CC entre o painel e o conversor CC/CA. Porém neste artigo, os autores abordam também a estratégia utilizada quanto ao controle do inversor monofásico *ponte completa*. Há duas maneiras de controle: por corrente e por tensão. Na figura 2.15 é ilustrado o controle utilizado para o sistema proposto. Observa-se que a malha de tensão se encontra em *loop* externo e o *loop* de corrente é o interno. O propósito do circuito interno é controlar o sinal de corrente dada como referência. Regulando os parâmetros do *loop* de corrente, a velocidade atual de rastreamento pode ser avançada e o erro pode ser reduzido. Esta configuração inclui o PLL para que se possa obter a sincronia com a frequência da rede. O correto funcionamento do controle empregado é notado quando a corrente de saída do inversor é senoidal e em fase com a tensão.

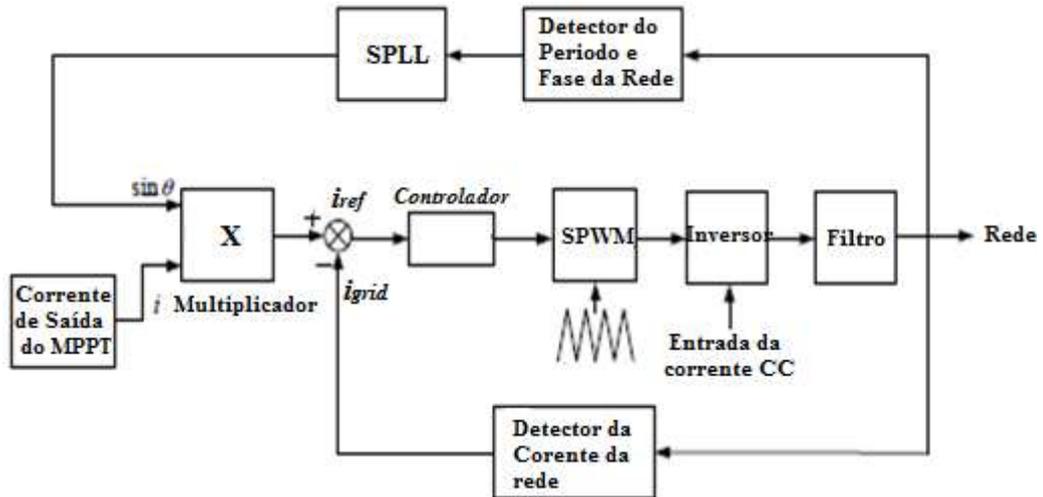


Figura 2.15 – Controle proposto para o inversor monofásico ponte completa pelos autores.

Fonte: Zhang., Ren L. Ren S., Ren J., Cheng B. & Zhang H., 2009.

Já os autores Samerchur S., Premrudeepracharn S., Kumsuwun Y., & Higuchi K. (2011), propõem o projeto e análise do controle de potência ativa e reativa de um inversor monofásico (VSI – em inglês: Voltage Source Inverter) em um sistema fotovoltaico conectado à rede apresentado na figura 2.16.

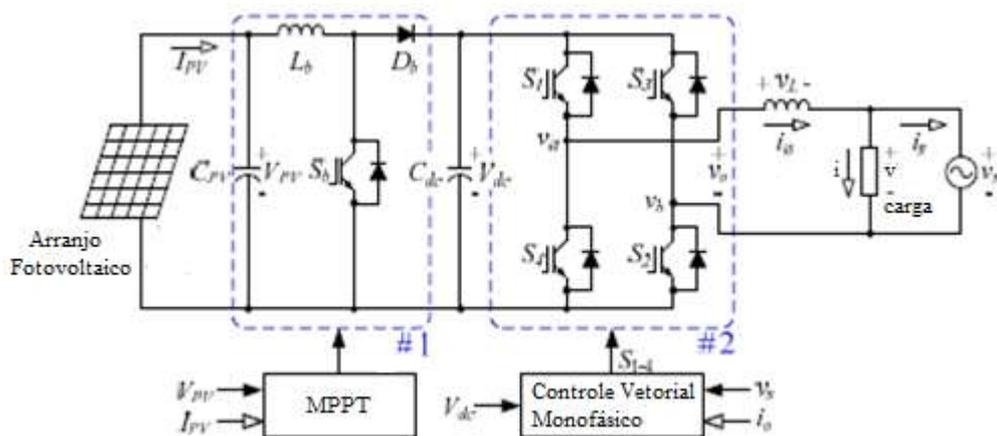


Figura 2.16 – Sistema Fotovoltaico proposto pelos autores.

Fonte: Samerchur S., Premrudeepracharn S., Kumsuwun Y., & Higuchi K., 2011.

O método proposto pelos autores é baseado no controle vetorial de potência através do desacoplamento das componentes de corrente ativa e reativa, controlando assim a potência ativa e reativa a ser injetada na rede. Outro importante objetivo do trabalho dos autores é o controle do fator de potência da rede, o que acarreta no aumento da eficiência da transferência de potência do arranjo fotovoltaico e diminuição da defasagem do ângulo de fase entre a

corrente e tensão do inversor. É apresentado também todo o modelo matemático do sistema, além dos resultados das simulações obtidas pelo software MATLAB/Simulink® para o dado sistema cuja potência é de 1 kW, tensão da rede de 220 V (RMS) e 50 Hz. Os resultados demonstraram que o fator de potência de entrada da rede é quase unitário, e a distorção da corrente de fase do sistema proposto foi reduzida, fazendo com que a distorção harmônica total para diversas condições de potência caísse em cerca de 5%. Na figura 2.17 é apresentado, em diagrama de blocos, o controle implementado.

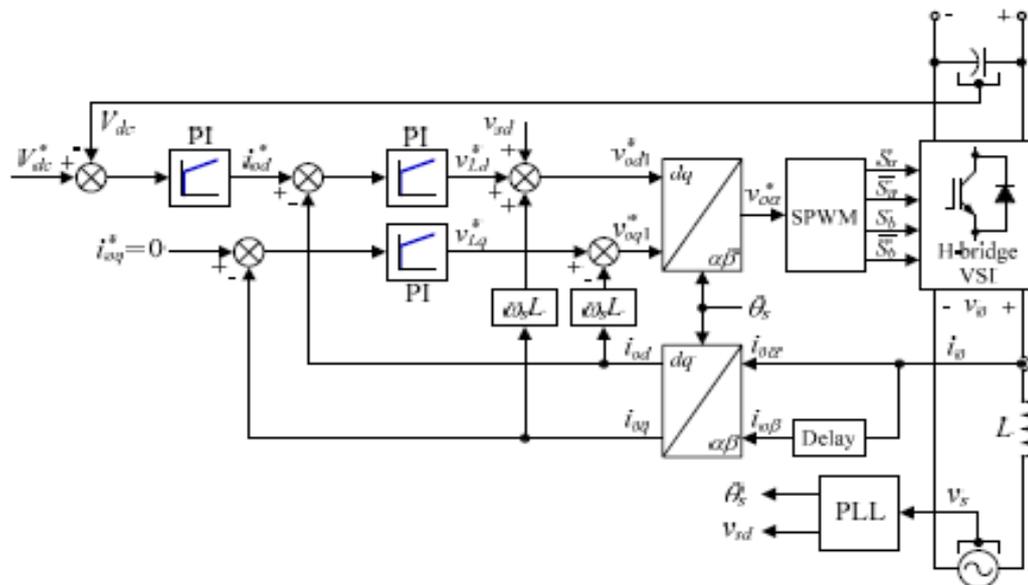


Figura 2.17 – Controle proposto da potência ativa e reativa a ser injetada na rede pelo inversor monofásico ponte completa.

Fonte: Samerchur S., Premrudeeprechacharn S., Kumsuwun Y., & Higuchi K., 2011.

Em Freitas D.N.S. (2013), o autor apresenta uma técnica de chaveamento para um inversor monofásico ponte completa utilizado com um aerogerador. Onde o inversor de tensão é controlado em corrente através de dois controladores PI. Sendo um deles utilizado para manter o controle da tensão do barramento CC constante e outro para corrente a ser injetada na rede elétrica. Quanto ao controle da tensão do barramento CC, faz-se a medida do valor de tensão V_{DC} atual neste barramento e compara-se com um valor de referência definido de acordo com o projeto V_{DC}^* . Efetua-se, então, a diferença entre estes dois valores de tensão e o resultado é a entrada do controlador (PI), como mostrado na figura 2.18.

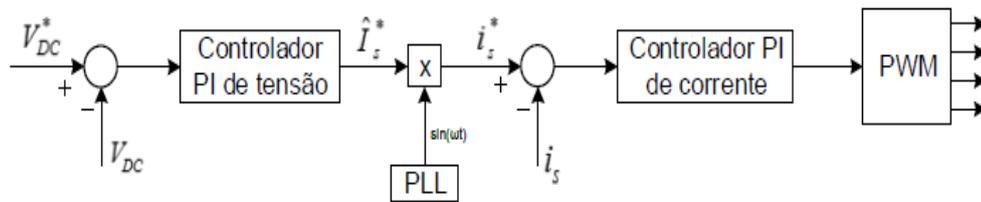


Figura 2.18 – Estratégia de controle do inversor proposta por Freitas D.N.S, (2013).

Fonte: Freitas D. N. S, 2013.

Michael E. R., & Gonzalez S. (2009) discutem, além de toda a modelagem convencional exigida para simulações deste tipo de sistemas fotovoltaicos, o dinamismo das técnicas de MPPT ou algoritmos de *anti-islanding*.

Desta forma, os autores indicam os principais aspectos necessários que os conversores CC/CA devem atender. Tais como, ser capaz de detectar um possível *islanding*¹, além de que a resposta à tensão da rede e flutuações de frequência sejam devidamente simuladas e observadas.

Banu I. V., & Istrate M. (2014) descrevem o fenômeno denominado *islanding* e é desenvolvido uma técnica para detecção e prevenção deste tipo de fenômeno em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Tal técnica consiste basicamente no monitoramento da tensão do barramento CC. Os resultados do emprego de tal método foram comprovados pela comparação direta do tempo de detecção do *islanding* em vários cenários em relação ao tempo ditado pela técnica da mudança média da frequência (ROCOF – em inglês: Rate Of Change Of Frequency). O modelo executado no Matlab/Simulink[®] para este método de *anti-islanding* é ilustrado na figura 2.19.

¹ O efeito denominado como “*islanding*” consiste em um fenômeno elétrico produzido quando uma fonte de geração distribuída continua energizando uma parte da rede elétrica mesmo depois que esta parte tenha sido interrompida ou desconectada.

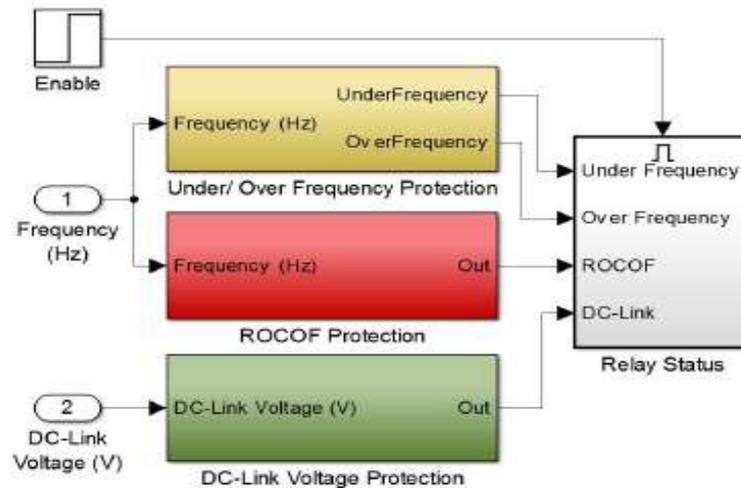


Figura 2.19 – Modelo da técnica de anti-islanding descrita pelos autores.

Fonte: Banu I. V., & Istrate M., 2014.

Pode-se notar no modelo desenvolvido pelos autores que além do bloco de monitoramento da tensão do barramento CC e da proteção ROCOF, há ainda um bloco denominado *Under/Over Frequency Protection* que monitora a frequência do conversor CC/CA (neste caso trifásico) e compara este valor com valores de referência determinados.

Sandeep N., KulKarni P. S. & Udaykumar R. Y. (2014) apresentam uma topologia para o conversor CC/CA monofásico de três níveis de um sistema fotovoltaico conectado à rede, além de um filtro LCL, e um novo método de realimentação em corrente para amortecimento ativo. Um método dinâmico e rápido é usado para rastrear o MPPT de arranjos fotovoltaicos, conhecido como *Ripple Correlation Control* (RPV). O algoritmo usa as oscilações de corrente e tensão em baixa frequência como perturbações, que são introduzidas na saída do arranjo fotovoltaico devida a potência senoidal injetada na rede elétrica monofásica, para habilitar a operação do máximo ponto de potência. O capacitor do filtro LCL utilizado é composto por duas partes e a corrente que flui entre estas é usado como “feedback” para regulação da corrente a ser injetada na rede. O sistema completo é ilustrado pela figura 2.20 simulado no MATLAB/Simulink[®]. O controle da corrente é feito por um Proporcional Ressonante (PR) que providencia potência para a linha com fator de potência unitário e o conversor CC/CA apresenta uma taxa de distorção harmônica muito menor. Os resultados obtidos foram verificados para diferentes perfis de irradiação e de tensão da rede.

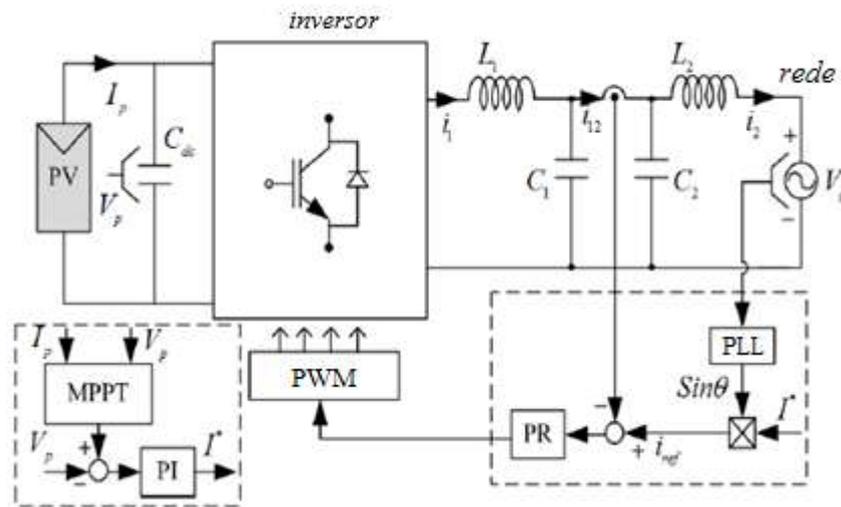


Figura 2.20 – Sistema com filtro LCL e com inversor com amortecimento ativo.

Fonte: Sandeep N., KulKarni P. S. & Udaykumar R. Y., 2014.

Destacando que para este Trabalho de Conclusão de Curso, dentre todas as topologias de sistemas fotovoltaicos conectados à rede apresentados nesta seção, optou-se por utilizar a topologia análoga a apresentada na figura 2.7. Porém, decidiu-se ainda acrescentar, entre o conjunto de painéis e o inversor, um conversor CC/CC do tipo *Boost* para que a tensão do gerador fotovoltaico pudesse ser elevada, exigindo assim uma menor quantidade de painéis, conforme destacado por Abella (2005). Além do fato de que este tipo de conversor CC/CC se adequa muito bem em sistemas fotovoltaicos. Ressaltando que a opção do uso ou não de um conversor CC/CC elevador dependerá da aplicação ou do projeto a ser implementado conforme abordado nesta seção.

Quanto à configuração do inversor, optou-se pela tecnologia do inversor centralizado, pois em uma possível implementação prática do sistema proposto o custo seria reduzido pelo fato de usar apenas um componente deste tipo.

Com relação a estratégia de controle escolhida, baseou-se no que foi proposto por Freitas D. N. S. (2013), apresentado na figura 2.18. Foi preciso que a técnica citada fosse adaptada ao sistema fotovoltaico deste Trabalho de Conclusão, uma vez que o autor a utilizou para um aerogerador. A opção por esta técnica se deu pelo fato de que este tipo de controle se mostrou eficiente quanto ao controle da tensão do barramento CC e da corrente a ser injetada na rede pelo inversor monofásico empregado no sistema proposto, quando diversos níveis de irradiação são aplicados.

Nesta seção, apesar de ter sido abordada uma técnica de *anti-islanding* (mostrada na figura 2.19) proposta por Banu I. V., & Istrate M. (2014), tal assunto está fora do escopo deste

Trabalho de Conclusão. Bem como a determinação de uma melhor configuração de filtros, embora para a conexão do inversor monofásico ponte completa com a rede será utilizado um filtro R-L-C simples que será descrito no próximo capítulo.

3 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE E CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO CC PELO CONVERSOR CC/CA

Neste capítulo serão apresentados todos os componentes utilizados no sistema fotovoltaico proposto conectado à rede elétrica monofásica e seus respectivos modelos matemático, com enfoque para o controle da tensão do barramento CC pelo inversor CC/CA. Todos os componentes do sistema, a princípio, foram projetados e simulados separadamente para validar seus devidos funcionamentos, e posteriormente ligados em conjunto. Para isto, foi utilizado a ferramenta *Simpowersystems* associado ao Simulink[®] que acompanha o software MATLAB[®].

