

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Cap CARLOS MAGNO DA COSTA DE MELLO LOPES
Cap RENAN SILVA DO CARMO**

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA HÍBRIDO
FOTOVOLTAICO – DIESEL ISOLADO**

**Rio de Janeiro
2018**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

**Cap CARLOS MAGNO DA COSTA DE MELLO LOPES
Cap RENAN SILVA DO CARMO**

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA
HÍBRIDO FOTOVOLTAICO – DIESEL ISOLADO**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Eumir Vergara Salgado - M.C.

Rio de Janeiro
2018

c2018

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha
Rio de Janeiro - RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

621.3 Lopes, Carlos Magno da Costa de Mello
L864e Estudo de um sistema de geração de energia híbrido
fotovoltaico – diesel isolado / Carlos Magno da Costa
de Mello Lopes, Renan Silva do Carmo, orientado por
Prof. Eumir Vergara Salgado - Rio de Janeiro: Instituto
Militar de Engenharia, 2018.

105p.: il.

Projeto de Fim de Curso (graduação) - Instituto
Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

1. Curso de Graduação em Engenharia Elétrica -
projeto de fim de curso. 1. fotovoltaico. 2. sistema
híbrido . 3. inversor . I. Salgado, Prof. Eumir Vergara
. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Cap CARLOS MAGNO DA COSTA DE MELLO LOPES
Cap RENAN SILVA DO CARMO

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA
HÍBRIDO FOTOVOLTAICO – DIESEL ISOLADO**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Eumir Vergara Salgado - M.C.

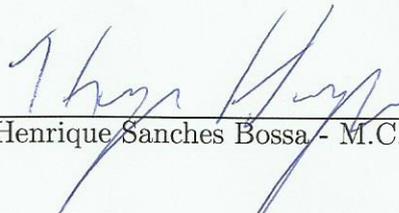
Aprovado em 4 de Outubro de 2018 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. Eumir Vergara Salgado - M.C. do IME - Presidente



Prof. Claudio Canto dos Santos - M.C. do IME



Prof. Thiago Henrique Sanches Bossa - M.C. do IME

Rio de Janeiro
2018

Ao Instituto Militar de Engenharia, alicerce da minha formação e aperfeiçoamento.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os apoiadores de nossa trajetória profissional e acadêmica. Em especial à Deus e aos familiares, sem eles certamente não teríamos chegado até aqui, e ao nosso orientador Ten Cel Eumir Vergara Salgado pelo suporte dado durante a confecção deste trabalho.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação. ”

SIMONE DE BEAUVOIR

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE SIGLAS	14
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Sistema de energia	17
1.2 Motivação	18
1.3 Objetivos	19
1.4 Estrutura do trabalho	19
1.5 Metodologia	20
2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E GERAÇÃO A DIESEL	22
2.1 Painel fotovoltaico	22
2.1.1 Aspectos construtivos	24
2.1.2 Conexão em série e em paralelo	26
2.1.3 Efeitos do sombreamento	27
2.1.4 Diodo de desvio (by-pass)	27
2.1.5 Diodo de bloqueio	29
2.1.6 Fusíveis de proteção	30
2.1.7 Sistemas fotovoltaicos	30
2.1.8 Sistema de armazenamento de energia	32
2.1.9 Controladores de carga	32
2.1.10 Conversores CC-CA	33
2.1.11 Conversores CC-CC	33
2.1.12 Seguidor do ponto de máxima potência (MPPT)	33
2.2 Gerador a diesel	34
2.2.1 Fundamentos de máquinas síncronas	35
2.2.1.1 O campo magnético girante	35
2.2.1.2 Conjugado induzido em uma máquina CA	36
2.2.1.3 Aspectos construtivos dos geradores síncronos	37
2.2.1.4 Velocidade de rotação de um gerador síncrono	41
2.2.2 Motores Diesel	41

2.2.2.1	Ciclo Otto e Ciclo Diesel	42
2.2.2.2	Motores de Quatro Tempos	42
2.2.3	Grupo Gerador a Diesel	43
2.2.3.1	Unidade de Supervisão de Corrente Alternada (USCA)	43
2.2.3.2	Vantagens e desvantagens do Grupo Gerador a diesel	43
2.3	Sistemas Híbridos	44
2.3.1	Principais tipos de sistemas híbridos	44
2.3.1.1	Sistema eólico-diesel	45
2.3.1.2	Sistema fotovoltaico-diesel	45
2.3.1.3	Sistema fotovoltaico-eólico-diesel	45
2.3.1.4	Sistema fotovoltaico-eólico	46
3	INTEGRAÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES DE ENERGIA	47
3.1	Conversor CC-CC	48
3.2	Seguidor de máxima potência	50
3.2.1	Tipos de estruturas	50
3.2.2	Método de perturbação e observação	51
3.2.3	Algoritmo condutância incremental	52
3.3	Conversor CC-CA	53
3.3.1	quanto ao modo de comutação	54
3.3.2	quanto à potência gerada	54
3.3.3	quanto ao uso do transformador	54
3.3.4	quanto à topologia referente ao número de níveis de tensão	56
3.3.5	quanto ao ilhamento	62
3.4	Estratégia de controle para o inversor	62
3.4.1	Controle por histerese	63
3.4.2	Controlador Proporcional-integral	64
4	MODELAGEM DO SISTEMA	67
4.1	Modelagem do painel fotovoltaico	67
4.2	Modelagem do MPPT	68
4.3	Modelagem do conversor CC-CC <i>boost</i>	69
4.3.1	Cálculo das capacitâncias	69
4.3.2	Cálculo das indutâncias	71
4.4	Modelagem do conversor CC-CA	71

4.4.1	Sistema de controle CC-CA	71
4.4.1.1	Regulador de tensão no link CC	72
4.4.1.2	Cálculo da corrente de referência no eixo de quadratura	73
4.4.1.3	Controle de corrente	73
4.4.1.4	Gerador de pulsos PWM	74
4.5	Modelagem do gerador diesel	76
4.5.1	Modelagem da máquina síncrona	76
4.5.2	Modelagem do motor diesel	77
4.5.3	Validação do modelo do gerador diesel	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
5.1	Primeira simulação	81
5.1.1	Torque e velocidade do gerador	81
5.1.2	Balanco de potência ativa	83
5.1.3	Compensação de reativos	85
5.1.4	Tensão no barramento	86
5.1.5	Correntes	87
5.2	Segunda simulação	88
5.2.1	Torque e velocidade do gerador	88
5.2.2	Balanco de potência ativa	89
5.2.3	Tensão no barramento	91
5.2.4	Correntes	93
5.3	Terceira Simulação	94
5.3.1	Torque e Velocidade do Gerador	94
5.3.2	Compensação de reativos e Potência Ativa	94
5.3.3	Tensão e Corrente do Gerador	95
6	CONCLUSÃO	97
6.1	Considerações finais	97
6.2	Trabalhos futuros	98
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
8	APÊNDICES	102
8.1	APÊNDICE 1: Transformadas de Park	103
8.2	APÊNDICE 2: Código do algoritmo P&O	104

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura2.1	Processo de um fóton gerando um par elétron-lacuna em uma célula PV.	23
Figura2.2	Modelo básico dos componentes da estrutura elétrica de um PV com os componentes parasitas	24
Figura2.3	Curva I-V para 4 módulos em série e o efeito do diodo de desvio quando existe o sombreamento.	28
Figura2.4	Operação de um diodo de desvio.	29
Figura2.5	Diagrama com 4 séries fotovoltaicas conectadas em paralelo usando diodos de bloqueio.	30
Figura2.6	Diagrama com 4 séries fotovoltaicas que utilizam fusíveis fotovoltaicos de proteção.	30
Figura2.7	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR).	31
Figura2.8	Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI).	31
Figura2.9	Curvas I-V e P-V de um gerador mostrando os máximos locais na curva de potência sem sombreamento e com um dos módulos com um fator de sombreamento de 50%.	34
Figura2.10	Uma maquina CA simplificada, com distribuicao senoidal de fluxo no estator e uma bobina com espira unica de fio montada no rotor. ...	36
Figura2.11	As componentes de densidade de fluxo magnetico no interior da maquina da figura 2.8.	37
Figura2.12	O rotor de dois polos nao salientes de uma maquina sincrona.	38
Figura2.13	Rotor de seis polos salientes de uma maquina sincrona.	38
Figura2.14	Um circuito de excitatriz sem escovas. Uma corrente trifasica de baixa intensidade e retificada e utilizada para alimentar o circuito de campo da excitatriz, o qual esta localizado no estator. A saida do circuito de armadura da excitatriz (no rotor) e entao retificada e usada para fornecer a corrente de campo da maquina principal.	40
Figura2.15	Fotografia de um rotor de maquina sincrona, com uma excitatriz sem escovas montada no mesmo eixo.	40
Figura2.16	Esquema de excitacao sem escovas que inclui uma excitatriz piloto. Os imas permanentes da excitatriz piloto produzem a corrente de campo da excitatriz, a qual por sua vez produz a corrente de campo da maquina principal.	41

Figura3.1	Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico-diesel.	47
Figura3.2	Circuito do conversor CC-CC boost.	48
Figura3.3	Modo de condução contínuo com (a) chave aberta e (b) chave fechada.	49
Figura3.4	Estrutura de MPPT (a) central, (b) em série e (c) modular.	51
Figura3.5	Fluxograma do algoritmo P&O.	52
Figura3.6	Fluxograma do algoritmo de condutância incremental.	53
Figura3.7	Corrente de fuga devido à capacitância parasita em um inversor sem transformador. As correntes Ipositivo e Inegativo são diferen- tes entre si em função da corrente de fuga	55
Figura3.8	Inversor de ponte completa trifásicos	56
Figura3.9	Braço de um conversor de diodos ligados ao ponto neutro, com três níveis de tensão.	58
Figura3.10	Combinação de estados dos interruptores para um conversor NPC de três níveis	59
Figura3.11	Braço de um conversor de capacitores flutuantes.	60
Figura3.12	Combinação de estados dos interruptores para um conversor de compensadores flutuantes.	60
Figura3.13	Braço de uma associação série de conversores em ponte.	61
Figura3.14	Combinações possíveis de estado de interruptores num conversor em ponte.	62
Figura3.15	Classificação dos controladores de corrente	63
Figura3.16	Diagrama de blocos do controle de corrente por histerese mono- fásico.	64
Figura3.17	Banda de histerese.	64
Figura3.18	Diagrama de blocos do controle de corrente nas coordenadas dq	66
Figura4.1	Esquema geral da modelagem do sistema proposto	67
Figura4.2	Fluxograma da implementação do algoritmo de P&O	68
Figura4.3	Diagrama em blocos do MPPT	69
Figura4.4	Esquema do circuito do conversor CC-CC Boost	70
Figura4.5	Diagrama em blocos do conversor CC-CA	72
Figura4.6	Diagrama em blocos do sistema de controle de corrente	74
Figura4.7	Esquema de comparação utilizado na técnica SPWM	75
Figura4.8	Esquema NPC para uma fase	76

Figura4.9	Equação do fluxo no eixo direto	77
Figura4.10	Equação do fluxo no eixo em quadratura	77
Figura4.11	Representação do circuito no eixo direto	78
Figura4.12	Representação do circuito no eixo em quadratura	78
Figura4.13	Diagrama em blocos do modelo do motor diesel e regulador de velocidade	79
Figura4.14	Desvio de frequência no modelo proposto em PPATHANAS- SIOU (2001)	79
Figura4.15	Desvio de frequência no modelo proposto neste trabalho	80
Figura5.1	Torque elétrico x Torque mecânico	82
Figura5.2	Velocidade do Rotor	82
Figura5.3	Frequência do sistema	83
Figura5.4	Potência produzida pelo sistema fotovoltaico	83
Figura5.5	Potência a tiva do inversor e do gerador	84
Figura5.6	Potência ativa consumida pela carga	84
Figura5.7	Potência reativa solicitada pela carga	85
Figura5.8	Potência reativa produzida pelo inversor	85
Figura5.9	Tensão eficaz no barramento CA	86
Figura5.10	Tensão senoidal no barramento CA	87
Figura5.11	Correntes na carga, do inversor e do gerador	87
Figura5.12	Torque Elétrico x Mecânico	88
Figura5.13	Velocidade do rotor	89
Figura5.14	Freqüência do sistema	89
Figura5.15	Potência produzida pelo sistema fotovoltaico	90
Figura5.16	Potência CA do inversor e do gerador	90
Figura5.17	Potência solicitada pela carga	91
Figura5.18	Tensão no Link CC	91
Figura5.19	Tensão eficaz no barramento CA	92
Figura5.20	forma senoidal da tensão CA	93
Figura5.21	Correntes na carga, do inversor e do gerador	93
Figura5.22	Torque Mecânico x Torque Elétrico	94
Figura5.23	Potência reativa fornecida pelo gerador	95
Figura5.24	Potência ativa fornecida pelo gerador	95
Figura5.25	Corrente do gerador	96

Figura5.26 Tensão do gerador 96

LISTA DE TABELAS

Tabela3.1	Comparação de características de inversores para conexões à rede com e sem transformador (GTES, 2014)	56
-----------	---	----

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
MPPT	<i>Maximum power point tracker</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
MT	Média tensão
BT	Baixa tensão
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
THD	<i>Total harmonic distortion</i>
PI	Proporcional-integral

RESUMO

O uso de energia solar está difundido em diversos países e, desta forma, cresce a necessidade de se conhecer o sistema fotovoltaico. Com relevância para estudos recentes na área de integração de fontes de energia diferentes e para emprego do Exército em locais remotos, a proposta deste trabalho permite que se integre a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos com a fornecida pelo grupo de geradores diesel para alimentar as cargas sem a presença da rede elétrica. O entendimento dos componentes que constituem o sistema fotovoltaico é indispensável para que se possa acoplar a saída do painel ao gerador diesel de modo a suprir as cargas que venham a ser alimentadas. Após a abordagem teórica, o trabalho consiste na modelagem do sistema fotovoltaico-diesel no software SIMULINK®/MATLAB®. Para a simulação deste trabalho, o gerador diesel é de 500 kVA 220/380 V e a potência ativa máxima que o sistema fotovoltaico pode gerar é de 100 kW. As simulações foram realizadas sob condições variáveis dos parâmetros de entrada do arranjo fotovoltaico e da carga ao longo da operação do sistema e os resultados serão analisados à luz dos conceitos estudados.

ABSTRACT

The use of solar energy is widespread in several countries and, in this way, the necessity of knowing the photovoltaic system grows. With relevance to recent studies in the area of integration of different energy sources and for the use of the Army in remote locations, the proposal of this work allows to integrate the energy generated by the photovoltaic panels with that provided by the group of diesel generators to feed the loads without the presence of the power grid. The understanding of the components that constitute the photovoltaic system is indispensable so that the output of the panel can be coupled to the diesel generator in order to supply the loads that are to be fed. After the theoretical approach, the work consists of the modeling of the photovoltaic-diesel system in the SIMULINK® / MATLAB® software. For the simulation of this work, the diesel generator is 500 kVA 220/380 V and the maximum active power that the photovoltaic system can generate is 100 kW. The simulations were carried out under variable conditions of the input parameters of the photovoltaic array and the load during the operation of the system and the results will be analyzed in light of the concepts studied.

1 INTRODUÇÃO

1.1 SISTEMA DE ENERGIA

Com o crescente aumento das políticas internacionais que visam à diminuição da emissão do gás carbônico na atmosfera e à escassez de recursos limitados, a busca por soluções alternativas para a geração de energia está amplamente difundida no mundo. Estados Unidos e países da Europa já contam com uma grande produção de energia renovável na sua matriz de geração elétrica.

O sistema fotovoltaico representa a tecnologia de energia de crescimento mais rápido durante os últimos anos pelo mundo devido à grande demanda na Europa em 2012. Em 2014 esses mercados também migraram para a China e a região do Pacífico e da Ásia. E como consequência, no final de 2015 havia mais de 222 GW de energia instalada por sistemas fotovoltaicos pelo mundo. Para 2016 a capacidade instalada global aumentou cerca de 50 GW e até 2019 pode alcançar 396 GW em um cenário menos otimista e 540 GW no mais otimista (BLAADJERG; IONEL, 2017)

O Brasil ainda possui um desenvolvimento insipiente de geração solar. De acordo com (ROCHA, 2018), mesmo o país tendo em 2017 ultrapassado a marca de 1GW de capacidade de energia solar em operação, está muito atrasado em relação ao setor fotovoltaico de outros países. No entanto, possui excelentes índices de radiação que podem ser aproveitados trabalhando conjuntamente com outros sistemas de energia.

Pela proposta do presente trabalho, deve-se realizar a integração de um sistema híbrido fotovoltaico-diesel isolado da rede elétrica. Portanto, é fundamental entender o que caracteriza um sistema híbrido e isolado. Segundo GTES (2014), sistemas isolados são definidos com funcionamento independente da rede elétrica e sistemas híbridos são aqueles que apresentam mais de uma forma de geração de energia. O sistema híbrido apresenta as seguintes características:

- são complexos;
- normalmente necessita de um tipo de armazenamento;
- necessita de um tipo de controle para integrar os diferentes tipos de fonte; e

- geralmente alimentam as cargas em corrente alternada, necessitando-se de um inversor.

Pode-se citar dois exemplos de sistemas híbridos fotovoltaicos-diesel instalados no Brasil. No ano de 1996 foi instalado um na Vila de Campinas, no Amazonas; e outro em 2001 na Vila de Araras, em Rondônia. Este último consta de uma planta fotovoltaica com capacidade nominal de 20.48 kWp no sistema de geração diesel elétrica de 162 kW (PINHO et al., 2008).

Durante a pesquisa bibliográfica foram encontrados alguns exemplos de estudo similares ao desenvolvido no presente trabalho, para desenvolvimento de projetos reais otimizados. Todos os artigos apresentados a seguir foram utilizados como subsídio para o desenvolvimento do presente trabalho.

Um desses exemplos foi o de um estudo realizado para subsidiar a implementação de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel. O foco deste estudo foi desenvolver um projeto ideal para um sistema híbrido inteligente apropriado para áreas remotas na Jordânia, com base nos recursos renováveis disponíveis nessas áreas (HALAWANI; ÖZVEREN, 2015).

Outro exemplo muito interessante versa sobre a utilização de banco de baterias para realizar o controle de frequência do sistema híbrido, sendo o gerador diesel o responsável pela manutenção do nível desejado de carga do banco de baterias (KIM et al., 2016).

Encontramos, ainda, um estudo sobre o desenvolvimento de uma nova estratégia de controle para regulação da frequência do sistema em sistemas híbridos sem armazenamento de energia (XIN et al., 2013).

1.2 MOTIVAÇÃO

De acordo com BLAADJERG (2017), o diário *The Electric Power Components and System* publicou em 2015 uma edição tripla especial destinada a pesquisas na área de energia renovável. Esta publicação consistia de mais de 30 papers de todo o mundo em que foram tratados sistemas de potência relevantes como geração distribuída e sistema de integração fotovoltaica com outras fontes de energia.

Os trabalhos recentes publicados reforçam a importância do estudo do tema. No ano de 2017 os autores do presente trabalho puderam realizar um intercâmbio acadêmico na Texas Tech University, localizada no Texas e nesta oportunidade puderam acompanhar a modelagem de alguns sistemas como o fotovoltaico e o eólico no software

Simulink®/MATLAB® que seriam, posteriormente, integrados em uma microgrid nos estudos de alunos de doutorado de diferentes lugares do mundo daquela Instituição.

Modelar um sistema híbrido fotovoltaico-diesel isolado é uma tarefa que apresenta relevante contribuição para o Exército Brasileiro, especialmente para a tropa situada em locais remotos. Pode-se, por exemplo, aumentar a flexibilidade da energia elétrica nos destacamentos militares das região de fronteira (onde muitos destes locais são dependentes exclusivamente dos grupos geradores) através do sistema híbrido fotovoltaico-diesel. Como consequência, haverá uma dependência menor dos problemas logísticos referentes à aquisição e transporte de óleo diesel e à manutenção dos geradores nestas regiões de difícil acesso.

Portanto, pode-se verificar que o estudo do sistema fotovoltaico integrado a um outro sistema é mundialmente relevante e atual e, durante a experiência do intercâmbio acadêmico dos autores foi possível comprovar a importância desse tema. Por fim, o presente trabalho é de interesse para o Exército Brasileiro e poderá contribuir para muitos militares que estão em locais remotos sem rede elétrica.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar o estudo de um sistema de geração de energia híbrido fotovoltaico-diesel isolado e realizar a modelagem deste sistema. O trabalho contará com as seguintes etapas:

- Apresentar os subsistemas do sistema fotovoltaico e do gerador síncrono.
- Apresentar as estruturas, topologias e os tipos de controle de corrente do inversor.
- Realizar a modelagem do sistema fotovoltaico-diesel.
- Realizar simulações alterando-se parâmetros de entrada.
- Realizar o balanço de reativos do modelo proposto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será composto de seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta o sistema de energia, introduzindo o sistema fotovoltaico no cenário mundial e brasileiro e apresentando o sistema híbrido isolado.

O segundo capítulo identifica as partes constituintes do sistema fotovoltaico e do sistema gerador à diesel. É apresentado o modelo elétrico da célula fotovoltaica e as principais características dos blocos que compõem esse sistema. Para o gerador diesel, aborda-se os aspectos construtivos e as propriedades elétricas da máquina.

O terceiro capítulo trata dos conversores (CC-CC e CC-CA), do seguidor de máxima potência e do controle de corrente do conversor CC-CA do sistema fotovoltaico. Apresenta-se o princípio de funcionamento desses componentes além de algumas topologias e estruturas existentes na literatura.

O quarto capítulo traz a modelagem do sistema onde abordaremos o modelo do painel utilizado, o detalhamento da modelagem dos conversores CC-CC e CC-CA, bem como o detalhamento do cálculo das capacitâncias e indutâncias, do sistema de controle do conversor CC-CA e, ainda, abordaremos a modelagem do gerador diesel e do controle de frequência do sistema.

O quinto capítulo apresenta os resultados do modelo proposto, onde analisaremos os resultados obtidos a fim de validar o modelo do sistema completa, funcionando sob diversas condições de operação.

E por fim, o sexto capítulo encerra o trabalho, fazendo as considerações finais pertinentes e identificando possíveis propostas para novos trabalhos.

1.5 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi utilizada uma pesquisa bibliográfica e exploratória, tendo em vista a pouca familiaridade com o tema ao início do trabalho.

As fontes utilizadas foram do tipo secundárias, ou seja, todo o trabalho foi baseado em diferentes livros de diversos autores, além de artigos publicados pela comunidade científica, muitos deles publicados pelo IEEE.

As principais referências bibliográficas na parte de sistemas fotovoltaicos foram:

- Renewable energy devices and systems with simulations in MATLAB® and ANSYS®, Frede Blaaudjerg, 2017;
- Sistemas híbridos soluções energéticas para a Amazônia, João Tavares Pinho, 2008; e
- Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, GTES, 2014.

Na parte de circuitos de potência e controle do conversor CC-CA, foram utilizadas, principalmente, as seguintes referências:

- Estrutura de um conversor multinível para aplicação em qualidade de energia elétrica, Rodrigues, 2011;
- Contribuições ao estudo de conexões de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica sem filtros passivos: Projeto de controladores digitais para redução do conteúdo harmônico, Almeida, 2013;
- Three level active neural point clamped inverter With sinusoidal PWM control, Pathak, 2017; e
- Power electronics : converters, applications, and design, Mohan, 2003.

Para a parte de máquinas síncronas e geradores a diesel nossas principais fontes foram:

- Fundamentos de máquinas elétricas, Chapman, 2013;
- Máquinas elétricas, Fitzgerald, 2014;
- Motores de combustao Interna e seus sistemas, Tillmann, 2013; e
- Dynamic characteristics of autonomous wind– diesel systems, Papathanassiou, 2001.

Após a pesquisa bibliográfica foi desenvolvido um modelo de um sistema híbrido fotovoltaico-diesel e realizadas três diferentes simulações a fim de verificar a validade e o correto funcionamento do sistema proposto. Ressalta-se que as fontes apresentadas nessa seção são apenas as fontes principais, existindo diversas outras referências ao longo do texto.

2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E GERAÇÃO A DIESEL

Com a proposta de realizarmos a integração entre os sistemas de geração fotovoltaico e a diesel, cresce de importância uma revisão bibliográfica detalhada dos principais conceitos acerca dos componentes necessários para o entendimento do modelo de geração de energia híbrido fotovoltaico-diesel isolado da rede elétrica.

Iniciaremos este capítulo apresentando o sistema de geração fotovoltaico, na sequência faremos uma explanação teórica a respeito dos fundamentos das máquinas síncronas, em seguida será apresentado o funcionamento dos motores a diesel e o conceito de grupos geradores e por fim uma abordagem dos principais sistemas híbridos de geração de energia elétrica.

2.1 PAINEL FOTOVOLTAICO

As células fotovoltaicas são elementos semicondutores que convertem energia solar em energia elétrica contínua. Por volta de 1950, as células PV (fotovoltaicas, do inglês *photovoltaic*) eram utilizadas em aplicações para satélites. Atualmente, células PV são usadas em sistemas grid (escala de utilidade e residencial), edifícios, equipamentos de trânsito e satélites (BLAADJERG; IONEL, 2017).

Células PV podem ser feitas de diferentes tipos de materiais e usando variada técnica de fabricação. As principais categorias de materiais fotovoltaicos são o silício cristalino (Si), o filme fino, a junção multi, e novas tecnologias aparecendo como por exemplo a sensibilizada por corantes, perovskite e células fotovoltaicas orgânicas. Hoje, há uma grande quantidade de pesquisas que focam tanto no aumento da eficiência quanto na diminuição do custo de fabricação. O tipo mais dominante de células fotovoltaicas usadas em aplicações de larga escala ainda é o silício cristalino (BLAADJERG; IONEL, 2017).

Existem dois tipos básicos de células de silício cristalino: monocristalinos (m-c) e policristalinos (p-c). As células m-c têm uma estrutura uniforme ao longo de toda a célula e permite que os elétrons transitem mais facilmente por seu material, enquanto que as células p-c têm múltiplas estruturas cristalinas, ou grãos, dispostos de maneira não alinhada que podem impedir o fluxo de elétrons. Portanto, as células p-c tendem a possuir menor eficiência de conversão que as células m-c, mas elas são mais baratas para fabricação. As células de silício monocristalinas e policristalinas são amplamente usadas

nos painéis fotovoltaicos e em sistemas fotovoltaicos nos dias atuais (PINHO et al., 2008).

A célula fotovoltaica é uma larga área de junção p-n do semiconductor que captura a energia dos fótons para criar energia elétrica. A junção p-n cria uma região de depleção com um campo elétrico em uma direção. Quando o fóton com energia suficiente se choca com o material na região de depleção, a energia do fóton excita o elétron de valência para uma banda de condução, deixando um buraco na camada de valência. Devido a presença do campo elétrico na região de depleção, o elétron e o buraco vão se deslocar em direções opostas e gerar a corrente elétrica. Esse processo de um fóton gerando um par elétron-lacuna é mostrado na figura 2.1. Essa corrente gerada permite que a célula fotovoltaica gere energia CC (BLAADJERG; IONEL, 2017).

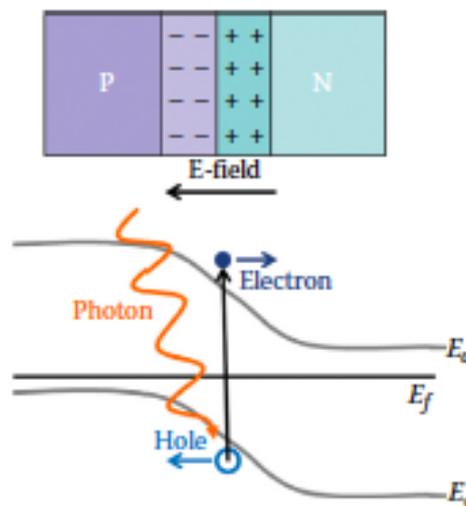


Figura 2.1: Processo de um fóton gerando um par elétron-lacuna em uma célula PV. (BLAADJERG; IONEL, 2017)

A estrutura básica da célula fotovoltaica pode ser dividida e modelada em componentes elétricos básicos. A figura 2.2 mostra a junção semicondutora p-n e os componentes que constroem uma célula fotovoltaica. O processo do fluxo fóton-elétron pode ser modelado com uma fonte de corrente I_{ph} , onde a corrente gerada depende da intensidade de luz que atinge a célula. A junção semicondutora p-n é modelada com um diodo D . A fonte de corrente e o diodo constituem um modelo ideal de células fotovoltaicas. No entanto existem as componentes parasitas que representam a parte não ideal deste modelo. Para representá-las, a junção p-n terá a capacitância em paralelo C_p , e a resistência em paralelo R_{sh} , enquanto que os cabos ligados à célula fotovoltaica terão a resistência em série associada R_s e a indutância em série L_s (BLAADJERG; IONEL, 2017).

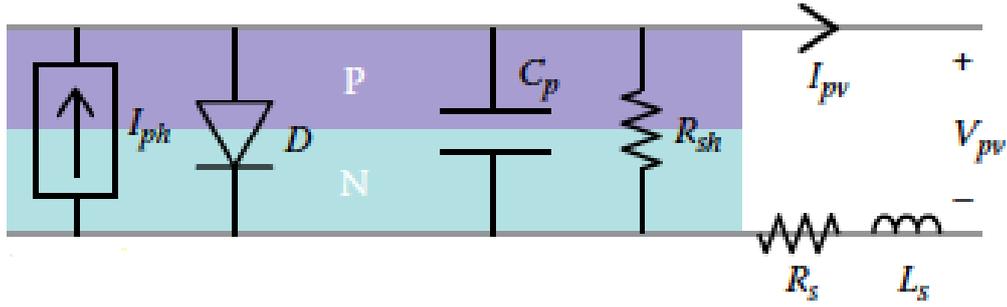


Figura 2.2: Modelo básico dos componentes da estrutura elétrica de um PV com os componentes parasitas

(BLAADJERG; IONEL, 2017)

2.1.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Os dois principais fatores que afetam a operação característica da célula fotovoltaica são a irradiação solar G , medida em W/m^2 , e a temperatura T , medida em graus Celsius ($^{\circ}C$). A relação entre esses dois fatores e o funcionamento do fotovoltaico pode ser modelada matematicamente. Primeiramente, examinamos o modelo ideal que consiste apenas da fonte de corrente I_{ph} e o diodo (BLAADJERG; IONEL, 2017).

A foto corrente I_{ph} depende da irradiação G e da temperatura T de acordo com

$$I_{ph}(G, T) = [I_{scn} + K_i (T - T_n)] \frac{G}{G_n}, \quad (2.1)$$

onde:

- I_{scn} é a corrente nominal de curto circuito;
- K_i é o coeficiente de temperatura de corrente;
- G_n é a irradiação solar nominal (normalmente $1000 W/m^2$); e
- T_n é a temperatura nominal da célula (normalmente $25 ^{\circ}C$).

Esses valores podem ser verificados nas especificações comerciais dos fabricantes das células e painéis fotovoltaicos. Também, a corrente I_d e a tensão V_d do diodo são expressas por uma relação exponencial, e elas são representadas por:

$$I_d(T, V_d) = I_s(T) \left[\exp \left(\frac{V_d}{a V_t(T)} \right) - 1 \right], \quad (2.2)$$

onde:

- I_s é a corrente de saturação do diodo;
- a é o fator de idealidade do diodo;
- V_d é a tensão do diodo; e
- V_t é a tensão termal.

A corrente de saturação do diodo depende da temperatura e pode ser definida por:

$$I_s(T) = \frac{I_{scn} + K_i (T - T_n)}{\exp \left(\frac{V_{ocn} + K_v (T - T_n)}{a V_t(T)} \right) - 1}, \quad (2.3)$$

onde:

- I_{scn} é a corrente nominal de curto-circuito;
- K_i é o coeficiente de corrente de temperatura;
- T_n é a temperatura nominal da célula;
- V_{ocn} é a tensão nominal de circuito aberto
- K_v é o coeficiente de tensão de temperatura;
- a é o fator de idealidade do diodo; e
- V_t é a tensão termal;

Note que a tensão do diodo V_d é a mesma que a tensão do painel fotovoltaico V_{pv} para o modelo ideal. A tensão térmica V_t depende da temperatura T e é definida por:

$$V_t(T) = \frac{kT}{q} N_s, \quad (2.4)$$

onde:

- k é a constante de Boltzmann (aproximadamente $1,3807 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$);
- q é a carga do elétron ($1,60217662 \times 10^{-19} \text{ C}$); e
- N_s é o número de células PV em série.

Usando a lei de Kirchhoff, a relação entre a corrente fotovoltaica I_{pv} e a tensão fotovoltaica V_{pv} para o modelo ideal é:

$$I_{pv} = I_{ph}(G, T) - I_d(T, V_{pv}) \quad (2.5)$$

onde a foto corrente I_{ph} é definida em (2.1) e a corrente do diodo I_d é definida em (2.2). Com base na equação da corrente fotovoltaica I_{pv} , dada em (2.5), pode-se verificar que a corrente de saída do painel fotovoltaico está relacionada com a irradiação solar G e a temperatura T .

As características elétricas dos módulos, fornecidas pelos fabricantes, baseiam-se na condição padrão de testes (*STC*): irradiação de 1000 W/m^2 , temperatura da célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e massa de ar (*AM*) igual a 1,5 (PINHO et al., 2008).

2.1.2 CONEXÃO EM SÉRIE E EM PARALELO

Uma única célula de silício produz aproximadamente $0,5 \text{ V}$ para tensão e uma corrente que é proporcional a superfície da área da célula. A escolha de conectar células fotovoltaicas em série ou paralelo é determinada pela tensão e corrente necessária na aplicação. A maioria das células fotovoltaicas hoje demandam uma tensão maior que a de uma única célula, portanto, as células são normalmente conectadas em série. Os modelos comerciais dos painéis fotovoltaicos são normalmente feitos com arranjos de $72 - 96$ células conectadas em série para que a soma de suas tensões atinja tensões na faixa de $30 - 60 \text{ V}$ (BLAADJERG; IONEL, 2017).

O cálculo das conexões em série e em paralelo é realizado da seguinte forma: para a ligação em série, a tensão final do arranjo é a soma das tensões dos módulos e a corrente final igual à corrente de um único módulo. Para as conexões em paralelo o processo é o inverso; a corrente final do arranjo é a soma das correntes e a tensão final é igual à tensão de um único módulo (PINHO et al., 2008).

Os módulos fotovoltaicos têm a função de fornecer rigidez mecânica ao conjunto, proteger as células das condições climáticas adversas e isolá-las eletricamente de contatos externos. Além das células, o módulo fotovoltaico é constituído por pequenas tiras metálicas que se destinam a conectar as células e fornecer contatos externos de saída; por um material aplicado na superfície das células, normalmente um polímero transparente e isolante; por um vidro temperado e anti-reflexivo para a cobertura frontal; uma cobertura posterior; uma caixa de conexões; e uma estrutura metálica que suporte todo o equipamento (PINHO et al., 2008).

Muitos sistemas fotovoltaicos são instalados nas coberturas e/ou áreas remotas que não contam com um apoio logístico para manutenção disponíveis. Desta forma, o sistema fotovoltaico que inclui tanto os painéis quanto os componentes de eletrônica de potência devem estar prontos para operarem corretamente com os requisitos mínimos de manutenção. Os painéis fotovoltaicos são projetados para trabalhar continuamente por 25 anos ou mais, com algum nível esperado de degradação natural na potência de saída, geralmente cerca de 0,5 % - 1,0 % por ano. Porém, em certas situações, os painéis fotovoltaicos tendem a degradar mais rapidamente, principalmente em áreas muito quentes (por exemplo, nos desertos) ou áreas com ambiente muito úmido (como nas áreas tropicais ou à beira-mar). Alto calor e umidade podem degradar e corroer os materiais que protegem as células e degradar as células fotovoltaicas (BLAADJERG; IONEL, 2017).

2.1.3 EFEITOS DO SOMBREAMENTO

Quando as células PV conectadas em série recebem menos radiação solar do que as outras da mesma associação, sua corrente irá limitar a corrente do ramo. Portanto, o efeito de sombreamento se propagará para toda a série. Pode ser que haja sombreamento parcial do módulo, acúmulo de detritos no vidro, objeto sobre o módulo (GTES, 2014).

As consequências para o sombreamento são a perda de potência gerada e a possibilidade de danificar o módulo. Essa potência, portanto, não está sendo destinada ao consumo e é dispersada no módulo. Denomina-se “ponto quente” o fenômeno no qual a célula sofre ruptura do material e é afetada por um intenso calor (GTES, 2014).

2.1.4 DIODO DE DESVIO (BY-PASS)

Os módulos são acrescidos de diodos de desvio (by-pass) para evitar os “pontos quentes”. Eles operam possibilitando um caminho alternativo para a corrente e, como consequência, limitam a dissipação de potência no conjunto de células sombreadas e preservando os painéis de danos (PINHO et al., 2008).

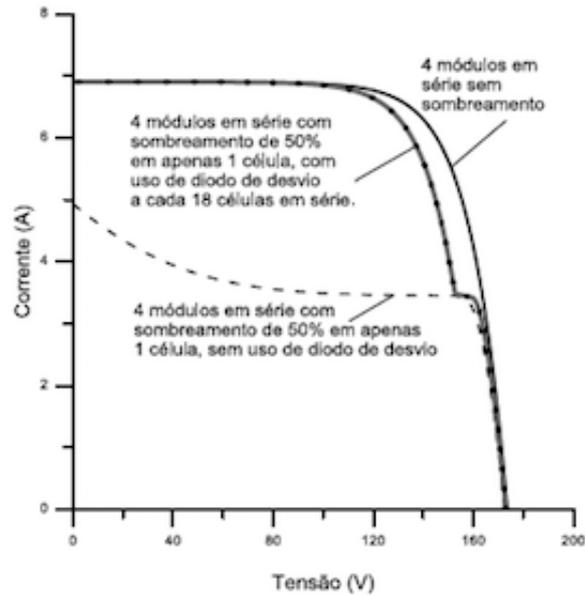


Figura 2.3: Curva I-V para 4 módulos em série e o efeito do diodo de desvio quando existe o sombreamento.