3.1 Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico é constituído, em resumo, por um arranjo adequado de células de silício. Normalmente em projetos práticos, principalmente os que são conectados à rede, precisa-se que os painéis sejam arrançados em série e/ou paralelo para obtenção dos parâmetros de tensão, corrente e potência adequados para a finalidade do projeto. Porém, antes disto, faz-se necessário conhecer o comportamento da célula fotovoltaica, que nada mais é do que a menor estrutura que compõe o painel como foi mencionado anteriormente.

3.1.1 Modelagem da célula fotovoltaico pelo seu circuito equivalente

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica pode ser visto na figura 3.1. Através deste circuito, pode-se obter as equações que modelam o funcionamento elétrico da célula, e é também, por estas equações, que modelos computacionais podem ser

desenvolvidos. Pode-se perceber que a corrente fotogerada, I_f , é quem determina a tensão de interesse V e a corrente I de saída da célula fotovoltaica.

Em se tratando de projetos reais de sistemas fotovoltaicos, um estudo climático detalhado deve ser feito para que seja verificada, da maneira mais fidedigna possível, a irradiação solar que incidirá sobre o painel ou o conjunto destes, pois a corrente fotogerada, representada pela fonte de corrente na figura 3.1, depende da irradiação solar. Deve-se verificar também os limites de temperatura do painel, assim como sua temperatura de operação. Uma vez que, a corrente I_f mostra-se inversamente proporcional ao aumento da temperatura na qual o painel opera.

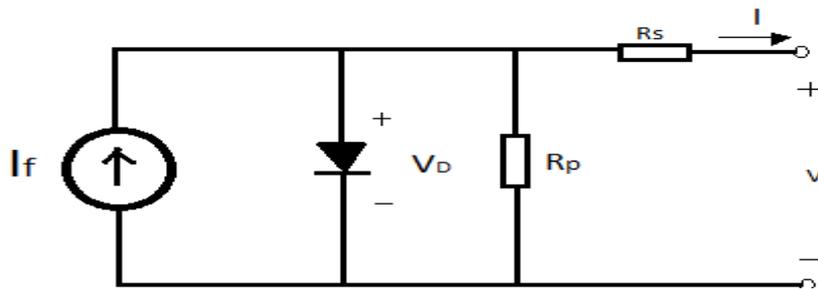


Figura 3.1 – Circuito equivalente de uma célula solar.

Fonte: Da autora.

O diodo do circuito, por sua vez, representa o comportamento da corrente de saturação da célula I_0 . A fonte de corrente fotogerada e o diodo isoladamente já serviriam para modelar o circuito ideal da célula e representam o comportamento da corrente de saturação da célula. Porém, para que a célula fotovoltaica tenha uma representação ainda mais fiel à realidade, acrescentam-se as perdas em forma de resistores.

A resistência em paralelo, R_p , e a resistência série, R_s , representam, respectivamente, as perdas referentes as correntes de fuga (parasitas), ocasionadas por inconformidades no processo de fabricação da célula ou impurezas em seu material; e as perdas nos contatos entre a ligação da célula fotovoltaica e as cargas elétricas que serão conectadas.

Ao analisar o circuito e aplicar as leis de Kirchoff's mostrado na Figura 3.1 da célula fotovoltaica, pode-se obter a equação (3.1) onde entre as variáveis encontram-se a tensão de saída V da célula fotovoltaica, a tensão sobre o diodo V_D e a queda de tensão ocasionada pela passagem da corrente de saída I na resistência série R_s .

$$V = V_D - I.R_s \quad (3.1)$$

A tensão sobre o diodo, V_D , é obtida pela equação (3.2) abaixo:

$$V_D = m.V_T \cdot \ln\left(\frac{I_f + I_0 - I - I_p}{I_0}\right) \quad (3.2)$$

Sendo m o fator de idealidade do diodo; I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo; I_p é a corrente que passa pelo resistor em paralelo R_p ; e V_T é denominado potencial térmico, obtido através da equação (3.3), sendo função da temperatura de célula fotovoltaica T e das constantes de Boltzman k e carga do elétron q .

$$V_T = \frac{k.T}{q} \quad (3.3)$$

Substituindo e manipulando adequadamente as equações (3.2) e (3.3) na equação (3.1), pode-se obter uma equação mais completa que descreva a tensão de saída da célula fotovoltaica:

$$V = m \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_f + I_0 - I - I_p}{I_0}\right) - I.R_s \quad (3.4)$$

Vale ressaltar que os parâmetros de corrente fotogerada I_f , a corrente de saturação do diodo I_0 e o fator de idealidade do diodo m podem ser calculados através de equações cujos parâmetros de referência são fornecidos pelos fabricantes de painéis fotovoltaicos.

Na biblioteca *SimPowerSystems/SpecializedTechnology/Renewables/Solar* do software MATLAB® R2016a, há várias possibilidades de modelos de painéis fotovoltaicos reais. Para este trabalho, o painel, cujas especificações de referência foram tomadas, foi o modelo *Kyocera KD 325 GX – LPB*, pois o mesmo possuía os parâmetros mais adequados para o que foi projetado. Neste trabalho, foi usado um arranjo em série e paralelo deste tipo de painel, com a finalidade de que os níveis de tensão e corrente de interesse fossem obtidos. Ao agrupar um conjunto de painéis em série, a tensão de circuito aberto V_{oc} aumenta proporcionalmente ao número de painéis e ao colocá-los em paralelo, a corrente de curto-circuito I_{sc} aumenta também proporcionalmente à quantidade de “ramos” em paralelo.

Como mencionado anteriormente, a corrente fotogerada é obtida utilizando os parâmetros de referência de corrente de curto-circuito do painel I_{sc}^r , da irradiância padrão G^r (1000 w/m^2) e da irradiância G que incide sobre a célula fotovoltaica. A definição desta corrente é apresentada na equação (3.5).

$$I_f = \frac{I_{sc}^r \cdot G}{G^r} \quad (3.5)$$

Além dos parâmetros já citados, existem ainda a referência de temperatura padrão da célula T^r , o potencial térmico de referência V_T^r e a corrente de saturação de referência I_o^r , sendo a mesma função da temperatura da célula fotovoltaica T . Tais parâmetros compõe a corrente de saturação do diodo representada na equação (3.6).

$$I_o = I_o^r \cdot \left(\frac{T}{T^r} \right)^3 \cdot \exp \left(\frac{Eg}{m} \cdot \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T} \right) \right) \quad (3.6)$$

Sendo Eg a energia de *gap* e equivalente a $1,12\text{eV}$ (elétron-Volt).

Finalmente, deve-se ainda encontrar o fator de idealidade do diodo. Este é obtido também utilizando os parâmetros de tensão de referência no ponto de máxima potência V_{pmax}^r , da tensão de circuito aberto do painel V_{oc} , da corrente de referência no ponto de máxima potência I_{pmax}^r , da corrente de curto circuito do painel I_{sc}^r e do potencial térmico V_T^r . Este fator é apresentado na equação (3.7).

$$m = \frac{2V_{pmax}^r - V_{oc}}{V_T^r \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}^r - I_{pmax}^r}{I_{sc}^r} \right) + \frac{V_T^r \cdot I_{pmax}^r}{I_{sc}^r - I_{pmax}^r}} \quad (3.7)$$

São através das equações (3.4) a (3.7) que a construção do modelo do circuito da Figura 3.1 é viabilizado. Ressaltando que um painel fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas devidamente arranjadas em serie e paralelo. Apenas uma célula não é capaz de produzir os níveis de tensão, corrente e potência suficientes para a utilização. Como já mencionado, a depender do projeto, apenas um painel não é suficiente para atender os requisitos relacionados aos níveis de energia do projeto.

Por isso às equações (3.4) a (3.6), foram acrescentadas do número de painéis em paralelo N_p e o número de painéis em série N_s . Obtendo-se as equações (3.8) a (3.10), que modelam completamente [juntamente com a equação (3.7)] o conjunto de painéis fotovoltaicos utilizados neste trabalho de conclusão de curso.

$$V = m \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_p \cdot I_f + N_p \cdot I_0 - I - I_p}{N_p \cdot I_0} \right) - \frac{N_s}{N_p} \cdot I \cdot R_s \quad (3.8)$$

$$I_f = \frac{N_p \cdot I_{sc} \cdot G}{G^r} \quad (3.9)$$

$$I_0 = I_o^r \cdot \left(\frac{T}{T^r} \right)^3 \cdot \exp \left(N_{cel} \cdot \frac{Eg}{m} \cdot \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T} \right) \right) \quad (3.10)$$

3.1.2 Desenvolvimento do Modelo no Simulink®

A equação (3.8), anteriormente descrita na seção anterior, tem como variáveis de saída a tensão terminal V e a corrente I do painel fotovoltaico. São através destas, que se obtém a curva I-V. Além do mais, a mesma equação tem como variáveis de entrada a corrente fotogerada I_f corrente de saturação I_0 , a irradiação solar G e a temperatura do painel fotovoltaico T .

Utilizando apenas blocos lógicos e de operações aritméticas: adição, subtração, produto, divisão, função exponencial e potenciação presentes na biblioteca, blocos *built-in* do ambiente Simulink®, foi possível construir o modelo do gerador fotovoltaico. As figuras 3.2 e 3.3 mostram, respectivamente, o modelo da corrente fotogerada I_f e da corrente de saturação, ambas construídas também no ambiente Simulink®.

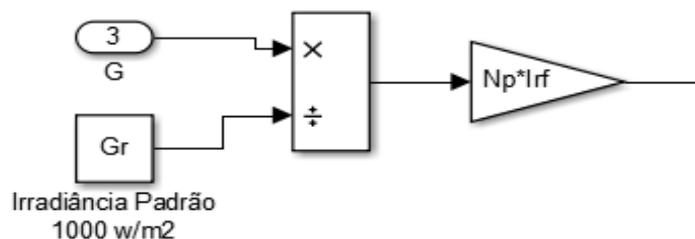


Figura 3.2 - Modelo da corrente fotogerada.

Figura 3.4- Modelo do painel fotovoltaico.

Fonte: Da autora.

Para complementar o modelo desenvolvido do painel, foi criado um único bloco mostrado, na Figura 3.5, contendo em seu interior os blocos na figura 3.4. Uma vantagem disto é que se tem um modelo mais compacto e de fácil utilização.

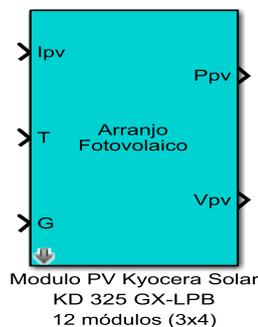


Figura 3.5 - Bloco do modelo do painel fotovoltaico.

Fonte: Da autora.

Após isto, também foi criada uma máscara (com uma simples *interface*) para o bloco do painel fotovoltaico para que, sempre que necessário, os valores dos parâmetros de referência fossem alterados mais facilmente. A tabela 1 apresenta os parâmetros, que são diretamente digitados na máscara criada, referentes ao modelo de painel escolhido.

Tabela 1 – Parâmetros do painel Kyocera KD 325 GX-LPB.

| Parâmetros do painel Kyocera KD 325 GX-LPB. | |
|---|-----------------------|
| Tensão de circuito aberto (V_{oc}) | 49,7 V (volts) |
| Corrente de curto circuito (I_{sc}) | 8,69 A (amperes) |
| Tensão no ponto de máxima potência (V_{pmax}) | 40,34 V (volts) |
| Corrente no ponto de máxima potência (I_{pmax}) | 8,07 A (amperes) |
| Temperatura padrão de operação (T_r) | 25°C |
| Irradiação padrão de operação (G_r) | 1000 W/m ² |
| Número de células (N_{cel}) | 80 |
| Resistencia série (R_s) | 0,40174 Ω (ohms) |
| Resistencia em paralelo (R_p) | 230,342 Ω (ohms) |
| Número de painéis em série (N_s) | 4 |
| Número de painéis em paralelo (N_p) | 3 |

Fonte: Da autora.

3.2 Técnica de Rastreamento Perturba e Observa (P&O)

Atualmente existem muitas técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico, como por exemplo a técnica InCod, lógicas de programação utilizando Fuzzy, entre outras. Porém, optou-se para este Trabalho de Conclusão de Curso uma técnica clássica chamada de Perturba e Observa (P&O).

A motivação da constante busca pela melhoria das técnicas de rastreamento de máxima potência dos painéis fotovoltaicos dá-se pela busca do rendimento máximo deste equipamento. A ciência dos materiais visa também a melhoria dos elementos utilizados para a composição e confecção dos painéis fotovoltaicos, uma vez que, o rendimento alcançado na conversão da energia que o sol disponibiliza em energia gerada pelos painéis fotovoltaicos ainda é muito baixo, além do fato que se deve contar com o fator meteorológico quanto a incidência dos raios solares sobre o painel ou conjunto deles. Portanto, todas as técnicas que visam a eficiência energética do painel são sempre almejadas tendo em conta que o ponto de máxima potência está sempre se deslocando.

Quanto a técnica do Perturba e Observa, apesar da simplicidade, a mesma se mostra eficiente e não exige equipamentos caros para sua implementação. Trabalhando com diversas tensões, esta técnica consiste em percorrer a curva $P \times V$ do painel fazendo com que este equipamento opere sempre com o maior nível de potência naquele dado momento (Konzen, 2014).

Faz-se, primeiramente, uma medição inicial nos valores de tensão e corrente presentes na saída do painel fotovoltaico em um determinado instante. De posse destes valores, calcula-se um valor inicial de potência P_1 . O algoritmo compara esta potência com o valor de referência especificado. Com um dado valor de perturbação, também especificado, é acrescentado ou retirado este valor na tensão de operação do painel fotovoltaico fazendo com que este trabalhe com um valor um pouco acima ou abaixo do valor de tensão em que se encontrava no estado inicial quando feita a primeira medição.

Feita esta perturbação na tensão de operação, mede-se novamente a corrente presente na saída do painel e através do produto desta com a nova tensão de operação se obtém uma potência P_2 . De forma análoga, caso P_2 seja maior que o valor anterior P_1 , significa que de fato a perturbação na tensão de operação do painel fez com que o ponto de operação deste se aproximasse do ponto máximo desejado na curva de potência, e desta forma, é realizada uma

nova perturbação de mesmo valor na tensão de operação do painel para que seja medida outra potência P_3 e comparada com a potência da medida anteriormente P_2 .

Porém, caso ocorre o contrário, significaria que o novo ponto de operação em que se encontra na curva está mais distante do ponto máximo. Desta forma, a próxima perturbação a ser realizada na tensão possuirá valor contrário ao da perturbação atual.

A técnica do Perturba e Observa é apresentada na Figura 3.6, ilustrando e resumindo o que foi descrito.

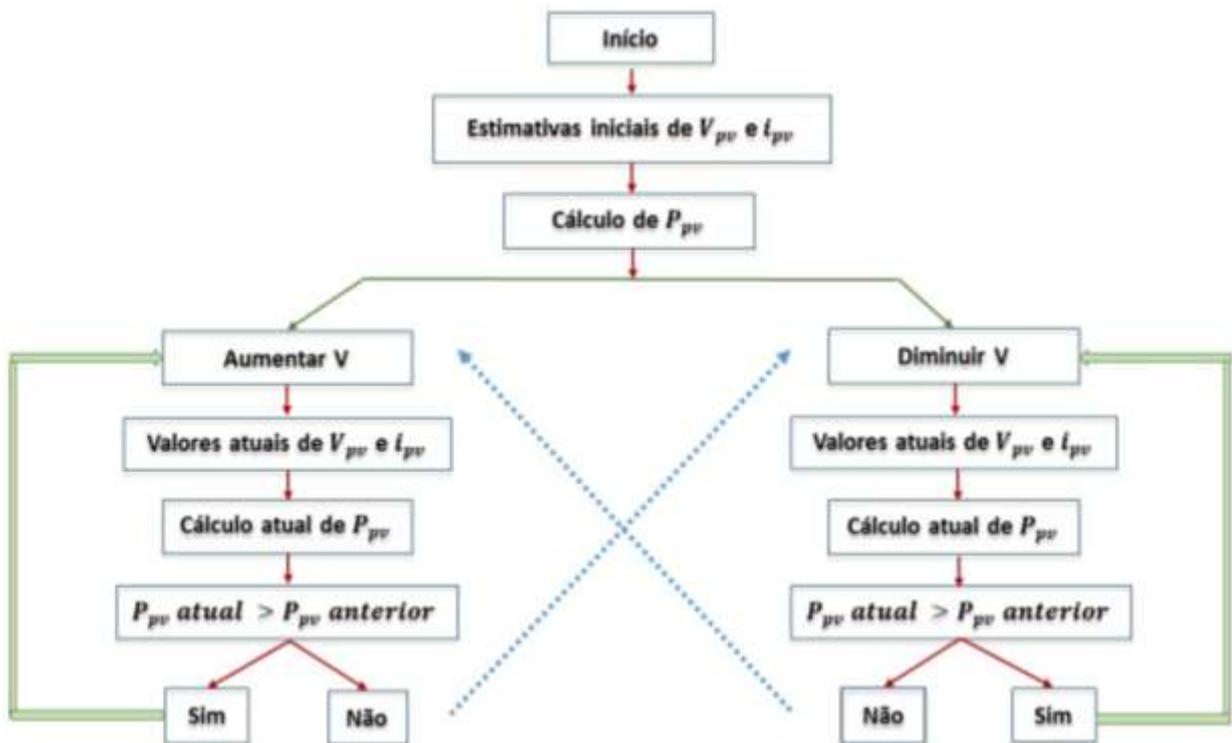


Figura 3.6- Representação da técnica Perturba e Observa.