(GTES, 2014)

A figura 2.3 mostra o efeito do diodo de desvio minimizando o efeito do sombreamento. Neste exemplo há 4 módulos conectados em série nas situações de sombreamento com e sem o diodo de desvio e sem sombreamento. Verifica-se que quando ocorre sombreamento na metade de uma das células, a corrente de todos os módulos no conjunto reduz-se pela metade sem a presença do diodo de desvio.

Os diodos de desvio são associados em antiparalelo com o ramo de células em série e localizados nas caixas de conexões dos módulos, podendo ser identificados visualmente. Em regime estacionário, devem resistir à mesma corrente das células (GTES, 2014).

Verifica-se na figura 2.4 o modo de operação do diodo de desvio.

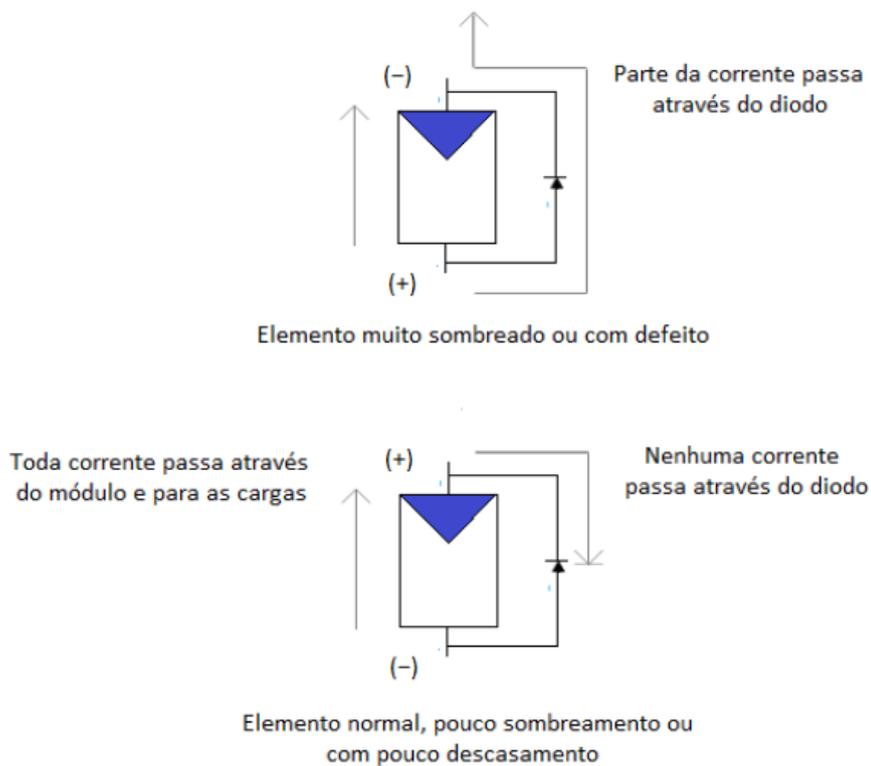


Figura 2.4: Operação de um diodo de desvio.
(GTES, 2014)

2.1.5 DIODO DE BLOQUEIO

O diodo de bloqueio é um componente de proteção que obstrui o fluxo de correntes reversas que podem ocorrer caso o módulo seja ligado diretamente a uma bateria. Para sistemas fotovoltaicos que possuam armazenamento de energia, funciona impedindo que os módulos fotovoltaicos atuem como cargas para as baterias quando não houver geração solar, como por exemplo nos períodos noturnos (PINHO et al., 2008).

A figura 2.5 é representada por um arranjo com 7 módulos em série 4 em paralelo. Para cada ramo em série é adicionado um diodo de bloqueio, que deve suportar uma tensão reversa de no mínimo duas vezes a tensão de circuito aberto do arranjo (GTES, 2014).

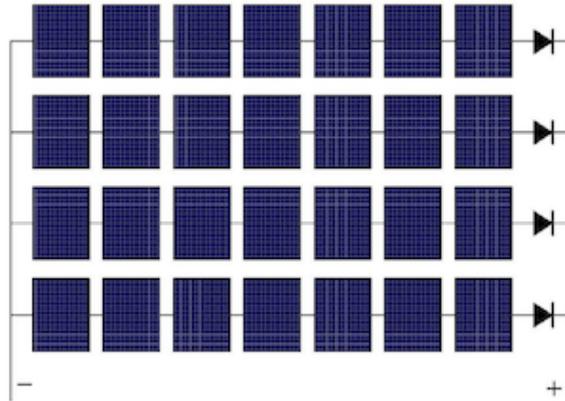


Figura 2.5: Diagrama com 4 séries fotovoltaicas conectadas em paralelo usando diodos de bloqueio.

(GTES, 2014)

2.1.6 FUSÍVEIS DE PROTEÇÃO

O fusível fotovoltaico é um elemento destinado à proteção do fluxo de corrente reversa de um arranjo em série de maior tensão em direção ao de menor valor. Para cada arranjo série inserem-se um fusível em cada polaridade. Estes diodos devem apresentar correntes menores que a corrente reversa que o módulo suporta (GTES, 2014).

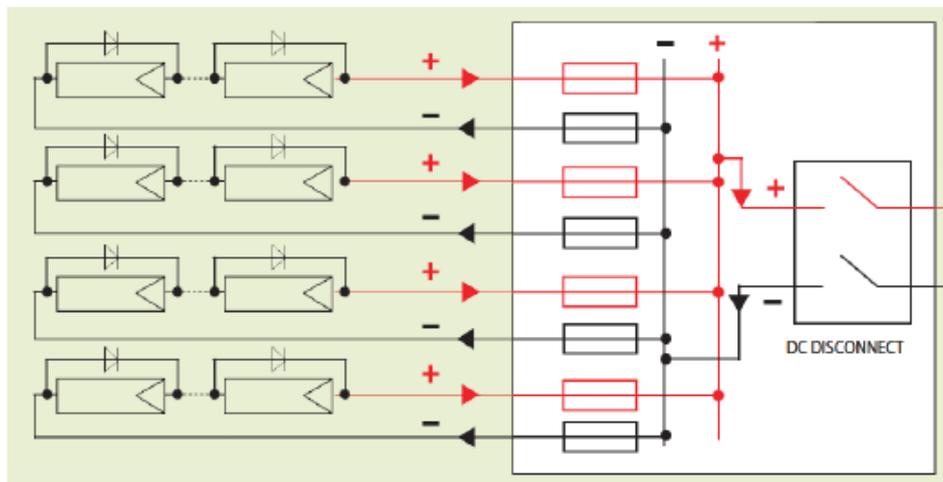


Figura 2.6: Diagrama com 4 séries fotovoltaicas que utilizam fusíveis fotovoltaicos de proteção.

(GTES, 2014)

2.1.7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Segundo GTES (2014), os sistemas fotovoltaicos podem ser conectados à rede ou

isolados. Cada tipo de sistema será adotado de acordo com a quantidade de recursos disponibilizados e a aplicação a que se destina. Os sistemas conectados à rede entregam a potência produzida pelo gerador fotovoltaico diretamente à rede. Para isso, deve-se utilizar um inversor que atenda as exigências de qualidade e segurança para atender os parâmetros da rede.

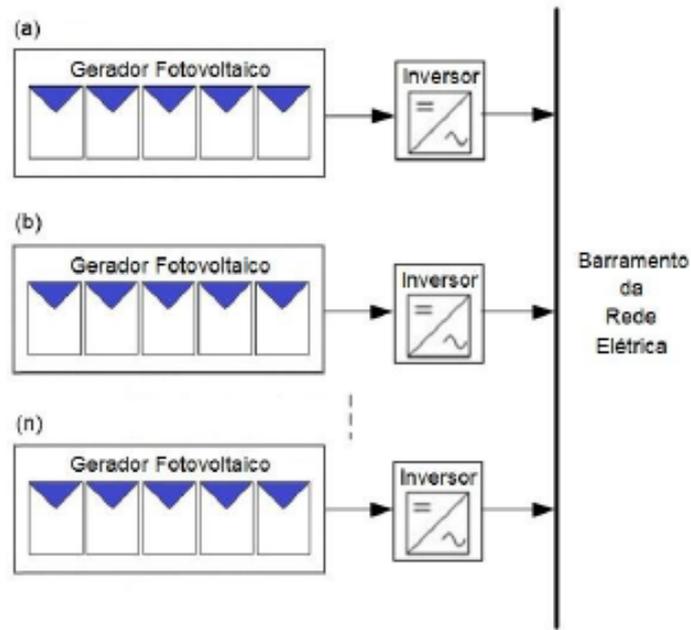


Figura 2.7: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR).
(GTES, 2014)

Os sistemas isolados são definidos com funcionamento independente da rede elétrica e, em geral, utiliza-se um sistema de armazenamento de energia.

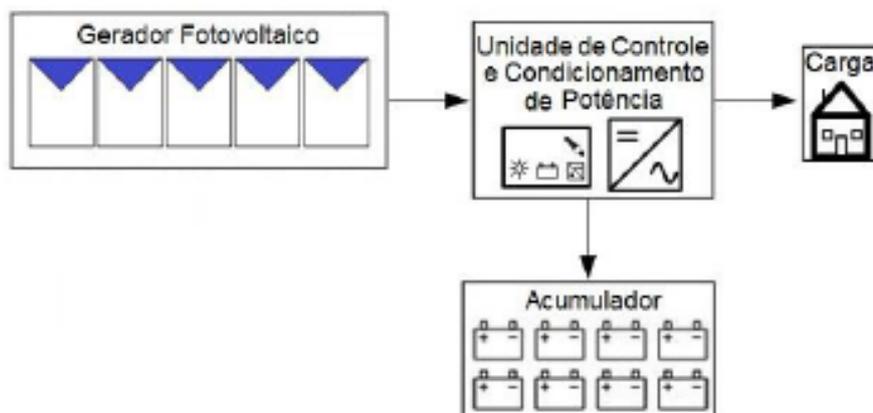


Figura 2.8: Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI).
(GTES, 2014)

Os sistemas isolados podem ser classificados em minirredes e individuais. No sistema isolado em minirredes a geração é dividida entre um grupo de unidades consumidoras, enquanto que no sistema isolado individual é exclusiva de uma única unidade consumidora (GTES,2014).

2.1.8 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A geração de energia solar depende de fatores climáticos como radiação e temperatura. Desta forma, recomenda-se o uso de baterias para armazenar a energia que está sendo gerada pelos painéis fotovoltaicos e não está sendo consumida pela carga. Tal energia pode ser utilizada posteriormente, como por exemplo, durante o período noturno. De acordo com GTES (2014), as baterias mais utilizadas são as baterias Chumbo-ácido e as baterias estacionárias com placas tubulares.

As baterias Chumbo-ácido podem ser divididas em *a) convencionais* (úmidas) - mais baratas e mais utilizadas, demandam reposição de água, limpeza dos contatos e ambientes ventilado; *b) eletrólito em gel* - não demandam ventilação nem reposição de água, e a tensão e velocidade de recarga são mais baixas que as demais baterias; e *c) AGM (Absorbed Glass Mat)* (seladas) - são bem mais caras, recomendadas para local remoto ou sem ventilação e não demandam manutenção (GTES, 2014).

As baterias estacionárias com placas tubulares (OP_zS e OP_zV) apresentam características construtivas semelhantes. O objetivo dessas placas tubulares é a manutenção da matéria ativa confinada, que permite um aumento da vida útil (GTES, 2014).

2.1.9 CONTROLADORES DE CARGA

Protege a bateria (ou banco de baterias) contra cargas e descargas excessivas, aumentando a sua vida útil (GTES, 2014).

Quando a bateria estiver com sua carga totalmente carregada ou com a sua carga em um nível de segurança mínimo, os controladores devem desconectar o gerador fotovoltaico por segurança. Alguns controladores também supervisionam o desempenho do sistema fotovoltaico isolado através dos parâmetros de corrente e tensão de carregamento da bateria ou da carga; e ativam alarmes caso haja algum problema. Para aumentar o desempenho do controlador de carga, pode-se adicionar um sensor de temperatura para compensar o efeito da mudança da temperatura nos parâmetros das baterias (GTES, 2014).

Para o dimensionamento dos controladores de carga devem ser considerados a capacidade, dada em amperes, e a tensão de operação V_{cc} . Hoje em dia, encontram-se

controladores de carga que atuam em diferentes faixas de tensão (PINHO et al., 2008).

2.1.10 CONVERSORES CC-CA

Também conhecido como inversor, é um dispositivo que, na sua entrada, recebe uma energia elétrica em corrente contínua (CC) e fornece em corrente alternada (CA) O inversor deve fornecer uma tensão com frequência sincronizada com a rede e fornecer a potência demandada pelas cargas que estão acopladas na sua saída (GTES, 2014).

2.1.11 CONVERSORES CC-CC

Os conversores CC-CC têm como função aumentar ou reduzir a tensão CC na saída do conversor. Quando os conversores aumentam as tensões de entrada são denominados conversores elevadores, *boost* ou *step-up* e quando reduzem as tensões de entrada são chamados de conversores abaixadores, *buck* ou *step-down*.

No caso do sistema fotovoltaico será empregado conversores elevadores pois o nível de tensão CC gerado pelos painéis fotovoltaicos são baixos e, assim, conectá-los a entrada do inversor.

2.1.12 SEGUIDOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

Um arranjo operando nas condições de radiação uniforme (sem sombreamentos parciais) tem uma curva P-V como mostrado na figura 2.7. Pode-se observar um único ponto denominado MPP – ponto de potência máxima e o produto da corrente pela tensão neste ponto em o seu valor máximo (GTES, 2014).

A corrente na saída dos módulos fotovoltaicos é diretamente proporcional à irradiação solar e muito pouco afetada pela temperatura da célula. Entretanto, a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura. Com isso, os valores de corrente e tensão de potência máxima (I_{PM} , V_{PM} e P_{PM}) são dependentes das condições de irradiação e de temperatura da célula (GTES, 2014).

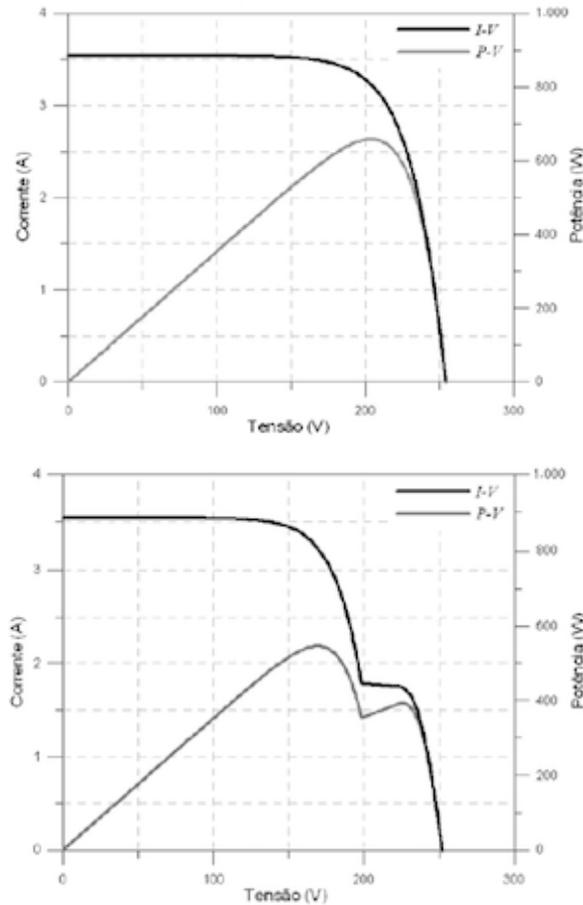


Figura 2.9: Curvas I-V e P-V de um gerador mostrando os máximos locais na curva de potência sem sombreamento e com um dos módulos com um fator de sombreamento de 50%.

(GTES, 2014)

O seguidor de ponto de máxima potência é um mecanismo de controle que observa constantemente as alterações medidas na curva característica I-V e opera sobre a eletrônica do inversor e/ou conversor CC-CC para que os painéis fotovoltaicos gerem a tensão correspondente ao ponto de máxima potência (MPP – maximum power point) (GTES, 2014).

2.2 GERADOR A DIESEL

O gerador a diesel é composto, basicamente, por duas partes principais, a máquina síncrona e o motor a diesel. A máquina síncrona é responsável pela geração, efetivamente, da potência elétrica, porém, como sabemos, precisa-se de uma outra fonte de potência para que se consiga gerar essa potência elétrica. A função do motor a diesel é, justamente, fornecer a potência mecânica à máquina síncrona para que esta produza a

potência elétrica.

Nesta seção faremos uma explanação teórica a respeito da máquina síncrona, onde abordaremos o campo magnético girante, o conjugado induzido, os aspectos construtivos e a velocidade de rotação nos geradores síncronos.

2.2.1 FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

2.2.1.1 O CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

O princípio básico de funcionamento de uma máquina CA sedimenta-se sobre a ideia do campo magnético girante. Caso dois campos magnéticos estejam presentes em uma máquina, um torque será criado e tenderá a alinhar os dois campos magnéticos. Se um campo magnético é gerado pelo estator de uma máquina CA e o outro é produzido pelo rotor, então um conjugado será induzido no rotor que fará o rotor girar e se alinhar com o campo magnético do estator (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

Se tivermos dois campos magnéticos frente a frente, quando fazemos um deles girar, forçamos o surgimento de um torque induzido no outro, fazendo com que o segundo campo persiga o primeiro. Se estendermos este pensamento para o estator e o rotor de uma máquina síncrona podemos entender o princípio de funcionamento, onde o campo do rotor segue o campo do estator (CHAPMAN, 2013).

Esse princípio de funcionamento é possível de ser implementado através das correntes trifásicas de mesma magnitude e defasadas entre si de 120°, fluindo pelos enrolamentos trifásicos das máquinas. Quando isso ocorre, um campo magnético girante de módulo constante surge. Um enrolamento trifásico é produzido por três bobinas espaçadas igualmente entre si, em graus elétricos (CHAPMAN, 2013).

O campo magnético girante possui uma característica muito útil, que é a inversão do sentido de rotação. Essa inversão é possível, apenas, trocando o sentido das correntes de quaisquer duas bobinas. Essa inversão no sentido das correntes e, conseqüentemente, na rotação do campo magnético é feita alterando-se as conexões de dois dos três enrolamentos (CHAPMAN, 2013).

Assim como podemos pensar em um conjunto de correntes trifásicas gerando um campo magnético girante, podemos pensar também que um campo magnético girante pode gerar um conjunto de correntes induzidas em uma máquina elétrica, bem como tensões induzidas nos enrolamentos, todas defasadas de 120° (CHAPMAN, 2013).

2.2.1.2 CONJUGADO INDUZIDO EM UMA MÁQUINA CA

Nas máquinas CA existem dois circuitos magnéticos principais, os quais são chamados de circuito de campo ou do rotor e circuito de armadura ou do estator. Esses dois campos interagem entre si de tal forma que produzem o torque elétrico da máquina CA, este torque tenderá a tentar alinhá-los (CHAPMAN, 2013).

Na figura 2.8 podemos observar uma máquina CA simplificada com uma distribuição senoidal de fluxo no estator, cujo máximo aponta para cima, e uma bobina com uma única espira montada no rotor. A distribuição de fluxo no estator dessa máquina é (CHAPMAN, 2013):

$$B_s(\alpha) = B_s \sin \alpha \quad (2.6)$$

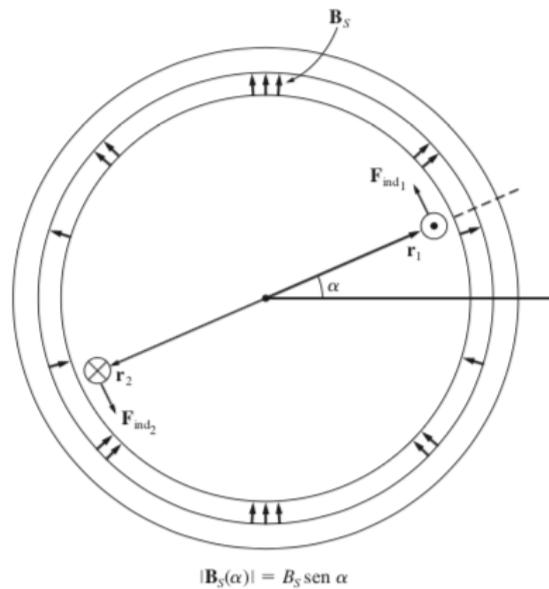


Figura 2.10: Uma máquina CA simplificada, com distribuição senoidal de fluxo no estator e uma bobina com espira única de fio montada no rotor.

(CHAPMAN, 2013)

A corrente que flui nas bobinas do circuito de campo da máquina produz um campo magnético que tem seu sentido determinado pela regra da mão direita e sua intensidade é diretamente proporcional à corrente do rotor (CHAPMAN, 2013).

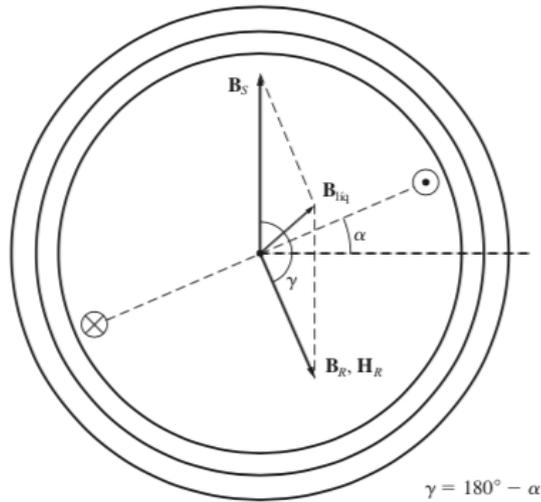


Figura 2.11: As componentes de densidade de fluxo magnético no interior da máquina da figura 2.8.

(CHAPMAN, 2013)

Partindo dessas duas observações temos que o conjugado na bobina do rotor pode ser expresso como

$$\tau_{ind} = K H_R B_s \text{sen} \alpha \quad (2.7)$$

em que K é uma constante que depende da construção da máquina (CHAPMAN, 2013).

O campo magnético líquido dessa máquina é a soma vetorial dos campos do rotor e do estator (assumindo que não há saturação):

$$B_{liq} = B_R + B_s \quad (2.8)$$

Esse fato pode ser usado para produzir uma expressão equivalente (e algumas vezes mais útil do que o conjugado induzido na máquina (CHAPMAN, 2013).

$$\tau_{ind} = K B_R B_{liq} \quad (2.9)$$

Quando o torque induzido é oposto ao sentido de rotação do rotor podemos dizer que a máquina está trabalhando como gerador, caso contrário estaria funcionando como motor.

2.2.1.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS GERADORES SÍNCRONOS

O campo magnético das máquinas síncronas é produzido no rotor, por isso o seu circuito também é conhecido como circuito de campo. Para a obtenção desse campo existem, basicamente, duas soluções, o ímã permanente e o eletroímã, que é obtido através

da aplicação e uma corrente CC nas bobinas do rotor. Após acionado, o campo magnético do rotor gera uma tensão induzida nas bobinas do estator (CHAPMAN, 2013).

Geralmente, nos geradores síncronos escolhe-se o método do eletroímã para a construção do rotor. Existem, também, duas maneiras de se construir os polos magnéticos do rotor, que são chamados de polos lisos e polos salientes. O rotor de polos salientes possuem esta denominação, pois ao olharmos para o rotor, de forma radial, podemos perceber que eles se sobressaem como mostrado na figura 2.11. Podemos perceber que os enrolamentos do eletroímã envolvem o próprio polo. Já no rotor de polos lisos, os enrolamentos são encaixados em ranhuras na superfície do rotor, permanecendo ao mesmo nível, sem sobressair. Na figura 2.10 podemos observar como os enrolamentos são encaixados nas fendas existentes na superfície. Os rotores de polos lisos são usados normalmente em máquinas de dois e quatro polos, de modo que os rotores de polos salientes são comumente usados em rotores de quatro ou mais polos (CHAPMAN, 2013).

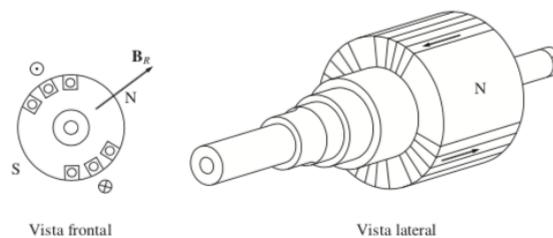


Figura 2.12: O rotor de dois polos não salientes de uma máquina síncrona. (CHAPMAN, 2013)

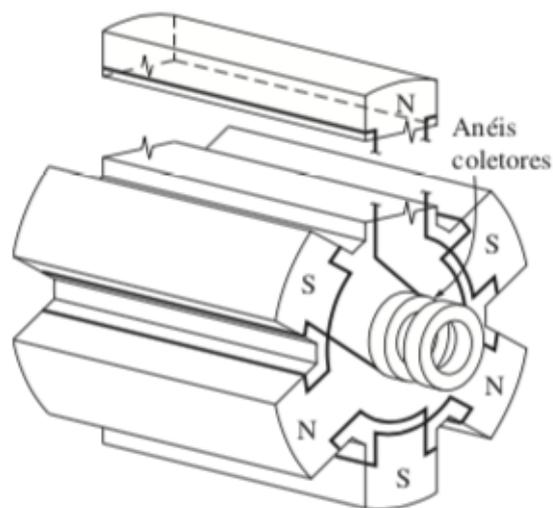


Figura 2.13: Rotor de seis polos salientes de uma máquina síncrona. (CHAPMAN, 2013)

Os campos magnéticos variantes podem fazer surgir correntes parasitas, por isso os rotores são construídos por lâminas delgadas, a fim de reduzir as perdas provenientes dessas correntes (CHAPMAN, 2013).

Nos rotores onde são utilizados elétrima para produzir o campo magnético, faz-se necessário o fornecimento de uma corrente CC à este circuito para que o mesmo funcione. Além disso, pelo fato de estarmos tratando de um conjunto girante, conexões feitas, simplesmente, por fios não são adequadas, logo necessita-se de tipo de conexão diferenciado para este tipo de circuito girante. Normalmente utilizam-se duas abordagens para fornecer a potencia CC (CHAPMAN,2013):

- A partir de uma fonte CC externa, fornecendo a a potencia CC para o rotor por meio de escovas e anéis coletores (ou deslizantes); e
- Fornecendo a potencia CC a partir de uma fonte montada diretamente no eixo do gerador síncrono.

Os anéis coletores são feitos de metal e envolvem o eixo da máquina, porém permanecem isolados do eixo. Os terminais da fonte CC externa são conectados aos anéis coletores do eixo da máquina, este contato é feito através de uma escova estacionária. A escova é um bloco feito de carbono, que conduz eletricidade e possui baixo atrito a fim de que não desgaste os anéis coletores. Conectando-se o terminal positivo da fonte externa à uma escova e o negativo à outra, uma tensão CC será aplicada ao circuito de campo, independente de velocidade de rotação ou posição angular (CHAPMAN, 2013).

Em geradores de grande porte costuma-se utilizar as excitatrizes sem escovas para o fornecimento da corrente CC ao circuito de campo. A excitatriz sem escovas funciona como um pequeno gerador CA montado no eixo da máquina principal. Como o objetivo é fornecer uma corrente CC ao circuito de campo, um retificador trifásico precisa ser montado no eixo da máquina. O esquemático deste circuito é mostrado na figura 2.12 e a construção da máquina é mostrada na figura 2.13. Pelo fato de não haver contatos diretos, como no caso das escovas e anéis coletores, as excitatrizes sem escovas demandam muito menos manutenção (CHAPMAN, 2013).

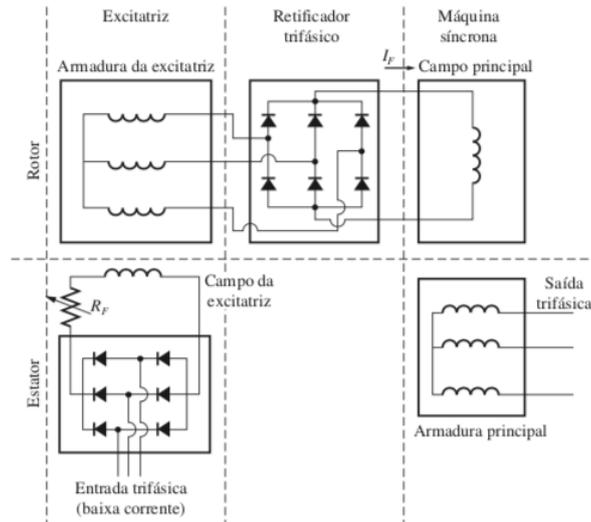


Figura 2.14: Um circuito de excitatriz sem escovas. Uma corrente trifásica de baixa intensidade é retificada e utilizada para alimentar o circuito de campo da excitatriz, o qual está localizado no estator. A saída do circuito de armadura da excitatriz (no rotor) é então retificada e usada para fornecer a corrente de campo da máquina principal. (CHAPMAN, 2013)

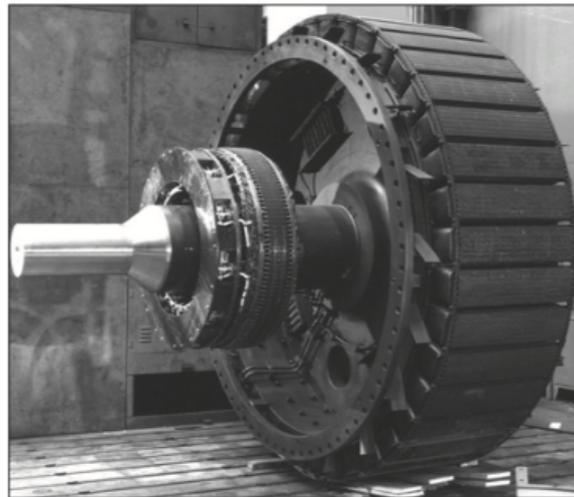


Figura 2.15: Fotografia de um rotor de máquina síncrona, com uma excitatriz sem escovas montada no mesmo eixo. (CHAPMAN, 2013)

A utilização de uma excitatriz piloto faz com que o gerador seja completamente independente de fontes externas. A excitatriz piloto é um pequeno gerador CA de ímã permanente montado no eixo da máquina a fim de fornecer potência para o circuito de campo da excitatriz, que controlará o circuito de campo da máquina principal a figura 2.14 mostra o esquemático do circuito com a excitatriz piloto (CHAPMAN, 2013).

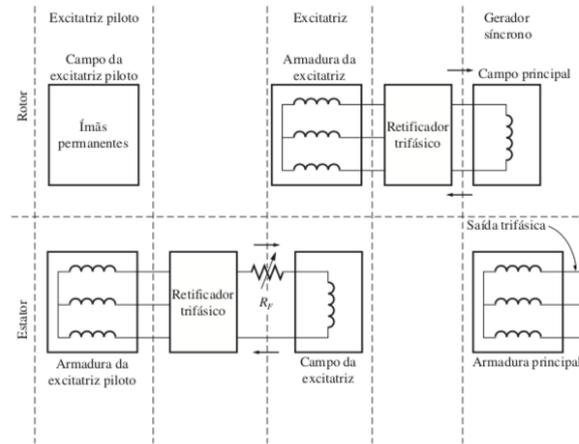


Figura 2.16: Esquema de excitação sem escovas que inclui uma excitatriz piloto. Os ímãs permanentes da excitatriz piloto produzem a corrente de campo da excitatriz, a qual por sua vez produz a corrente de campo da máquina principal.

(CHAPMAN, 2013)

2.2.1.4 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO

Nos geradores síncronos a frequência elétrica das tensões e correntes produzidas é dependente da velocidade de rotação mecânica do rotor. A frequência elétrica do sistema relaciona-se com a velocidade mecânica do rotor e com o número de polos da máquina de acordo com a seguinte relação (CHAPMAN, 2013):

$$f = \frac{wP}{120} \quad (2.10)$$

em que

- f é a frequência elétrica, em Hz;
- w velocidade mecânica do campo magnético, em rpm (igual a velocidade do rotor nas máquinas síncronas; e
- P é o número de polos;

A velocidade de rotação síncrona de um gerador vai depender de seu número de polos. Por exemplo, para gerar potência a 60 Hz em uma máquina de quatro polos, precisamos que o rotor gire a uma velocidade de 1800 rpm (CHAPMAN, 2013).

2.2.2 MOTORES DIESEL

Os motores a combustão podem ser classificados como de combustão externa ou combustão interna. Nos motores de combustão externa o calor produzido é transmitido através

das paredes dos retervatórios, já nos motores a combustão interna o trabalho resulta das expansão da mistura ar-combustível após a combustão (TILLMANN, 2013).

Trataremos, nessa seção, dos motores a combustão interna de pistão, onde se enquadram os motores a diesel. Esses motores podem ter dois tipos de ciclos: o Ciclo Otto e Ciclo Diesel.

2.2.2.1 CICLO OTTO E CICLO DIESEL

A principal diferença entre esses ciclo é relativa ao método de ignição. No Ciclo Otto a ignição se dá através de um centelhamento. Nesses motores a mistura ar-combustível é admitida, comprimida e inflamada por uma centelha produzida pelas velas de ignição. Já no Ciclo Diesel, apenas o ar é admitido e comprimido até que alcance a condição de temperatura e pressão suficiente para a combustão espontânea da mistura, quando o combustível for injetado. Os motores a combustão interna de pistão podem ser classificados, ainda, quanto ao número de tempos, podendo ser de dois ou quatro tempos (TILLMANN, 2013). A seguir apresentaremos o funcionamento dos motores de quatro tempos, pois são largamente empregados em grupos geradores diesel.

2.2.2.2 MOTORES DE QUATRO TEMPOS

Nos motores de quatro tempos ocorrem, continuamente, a admissão, a compressão, a expansão e a exaustão. Esses estágios são chamados de tempos do motor, por isso são motores de quatro tempos (TILLMANN, 2013).

No primeiro tempo (admissão) o cilindro faz um movimento para baixo, realizando a admissão da mistura ar-combustível, no caso motor Otto, ou somente de ar, no caso do motor Diesel. Durante esse movimento descendente a válvula de admissão permanece aberta e a válvula de exaustão fechada (TILLMANN, 2013).

No segundo tempo, quando a válvula de admissão se fecha, ocorre a compressão, através do movimento ascendente do pistão. O pistão sobe até uma posição máxima, denominada ponto morto superior. Ao atingir o ponto de máxima compressão é realizada a ignição, que no caso do Ciclo Otto é feita por centelhamento e no caso do Ciclo Diesel é feita através da injeção de combustível (TILLMANN, 2013).

No terceiro tempo ocorre a expansão do volume, com o pistão realizando um novo movimento descendente. Nesse momento ocorre a geração de potência do motor, pois com a combustão o volume da mistura ar-combustível é aumentado, realizando uma força sobre o pistão (TILLMANN, 2013).

No terceiro tempo, quando o pistão alcança sua posição inferior, denominada ponto morto inferior, a válvula de exaustão é aberta e o pistão realiza novamente um movimento ascendente, expulsando a mistura queimada (TILLMANN, 2013).

2.2.3 GRUPO GERADOR A DIESEL

Ao se acoplar um motor e uma máquina síncrona, juntamente com seu sistema de controle e regulação, em uma mesma plataforma, denomina-se esse equipamento de Grupo Gerador, que pode realizar seu funcionamento autônomo, gerando energia elétrica.

Os grupos geradores são utilizados tanto em locais remotos, onde o custo de fornecimento de energia elétrica é muito elevado, quanto em locais que necessitam de fornecimento de energia ininterrupto, como hospitais.

Os grupos geradores vêm sendo utilizados em conjunto com sistemas alternativos de energia, tais como eólico e solar, constituindo os sistemas híbridos, foco de estudo deste trabalho. O principal objetivo destes sistemas híbridos é a redução do consumo de óleo diesel, tendo em vista as grandes dificuldades logísticas no fornecimento do combustível em áreas remotas. Um bom exemplo desse tipo de sistema é o projeto realizado em Tamaruteua, onde foi montado um sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel (PINHO et al., 2008).

2.2.3.1 UNIDADE DE SUPERVISÃO DE CORRENTE ALTERNADA (USCA)

O controle e a monitoração dos grupos geradores são realizados pela Unidade de Supervisão de Corrente Alternada (USCA). A USCA é capaz de realizar tanto a partida quanto a parada do grupo gerador, bem como realizar a medição de corrente, tensão, frequência e temperatura de operação do sistema.

2.2.3.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO GRUPO GERADOR A DIESEL

Os geradores a diesel apresentam as seguintes vantagens (PINHO et al., 2008):

- Baixo custo de aquisição se comparados com sistemas eólicos ou fotovoltaicos;
- Fácil manutenção e reposição de peças;
- Ampla faixa de potências disponíveis comercialmente;
- Robustez do sistema

Como desvantagens podemos citar (PINHO et al., 2008):

- Dificuldades de logística no transporte e distribuição do óleo diesel;
- Poluição do meio ambiente, através da emissão de gases;
- Poluição sonora, caso não seja possível a construção de uma cabine adequada para o confinamento do ruído;

2.3 SISTEMAS HÍBRIDOS

Em algumas regiões do Brasil, devido ao alto custo de implantação de linhas de transmissão e construção de subestações, inexistente fornecimento de energia elétrica. Nessas localidades o meio de geração de energia elétrica mais utilizado são os grupos geradores diesel.

Apesar de os grupos geradores a diesel serem amplamente utilizados em localidades isoladas, sua operação não é trivial. As principais complicações na operação dos geradores a diesel dizem respeito à grande dificuldade de transporte e armazenamento do óleo diesel, bem como a necessidade, constante, de manutenção nos motores a diesel, ao custo do combustível e ao impacto ambiental devido à queima de combustíveis fósseis (PINHO et al., 2008).

Em algumas localidades existe o potencial para a instalação de geradoras de energia elétrica baseada em fontes renováveis. Porém devido ao alto custo de instalação, torna-se necessária uma boa caracterização dos recursos energéticos existentes, bem como da demanda energética (PINHO et al., 2008).

Existem regiões onde há a disponibilidade de mais de uma fonte de energia. A combinação dessas fontes pode ser economicamente viável e ainda conferir um maior grau de flexibilidade e confiabilidade ao sistema instalado. Essa ideia da integração de duas ou mais fontes energia, define o sistema híbrido de geração, onde uma fonte pode cobrir a deficiência de outra ou, nos casos em que existem geradores a diesel, pode reduzir o consumo de combustível, otimizando o consumo de diesel (PINHO et al., 2008).