Fonte: Da autora.

A utilização da técnica do Perturba e Observa se dá em conjunto ao uso de um conversor CC/CC no sistema fotovoltaico, uma vez que as perturbações inseridas na tensão de operação do painel fotovoltaico se dão a partir da variação nos valores da razão cíclica D dos sinais de PWM que controlam o chaveamento dos conversores CC/CC.

3.2.1 Modelagem da técnica do Perturba e Observa (P&O) no Simulink®

Para tal modelagem, utilizou-se o bloco *function* presente na biblioteca do Simulink®, pois este bloco permite que seja feita a programação correspondente ao algoritmo da técnica Perturba e Observa diretamente em seu interior. Como apresentado na figura 3.7, o bloco *function* referente à técnica P&O possui duas entradas que são a tensão e corrente de saída do painel fotovoltaico, além de uma saída, na qual, se empregará o sinal gerado para o controle da chave S do conversor *Boost* (que se descreverá mais adiante) por onde atua a técnica de rastreamento. O bloco com este controle é apresentado na figura 3.7.



Figura 3.7 - Bloco da técnica P&O de rastreamento do ponto máximo do painel.

Fonte: Da autora.

3.3 Conversor CC/CC *Boost*

Em se tratando de sistemas fotovoltaicos, pode-se utilizar vários tipos de Conversores CC/CC para serem conectados ao gerador fotovoltaico, tais como os Conversores CC do tipo não isolados como o Buck, Boost, Buck-Boost e ainda o *PushPull* que é isolado, conforme comentado no capítulo 2.

A topologia escolhida para o sistema fotovoltaico proposto neste trabalho foi o *Boost*, inicialmente ilustrado na Figura 2.1 na seção 2.1 do capítulo 2. Uma das razões da escolha por este tipo de Conversor CC/ CC, é no fato de adequar-se muito bem às mais diversas aplicações referentes aos sistemas fotovoltaicos. Além disto, este conversor mostra-se mais simples, em termos de topologia, que o conversor CC/CC *Buck-Boost*. Como exemplo de outras aplicações do conversor *Boost*, pode-se utiliza-lo como elevador de tensão em fontes de alimentação, retificadores com elevado fator de potência e no acionamento de motores de corrente contínua com frenagem regenerativa. Em se tratando de circuitos eletrônicos de potência, sabe-se que existem vários meios de abaixar um dado nível de tensão.

Porém para o caso contrário não se pode dizer o mesmo, o que mais uma vez ressalta a importância do conversor CC/CC do tipo *Boost*.

Diferentemente do painel fotovoltaico modelado no ambiente Simulink[®], para o conversor *Boost* optou-se por representá-lo através dos elementos da biblioteca *SimPowerSystems* do mesmo ambiente.

Tendo sido escolhida a forma de representar o conversor no ambiente de simulação Simulink[®], parte-se então para o equacionamento do mesmo para que seja possível dimensionar seus componentes, apresentados na figura 3.8. A obtenção das equações que modelam este conversor é feita ao analisar as duas etapas de funcionamento: no momento em que a chave S fecha e no momento em que é aberta.

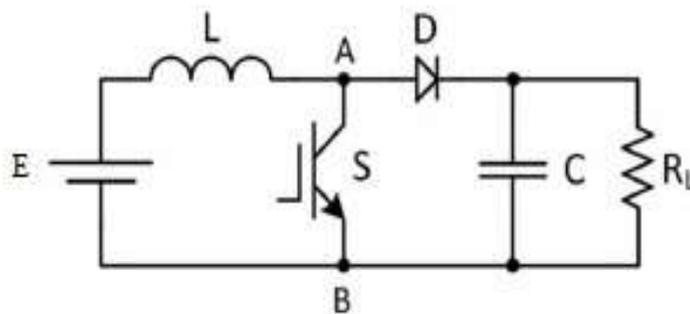


Figura 3.8 - Destaque da chave de entrada do conversor *Boost*.

Fonte: Da autora.

3.3.1 Etapas de funcionamento e equações que modelam o Conversor CC/CC *Boost*.

O conversor CC/CC *Boost* possui duas etapas de operação que serão descritas nas subseções a seguir. Na primeira etapa, a chave S permanece fechada e na segunda etapa, a chave fica aberta. Em cada uma destas operações, faz-se a análise do circuito equivalente e obtém-se as devidas equações.

3.3.1.1 Primeira Etapa de Operação: Chave S fechada

Na primeira etapa de funcionamento, onde a chave S se encontra fechada, o diodo D é polarizado inversamente, isolando o estágio de saída da fonte de alimentação E, que aplica uma tensão constante diretamente sobre o indutor. A corrente da chave i_S é igual à corrente

que passa no indutor i_L e a corrente que passa no diodo é nula, conforme ilustrado na Figura 3.9.

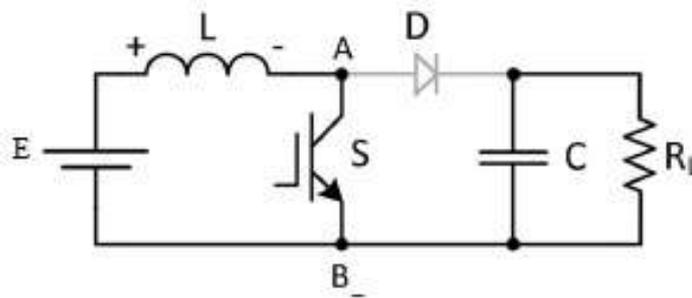


Figura 3.9 - Circuito equivalente conversor Boost com chave fechada.

Fonte: Da autora.

3.3.1.2 Segunda Etapa de Operação: Chave S aberta

Nesta etapa de operação do conversor *Boost*, a chave S que antes estava fechada é agora aberta e, assim, a corrente do indutor i_L e a corrente no diodo i_D são iguais.

Conforme pode ser observado na figura 3.10.

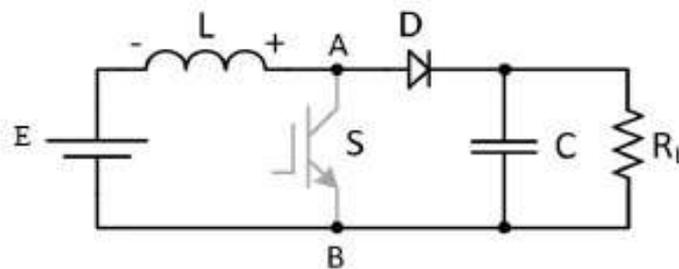


Figura 3.10 - Circuito equivalente conversor Buck-Boost com chave aberta.

Fonte: Da autora.

3.3.1.3 Cálculo do Ganho estático em Condução Contínua

Com a chave fechada, a corrente que passa pelo indutor cresce linearmente, como mostrado na equação (3.11).

$$i_E = i_L = I_m + \frac{E}{L} \cdot t \quad (3.11)$$

No momento em que a chave abre t_{on} , o valor de corrente máxima i_M é dada pela equação (3.12).

$$i_M = I_m + \frac{E}{L} \cdot t_{on} \quad (3.12)$$

O diodo está reversamente polarizado fazendo com que a tensão na carga seja superior à da fonte ($V_o > E$), e a carga é alimentada apenas pelo capacitor C. Quando a chave S é aberta, a corrente da indutância será a mesma que a do diodo, este estará diretamente polarizado e conduzirá, como mostrado pela equação (3.13).

$$i_D = i_E = i_L = I_M - \frac{(V_o - E)}{L} \cdot t \quad (3.13)$$

Quando a chave fecha no instante de tempo t_{off} , o valor da corrente mínima é dado pela equação (3.14).

$$i_m = I_M - \frac{(V_o - E)}{L} \cdot t_{off} \quad (3.14)$$

Sabendo que $t_{on} = DT$, sendo D a razão cíclica e T o período de chaveamento. Pela correta manipulação algébrica destas expressões, tem-se que a tensão na fonte E e a diferença entre esta e a tensão na carga são dadas, respectivamente, pelas equações (3.15) e (3.16):

$$E = L \frac{(I_M - I_m)}{DT} \quad (3.15)$$

e

$$(V_o - E) = L \frac{(I_M - I_m)}{(1 - D)T} \quad (3.16)$$

Dividindo a equação (3.15) pela equação (3.16), encontra-se o ganho estático em condição contínua como sendo dada pela equação (3.17):

$$\frac{V_o}{E} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (3.17)$$

A energia armazenada no indutor é transferida para a saída, recarregando o capacitor e alimentando a carga.

No modo contínuo, ao se iniciar o ciclo seguinte, ainda existe corrente pelo indutor. Teoricamente a tensão de saída vai para valores infinitos para ciclos de trabalho que tendam à unidade. No entanto, devido principalmente às perdas resistivas da fonte, dos semicondutores e do indutor, o valor máximo da tensão fica limitado, uma vez que a potência dissipada se torna maior do que a potência entregue à saída.

Admitindo os componentes ideais, pode-se afirmar que toda potência cedida pela fonte é transferida a carga, ou seja:

$$P_o = P_E \quad (3.18)$$

Como,

$$P_E = E \cdot I_{Emed} \quad (3.19)$$

Pode-se obter a relação descrita pela equação (3.20):

$$E \cdot I_{Emed} = \frac{E^2}{R_o} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} \quad (3.20)$$

Pela qual encontra-se que a corrente na fonte de tensão I_{Emed} é dada pela equação (3.21).

$$I_{Emed} = \frac{E}{R_o} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} \quad (3.21)$$

A partir da ondulação da corrente de entrada pode-se encontrar a indutância do circuito do conversor *Boost* utilizando a expressão (3.22) estabelecida a partir da forma de onda da corrente do indutor.

$$\Delta I_L = \frac{E \cdot T}{L} \cdot D = \frac{E}{L \cdot f_s} \cdot D \quad (3.22)$$

Logo,

$$L = \frac{E}{\Delta I_L \cdot f_s} \cdot D \quad (3.23)$$

Quanto ao capacitor, pode-se afirmar que a ondulação da tensão de saída deste elemento (ΔV_C) é dado pela equação (3.24).

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \rightarrow I_o = C \frac{\Delta V_c}{\Delta t} \quad (3.24)$$

Ou seja,

$$\Delta V_c = I_o \frac{\Delta t}{C} = I_o \frac{t_c}{C} \quad (3.25)$$

$$\Delta V_c = \Delta V_o = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot C} \quad (3.26)$$

A partir da expressão (3.26) encontra-se o valor da capacitância como sendo:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_o} \quad (3.27)$$

Portanto, sendo feitos os cálculos utilizando as equações descritas, os valores obtidos para a indutância e capacitância são exibidos na tabela 2, como também os valores das outras grandezas necessárias para os cálculos citados.

Tabela 2 – Parâmetros do conversor CC/CC Boost.

| Parâmetros o conversor CC/CC Boost. | |
|---|------------------|
| Frequência de Chaveamento (f_s) | 10 kHz (Hertz) |
| Faixa de Tensão de Entrada (E) | 198,8 (Volts) |
| Tensão de saída (V_o) | 311 V (Volts) |
| Duty Cicle (D) | 0,56 |
| Ondulação na tensão de saída (ΔV_o) | 25 mV (Volts) |
| Ondulação na corrente do indutor (ΔI_L) | 500 mA (Ampères) |
| Capacitor (C) | 1000 μ F |
| Indutor (L) | 200 μ H |

Fonte: Da autora.

3.3.2 Desenvolvimento do conversor CC/CC do tipo *Boost* no Simulink®

Novamente utilizando os blocos da biblioteca *comum blocks*, e do ambiente *SimPower Systems*, e de acordo com a figura 3.11, obteve-se o modelo ilustrado na figura 3.12. Ressaltando que o ramo RL no início do circuito cujos valores são, respectivamente, 1 mΩ e 200 μH, foram inseridos à topologia correspondente ao conversor *Boost* para que a corrente I_{pv} do arranjo fotovoltaico pudesse ser medida. Bem como, foi inserido também (em paralelo com a entrada do conversor *Boost*) um capacitor de 1000 μF para que a ondulação intrínseca à tensão do painel V_{pv} fosse atenuada na entrada do conversor. Evitando assim, a propagação desta ondulação para a saída do conversor ou barramento CC e, por conseguinte, na entrada do inversor.

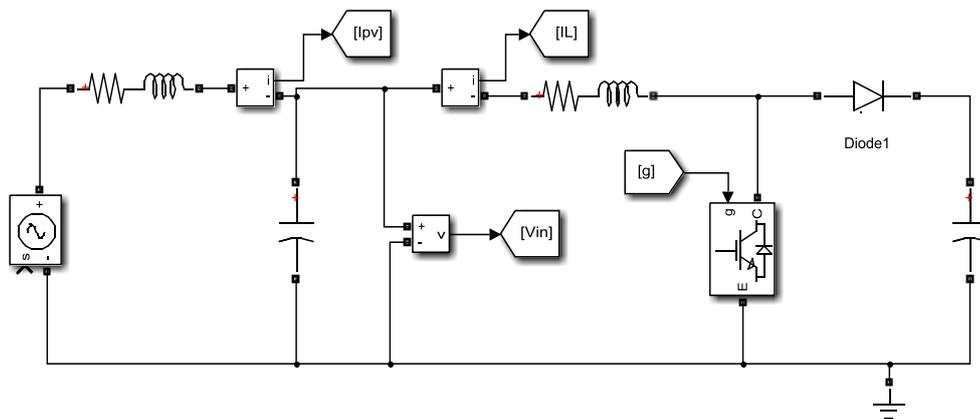


Figura 3.11 - Modelo do conversor CC/CC Boost no ambiente Simpower System.

Fonte: Da autora.

Pode-se observar que a tensão de entrada é a própria tensão V_{pv} do painel, utilizada através de um sensor chamado *Controlled Voltage Source* do ambiente *SimPowerSystems*. Para que os sinais de interesse como a corrente no indutor, os gatilhos dos transistores, entre outros, possam ser visualizados quanto seu formato de onda ou inseridos no funcionamento do circuito utilizam-se as etiquetas, também encontradas no mesmo ambiente anteriormente citado.

3.3.3 Chaveamento do conversor CC/CC *Boost*

3.3.3.1 Controle do conversor *Boost*

Como mencionado na seção 3.2.1.3, sabe-se que o ganho do conversor CC/CC *Boost* é dada pela equação (3.17). Sendo V_o a tensão de saída e E a tensão de entrada do conversor.

O sinal de controle do conversor *Boost* deve ter o formato de uma onda quadrada periódica de período T , cujos patamares são os valores 0 (zero) e 1 (um). A portadora deve ser um sinal triangular e o sinal modulante é um sinal DC, como mostrado na figura 3.12.

Esta forma de geração de sinais é denominada modulação por largura de pulso (*pulse width modulation* – PWM, em inglês). O sinal quadrático é gerado pela comparação entre a amplitude da modulante e da portadora cada metade do período de chaveamento.

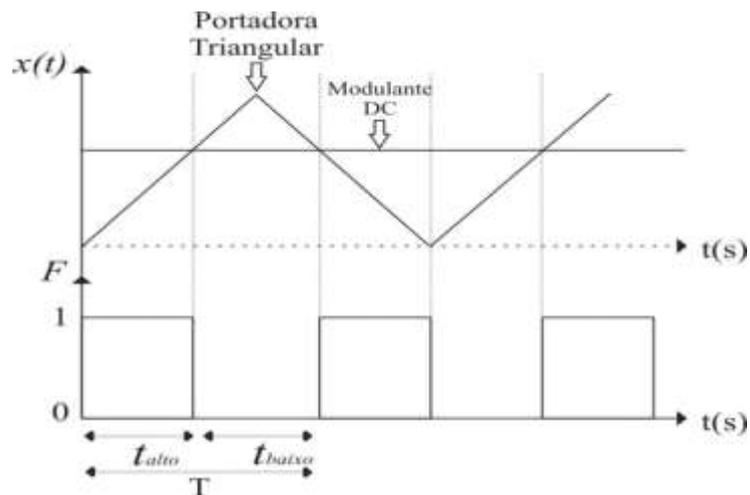


Figura 3.12 - Técnica de geração do PWM para o conversor *Boost*.

Fonte: VIEIRA L. M., 2015.

3.3.3.2 Modelagem do bloco de PWM do conversor *Boost* no Simulink®

Os blocos utilizados para esta modelagem no *Simulink*® encontram-se na biblioteca *common blocks*. Através do bloco *Relational Operator*, é possível comparar dois sinais na entrada e fornece em sua saída um sinal lógico de valor 0 (zero) ou 1 (um), de acordo com o resultado de sua comparação entre estes dois sinais.

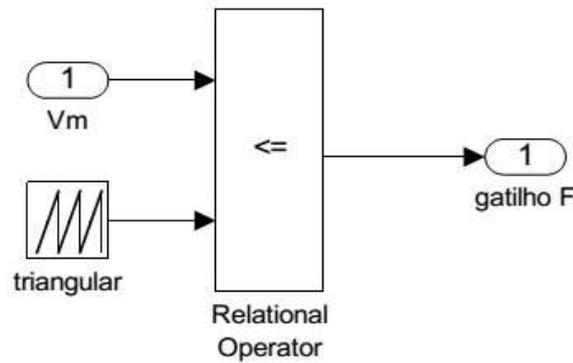


Figura 3.13 - Modelo para o gerador do sinal PWM do Boost.

Fonte: Da autora.

O modelo exibido na figura 3.13 foi colocado dentro de um bloco, também por questões de simplificação e de organização, como mostrado na figura 3.14.

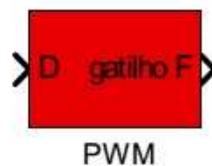


Figura 3.14 - Bloco gerador do PWM para o conversor Boost.

Fonte: Da autora.

Na entrada deste bloco pode-se colocar diretamente o valor desejado do valor da razão cíclica. Pode-se também colocar a frequência de chaveamento, neste caso igual à 10 kHz.

3.4 Conversor CC/CA ou Inversor *Ponte Completa* Monofásico

Os conversores CC/CA ou inversores são utilizados para obter um sinal CA cujas características são ajustadas (valor máximo e frequência) a partir de uma fonte CC constante.

Entre as diversas aplicações do inversor destaca-se a conexão de sistemas de geração/transmissão CC com sistemas CA e controle da velocidade de motores.

Os inversores são classificados quanto à fonte de energia, o número de fontes de energia, ou pelo número de fases. Com relação ao tipo de fonte utilizada, pode-se ter dois tipos de inversor: CSI (em inglês: Current Source Inverter) ou VSI (em inglês: Voltage

Source Inverter). Sendo o VSI o tipo mais comum e, inclusive, a topologia utilizada neste trabalho. Quanto ao número de fontes de energia, pode-se ter apenas uma (ou mais, porém combinadas em um único módulo) ou ainda com diversas delas. Neste último caso, pode-se combiná-las uma a uma para que se obtenha vários níveis de tensão de alimentação. Sendo estes conhecidos como inversores multiníveis. Com relação ao número de fases, tem-se tanto inversores monofásicos, trifásicos e polifásicos.

Os inversores monofásicos podem ser classificados como: *Meia Ponte (Half-Bridge - em inglês)* ou *Ponte Completa (Full-Bridge - em inglês)*. O circuito que representa o inversor *Ponte Completa* é mostrado na Figura 3.15.

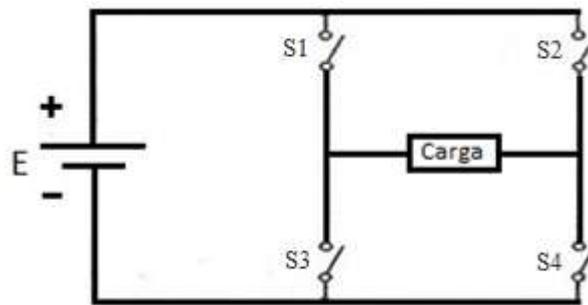


Figura 3.15 – Topologia clássica de um inversor ponte completa.

Fonte: Da autora.

A tensão de saída do inversor monofásico é dada pela série descrita pela equação (3.28) (Rashid M. H., 2011).

$$V_o = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A}{n\pi} \text{sen}(nwt), \quad n = 2k + 1, k \in N_+ \quad (3.28)$$

Onde A é a tensão V em Volts (para o inversor ponte completa) e w é a frequência angular da tensão de saída em rad/s.

Para o caso onde a carga é do tipo RL, assim como neste trabalho, a corrente de saída é dada pela equação (3.29) (Rashid M. H., 2011).

$$i_o = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A}{n\pi |Z_n|} \text{sen}(nwt - \varphi_n), \quad n = 2k + 1, k \in N_+ \quad (3.29)$$

Sendo:

$$|Z_n| = \sqrt{R^2 + nwL^2} \quad (3.30)$$

No caso do sistema fotovoltaico proposto neste trabalho, a tensão na carga V_o é conhecida, pois é necessária que a mesma seja igual à 220 V RMS para atender à carga residencial. Sendo assim, precisa-se que a tensão de pico no barramento CC obedeça à um valor mínimo estabelecido pela equação (3.31) (Konzen, 2014).

$$V_{DCmin} = (1 + f) \times V_{CA} \times \sqrt{2} \quad (3.31)$$

Onde V_{CA} é a tensão eficaz na saída do inversor e f é o fator de segurança que vai de 10 a 20% para evitar que esta tensão seja maior do que a tensão do lado CC. Desta forma, garante-se que o inversor não opere como um retificador CA/CC. Ao escolher um fator de segurança igual à 20%, tem-se que a tensão de pico no lado CC mínima deve ser de 373,35 V. É preferível que se adote no projeto, um valor maior que este calculado para minimizar correntes no barramento CC. Portanto, definiu-se que a tensão de pico no barramento CC deve ser igual à 400 V.

3.4.1 Desenvolvimento do inversor *Ponte Completa* Monofásico no Simulink[®]

Tendo em visto tudo o que foi mencionado na seção 3.4, foi possível desenvolver o modelo correspondente ao inversor *Ponte Completa* monofásica como ilustrado na figura 3.15.

As chaves, neste caso os transistores, do inversor devem ser comutadas aos pares S_1 e S_4 , e S_2 e S_3 . Quando o primeiro par está conduzindo a tensão de saída é positiva, já quando o segundo para conduz a tensão é negativa.

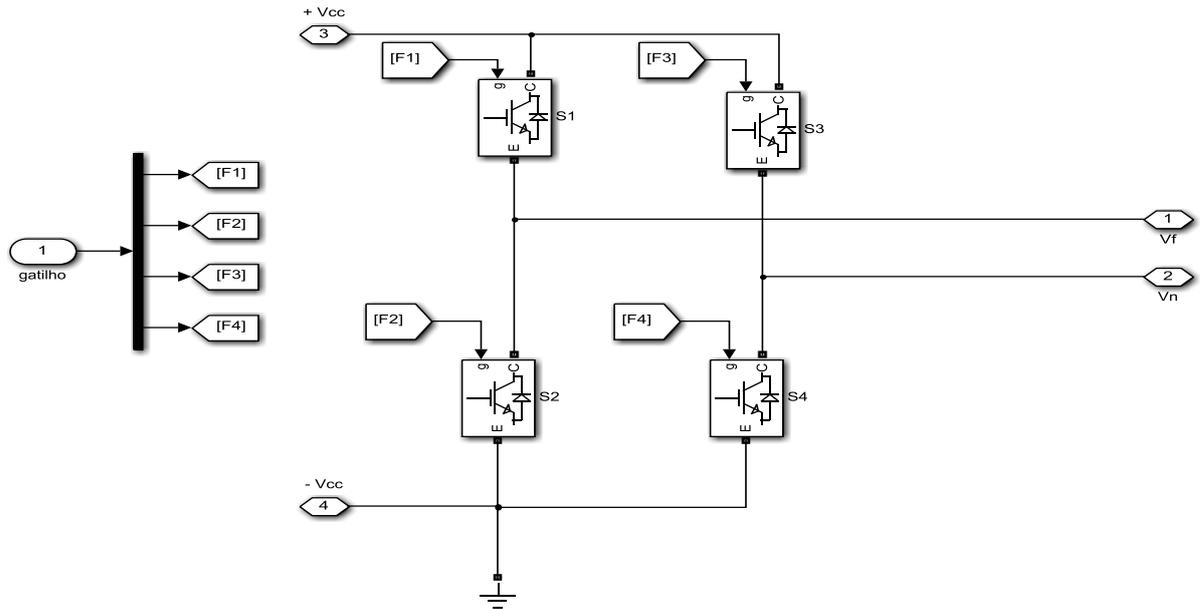


Figura 3.16 - Diagrama do modelo para o inversor Ponte Completa monofásico.

Fonte: Da autora.

De posse do modelo apresentado na figura 3.16, optou-se também por criar um bloco que o englobasse, como é ilustrado na figura 3.17. Observando o diagrama apresentado, nota-se a existência de 3 (três) entradas de sinais no modelo identificadas por $+V_{CC}$, gatilho e $-V_{CC}$. Além de duas saídas referentes a fase que alimentará a instalação residencial (carga).

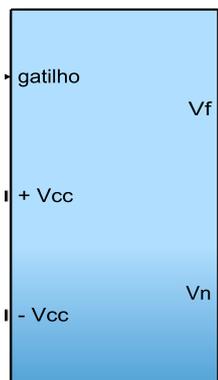


Figura 3.17 - Bloco do inversor monofásico ponte completa.

Fonte: Da autora.

3.4.2 Controle do inversor *Ponte Completa Monofásico*

Quanto ao chaveamento do inversor, optou-se por adaptar o controle do inversor monofásico para a ligação à rede proposto por Freitas D. N. S, (2013), onde o inversor de tensão é controlado em corrente através de dois controladores PI. Sendo um deles utilizado para manter o controle da tensão do barramento CC constante e outro para corrente a ser injetada na rede elétrica.

Quanto ao controle da tensão do barramento CC, faz-se a medida do valor de tensão V_{CC} atual neste barramento e compara-se com um valor de referência definido de acordo com o projeto V_{CC}^* . Efetua-se, então, a diferença entre estes dois valores de tensão e o resultado é a entrada do controlador (PI), como mostrado na figura 3.18.

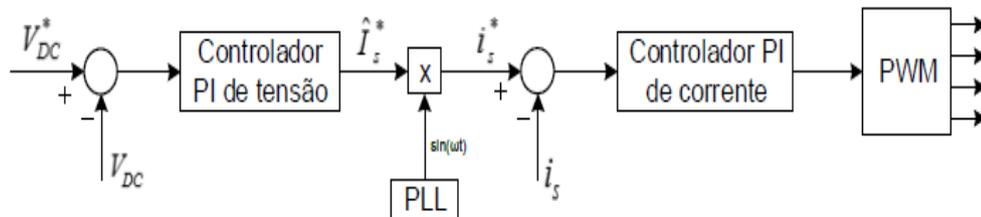


Figura 3.18 – Controle do inversor.

Fonte: Freitas D. N. S, 2013.

O sinal i_s^* que sai do controlador PI de tensão é multiplicado por uma onda senoidal pura em fase com a rede, obtida pelo PLL (do inglês – *Phase Locked Loop*), cuja amplitude é de 1 V.

Quanto ao controlador PI de corrente, o mesmo compara uma corrente de referência com o valor que a rede está fornecendo. O erro desta operação consiste na entrada i_s^* deste controlador. Por fim, a saída deste controlador gera o sinal que de fato atua na modulação da largura de pulsos (PWM), anteriormente explicada na subseção 3.3.3.2.

Para que o controle mostrado na figura 3.18 possa ser executado precisa-se, primeiramente, que o inversor seja representado pelo diagrama de blocos que o modela, como mostrado na figura 3.19, onde V_C é a tensão de controle oriunda do controlador PI, o bloco K_{PWM} representa o ganho do inversor, v_s é a tensão de saída e FT é a função de transferência do sistema visto do inversor à rede. Ressaltando que o ganho K_{PWM} é dado de acordo com a configuração do inversor utilizado (meia ponte ou ponte completa).

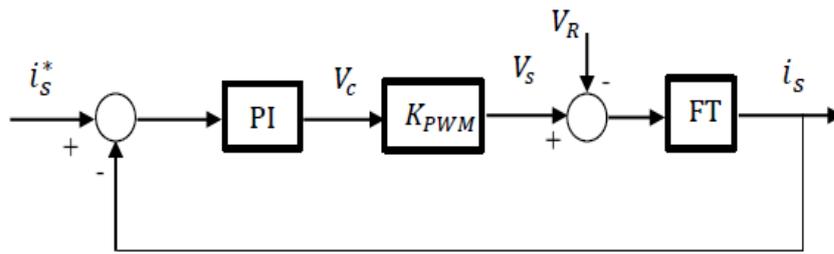


Figura 3.19 – Representação em blocos do Inversor Monofásico de Tensão.

Fonte: Freitas D. N. S, 2013

3.4.2.1 Modelo e Escolha dos Parâmetros do Controlador de Tensão CC no Simulink®

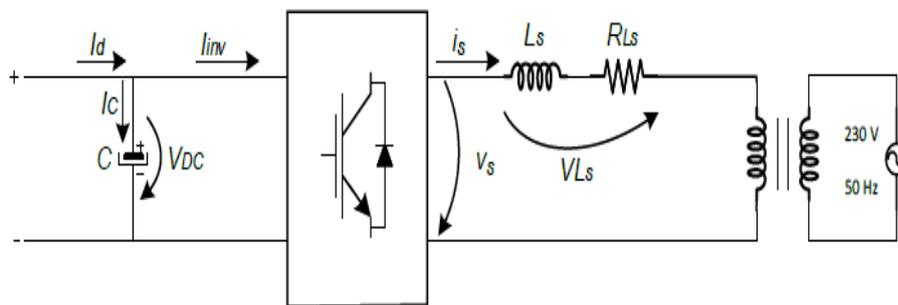


Figura 3.20 -Representação do inversor de tensão.

Fonte: Freitas D. N. S, 2013

Na figura 3.21 é ilustrado o diagrama de blocos referente ao controle de tensão do inversor representado na figura 3.20. Onde V_{DC} e V_{DC}^* , são, respectivamente, a tensão medida e a tensão de referência do barramento CC, $K_{PWM_{DC}}$ é o ganho do inversor para o controlador de tensão e a função de transferência FT é dada pela aplicação da transformada de Laplace para o capacitor que modela o barramento CC.

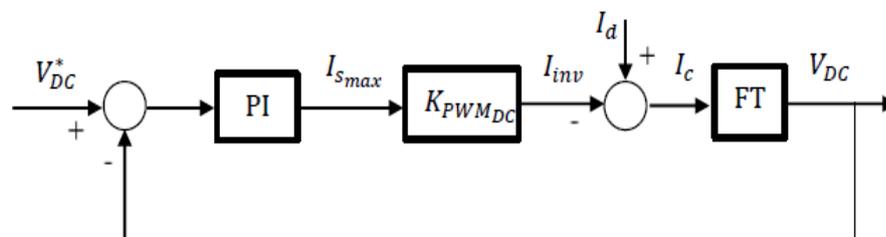


Figura 3.21 - Diagrama de bloco do controlador de tensão.

Fonte: Freitas D. N. S, 2013

Face ao exposto na seção 3.4.2, pode-se obter o modelo do controlador de tensão que compõe o controle do inversor monofásico ilustrado na figura 3.22.

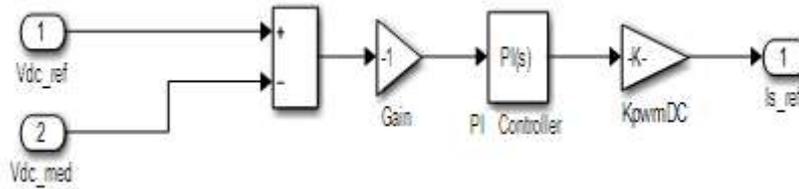


Figura 3.22 – Modelo do controlador de tensão.

Fonte: Da autora.

3.4.2.2 Modelo e Escolha dos Parâmetros do Controlador de Corrente no Simulink®

A função do controlador de corrente é monitorar ou injetar na rede uma quantidade maior ou menor de corrente de acordo com a configuração disponível.

Do ponto de vista do conversor *Boost*, o inversor se comporta como uma carga ativa ideal, ou seja, o mesmo drenará toda a corrente ofertada. Pelo princípio de conservação de potência, e desprezando-se as perdas intrínsecas, a potência na entrada deve ser igual a de saída do inversor. Desta maneira, é possível obter uma relação entre a amplitude da corrente na saída com o valor CC da corrente na entrada (Freitas D. N. S., 2009).

O diagrama de blocos referente ao controlador de corrente representado na figura 3.23.

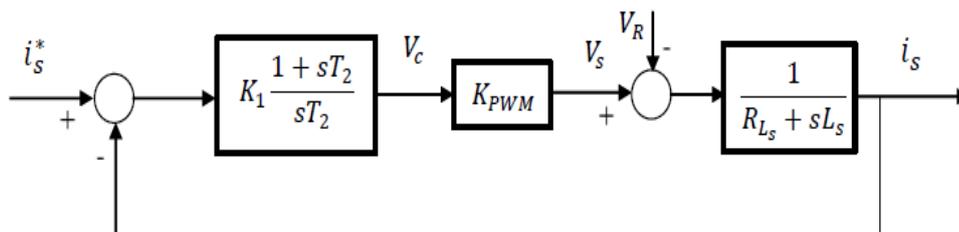


Figura 3.23 – Diagrama de blocos do controlador de corrente.

Fonte: Freitas D. N. S, 2013

De posse destas informações, pode-se obter também o modelo do controlador de corrente no Simulink® que compõe o controle do inversor monofásico ilustrado na figura 3.24.

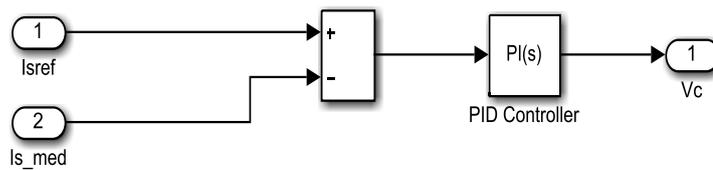


Figura 3.24 - Modelo do controlador de corrente.

Fonte: Da autora.

3.4.2.3 Modelo Completo da Malha de Controle de Corrente do Inversor Monofásico no Simulink®

Ao juntar os modelos em blocos do controlador de tensão, do PLL e do controlador e corrente, obtém-se o modelo completo para a malha de controle de corrente do inversor monofásico no Simulink® apresentado na figura 3.25.