Geralmente os sistemas híbridos são isolados da rede elétrica, sendo compostos pelas fontes renováveis como energia eólica, solar ou hidráulica, fontes não renováveis, como os geradores a diesel, banco de baterias, que são os armazenadores de energia e pelos inversores de tensão.

2.3.1 PRINCIPAIS TIPOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Os principais tipos de sistemas híbridos são (PINHO et al., 2008):

- Sistema eólico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-eólico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-eólico;

2.3.1.1 SISTEMA EÓLICO-DIESEL

O sistema eólico-diesel é o mais difundido mundialmente, tendo sido aplicado desde a década de 1970. Nesse tipo de sistema as fontes podem atuar em paralelo ou não, bem como o gerador diesel pode ser utilizado como fonte principal e a geração eólica usada para economizar combustível ou o gerador diesel pode ser utilizado como fonte secundária com o objetivo de manter a continuidade de fornecimento de energia. O gerador diesel como fonte secundária é utilizado, normalmente, em sistemas de pequeno porte (PINHO et al., 2008).

Para a implementação desse tipo de sistema híbrido faz-se necessária a instalação dos aero geradores associados ao gerador diesel. Para essa associação necessita-se de um sistema de gerenciamento do suprimento da carga, bem como dispositivos de conversão de potência para adequar a energia gerada à demandada pela carga (PINHO et al., 2008).

2.3.1.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO-DIESEL

A utilização desse tipo sistema vem se difundindo cada vez mais, devido a redução nos custos de aquisição e instalação dos sistemas fotovoltaicos. Este sistema assemelha-se ao eólico-diesel, porém aqui a geração diesel é utilizada como fonte principal, tendo em vista que não existe geração solar durante os períodos noturnos.

Para a implantação de um sistema fotovoltaico-diesel são necessários os módulos fotovoltaicos, o conjunto inversor, composto pelo MPPT e inversor, própria mente dito, gerador diesel, sistema de armazenamento de energia, além do sistema de gerenciamento de suprimento da carga.

2.3.1.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO-EÓLICO-DIESEL

Devido aos bons resultados obtidos com os sistemas eólico-diesel e fotovoltaico-diesel, iniciou-se o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaico-eólico-diesel. Ao unir duas fontes renováveis ao gerador diesel consegue-se reduzir ainda mais o consumo de diesel, reduzindo

os custos atrelados a esse combustível. Além disso a confiabilidade do sistema é aumentada (PINHO et al., 2008).

Para fins de implantação do sistema, os mesmos equipamentos dos sistemas eólico-diesel somados aos do sistema fotovoltaico-diesel, são necessários.

2.3.1.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO-EÓLICO

Este tipo de sistema busca explorar a complementaridade entre as fontes eólica e solar. A grande vantagem desse sistema é a não utilização de combustíveis fósseis. Porém, devido a grande intermitência das fontes utilizadas, faz-se necessário um sistema de armazenamento de energia maior quando comparado aos sistemas que utilizam o gerador diesel (PINHO et al., 2008).

3 INTEGRAÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES DE ENERGIA

O presente capítulo tem o propósito de apresentar soluções de integração entre o sistema fotovoltaico e o sistema diesel. É de vital importância que se apresente as diversas configurações dos conversores e controladores que constituem o sistema fotovoltaico.

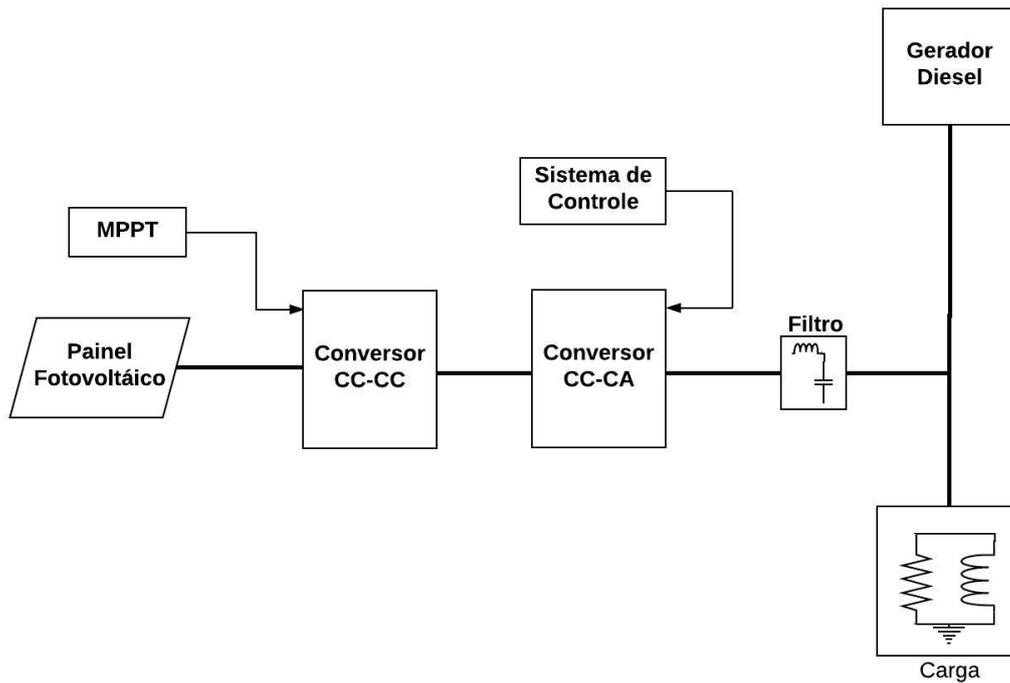


Figura 3.1: Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico-diesel.

A figura 3.1 apresenta os blocos que compõem o sistema fotovoltaico-diesel. O painel fotovoltaico recebe como parâmetros de entrada a radiação solar e a temperatura e gera uma tensão e corrente CC. O conversor CC-CC recebe os pulsos gerado pelo seguidor de máxima potência e eleva a tensão de saída dos painéis. Na saída deste conversor, transforma-se a tensão e corrente para o nível CA através do conversor CC-CA. Através do sinal de controle, o conversor CC-CA chaveia seus componentes eletrônicos e gera na saída tensões e correntes CA de acordo com as referências do controlador. Após esta conversão, há a presença de um filtro que irá retirar os componentes harmônicos do sinal, a carga a ser alimentada por este sistema fotovoltaico e, por fim, o gerador diesel.

As topologias dos conversores e as estratégias de controle explanadas ao longo deste capítulo irão auxiliar o embasamento teórico da integração fotovoltaica-diesel realizada

neste trabalho. O capítulo se dividirá em quatro blocos:

- conversor CC-CC e seu princípio de funcionamento;
- seguidor de máxima potência e os tipos de algoritmos existentes para este sinal de controle;
- conversor CC-CA e suas diversas classificações; e
- estratégia de controle para o inversor com os controles de corrente por histerese, proporcional-integral e proporcional-ressonante.

3.1 CONVERSOR CC-CC

Através do conversor CC-CC é possível gerar uma tensão de saída diferente da tensão de entrada. Desta forma, almeja-se elevar a tensão fornecida pelos painéis fotovoltaicos tornando-a compatível com o nível de tensão exigido pelo conversor CC-CA. O conversor capaz de aumentar a tensão de entrada é conhecido como conversor boost. Na figura 3.2 tem-se a representação do circuito do conversor CC-CC *boost*.

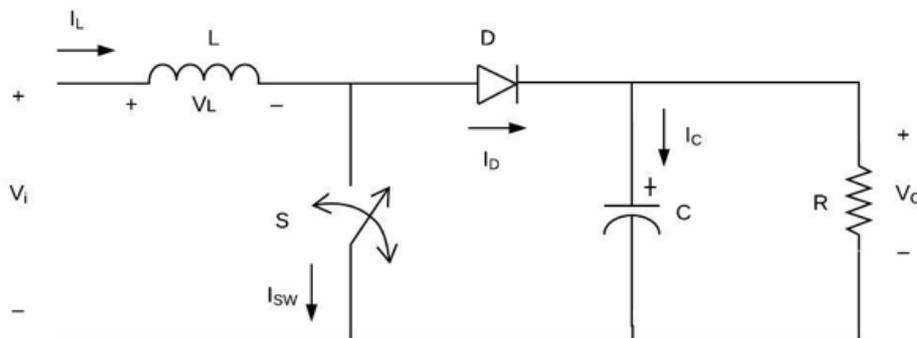


Figura 3.2: Circuito do conversor CC-CC boost.

Quando a chave está fechada, o estágio de saída do conversor fica isolado pois toda a corrente irá se deslocar no ramo da chave. Durante este período, a energia está sendo armazenada no indutor. No momento em que a chave é aberta, a energia armazenada no indutor é transferida para o capacitor. Desta forma, a tensão do indutor muda sua polaridade e a tensão no capacitor passa a ser maior que a tensão da fonte (MOHAN et al., 2003).

Na figura 3.3 observa-se o comportamento do circuito do conversor CC-CC *boost* quando a chave está aberta e fechada.

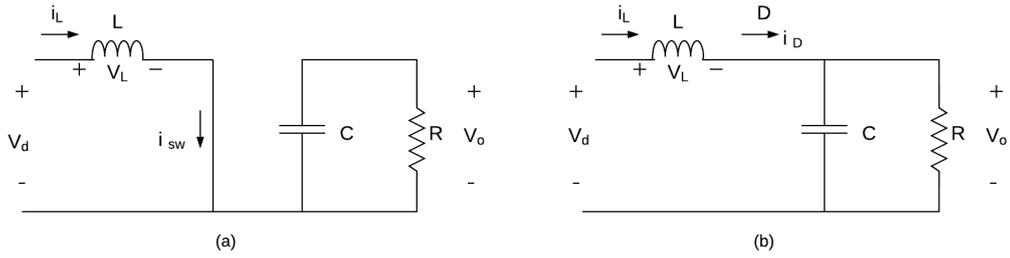


Figura 3.3: Modo de condução contínuo com (a) chave aberta e (b) chave fechada.

Segundo Mohan et al. (2003), o valor da tensão no indutor em estado estacionário durante o período de chaveamento deve ser 0, portanto:

$$V_L t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (3.1)$$

Dividindo os termos por T_s :

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.2)$$

Da expressão 3.2 conclui-se que quanto maior o ciclo de trabalho D , maior será a tensão de saída, que será limitada pelas perdas de potência nos componentes não ideais. O ciclo de trabalho representa uma modulação e varia de 0 a 1. As tensões medidas e desejadas são utilizadas para o cálculo do ciclo de trabalho de acordo com a equação 3.2. O ciclo de trabalho resultante é comparado com uma onda portadora trinagular. Um sinal de controle PWM (*pulse width modulation*) é gerado na saída desse comparador. No instante em que o ciclo de trabalho for maior que a tensão da onda dente de serra, o sinal de saída será 1 e, quando for menor ou igual será 0.

Assumindo um circuito sem perdas, atribui-se que a energia fornecida ao indutor é transferida ao capacitor. Assim, temos que $P_d = P_o$ e portanto:

$$V_d * I_d = V_o * I_o \quad (3.3)$$

Substituindo (3.3) em (3.2) tem-se que:

$$\frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad (3.4)$$

Pode-se chegar ao dimensionamento do menor valor da indutância necessário para se atender ao menor valor de corrente desejado. Segundo MOHAN et al. (2003):

$$L_{min} = V_o * D * (1 - D)^2 * \frac{T}{2I_{o_{min}}} \quad (3.5)$$

Admitindo que a corrente de saída do conversor seja constante, pode-se obter o valor da capacitância do conversor estimando o valor desejado para o *ripple* de tensão (ΔV_0) através da seguinte expressão (MOHAN et al., 2003):

$$C = \frac{\Delta Q}{(\Delta V_0)} = \frac{T * D * I_o}{\Delta V} \quad (3.6)$$

3.2 SEGUIDOR DE MÁXIMA POTÊNCIA

Considerando as características da curva corrente x tensão das células fotovoltaicas serem não lineares, o ponto de máxima potência é bem definido e o seu rastreamento ocorre devido a necessidade de se extrair a maior potência que o sistema fotovoltaico pode fornecer. Nesta seção iremos apresentar os tipos de estrutura e os algoritmos para o controle do seguidor do ponto de máxima potência (também conhecido como MPPT)

3.2.1 TIPOS DE ESTRUTURAS

As estruturas para o seguidor de máxima potência apresentam configurações diferentes entre si, caracterizando-se pela quantidade de MPPTs acopladas na entrada do inversor e o quanto de flexibilidade e aumento da eficiência que podem trazer de benefícios ao sistema. As estruturas de MPPT centrais e em série são as mais comuns e podem ser consideradas como configuração padrão. O MPPT modular é uma estrutura que aumenta a eficiência de acordo com as condições atmosféricas e condições de sombreamento. A estrutura híbrida apresenta a possibilidade de apenas uma parte da série MPPT ser equipada com a estrutura modular, o que aumenta a performance do sistema (BLAADJERG; IONEL, 2017).

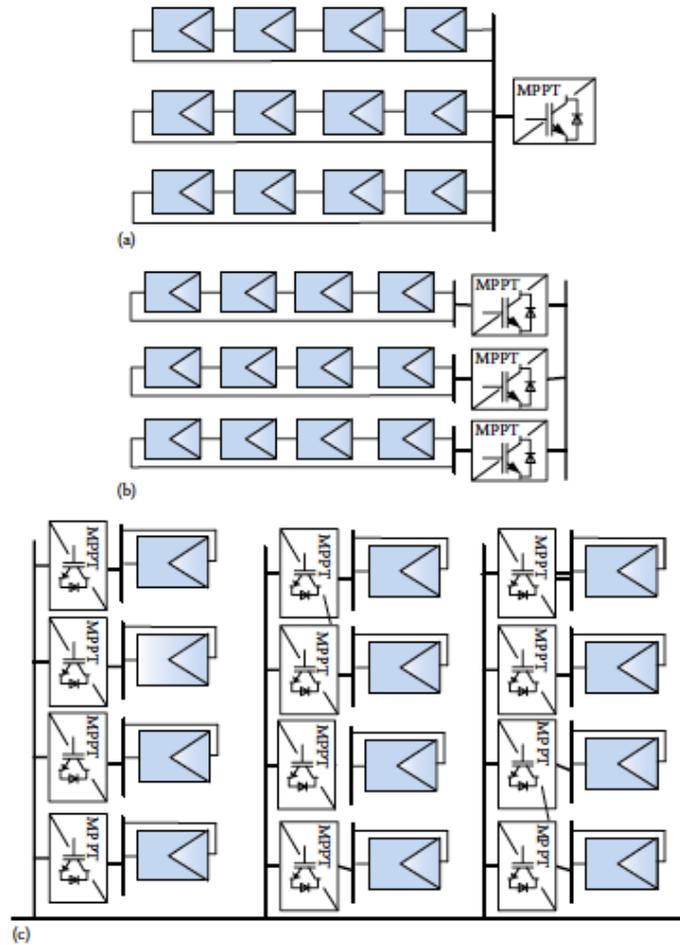


Figura 3.4: Estrutura de MPPT (a) central, (b) em série e (c) modular. (BLAAdjERG; IONEL, 2017)

3.2.2 MÉTODO DE PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO

Conhecida como P&O, é de simples implementação. Conhecendo a potência verificada em uma etapa passada e comparando este valor com a potência atual que é função da radiação e temperatura do painel solar, a tensão irá ser elevada ou reduzida de modo que a potência seja alterada na direção do ponto em que a potência fornecida pelos painéis seja a máxima possível (CALAÇA, 2016).

Depois da variação da tensão, o procedimento é efetuado novamente, mesmo quando o ponto de máxima potência é atingido. Em condições favoráveis da potência de entrada não variar bruscamente, o sinal de controle ficará se movendo alternadamente nas fronteiras do ponto de máxima potência. Uma maneira de melhorar a precisão do algoritmo é diminuindo o passo, embora torne a resposta mais devagar. Uma solução efetiva seria variar a resolução de passo nas vizinhanças do MPP. O diagrama abaixo descreve o algoritmo P&O (CALAÇA, 2016).

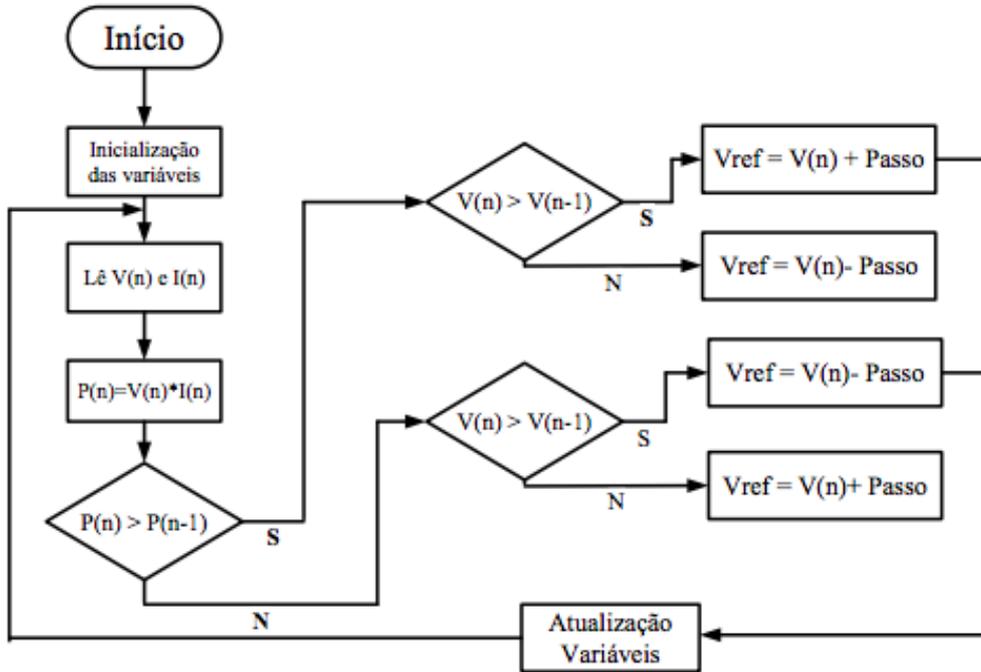


Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo P&O.
(CALAÇA, 2016)

3.2.3 ALGORITMO CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

Similar ao método anterior, entretanto possui resultados mais satisfatórios em regime permanente e para variações repentinas de potência. Esta técnica consiste na análise da derivada da curva P-V. A derivada é positiva à esquerda da curva, negativa à direita e nula no MPP (CALAÇA, 2016).