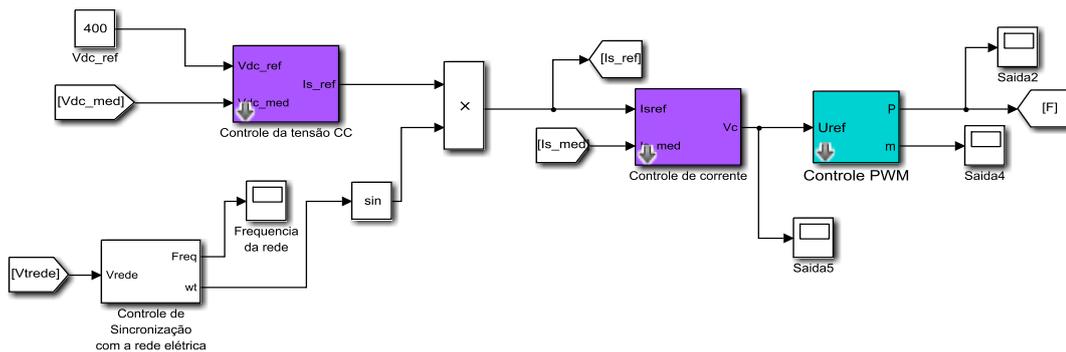


Figura 3.25 - Modelo completo do controle de corrente do inversor monofásico.

Fonte: Da autora.

Os valores finais utilizados para os ganhos para o controlador Proporcional K_p e Integral K_i do controlador de tensão e corrente são apresentados na tabela 2.

Tabela 3 – Ganhos dos controladores de tensão e corrente.

| Ganhos | K_p | K_i |
|-------------------------|-------|-------|
| Controlador de Tensão | 0,5 | 50 |
| Controlador de corrente | 0,5 | 2500 |

Fonte: Da autora.

3.5 Filtro R-L-C Para Conexão com a Rede

Caso o inversor e a rede fossem conectados diretamente, provavelmente a corrente compartilhada por estes componentes apresentaria um ruído indesejável. Desta forma, destaca-se o emprego dos filtros que retiram o ruído mencionado referentes as frequências superiores à fundamental (no Brasil, 60 Hz).

Existem algumas topologias de filtros que podem ser empregas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, tais como: o filtro L, L-C, R-L-C e L-C-L (Freitas D. N. S., 2013). Todas elas apresentam vantagens e desvantagens que se adequam melhor a cada tipo de aplicação.

Neste trabalho de conclusão de curso, optou-se pelo filtro R-L-C apresentado na figura 3.26 que consiste, basicamente, em um ramo em série ao inversor e outro em paralelo formado por um capacitor.

A utilização de um capacitor em paralelo permite que o valor da indutância seja menor, o que torna o filtro mais barato, reduzindo também as perdas (FREITAS D. N. S., 2013).

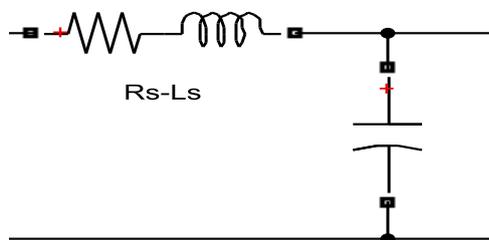


Figura 3.26 – Filtro RLC escolhido para o sistema proposto.

Fonte: Da autora.

Os valores dos elementos mencionados deste filtro R-L-C e da resistência são, respectivamente:

- Resistência: 0.18 Ω ,
- Indutância: 10 mH,
- Capacitância: 10 μ F.

3.6 Rede Elétrica

O modelo para a rede elétrica escolhido pode ser visualizado na figura 3.27. Nota-se que a rede é representada por um barramento (na cor preta), onde está conectada uma carga e uma fonte CA que representa o nível de alta tensão de 13,8 kV e 60Hz de rede monofásica de distribuição. Como a carga consiste em uma residência, onde a tensão eficaz de conexão requerida é de 220V, para a adequada representação do modelo *carga-rede*, faz-se necessário a utilização de um transformador monofásico abaixador 13,8kV-230V de 25 kVA.

O isolamento galvânico, realizado pelo uso do transformador, é exigido pelas normas¹ do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) quanto a conexão do inversor fotovoltaico ligado à rede.

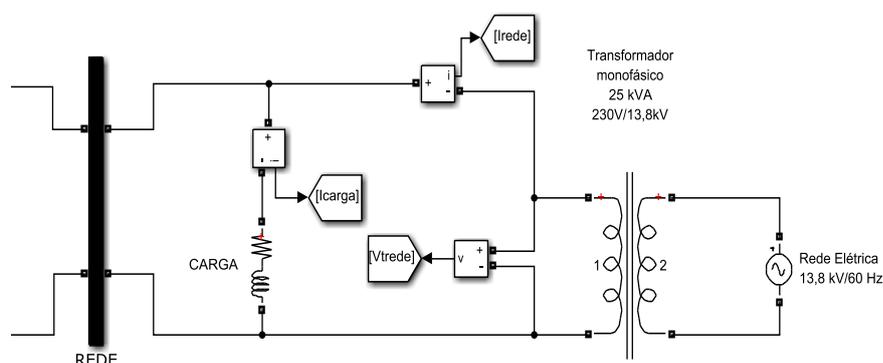


Figura 3.27 - Modelo da rede elétrica junto com o transformador.

Fonte: Da autora.

3.7 Carga

O sistema fotovoltaico conectado à rede proposto neste trabalho foi projetado para atender as seguintes especificações da carga:

- Potência: 4 kVA;
- Tensão Eficaz: 220 V;

¹IEEE 929/2000 – Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems, IEEE 1547 – Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, o IEC 61727 – Characteristics of the Utility Interface das concessionárias [Konzen, 2014].

Através de pesquisas, observou-se que a potência de 4 kVA pode ser considerada uma boa estimativa quanto ao consumo de energia elétrica residencial, pois, com base na produtividade dos sistemas fotovoltaicos, em consonância com os consumos dos potenciais consumidores, e da potência média dos sistemas fotovoltaicos instalados até o primeiro semestre de 2014 no país, tem-se o seguinte mercado nicho e sua respectiva potência típica de instalação (Konzen, 2014):

- Residências que consomem entre 400 e 1000 kWh/mês: Sistemas de 3 kWp¹ (área de aproximadamente 20m²);
- Residências que consomem mais de 1000 kWh/mês: Sistemas de 6 kWp (área de aproximadamente 40m²);
- Comercial Baixa Tensão: Potência 5 kWp, 10 kWp e 35 kWp.

Quanto ao modelo desenvolvido para a carga no Simulink[®], optou-se por representá-la genericamente por uma resistência em série com uma indutância conforme ilustrado pela figura 3.28.

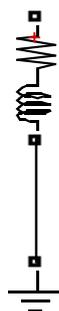


Figura 3.28 – Carga residencial modelada por uma resistência em série com indutância.

Fonte: Da autora.

Os parâmetros de interesse para a carga, tais como, tensão nominal eficaz, frequência nominal, potência ativa e reativa indutiva e fator de potência são diretamente apresentadas na tabela 4.

¹ Watt-pico (Wp) é uma medida de potência energética, normalmente associada com células fotovoltaicas. O valor de Wp de um determinado sistema fotovoltaico que funcione em corrente contínua é a potência medida, quando este sistema é irradiado por uma luz que simula a luz solar com a potência de 1000 W/m², à temperatura de 25 °C [Konzen, 2014].

Tabela 4 – Parâmetros da carga.

| Parâmetros da carga | |
|--|-------------------|
| Tensão nominal RMS (V_{RMS}) | 220 V (Volts) |
| Frequência nominal (f_n) | 60 Hz (Hertz) |
| Potência ativa (W) | 5000 x 0,92 Watts |
| Potência reativa indutiva (VAr) | 5000 Var |
| Fator de Potência ($\cos\phi$) | 0.92 (indutivo) |

Fonte: Da autora.

3.8 Sistema completo

De posse da modelagem e verificação via vários cenários diferentes de simulação de todos os componentes do sistema e partes deles juntos, como será apresentado no capítulo 4, pode-se enfim conectar cada parte abordada até então neste capítulo. Desta maneira, obteve-se a plataforma de simulação completa do sistema fotovoltaico conectado à rede, conforme apresentado na figura 3.29. Pode-se notar, da esquerda para direita, o painel fotovoltaico, o conversor *Boost*, o inversor ponte completa, a carga e a rede.

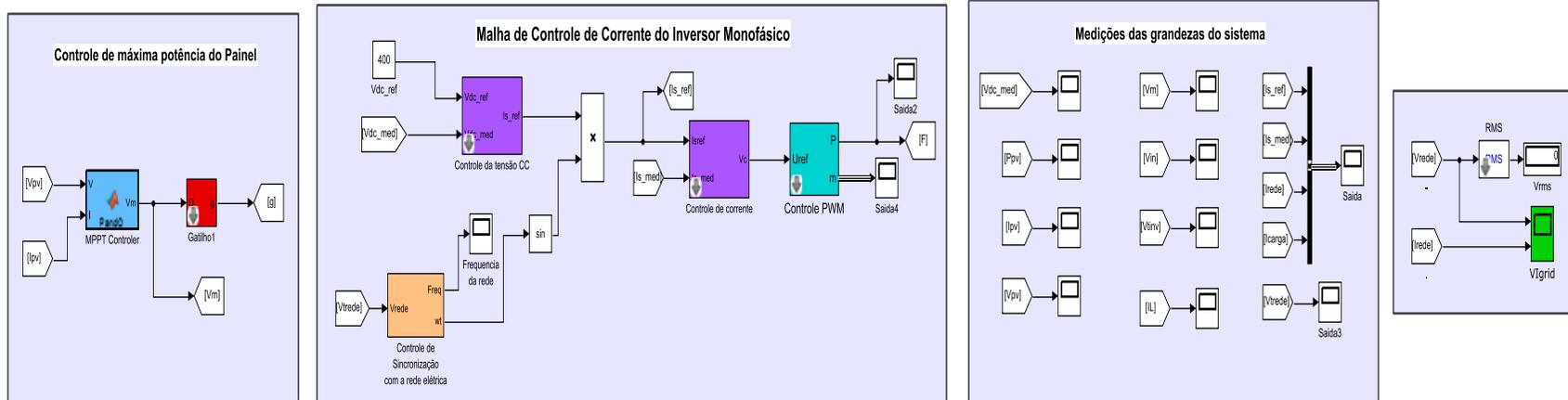
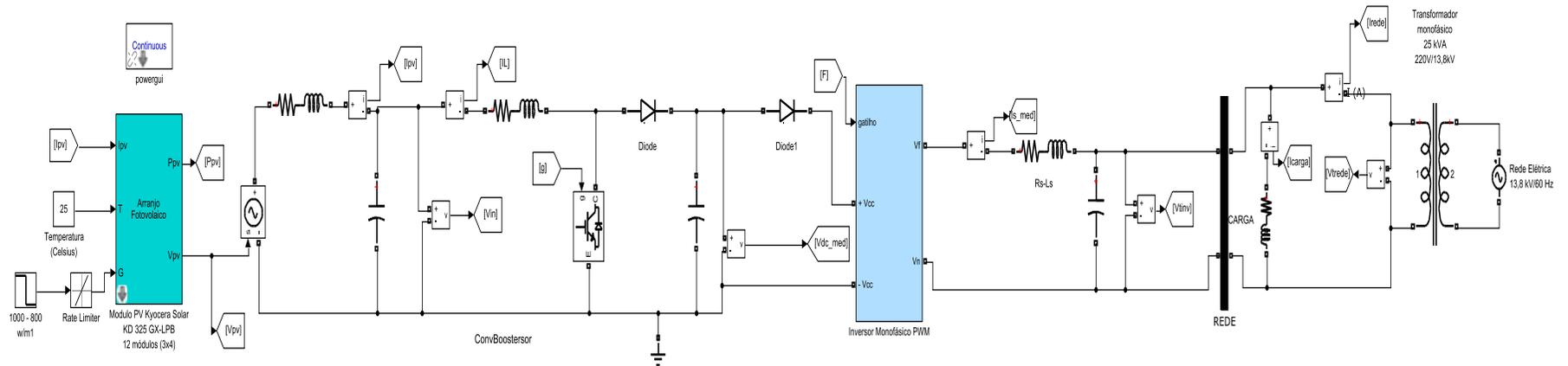


Figura 3.29 - Modelo do sistema fotovoltaico proposto.

Fonte: Da autora.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, através de simulações, os resultados mais relevantes deste Trabalho de Conclusão de Curso. Para tal, serão descritos vários cenários de simulação que validam os modelos e, conseqüentemente, o sistema fotovoltaico conectado à rede proposto. Serão apresentadas inicialmente as curvas características de corrente versus tensão ($I \times V$) e potência versus tensão ($P \times V$) obtidas utilizando o modelo de painel fotovoltaico utilizado, além dos principais sinais do conversor *CC/CC Boost*, e o controle do inversor *Ponte Completa*. E ainda, apresentar-se-á alguns cenários de simulação para o sistema fotovoltaico desenvolvido juntamente com as devidas discussões referentes aos resultados obtidos.

4.1 Curvas características do painel fotovoltaico

Conforme mencionado no capítulo 3, na seção 3.1.2, os parâmetros de configuração usados para o conjunto de painéis solares foram os mesmos do painel do tipo *Kyocera Solar KD 325 GX-LPB* presente na *toolbox SimPowerSystems* do software MATLAB^{®R2016a}. Ressaltando que para que a corrente e tensão de projeto na carga fossem obtidas, foi preciso dispor de um conjunto de painéis organizados em três ramos em paralelo, sendo estes compostos por quatro painéis em série cada um, totalizando 12 painéis. Esta prática é muito comum em sistemas fotovoltaicos reais, dependendo dos níveis de tensão e corrente requeridos para determinadas aplicações, conforme foi mencionado no capítulo 2.

Através de simulação obteve-se as curvas referentes à diferentes níveis de irradiação solar sobre um destes painéis do modelo *Kyocera KD 325 GX-LPB*. O resultado obtido é apresentado nas figuras 4.1 e 4.2 onde são mostradas as curvas de corrente versus tensão para um painel e de potência versus tensão, respectivamente.

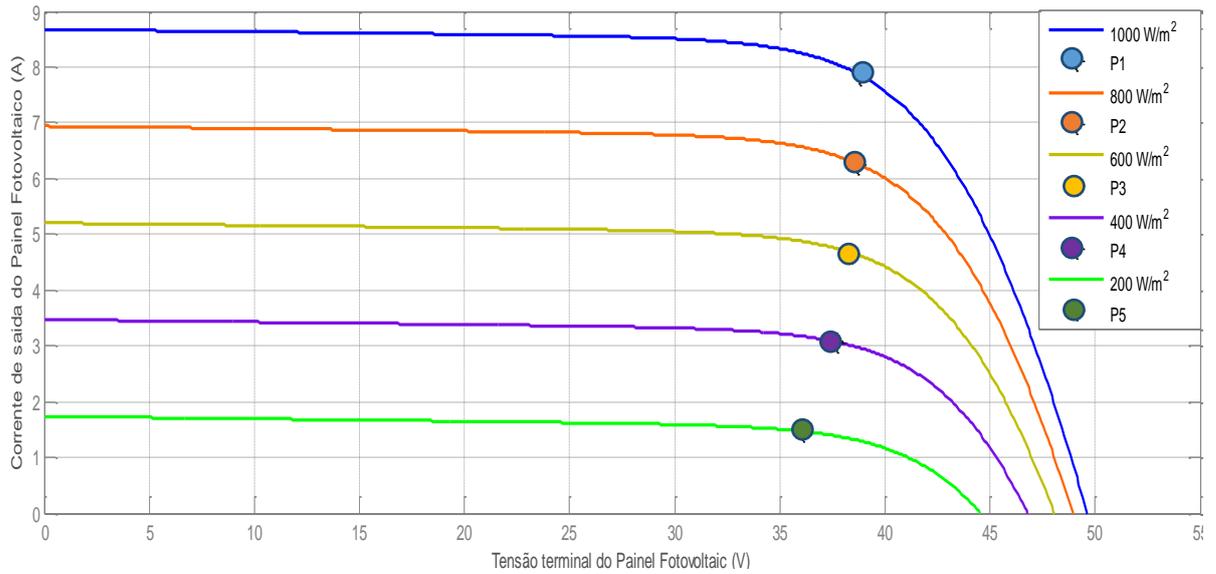


Figura 4.1 - Curva característica da corrente versus tensão para diferentes níveis de irradiação.

Fonte: Da autora.

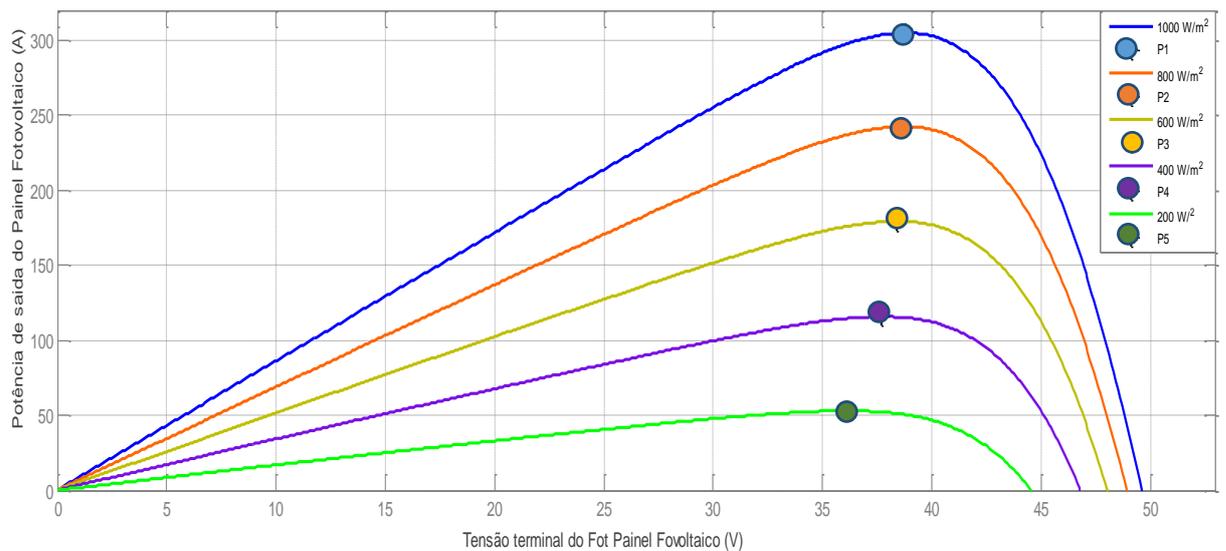


Figura 4.2 - Curva característica da potência versus tensão para diferentes níveis de irradiação.

Fonte: Da autora.

Através das figuras 4.1 e 4.2 observa-se o quanto a incidência dos raios solares sobre o painel altera a forma como este se comporta como um todo. Percebe-se que a tensão terminal do painel permanece dentro de uma faixa de valores (de 44,45 a 49,63 V), já a corrente que sai do painel fotovoltaico apresenta variações significativas de acordo com a faixa de irradiação aplicada sobre o mesmo, conforme pode ser notado pela figura 4.1. Sendo a potência o produto entre a tensão e corrente do painel, uma vez que a corrente é afetada pela mudança de irradiação, a potência resultante também será, conforme observado na figura 4.2.

Em se tratando de sistemas fotovoltaicos, sejam os mesmos conectados à rede ou não, pode-se afirmar que a potência (e, portanto, a tensão e corrente) entregue pelo gerador fotovoltaico é um dos parâmetros chave para que os demais componentes do sistema sejam dimensionados e para que a viabilidade (tanto econômica quanto prática) do sistema seja realizada.

Na tabela 5 são apresentados os valores de tensão, corrente e potência nos pontos de máximo, obtidos diretamente das figuras 4.1 e 4.2. Ressaltando que a mesma análise, que foi feita para apenas um painel fotovoltaico, pode ser estendida para um arranjo de painéis.

Tabela 5 - Valores de tensão, corrente e potência nos pontos de máximo das curvas características obtidas para o painel fotovoltaico.

| Irradiação (G) | Tensão ($V_{P_{max}}$) | Corrente ($I_{P_{max}}$) | Potencia (P_{max}) |
|-----------------------|--|--|--|
| 1000 | 38,79 V | 7,86 A | 304,9 W |
| 800 | 38,69 V | 6,27 A | 242,59 W |
| 600 | 37,39 V | 4,67 A | 176,01 W |
| 400 | 37,39 V | 3,70 A | 138,34 W |
| 200 | 36,10 V | 1,47 A | 53,07 W |

Fonte: Da autora.

4.2 Funcionamento do Sistema com Diferentes Variações Simultâneas no Nível de Irradiação

Como já discutido ao longo deste trabalho, sabe-se que a potência entregue pelo arranjo de painéis está relacionada com a irradiação solar. Considerando isto, é de grande relevância verificar as formas de ondas referentes as grandezas de potência, tensão e corrente, bem como a relação entre as mesmas em alguns pontos do sistema.

Assim sendo, foi realizada a simulação do sistema fotovoltaico conectado à rede, proposto neste trabalho, onde a irradiação foi variada para diferentes níveis durante a mesma simulação.

No sistema completo apresentado na figura 3.30, a irradiação solar foi representada por um sinal degrau de valor inicial e final de 1000 e 800 W/m^2 , respectivamente. Com a finalidade de verificar o comportamento do sistema e do controle implementado para o inversor CC/CA ponte completa. Porém para análise dos resultados deste cenário de

simulação, optou-se por impor uma soma de degraus representando quedas e aumentos diferentes do nível de irradiação solar (ao invés de um valor fixo ou apenas dois patamares). Fazendo com que o sistema seja confrontado para diversas situações possíveis, assim como acontecem nos sistemas reais.

4.2.1 Comportamento da Potência, Tensão e Correntes nos Terminais do Arranjo Fotovoltaico

O sistema completo representado no capítulo 3 é apresentado novamente na figura 4.3, onde todos os componentes após o arranjo fotovoltaico (conversor CC/CC *Boost*, inversor CC/CA ponte completa, carga e rede elétrica), foram colocados em uma “caixa preta” apenas por questão de simplificação. Na figura 4.3 pode-se observar também, a soma de sinais do tipo degrau anteriormente mencionada.

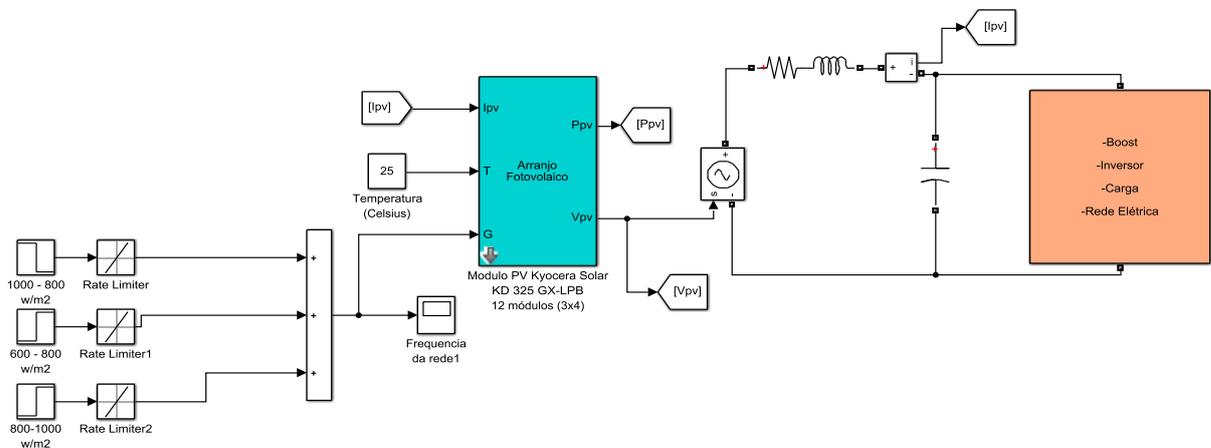


Figura 4.3 – Sistema fotovoltaico à rede proposto com irradiação variável.

Fonte: Da autora.

Na figura 4.4 observa-se a forma de onda que representa a potência entregue ao sistema pelo arranjo fotovoltaico em função das variações de irradiação definidas em quatro intervalos distintos:

- Primeiro intervalo: de 0 a 0.5 segundos e nível de irradiação imposto igual à 1000 W/m^2 ,
- Segundo intervalo: de 0.5 a 1 segundo e nível de irradiação imposto de 600 W/m^2 ,

- Terceiro intervalo: de 1 a 1.5 segundo e nível de irradiação imposto de 800 W/m²,
- Quarto intervalo: de 1.5 a 2 segundos e nível de irradiação imposto de 1000 W/m² novamente.

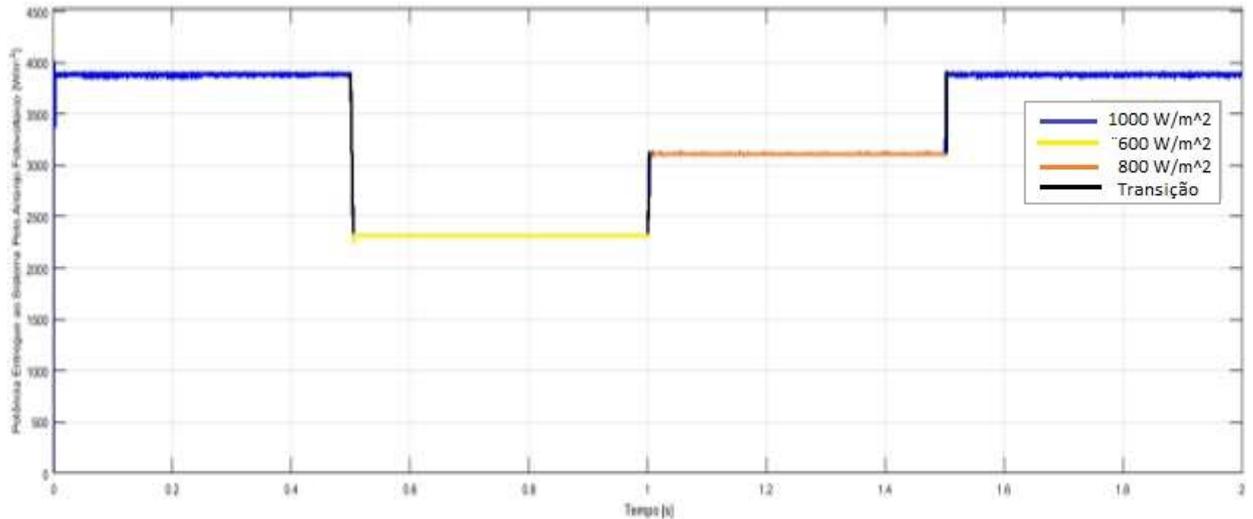


Figura 4.4 – Potência entregue ao sistema pelo arranjo fotovoltaico.

Fonte: Da autora.

Da mesma forma, nas figuras 4.5 e 4.6 são apresentadas a tensão e corrente, respectivamente, nos terminais do arranjo fotovoltaico segundo as mesmas variações de irradiação anteriormente citadas.

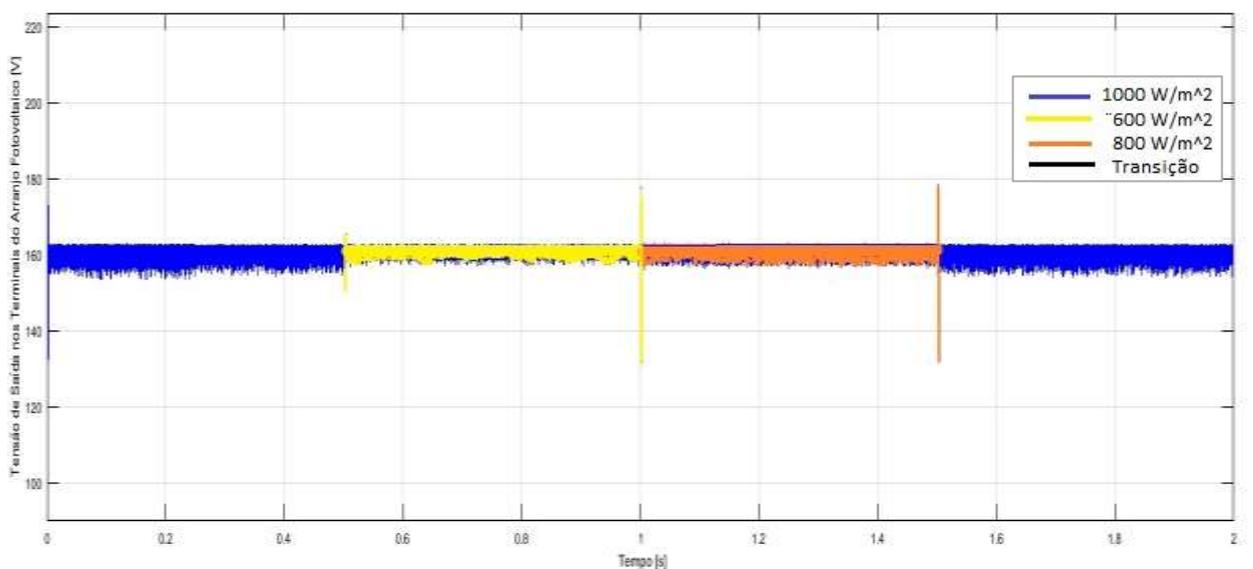


Figura 4.5 – Tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico para as irradiações apresentadas.

Fonte: Da autora.

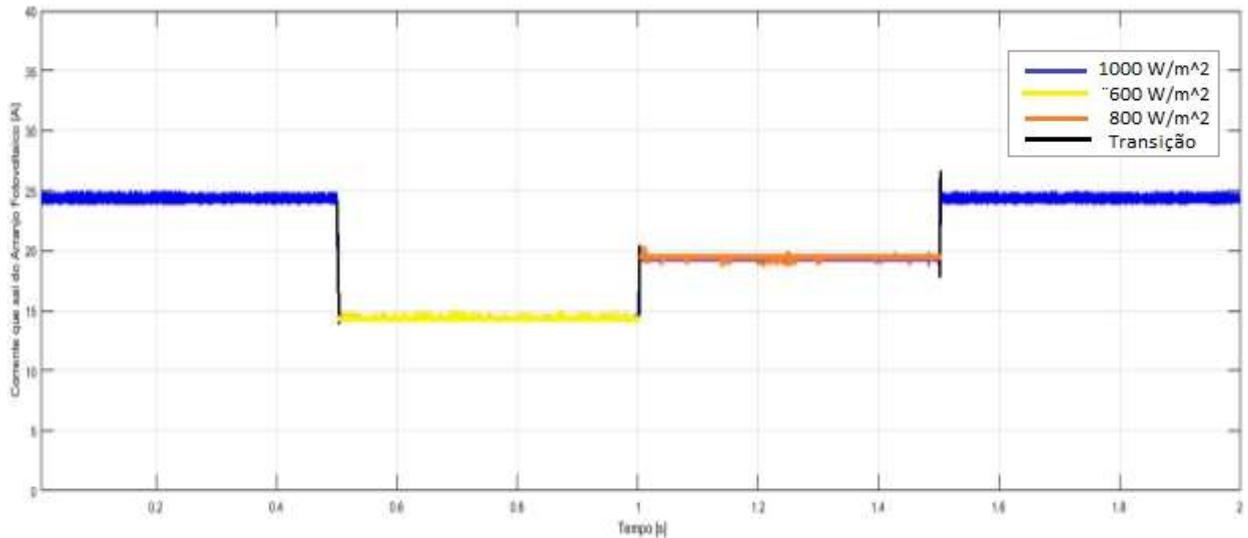


Figura 4.6 – Corrente que sai do arranjo fotovoltaico para as irradiações apresentadas.

Fonte: Da autora.

Observando as figuras 4.5 e 4.6, pode-se constatar o que foi afirmado na seção 4.1 quanto à variação de tensão e corrente quando a irradiação é alterada. De fato, nota-se que as variações de corrente são bem mais significativas que as da tensão. A pouca variação de tensão é decorrente das características dos painéis como mostrado anteriormente na através da curva IxV na figura 4.1.

4.2.2 Comportamento da Tensão de Saída do Barramento CC ou do Conversor CC/CC *Boost*

Sob as mesmas condições de simulação da seção anterior, tem-se que a forma de onda de tensão nos terminais de entrada do conversor *Boost* é exatamente a mesma apresentada na figura 4.6. A corrente de entrada deste conversor é também a mesma que sai do arranjo fotovoltaico apresentada na figura 4.7. O projeto e dimensionamento deste conversor foi tal que possibilitou com que este componente do sistema elevasse a tensão do arranjo fotovoltaico, sob a irradiação percebida, para cerca de 400 V.

Como o capacitor da topologia do *Boost* é visto pelo inversor como o barramento CC do sistema, elevou-se o valor inicialmente dimensionado de 1000 μF para 3000 μF . Este aumento de 3 vezes em seu valor original é justificado pelo fato de que se almeja que a tensão neste capacitor não tenha grandes ondulações. O resultado obtido é apresentado na figura 4.7, onde são marcados todos os intervalos nos quais a irradiação muda.

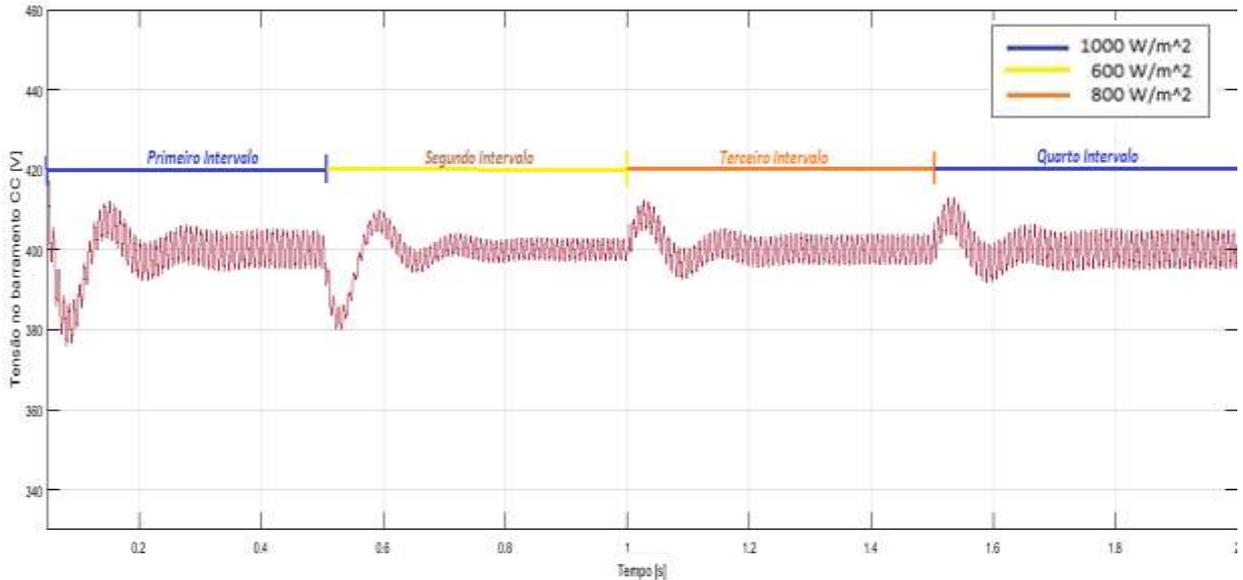


Figura 4.7 – Tensão no barramento CC.