Conforme Calaça (2016), o algoritmo compara a condutância incremental, dI/dV , com a condutância instantânea, I/V conforme equação abaixo:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{d(I)}{dV} = 0 \quad (3.7)$$

Segundo Calaça (2016), calculam-se as condutâncias e verifica-se a inclinação da derivada. Se $d(I)/d(V) = -I/V$, o declive é zero e os painéis estão fornecendo o máximo de potência que é possível. Se $d(I)/d(V)$ for diferente de $-I/V$ e a derivada positiva (lado esquerdo da curva P-V), a tensão de referência será aumentada, e se a derivada for negativa (lado direito da curva PV) a tensão de referência será reduzida. Este algoritmo é mais eficiente que o P&O), no entanto utiliza maior recurso de processamento. O fluxograma está representado na figura abaixo:

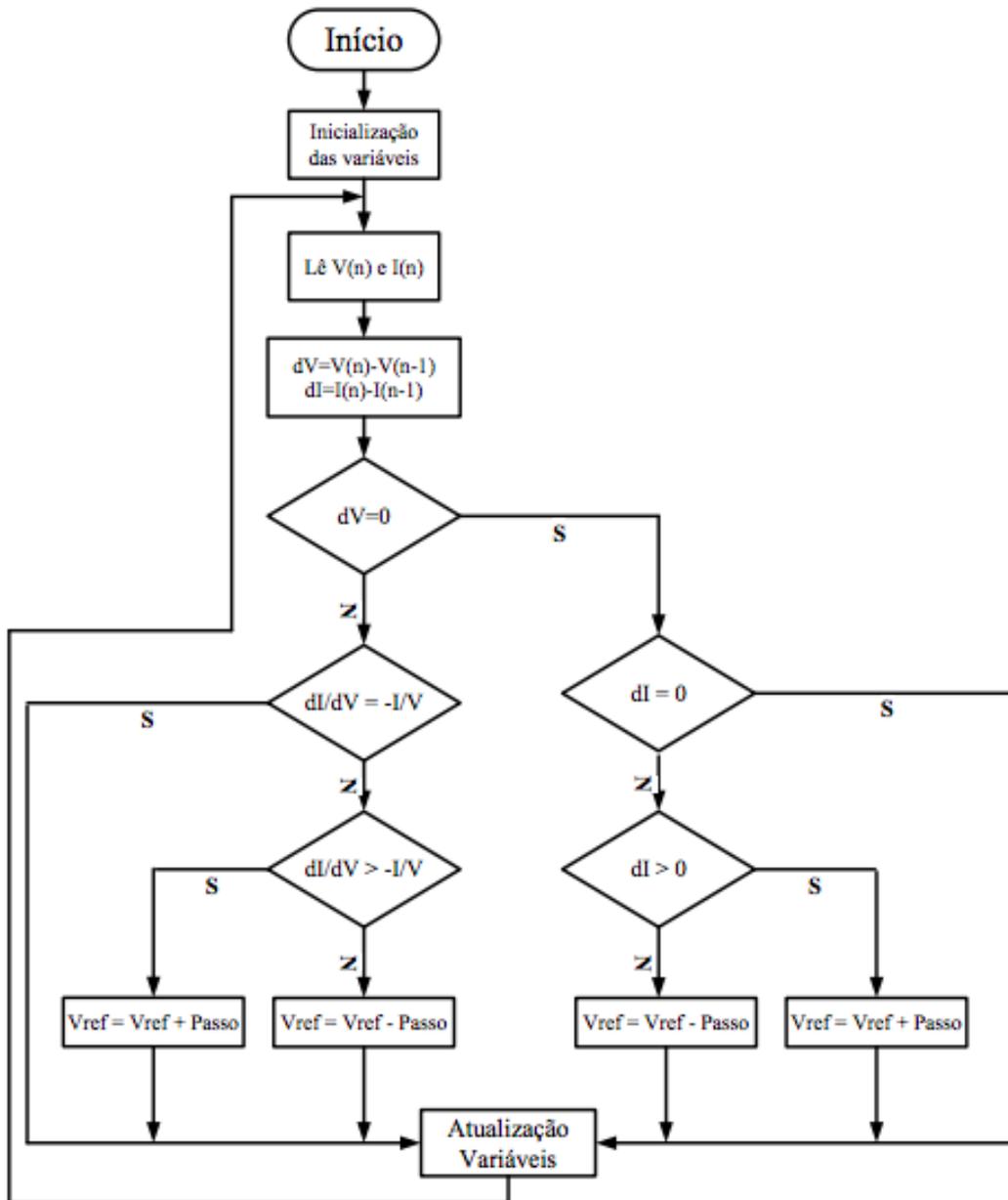


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo de condutância incremental. (CALAÇA, 2016)

3.3 CONVERSOR CC-CA

O conversor CC-CA é um componente eletrônico responsável por transformar as tensões e correntes CC em CA. É fundamental conhecer os diferentes tipos de estruturas e topologias porque os conversores são utilizados para compatibilizar as diferentes fontes de energia sempre que for necessário, de acordo com as condições de emprego pode-se utilizar tipos e arranjos diferentes.

Os conversores CC-CA são utilizados tanto nos sistemas fotovoltaicos, como nos sistemas eólicos. Nos sistemas fotovoltaicos sua necessidade dá-se naturalmente, pois a potência produzida é, originalmente, CC, porém a grande maioria das cargas usuais são CA. Já nos sistemas eólicos, apesar de a potência gerada ser CA, devido a grande intermitência e variação na velocidade do vento existem muitas oscilações na frequência das tensões e correntes produzidas. Esse fato faz com que a tensão gerada seja retificada e, em seguida, convertida para a forma CA, através do conversor CC-CA.

3.3.1 QUANTO AO MODO DE COMUTAÇÃO

Nos processos de estágio único é utilizado um conversor CC-CA, enquanto que nos processos com dupla conversão, o primeiro estágio é formado por conversores CC-CC e o segundo estágio por um conversor CC-CA. (DE ALMEIDA, 2013).

3.3.2 QUANTO À POTÊNCIA GERADA

De acordo com De Almeida (2013), podem ser classificados como:

- Módulos de inversores integrados: operam na faixa de potência de 50 a 400 W para plantas PV muito pequenas;
- Inversores em string: operam na faixa de 0,4 a 2 kW para pequenas plantas que os painéis são associados em uma string;
- Inversores em multistring: operam na faixa de 1,5 a 6 kW para plantas de porte médio e os painéis são conectados em uma ou duas strings;
- Pequenos inversores centrais: operam utilizando potências superiores a 6 kW com topologia trifásica e projeto modular, para plantas de grande porte em telhados ou pequenas plantas de potência na faixa de 100 kW.
- Inversores centrais: tipicamente na faixa de potência de 100 a 1000 kW com topologia trifásica e projeto modular, para grandes plantas de potência na faixa de dezenas de MW.

3.3.3 QUANTO AO USO DO TRANSFORMADOR

Conforme De Almeida (2013), podem ser classificados como:

- topologias sem transformadores (transformerless);

- topologias com transformadores de alta frequência; e
- topologias com transformadores de baixa frequência.

Para sistemas de baixa potência, o conversor CC-CA pode ser ligado diretamente à rede sem a utilização de um transformador. Este tipo de configuração possui maior eficiência, tamanho e custo reduzidos. Em contrapartida, apresenta problemas com correntes de fuga para terra (conhecido como ground current leakage) e injeção de correntes CC na rede básica (DE ALMEIDA, 2013)

Os problemas com corrente de fuga nos sistemas sem transformador ocorrem na conexão momentânea entre os polos do gerador fotovoltaico e o neutro da rede e nas capacitâncias parasitas entre o gerador fotovoltaico e a terra. Por razões de segurança e compatibilidade magnética do sistema, essas correntes devem ser limitadas pelo inversor. A figura abaixo retrata as correntes de fuga se deslocando pela capacitância parasita (ALMEIDA, 2012).

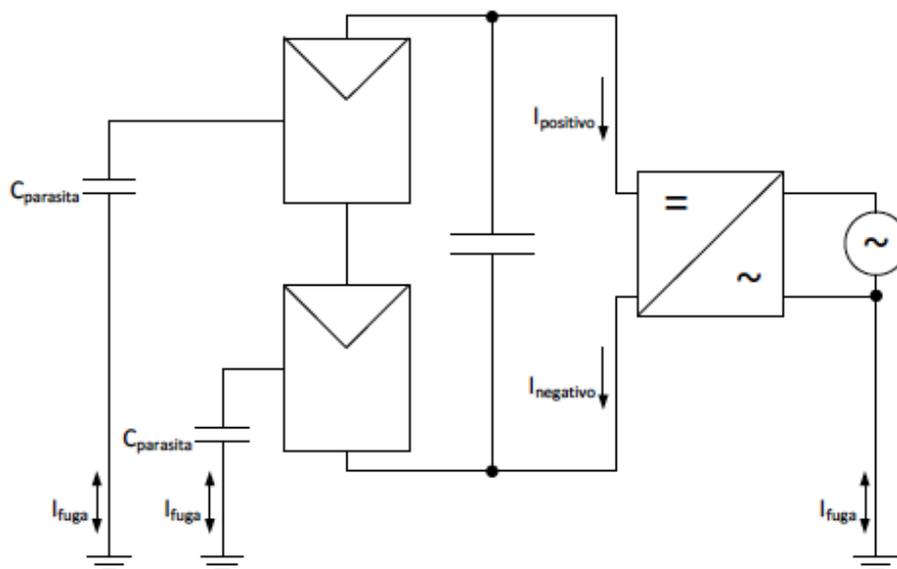


Figura 3.7: Corrente de fuga devido à capacitância parasita em um inversor sem transformador. As correntes I_{positivo} e I_{negativo} são diferentes entre si em função da corrente de fuga

(ALMEIDA, 2012)

Quando os procedimentos de rede exigem a isolação galvânica, deve-se optar pelas topologias com transformadores para a conexão do sistema fotovoltaico à rede básica (DE ALMEIDA, 2013).

Na tabela 3.1 pode-se verificar um quadro resumo entre as duas configurações:

Tabela 3.1: Comparação de características de inversores para conexões à rede com e sem transformador (GTES, 2014)

Com transformador	Sem transformador
<ul style="list-style-type: none"> - Maior peso e volume - Maiores perdas (magnéticas e ôhmicas) - Menor eficiência - Permite PV operar com tensão baixa - Menor interferência eletromagnética - Os circuitos CC e CA são isolados - Menores requisitos de proteção 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor peso e volume - Maior eficiência - Maior interferência eletromagnética - Falta de isolamento entre o lado CC e CA

3.3.4 QUANTO À TOPOLOGIA REFERENTE AO NÚMERO DE NÍVEIS DE TENSÃO

I) inversores de dois níveis de tensão

Consiste em três ramificações e dois comutadores conectados em série. Cada ramo produz uma única fase do sinal de saída. A entrada é um barramento CC com uma tensão V divididos em um ponto de neutro no centro do barramento CC (STRANDT, 2013).

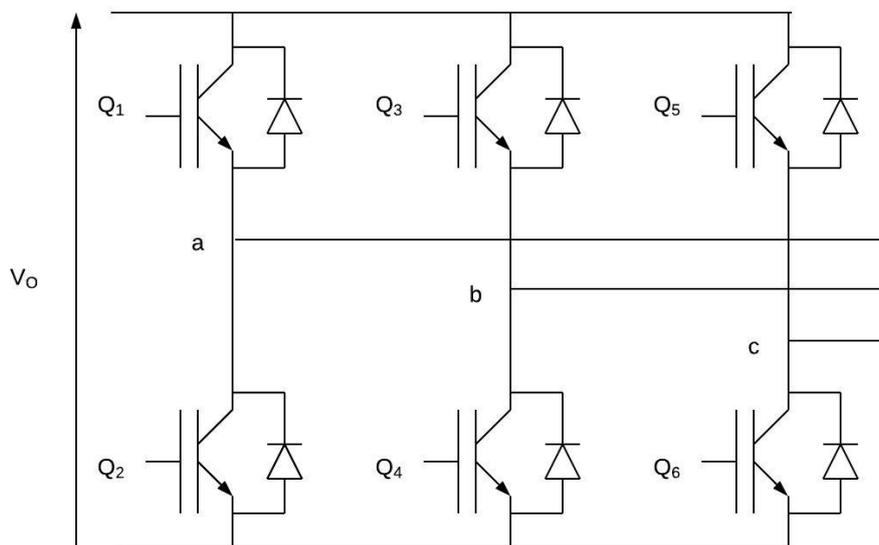


Figura 3.8: Inversor de ponte completa trifásicos

A saída trifásica é gerada através do sequenciamento adequado dos períodos de comutação e dos períodos abertos dos comutadores em cada fase. É importante notar que apenas um dispositivo em cada fase pode conduzir. Assim, evita-se o curto-circuito do

barramento CC. No entanto, ambos os dispositivos podem permanecer abertos no mesmo momento (STRANDT, 2013).

Um inversor de fonte de tensão converte o barramento CC em CA controlando adequadamente os chaveamentos para que cada fase seja conectada sequencialmente aos barramentos positivos e negativos do barramento CC, o que produz pulsos de tensão variáveis no tempo na carga independente da corrente de carga. A topologia básica do inversor de fonte de tensão de dois níveis está mostrada na figura 3.8. Nesta topologia, os comutadores consistem de uma combinação paralela de um IGBT e um diodo antiparalelo. Ao contrário dos comutadores ideais, os IGBTs possuem uma velocidade de comutação curta, mas não instantânea, que podem diferir entre a transição do IGBT para conduzir ou para abrir. Para evitar curto circuito no barramento CC, deve-se permitir um curto tempo que leve em conta a velocidade de comutação dos IGBTs entre a comutação dos IGBTs superiores e inferiores dentro de uma fase. Com isso, os diodos antiparalelos impedem uma mudança instantânea na corrente de carga para cargas indutivas durante o tempo morto nas transições de chaveamento dentro de cada fase (STRANDT, 2013).

II) Inversores de três níveis de tensão e n -níveis de tensão

Serão abordadas três topologias diferentes:

a. Topologia NPC

A topologia NPC é composta por uma fonte de tensão contínua que alimenta um ramo de semicondutores e diodos e um outro ramo com capacitores em série. A quantidade de componentes para n -níveis pode ser calculada por $(n - 1)$ capacitores no barramento CC, $2(n - 1)$ semicondutores de potência e $(n - 1)(n - 2)$ diodos por ramo. Para a figura abaixo com 3 níveis de tensão pode-se verificar 2 capacitores conectados em série e em paralelos com 4 semicondutores e 2 diodos (RODRIGUES, 2011).

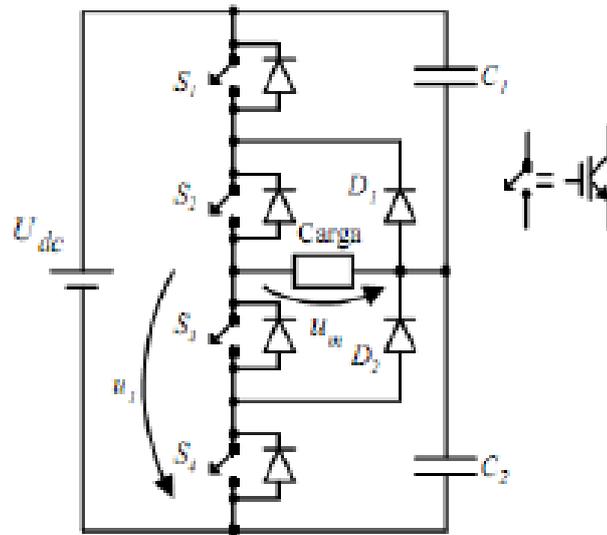


Figura 3.9: Braço de um conversor de diodos ligados ao ponto neutro, com três níveis de tensão.

(RODRIGUES, 2011)

Os diodos são conectados no ponto de neutro, que também pode ser chamado de ponto médio dos capacitores. Os diodos agem dividindo a tensão dos capacitores e fornecendo um caminho livre para a passagem da corrente. Os semicondutores em série, por sua vez, dão um suporte para que o conversor possa operar com tensões mais elevadas (RODRIGUES, 2011).

Segundo tabela abaixo, o conversor de 3-níveis pode-se ter os seguintes valores para a tensão de saída: 0 , $U_{dc}/2$ e U_{dc} ; de acordo com o chaveamento dos interruptores S1, S3, S2 e S4. Pela disposição da topologia, S1 e S2 alternam o seu chaveamento com os interruptores S3 e S4 e vice-versa, logo, quando um par de semicondutores conduzir, o outro estará em corte. Esta operação reduz-se o curto-circuito no ramo do conversor (RODRIGUES, 2011).

Estado dos interruptores				Tensão Saída
S1	S2	S3	S4	U_1
1	1	0	0	U_{dc}
0	1	1	0	$U_{dc}/2$
0	0	1	1	0

Figura 3.10: Combinação de estados dos interruptores para um conversor NPC de três níveis

(RODRIGUES, 2011)

b. Topologia com capacitores flutuantes

É utilizado um capacitor C_m conectado no lugar de diodos apresentados anteriormente e com tensão de $U_{dc}/2$. Inserindo mais capacitores é possível obter o mesmo nível de tensão com diferentes combinações de disparo de semicondutores e capacitores. Esta redundância garante maior flexibilidade ao conversor. No entanto, verifica-se uma dificuldade de equalizar as tensões dos capacitores flutuantes, gerando um esforço estabilizar de tensão desejado (RODRIGUES, 2011).

A quantidade de componentes para n -níveis de tensão nesta topologia é dado por $2(n - 1)$ semicondutores de potência, $(n - 1)(n - 2)/2$ capacitores flutuantes por ramo do conversor e $(n - 1)$ capacitores conectados no link CC. Assim como na topologia (NPC), pode-se utilizar um dos n níveis de tensão e os interruptores alternam seu chaveamento: S1 e S4, e S2 e S3 (RODRIGUES, 2011).

O funcionamento de 3-níveis de tensão, ilustrado na fig , ocorre da seguinte forma:

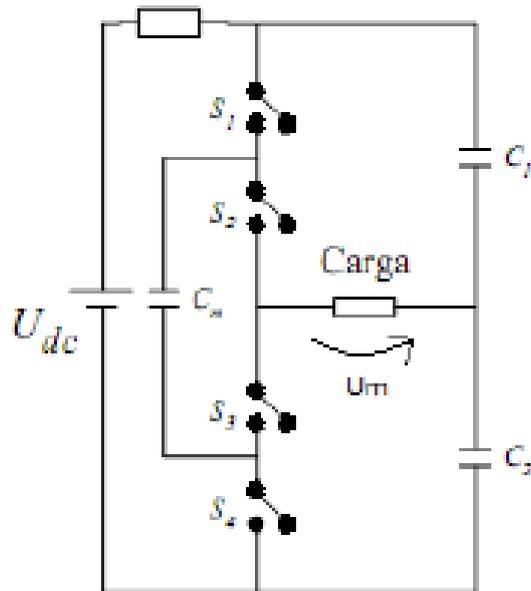


Figura 3.11: Braço de um conversor de capacitores flutuantes.
(RODRIGUES, 2011)

De acordo com a tabela abaixo, os possíveis valores de tensão para U_m são $-U_{dc}/2$, 0 e $U_{dc}/2$. Quando for $-U_{dc}/2$, S3 e S4 devem conduzir. Quando o nível for 0, S1 e S3 ou S2 e S4 devem conduzir e, por fim, quando o nível for $U_{dc}/2$, S1 e S2 devem conduzir. O capacitor flutuante C1 se S1 e S3 conduz, o capacitor flutuante C1 é carregado, caso S2 e S4 conduzam, é descarregado. A estabilidade para C1 ocorre no nível 0 através das combinações redundantes e desta maneira, uma destas combinações carregará ou descarregará o próprio capacitor (RODRIGUES, 2011).

Estado dos interruptores				Tensão Saída
S1	S2	S3	S4	U_1
1	1	0	0	$U_{dc}/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-U_{dc}/2$

Figura 3.12: Combinação de estados dos interruptores para um conversor de compensadores flutuantes.

(RODRIGUES, 2011)

c. Associação série de conversores em ponte

Conhecida por *Cascaded H-Bridges*, é alimentada por fontes de tensão contínuas. Na

figura nota-se uma associação de duas pontes monofásicas. Os valores de tensão: $-U_{dc}/2$, 0 e $U_{dc}/2$. Seja f a quantidade de fontes, o nível de tensão de saída n é dado por $n = 2f + 1$ (RODRIGUES, 2011).