Fonte: Da autora.

Através da curva mostrada na figura 4.7, é perceptível a atuação do controle sobre a tensão do barramento CC que o inversor ponte completa executa. Mesmo com variações bruscas de irradiação nota-se que o controle enfrenta uma pequena transição no início de cada intervalo, mas adapta-se rapidamente e estabiliza-se no valor de referência de 400 V exigido, independente das mudanças de incidência dos raios solares sobre os painéis que compõe o conjunto fotovoltaico.

4.2.3 Comportamento da Tensão e Corrente nos Terminais de Saída do Inversor CC/CA Ponte Completa Monofásico

Duas das formas de onda a se observar no inversor CC/CA ponte completa monofásico é a corrente e tensão em seus terminais de saída.

Na figura 4.8 é apresentada a forma de onda senoidal que representa a tensão nos terminais do inversor. É possível observar que a tensão durante toda simulação se mantém estável e sem variações. Nota-se ainda, que assim como foi projetado, a tensão de pico é 311 V e a tensão eficaz é 220 V.

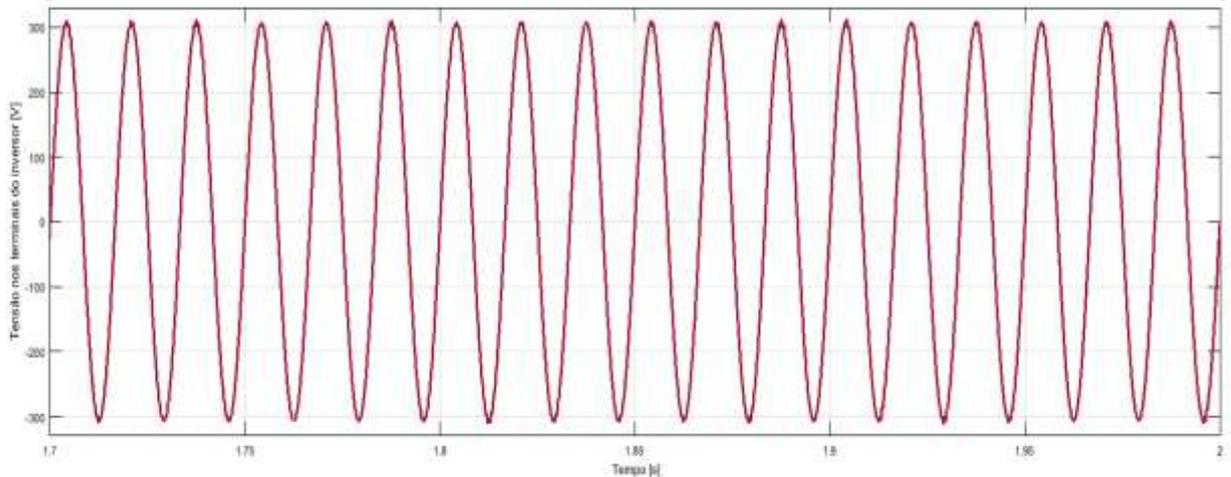


Figura 4.8 – Tensão nos terminais de saída do inversor CC/CA.

Fonte: Da autora.

Na corrente do inversor, apresentada na figura 4.9, é notória a mudança que a mesma sofre em cada intervalo onde a irradiação é variada.

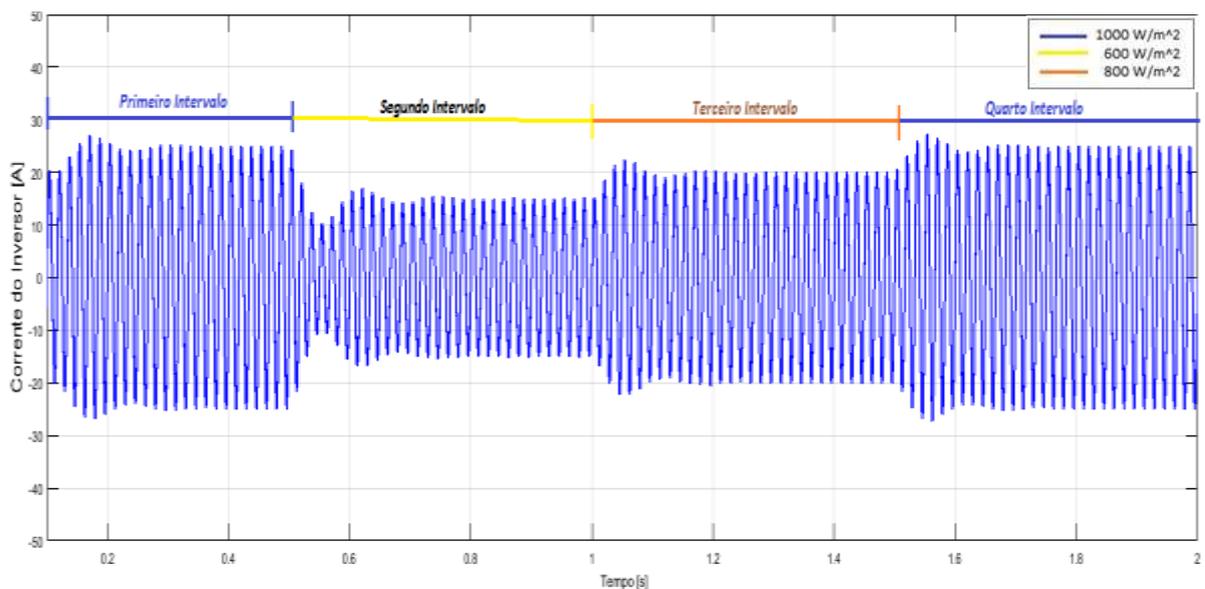


Figura 4.9 – Corrente de saída do inversor.

Fonte: Da autora.

Os valores eficazes (ou RMS) em Ampères da corrente do inversor observados em cada intervalo são mostradas na tabela 7.

Tabela 6 – Valores de corrente de pico para cada intervalo de nível de irradiação apresentados na figura 4.9.

| Níveis de Irradiação (W/m ²) | 1000 | 600 | 800 | 1000 |
|---|-------|-------|-----|-------|
| Corrente (A) | 17,32 | 10,36 | 14 | 17,32 |

Fonte: Da autora.

4.2.4 Comportamento da Tensão e Corrente da Carga e da Rede Elétrica

A tensão nos terminais da carga e da rede elétrica são exatamente a mesma que foi apresentada pela figura 4.8. Este resultado é esperado pois os terminais de saída do inversor está em paralelo com a carga e a rede. Quanto ao comportamento da carga e da rede, pode-se destacar ainda suas correntes observadas nas figuras 4.10 e 4.11, respectivamente.

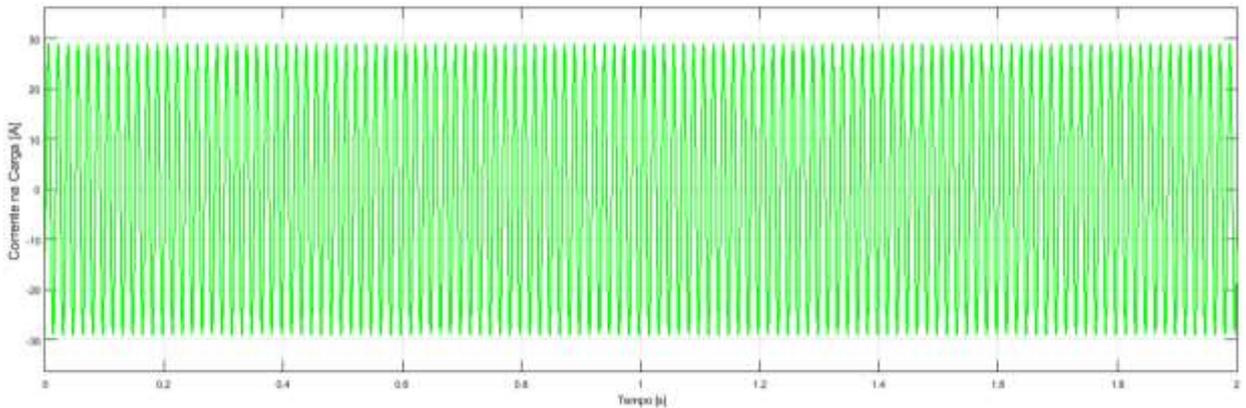


Figura 4.10 – Corrente da carga.

Fonte: Da autora.

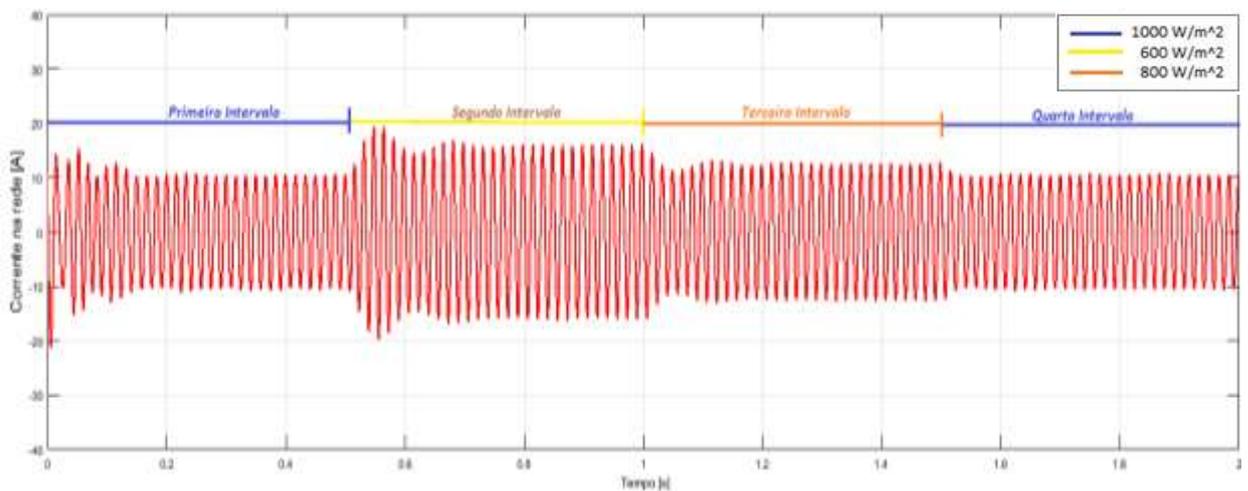


Figura 4.11 – Corrente da rede.

Fonte: Da autora.

Nota-se que a corrente na carga não é afetada pela variação de irradiação e tem valor de eficaz igual à aproximadamente 20,5 A. Tal característica ressalta novamente a atuação do controle do inversor, uma vez que não se deseja que a carga perceba mudanças significativas na corrente e tensão entregues à mesma.

Já a corrente da rede sofre variações, e estes valores (em cada intervalo) são mostrados na tabela 7.

Tabela 7 - Valores de corrente eficaz da rede para cada intervalo de nível de irradiação apresentados na figura 4.13.

| Intervalos de Irradiação (W/m ²) | 1000 | 600 | 800 | 1000 |
|--|------|-------|------|------|
| Corrente da Rede (A) | 7,5 | 11,34 | 8,93 | 7,45 |

Fonte: Da autora.

Na figura 4.12 foi tomado apenas o valor fixo de irradiação de 1000 W/m² (primeiro e quarto intervalos da simulação proposta) para que as formas de onda destas correntes sejam melhor observadas.

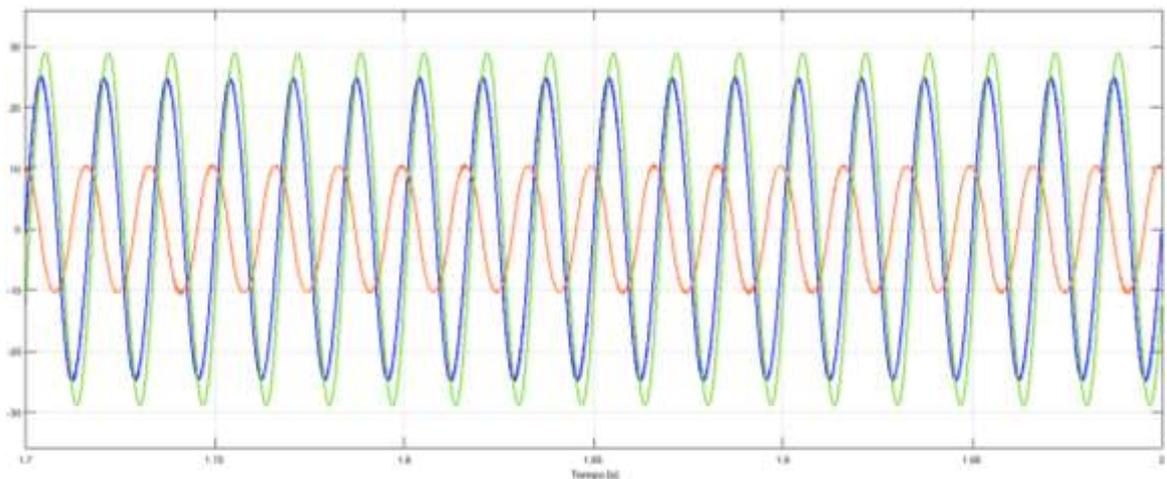


Figura 4.12 – Vista detalhada das correntes da carga, da rede e do inversor.

Fonte: Da autora.

Ao analisar a corrente da carga (na cor verde), da rede (em vermelho) e do inversor (em azul) juntas, pode-se afirmar que a corrente na carga não sofre alterações (como já antes mencionado). Enquanto que as correntes da rede e do inversor se compensam a cada intervalo de variação da irradiação, mantendo desta forma, o equilíbrio do sistema. Além de garantir que a soma de ambas resulte na corrente de carga, como é esperado em sistemas de geração de energia elétrica distribuídos.

Na figura 4.13 são apresentadas as formas de onda da corrente do inversor e da rede juntas nos intervalos onde os níveis de irradiação são de 600 e 800 W/m², respectivamente. Nota-se que a corrente do inversor é maior de acordo com a irradiação, e corrente da rede

menor. Portanto, observa-se ainda, que com o aumento da irradiação o gerador fotovoltaico passa a contribuir com mais corrente.

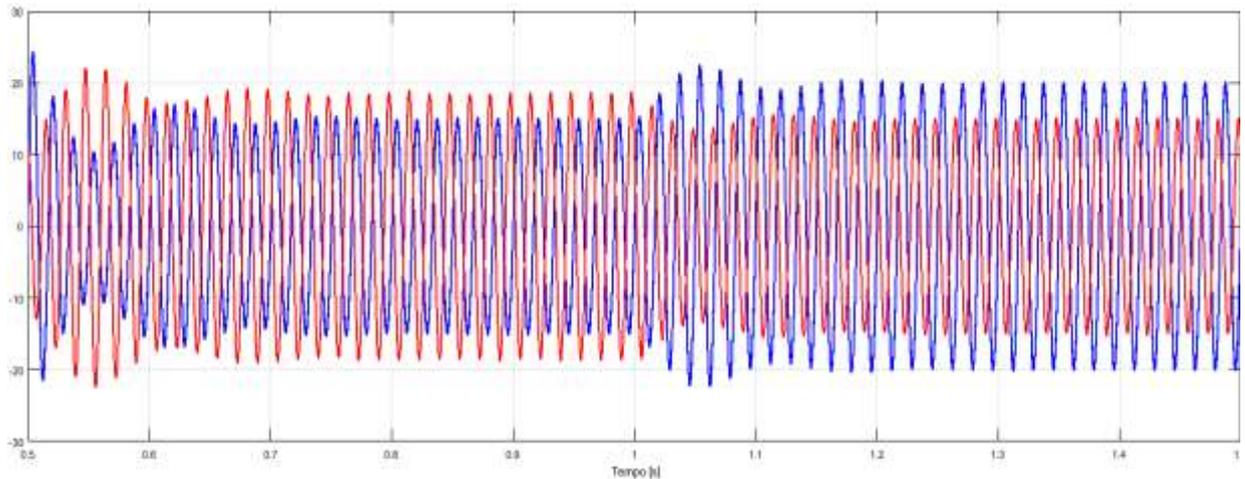


Figura 4.13 – Correntes do inversor (em azul) e da rede (em vermelho) para irradiações de 600 e 800 W/m^2 , respectivamente.

Fonte: Da autora.

4.2.5 Análise da Defasagem ou Fator de Potência entre a Tensão da Rede e Corrente do Inversor, da Carga e da Rede

Outro relevante fato a notar para que seja comprovado o funcionamento adequado do inversor controlado em corrente (usados em sistemas fotovoltaicos), consiste na capacidade do mesmo de regular a defasagem entre a corrente alternada que sai dos seus terminais em relação à tensão da rede (Abella, 2005).

O cenário ideal, da grande maioria de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, é que a corrente do inversor e tensão da rede estejam em fase. Garantindo assim, um fator de potência seja mais próximo do valor unitário. Em muitos sistemas fotovoltaicos reais, o valor ideal do fator de potência não é alcançado devido a distorção harmônica da corrente de saída do inversor.