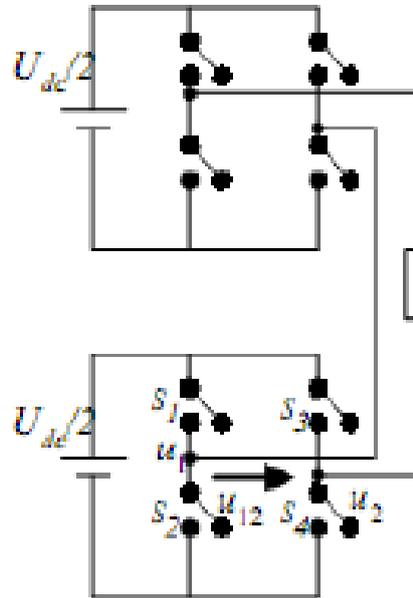


Figura 3.13: Braço de uma associação série de conversores em ponte.
(RODRIGUES, 2011)

Esta topologia não necessita de diodos e capacitores flutuantes como nas topologias já apresentadas, e como não é necessário o balanceamento das tensões capacitivas, menos semicondutores são utilizados. Porém muitas fontes independentes são utilizadas para fornecer os valores de tensão de saída (RODRIGUES, 2011).

A tensão de saída do conversor é a soma dos diferentes níveis de tensão de cada um dos dois conversores monofásicos. As combinações mostradas na tabela abaixo mostram que para alcançar o nível $U_{dc}/2$, S1 e S4 devem conduzir; para o nível 0, o par S1 e S3 ou o par S2 e S4 devem conduzir; e para $-U_{dc}/2$, S2 e S3 devem conduzir (RODRIGUES, 2011).

Estado dos interruptores				Tensão Saída
S1	S2	S3	S4	U_{12}
1	0	0	1	$U_{dc}/2$
1	0	1	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	$-U_{dc}/2$

Figura 3.14: Combinações possíveis de estado de interruptores num conversor em ponte. (RODRIGUES, 2011)

3.3.5 QUANTO AO ILHAMENTO

Ilhamento de um sistema fotovoltaico busca a segurança de pessoas e equipamentos. Esta operação acontece quando o inversor continua funcionando e injetando energia elétrica em uma rede que deveria estar desenergizada, causando riscos para as pessoas (DE ALMEIDA, 2013).

Os inversores apresentam proteções contra sobre e subtensão e subfrequência, que o desconectam da rede quando os níveis de tensão e frequência ficam fora de uma faixa pré-estabelecida por um período de tempo. Esses valores são normalizados (DE ALMEIDA, 2013).

3.4 ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA O INVERSOR

Para controlar os VSC (*voltage source control*) conectados à rede elétrica existem duas estratégias básicas. A primeira é conhecida como controle no modo de tensão (*voltage-mode control*)(VMC) e atua principalmente nas aplicações em altas potências, como por exemplo os controladores de FACTS. Nesta técnica, a potência é controlada alterando-se o ângulo de fase e a amplitude das tensões de saída do VSC em relação as tensões no ponto de acoplamento comum (PAC). É necessário levar em consideração uma estratégia para proteger o conversor contra sobrecorrentes ou correntes de curto-circuito (DE ALMEIDA, 2013).

A segunda estratégia é conhecida como controle no modo de corrente (*current-mode control*) (CMC). Nela, as correntes sintetizadas pelo conversor são controladas por um compensador dedicado. Portanto, as potências injetadas na rede elétrica são controladas pela amplitude e fase das correntes em relação à tensão no PAC. Com isso, o VSC está protegido contra sobrecorrentes e terá uma característica robusta contra variações nos parâmetros do sistema, com um desempenho dinâmico superior e preciso. Além das

vantagens mencionadas, o controle no modo corrente oferece uma melhor proteção, melhor estabilidade e resposta mais rápida (DE ALMEIDA, 2013).

As estratégias de controle dos conversores eletrônicos no modo corrente podem ser separadas em duas categorias: controladores lineares e não-lineares. Essas duas categorias possuem diversas subcategorias, dentre elas estão os controladores deadbeat(DB), proporcional-integral (PI), proporcional-ressoante (PR), controlador repetitivo (repetitive controller) (RC), histerese, controle por modos deslizantes (sliding mode control) (SMC), controlador nebuloso (Fuzzy), controlador preditivo, entre outros (DE ALMEIDA, 2013)

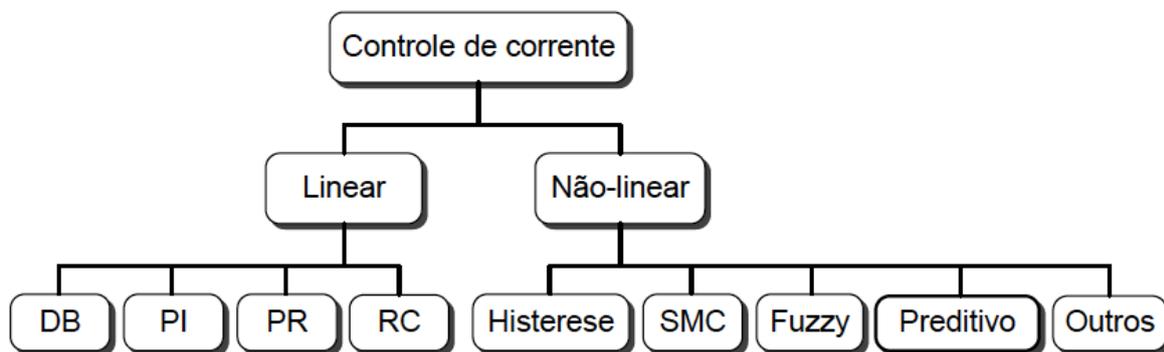


Figura 3.15: Classificação dos controladores de corrente (DE ALMEIDA, 2013)

3.4.1 CONTROLE POR HISTERESE

O objetivo desta técnica é obter os sinais de comutação dos interruptores através da comparação do erro de corrente atual com uma banda de histerese fixa. Mesmo sendo simples e robusta, esta técnica possui algumas características insatisfatórias. Dentre elas, o controle por histerese gera uma frequência de modulação variante no tempo, causando problemas no projeto do filtro de saída e também na excitação de ressonâncias indesejadas no SEP. Outro ponto negativo é que o desempenho do controle básico por histerese com banda fixa é reduzido devido a interação das correntes de cada fase em um sistema com o neutro isolado (DE ALMEIDA, 2013).

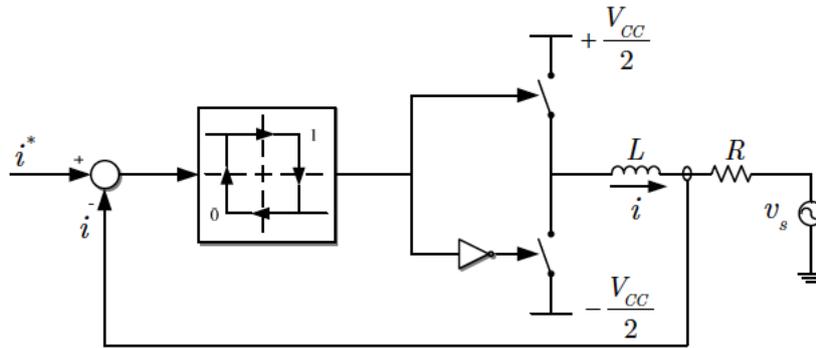


Figura 3.16: Diagrama de blocos do controle de corrente por histerese monofásico. (DE ALMEIDA, 2013)

Esta técnica sofreu melhorias como a eliminação do acoplamento entre as fases e o emprego de banda de histerese variável, pelas quais as variações de frequência de chaveamento ficam limitadas em um intervalo pré-fixado e, assim, o espectro harmônico fica restrito às altas frequências. O controle por histerese de origem analógica, após a modernização dos conversores digitais sofreu uma otimização para um controle digital (DE ALMEIDA, 2013).

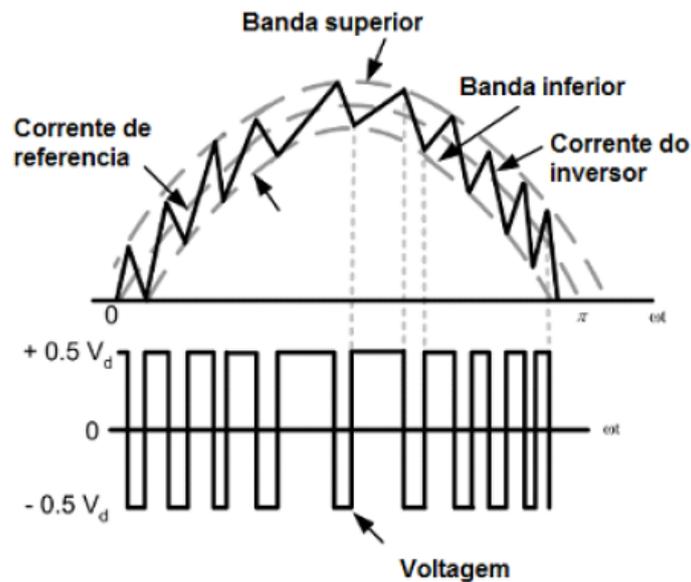


Figura 3.17: Banda de histerese. (GAUTAM, 2016)

3.4.2 CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL

Segundo De Almeida (2013), o controlador PI é bastante difundido e tem grande aplicação prática. É utilizado para rastreamento de sinais estacionários ou que variam

lentamente no tempo. Apresentará erros de fase e de amplitude quando utilizados para seguir sinais mais rápidos.

O erro de regime de um controlador PI, cuja função de transferência é

$$C_{pi}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.8)$$

quando empregado para controlar um VSC no modo de corrente, depende da faixa de passagem do sistema de malha fechada. Assumindo a corrente de referência

$$i^*(s) = I \cos(w_i(t) + \phi) U(t) \quad (3.9)$$

sendo \hat{I} e ϕ a amplitude e o ângulo de fase inicial da corrente de referência, respectivamente; w_i é a frequência do sinal e $U(t)$ a função degrau unitário. A corrente sintetizada pelo conversor é dada por

$$i(t) = \frac{I}{\sqrt{1 + (w_i)^2}} \cos(w_i(t) + \phi + \lambda_i) \quad (3.10)$$

em que o deslocamento de fase é expresso por

$$\lambda_i = -\tan^{-1}(\tau w_i) \quad (3.11)$$

com $1/\tau$ sendo a faixa de passagem do sistema em malha fechada.

Conforme De Almeida (2013), as equações (3.10) e (3.11) mostram que caso um controlador PI seja utilizado para seguir um sinal senoidal, a corrente $i(t)$ segue a referência $i^*(t)$ com erros de amplitude e de fase. Para evitar estes problemas, pode-se utilizar a transformação de Park para referenciar as tensões e correntes no sistema de coordenadas girantes, conhecido também por síncrono ou $dq0$. Essa transformação assegura um comportamento estacionário para sinais de tensão e corrente e com isso é possível projetar os controladores PI para obter um ganho unitário para sinais senoidais, assegurando erro nulo em estado estacionário para malha fechada.

Segundo De Almeida (2013), deve-se ajustar a frequência w_0 da transformação de Park para ser igual à frequência da rede elétrica, ou da componente harmônica h , que se deseja controlar. Assim, w_0 corresponde a hw_1 , onde w_1 é $2\pi f_1$ e f_1 a frequência fundamental da rede. Essa frequência tem que ser estimada, assim como o ângulo de fase θ_1 das tensões do ponto de conexão do conversor por meio de um circuito de sincronismo (*Phase Locked Loop*(PLL)). No caso das componentes de sequência negativa deve-se utilizar w_0 sendo $-hw_1$.

4 MODELAGEM DO SISTEMA

No presente capítulo será apresentado o esquema geral do modelo e será abordada a modelagem do sistema onde iniciaremos apresentando o modelo utilizado para o painel fotovoltaico e MPPT, depois será detalhada a modelagem do conversor boost, estratégia de controle do conversor CC-CA, cálculo do filtro e modelagem do gerador diesel com o droop de frequência. O modelo foi desenvolvido usando-se o software MATLAB/SIMULINK.

O sistema foi modelado de acordo com a figura 4.1

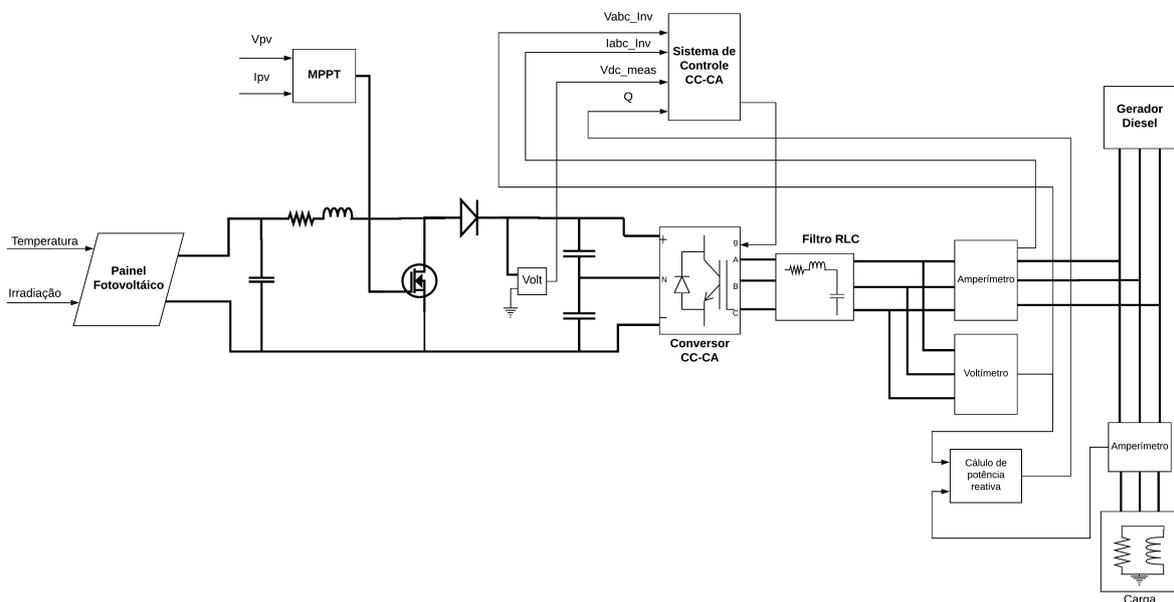


Figura 4.1: Esquema geral da modelagem do sistema proposto

4.1 MODELAGEM DO PAINEL FOTOVOLTAICO

Para o painel fotovoltaico foi utilizado o modelo SunPower SPR-415E-WHT-D, disponível na biblioteca do MATLAB/SIMULINK, na configuração de 35 strings em paralelo, cada uma formada por 7 painéis em série, totalizando uma potência máxima de 101 kW. O painel possui as seguintes características:

- Potência máxima: 414,8 W
- Voc: 85,3 V

- Voltagem no ponto de máxima potência: 72,9 V
- Coeficiente de temperatura de V_{oc} : -0,229 (%/C)
- Corrente de curto-circuito: 6,09 A
- Corrente no ponto de máxima potência: 5,69 A
- Coeficiente de temperatura de corrente de curto-circuito: 0,030706 (%/C)

4.2 MODELAGEM DO MPPT

Para a modelagem do MPPT foi utilizada a técnica de perturbar e observar, já apresentada anteriormente, para isso foi desenvolvida uma função no MATLAB para a implementação do seguinte fluxo grama:

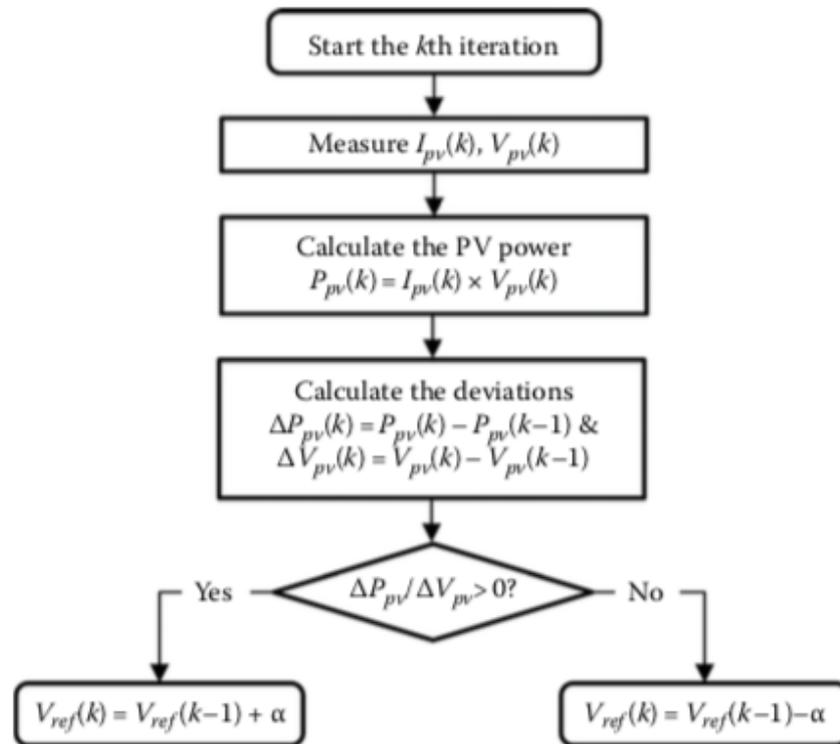


Figura 4.2: Fluxograma da implementação do algoritmo de P&O (BLAADJERG; IONEL, 2017)

Para implementar o algoritmo apresentado na figura 4.2 foi desenvolvido o código em função do MATLAB localizado no APÊNDICE 2.

O método P&O é caracterizado pela simplicidade de implementação. Porém, possui uma lenta velocidade de convergência sob diferentes condições de irradiação solar e seu

desempenho também pode ser afetado por, eventuais, ruídos do sistema (BLAADJERG; IONEL, 2017).

A função implementada tem como entrada a tensão e corrente medidas no painel e possui como saída a tensão de máxima potência. Essa tensão no ponto de máxima potência é utilizada para calcular o ciclo de trabalho do conversor CC-CC, que terá sua modelagem detalhada posteriormente. Desse modo a tensão na saída do painel é controlada e mantida no nível desejado, garantindo que o painel funcione no ponto de máxima potência. A figura 4.3 mostra o diagrama em blocos do MPPT completo.

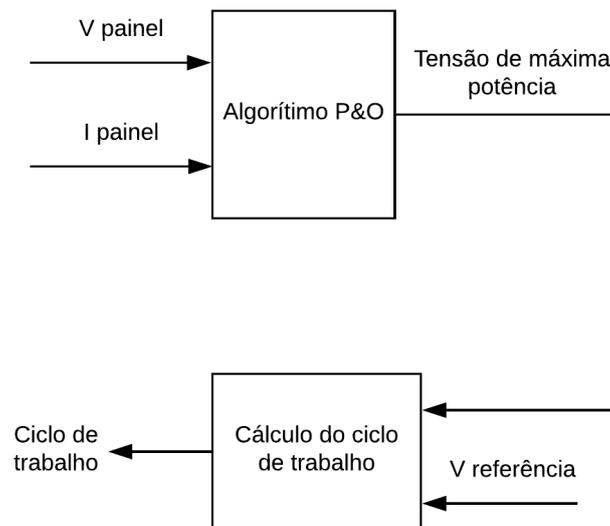


Figura 4.3: Diagrama em blocos do MPPT

4.3 MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC *BOOST*

Para a modelagem do conversor CC-CC, foi utilizada a topologia padrão do circuito de um conversor boost conforme apresentado na figura figura 4.4 (MOHAN et al., 2003).