Em regra, por normas¹, os fatores de potência dos sistemas fotovoltaicos devem ser maiores que 0.85, indutivo ou capacitivo, para os casos onde a potência gerada é superior a 10% da capacidade nominal do sistema fotovoltaico conectado à rede. Há casos onde o sistema opera com fator de potência não unitário como, por exemplo, quando a potência

¹ Normas estabelecidas pela IEC (Comissão Internacional de Eletrotécnica) e/ou concessionárias de cada estado.

gerada é menor que 10% da capacidade nominal. Somente se o sistema possuir um mecanismo próprio de compensação de reativos é que seria permitido que o fator de potência não esteja nas faixas citadas. Sendo de responsabilidade da concessionária de energia aprovar o funcionamento do sistema sob estas condições (Konzen, 2014).

Na figura 4.14 é mostrada a tensão da rede e corrente de saída do inversor no mesmo gráfico com dois níveis de irradiação diferentes, 1000 e 600 W/m².

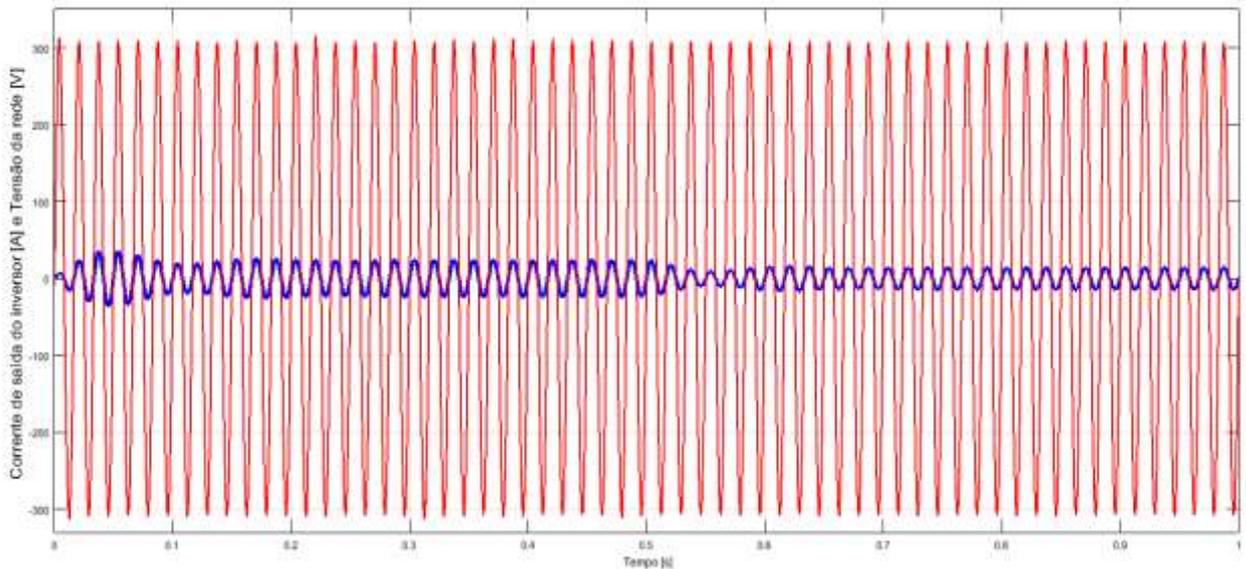


Figura 4.14 – Tensão da rede e corrente do inversor.

Fonte: Da autora.

Na figura 4.15 é apresentada a mesma forma de onda exibida na figura 4.14, porém com apenas um nível de irradiação para que a curva possa ser observada em maiores detalhes. É perceptível que ambas as grandezas estão em fase tanto para qualquer que seja o nível de irradiação dentro da faixa de 200 a 1000 W/m².

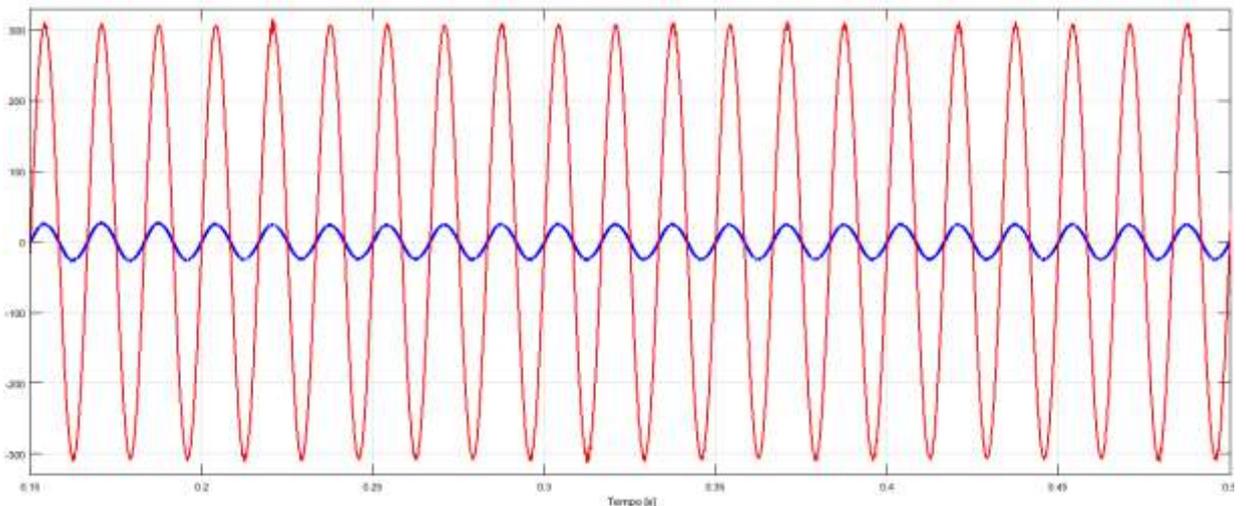


Figura 4.15 – Tensão da rede e Corrente do inversor em maiores detalhes.

Fonte: Da autora.

De forma análoga, pode-se observar a corrente da carga e tensão da rede apresentadas na figura 4.16. Com relação à estas grandezas, nota-se uma defasagem entre estas explicada pelo fato da carga ser modelada como uma resistência em série com uma indutância. Diferentemente do que é notado na figura 4.14, a tensão na rede e corrente nos terminais da carga devem responder da mesma forma (sem variações) para qualquer que seja o nível de irradiação permitido.

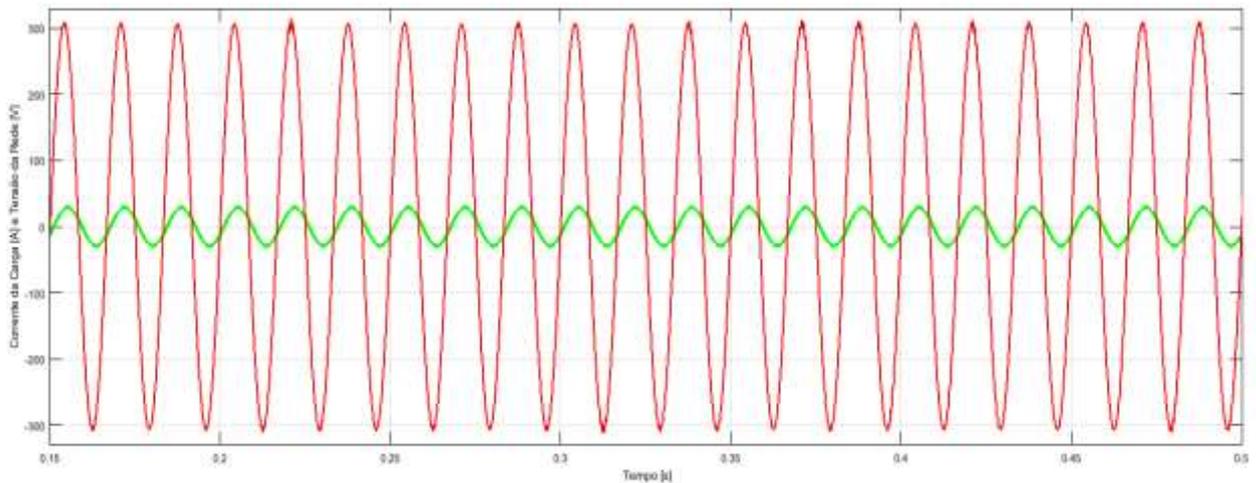


Figura 4.16 – Tensão da rede e Corrente da carga.

Fonte: Da autora.

E, por fim, na figura 4.17 podem ser observadas as curvas referentes a tensão e corrente na rede tomando uma irradiação fixa de 1000 W/m^2 .

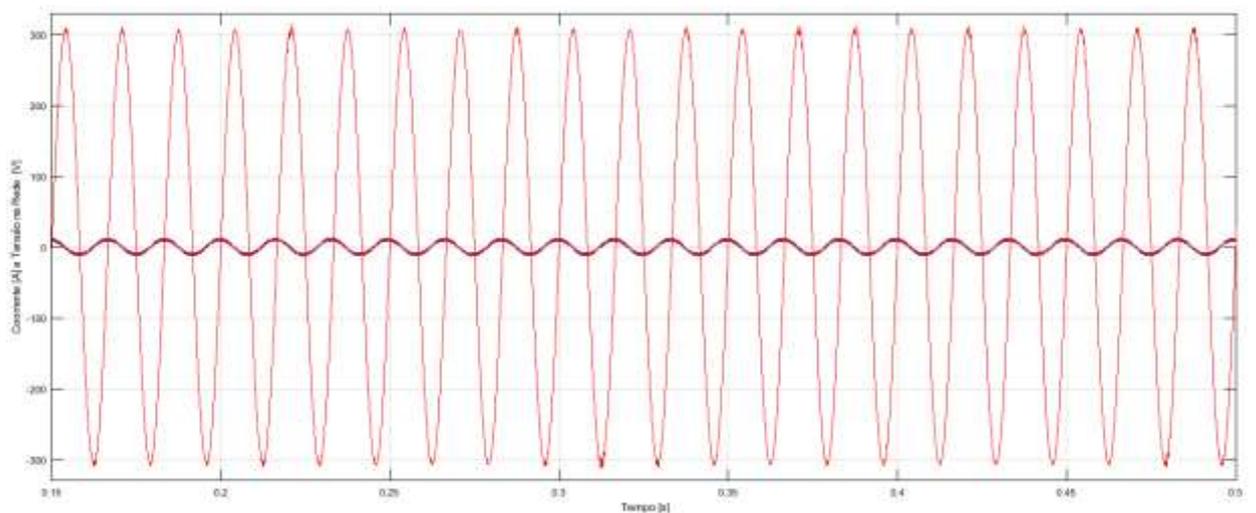


Figura 4.17– Tensão e Corrente da rede.

Fonte: Da autora.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho de conclusão de curso foi realizada a modelagem através do Simulink[®] de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, composto por um conjunto ou arranjo fotovoltaico formado por três ramos em paralelo contendo quatro painéis em série em cada ramo, além da técnica Perturba e Observa de rastreamento do ponto de máxima potência do arranjo de painéis, um conversor CC/ CC *Boost*, inversor CC/CA controlado em corrente, uma carga que modela uma residência genérica de 4 kVA e a rede elétrica.

Foram feitas diversas simulações, modelando cada parte que compõe o sistema proposto para que o funcionamento individual destas pudesse ser observado. De posse da análise dos resultados obtidos, foi feita a conexão destes elementos. Quanto à técnica Perturba e Observa, pode-se destacar que sem a mesma não é possível extrair a máxima potência que o arranjo de painéis pode entregar sob determinando nível de irradiação e outras condições de funcionamento. Em relação ao conversor CC/CC e inversor CC/CA, além do projeto e dimensionamento adequado de seus componentes elétricos, destaca-se a importância do controle de chaveamento em ambos.

Como mencionado anteriormente, o controle do inversor CC/CA permite tanto controlar a tensão no barramento CC do sistema quanto controlar a qualidade de corrente a ser injetada na rede pelo inversor. Desta forma, pode-se obter uma tensão na entrada do inversor conforme projetada e sem oscilações significativas. O que foi de crucial importância para o funcionamento deste componente durante todo o seu tempo de operação. Garantindo que a tensão nos seus terminais de saída, e conseqüentemente a tensão na carga e na rede, se mantivesse igualmente sem oscilações.

Durante o desenvolvimento do sistema proposto neste Trabalho de conclusão de curso, pode-se de fato aplicar grande parte dos conhecimentos adquiridos na graduação em Engenharia Elétrica. Tanto na formação do Engenheiro quanto na sua vida após a academia, o profissional se deparará com diversos projetos onde se torna imprescindível saber trabalhar com diversos softwares comerciais. Tendo em vista que antes que um dado sistema seja, de fato, implementado, faz-se necessário que este seja validado para diversas condições de funcionamento. A simulação de um sistema em projeto permite, portanto, a alteração livre dos

parâmetros e dos componentes antes que os mesmos sejam comprados, o que não é possível realizar em um sistema real em pleno funcionamento.

Através do que foi proposto neste trabalho de conclusão de curso pode-se sugerir diversas outras propostas de trabalhos futuros.

Como, por exemplo, a construção de um sistema real seguindo os componentes do sistema descritos neste trabalho. Desta forma, pode-se ter uma comparação fidedigna do que foi projetado e do que é observado na prática. Trazendo melhorias aos modelos aqui apresentados e, conseqüentemente, uma contribuição para a pesquisa acadêmica, como também para a sociedade e meio ambiente quanto a utilização prática desta fonte de energia renovável.

Uma outra proposta seria realizar a viabilidade econômica da construção prática deste sistema. Destacando qual seria o tempo em que o cliente, pessoa física ou jurídica, que deseja ter um sistema de geração fotovoltaica em sua casa ou estabelecimento, poderia recuperar o valor investido. E qual seria a diferença em reais da conta de energia anual deste cliente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abella, M. A. **Sistemas Fotovoltaicos**. *Dissertação de Mestrado*. Universidad de Chile. 2005.

Banu I. V., & Istrate M. **Islanding Prevention Scheme for Grid-Connected Photovoltaic Systems in Matlab/ Simulink**. *IEEE Trans. EnergyConvers.* pp. 2-3. 2014.

Batard, Christophe et al. **Simulation of Power Converters Using Matlab-Simulink**. *MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*. Vol.1. pp. 43-68. 2012.

Busa, Venkatesh; Narsingoju, Kiran; Vijay, G. **Simulation Analysis of Maximum Power Control of Photo Voltaic Power System**. Vol.1, *International Journal on Advanced Electrical and Electronics Engineering*. pp. 9-14. 2012.

Carrascal C. E., Casal F. D. **Inversores en aplicaciones fotovoltaicas**. *Trabalho de Conclusão*. Universidad de Chile. pp. 10-20. 2012.

CONELEC. **Proyecto Fotovoltaico Montecristi**. *Escuela Politécnica Nacional*. http://www.conelec.gob.ec/images/documents/doc_10176_3%Linea%20base.pdf. 2014.

Cupeprtino, A., De Resende, J., Pereira, H., Seleme J. **A grid-connected photovoltaic system with a maximum power point tracker using passivity-based control applied in a boost converter**. pp. 1-8. 2012.

Egan M. G. **Power-factor-corrected single-stage inductive charger for electric vehicle batteries**. *IEEE Trans Ind Electron* 54. pp.1217–1226. 2007.

Freitas N. D. S. **Controlo de um Inversor Monofásico para a Ligação à Rede de um Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes**. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Politécnico de Bragança. 2013.

Gradelha, M.; Gazoli, J. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

IEA. International Energy Agency. **PVPS Annual Report 2006**. 2006.

Julean, A. **Active Damping of LCL Filter Resonance in Grid Connected Applications**. *Dissertação de Mestrado*. Aalborg Universitet, 2009.

Michael E. R., & Gonzalez S. **Development of a MATLAB/Simulink Model of a Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System**. *IEEE Trans. EnergyConvers.* pp. 3-4. 2009.

Morocho R., & Ríos S.K. **Estudio Técnico- Económico para Incorporar Generación Distribuida Fotovoltaica en el Sector Residencial del Cantón Cuenca.** *Tese de Doutorado.* Universidad de Chile. 2015.

Orlandi, S. **Snapshot of Global PV Markets**, Report IEA 2015. Tech rep., Becquerel Institute, *IEA International Energy Agency*, http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf. 2014

Rashid, M. H., Gonzalez, M., & Fernandez, P.A. **Electrónica de potência: circuitos, dispositivos y aplicaciones.** Pearson Education.2004.

Roper L. D. **Word Photovoltaic Energy.** *Word PhotovoltaicEnergy.* <http://www.roperld.com/science/wordphotovoltaicenergy.htm>. Agosto 2011.

Sabiri, Zakaria et al. **DC / DC converters for Photovoltaic Applications Modeling and Simulations.** *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC).* pp. 209-213. 2014.

Samerchur S., Premrudeeprechacharn S., Kumsuwun Y., & Higuchi K. **Power Control of Single-Phase Voltage Source Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems.** *IEEE Trans. Energy Convers.* pp. 1-4. 2011.

Sandeep N., KulKarni P. S. & Udaykumar R. Y. **A Single-Stage Active Damped LCL-Filter-Based Grid-Connected Photovoltaic Inverter With Maximum Power Point Tracking.** *IEEE Trans. Energy Convers.* pp. 1-3. 2014.

Sumathi, Ashok Kumar & Surekha. **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems.** Springer. pp. 630 – 631. 2015.

Vieira L.M. **Modelagem e Simulação Computacional de Painel Fotovoltaico com Conversor Buck-Boost Modificado para Suprimento de Carga Isolada.** *Trabalho de Conclusão de Curso.* Universidade Federal da Paraíba. 2015.

Zhang., Ren L. Ren S., Ren J., Cheng B. & Zhang H. **Study on Photovoltaic Grid-connected Inverter Control System.** *IEEE Trans. Energy Convers.* pp. 2-3. 2009.