4.3.1 CÁLCULO DAS CAPACITÂNCIAS

Para o cálculo das capacitâncias e indutância do conversor lançamos mão de conhecimentos básicos de circuitos, onde sabemos que a energia armazenada pelo capacitor é dada pela expressão:

$$E = \frac{CV^2}{2} \quad (4.1)$$

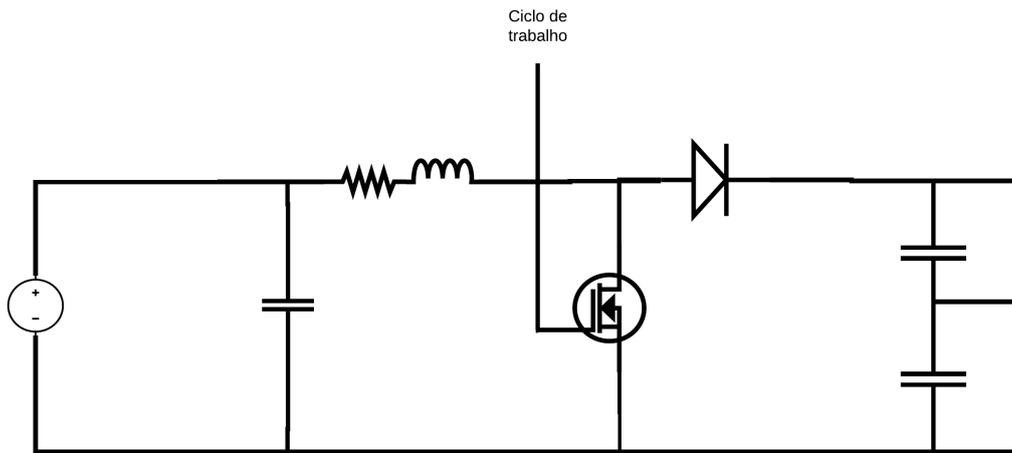


Figura 4.4: Esquema do circuito do conversor CC-CC Boost

Onde

- E é a energia armazenada; e
- V a tensão nos terminais do capacitor

Sabendo-se que

$$E = Pt \quad (4.2)$$

e isolando-se C na equação 4.1, e adotando t como o tempo de um ciclo, temos:

$$C_{eq} = \frac{2P}{fV^2} \quad (4.3)$$

onde

- P é a potência do link CC;
- C é a capacitância equivalente do link CC; e
- f é a frequência do sistema no lado CA

Inicialmente realizamos o cálculo da capacitância baseado na energia armazenada durante um ciclo, ou seja, 16,67 ms. Porém os melhores resultados foram obtidos a partir do cálculo da capacitância baseada na energia armazenada em meio ciclo. Este resultado faz sentido, já que uma capacitância menor permite uma troca de energia mais rápida entre o lado CC e o lado CA.

Na entrada do conversor Boost desejamos uma tensão mais estável, logo faz-se necessária uma capacitância de valor muito maior do que a capacitância do link CC, pois dessa forma o ripple de tensão na entrada do conversor CC-CC será mínimo. Para o cálculo dessa capacitância foi adotado um valor 10 vezes maior do que a capacitância do link CC.

4.3.2 CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS

Dos conceitos básicos de circuitos LC sabemos, ainda, que a frequência de ressonância do circuito é dada pela expressão:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.4)$$

- L é a indutância do circuito;
- C é a capacitância do circuito; e
- ω é a frequência de ressonância em radianos por segundo;

A partir da equação 4.4 podemos calcular a indutância do circuito, já passando a frequência para Hertz, através da seguinte equação:

$$L = \frac{1}{Cf^24\pi^2} \quad (4.5)$$

4.4 MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CA

Para modelagem do conversor CC-CA foi utilizado um inversor trifásico de ponte completa com o link CC dividido, onde o ponto central do banco de capacitores é conectado ao neutro da rede, essa estrutura é conhecida como NPC.

Este esquema é o mais adequado para sistemas fotovoltaicos, tendo em vista que neste caso, o potencial do arranjo fotovoltaico é fixado ao neutro, tendo um potencial constante de aterramento, levando a correntes de fuga muito baixas (BLAADJERG; IONEL, 2017).

4.4.1 SISTEMA DE CONTROLE CC-CA

O sistema de controle CC-CA é formado pelo blocos de transformação das tensões medidas da base abc para $dq\theta$, Regulador da tensão no link CC (*VCC Regulator*), cálculo da corrente de referência no eixo de quadratura, Controlador de corrente, Transformação das correntes de referência em tensões de referencia na base abc e, por último, Gerador de pulsos PWM seguindo uma tensão de referência. Ressalta-se que para a transformação de

abc para $dq0$ e sua respectiva inversa, foram utilizados os blocos disponíveis na biblioteca do SIMULINK, os quais implementam as transformadas de Park.

Na figura 4.5 podemos observar o diagrama de blocos do sistema de controle CC-CA

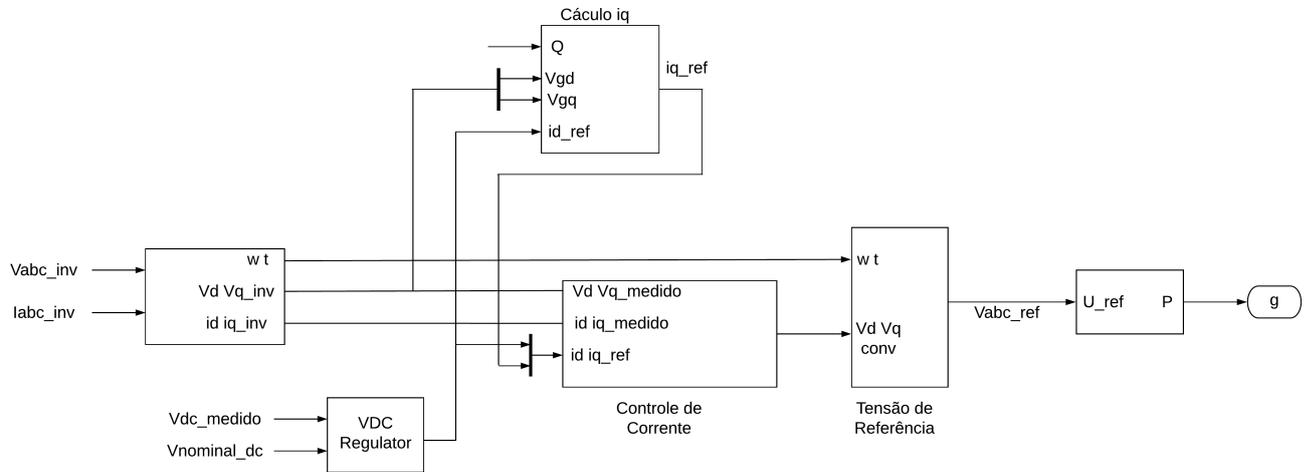


Figura 4.5: Diagrama em blocos do conversor CC-CA

4.4.1.1 REGULADOR DE TENSÃO NO LINK CC

A corrente de referência no eixo direto é obtida através da regulação de tensão no link CC, uma vez que a corrente de referência no eixo direto é responsável pela injeção de potência ativa pelo inversor. A chave para o controle de potência ativa injetado na rede CA pelo inversor se dá através do controle da tensão no link CC. Para isso a tensão no link CC é monitorada e comparada com a tensão desejada. Caso a tensão no link CC aumente, isso quer dizer que o inversor está injetando menos potência ativa na rede CA do que o sistema fotovoltaico está produzindo, no caso contrário, quando a tensão no link CC está diminuindo, o inversor está transferindo mais potência ativa do que sistema fotovoltaico está produzindo e esta potência extra vem da energia armazenada nos capacitores do link CC, o que faz com que a tensão caia (BLAADJERG; IONEL, 2017).

Este controle da tensão no link CC é feito através do rastreamento do erro entre a tensão medida e a tensão desejada por um controlador PI. Já que, este controlador possui um bom desempenho para rastreamento de sinais que não tem variações abruptas no tempo (OGATA, 2015). O controlador utilizado possui ganho proporcional igual a 2 e um ganho integral igual a 400.

4.4.1.2 CÁLCULO DA CORRENTE DE REFERÊNCIA NO EIXO DE QUADRATURA

Através da corrente de referência no eixo de quadratura podemos controlar a injeção de potência reativa pelo inversor. A corrente no eixo de quadratura é calculada através da seguinte expressão (BLAADJERG; IONEL, 2017):

$$Q = -v_q i_d + v_d i_q \quad (4.6)$$

onde

- Q é a Potência reativa solicitada pela carga;

Quando realizamos a compensação de reativos através do inversor, não quer dizer que estaremos produzindo energia reativa, o que ocorre é que através da eletrônica de potência podemos sintetizar essa energia reativa através do avanço ou retardo de fase da corrente produzida pelo inversor. Dessa forma, o gerador do sistema proposto enxerga a carga como tendo fator de potência unitário.

4.4.1.3 CONTROLE DE CORRENTE

Existem, basicamente, dois modos de controle para os conversores CC-CA o controle no modo de tensão e o controle no modo de corrente. Neste trabalho foi adotado o controle no modo de corrente, tendo em vista que esse modo possui maior robustez contra variações nos parâmetros do sistema e apresenta um desempenho dinâmico superior e mais preciso (DE ALMEIDA, 2013).

Dentre os modelos de controle de corrente apresentados no capítulo 3 deste trabalho, foi selecionado o controlador PI para modelagem do controle de corrente por ser uma estratégia de controle muito bem estabelecida na literatura.

Apesar de os controladores PI não possuírem um bom desempenho no rastreamento de sinais senoidais, pois estes variam muito rapidamente no tempo, podemos contornar este problema através da transformada de Park para referenciar as tensões e correntes num sistema de coordenadas girante, denominado sistema dq0 (DE ALMEIDA, 2013).

Embora a transformada de Park traga benefícios no que tange à simplicidade do controlador, ela introduz acoplamentos entre as correntes e tensões nos eixos diretos e de quadratura que devem ser compensadas para evitar o comprometimento do desempenho do controlador (DE ALMEIDA, 2013).

A figura 4.6 apresenta o diagrama em blocos do sistema de controle de corrente utilizado, destacando o desacoplamento entre as correntes nos eixos direto e de quadratura.

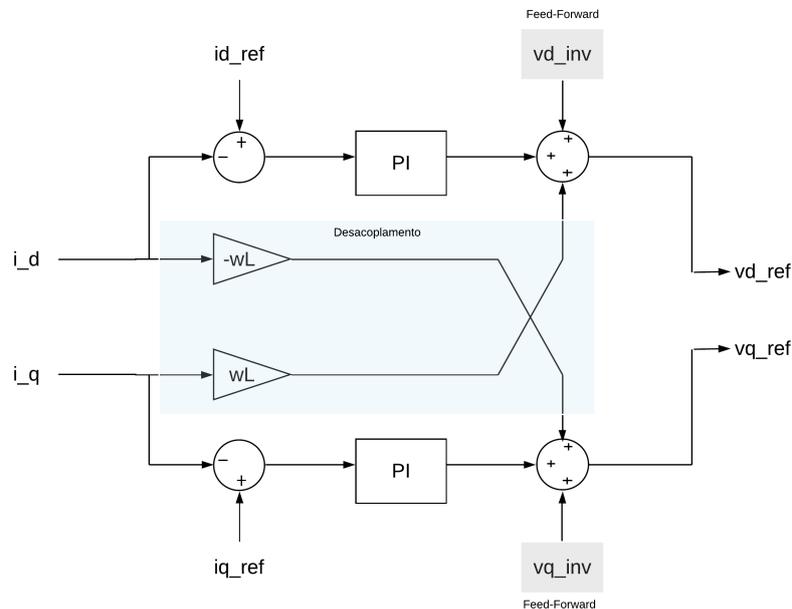


Figura 4.6: Diagrama em blocos do sistema de controle de corrente

Temos ainda a adição de mais termo ao desacoplamento, chamado feed-forward, que tem o objetivo de reduzir a influência de distúrbios da rede no desempenho do controlador (RAZALI et al., 2014). Bem como atenuar os harmônicos indesejados na tensão de saída, devido a oscilações da tensão no link CC (DE ALMEIDA, 2013). Para a implementação do circuito de controle de corrente foram utilizados controladores PI, cujos ganhos proporcional e integral são, respectivamente, 0.3 e 20.

4.4.1.4 GERADOR DE PULSOS PWM

Após a obtenção das correntes de referência nos eixos direto de quadratura, lançando-se mão da transformada inversa de Park, através dos blocos de transformação dq0 para abc, existentes na biblioteca do Simulink, obtêm-se as tensões de referência. Para obtermos os 12 pulsos necessários para controlar o inversor NPC, existem vários esquema PWM disponíveis (PATHAK; SATARKAR, 2017):

- Modulação de largura de pulso sinusoidal (SPWM);
- Modulação de largura de pulso de injeção de terceiro harmônico (THI-PWM);
- Modulação de Largura de Pulso de Vetor Espacial (SVPWM);e

- Modulação de Largura de Pulso de harmônico seletivo (SHE-PWM);

Na elaboração deste trabalho foi utilizada a técnica de SPWM para obtenção do sinal de controle do inversor. Para o inversor NPC, são necessários dois sinais de onda triangulares para comparação com o sinal de referência. As ondas triangulares devem ter a mesma frequência e a mesma amplitude pico a pico. A cada instante, cada onda é comparada com o sinal de referência. Cada comparação liga a chave, se o sinal de referência é maior que o sinal da onda triangular atribuído a essa chave. A figura 4.7 mostra o esquema de comparação utilizado:

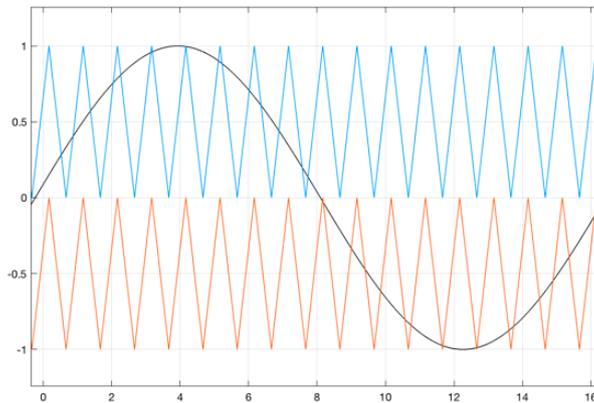


Figura 4.7: Esquema de comparação utilizado na técnica SPWM

A cada comparação entre a onda triangular e o sinal referência gera dois pulsos, um relativo à onda triangular superior e outro relativo a onda triangular inferior, porém, como vemos na figura 4.8, dois IGBTs adjacentes (S1 e S2) não podem conduzir ao mesmo tempo, quando um está liga o outro deve estar desligado, essa lógica é obtida invertendo-se o sinal de controle de S1 para controlar S2. Esse raciocínio pode ser estendido para o sistema trifásico. Dessa forma temos 4 pulsos por fase, como o modelo implementado trata-se de um sistema trifásico obtemos o total de 12 pulsos necessários para o controle do inversor.

Dessa forma a onda triangular superior comanda as chaves superiores (S1 e S2) e a onda triangular inferior comanda as chaves inferiores (S3 e S4). Os níveis de tensão são obtidos da seguinte forma (PATHAK; SATARKAR, 2017):

- O conversor é comutado para $+VCC/2$ quando a onda senoidal é maior que a onda triangular superior.;
- O conversor é comutado para $-VCC/2$ quando a onda senoidal é menor que a onda triangular inferior; e

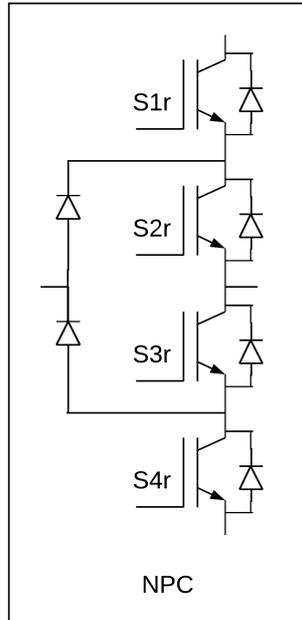


Figura 4.8: Esquema NPC para uma fase

- A tensão do conversor é alterada para zero quando a onda senoidal é menor que a onda triangular superior, mas maior que a onda triangular inferior;

Para a implementação do sistema de chaveamento apresentado foi utilizado o bloco gerador de pulsos PWM seguidor de tensão de referência, disponível na biblioteca do Simulink.

4.5 MODELAGEM DO GERADOR DIESEL

A modelagem do gerador diesel é dividida em dois módulos, a máquina síncrona que recebe um torque mecânico na entrada e produz um torque elétrico, através das tensões e correntes, na saída e um módulo responsável por inserir a dinâmica do gerador diesel e seu controle de velocidade. A seguir exploraremos as duas modelagens citadas.

4.5.1 MODELAGEM DA MÁQUINA SÍNCRONA

Para a máquina síncrona foi utilizado o modelo disponível na biblioteca do Simulink, trata-se de um dos modelos matemáticos mais complexos para máquinas síncronas. Este modelo disponível no MATLAB/SIMULINK SimPowerSystems, ignora a assimetria dos enrolamentos do estator, mudança de parâmetros devido ao meio externa, como temperatura, não linearidade das características magnéticas do ferro e perdas no ferro (ZELJKO

et al., 2010). O modelo é descrito pelas seguintes equações diferenciais (MATHEWORKS, 2018):

$$V_d = -i_d R_s - \omega \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \quad (4.7)$$

$$V_q = -i_q R_s + \omega \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \quad (4.8)$$

$$V_0 = -i_0 R_s + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (4.9)$$

$$V_{fd} = i_{fd} R_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (4.10)$$

$$0 = i_{kd} R_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (4.11)$$

$$0 = i_{kq1} R_{kq1} + \frac{d\psi_{kq1}}{dt} \quad (4.12)$$

$$0 = i_{kq2} R_{kq2} + \frac{d\psi_{kq2}}{dt} \quad (4.13)$$

onde os fluxos são dados pelas equações matriciais das figuras 4.9 e 4.10.

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_{kd} \\ \Psi_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{md} + L_l & L_{md} & L_{md} \\ L_{md} & L_{md} + L_{lkd} + L_{f1d} & L_{md} + L_{f1d} \\ L_{md} & L_{md} + L_{f1d} & L_{md} + L_{lkd} + L_{f1d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{kd} \\ i_{fd} \end{bmatrix}$$

Figura 4.9: Equação do fluxo no eixo direto

$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{kq1} \\ \Psi_{kq2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{mq} + L_l & L_{mq} & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} + L_{kq1} & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} & L_{mq} + L_{kq2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_{kq1} \\ i_{kq2} \end{bmatrix}$$

Figura 4.10: Equação do fluxo no eixo em quadratura

O circuito referente ao modelo é apresentado nas figuras 4.11 e 4.12.

4.5.2 MODELAGEM DO MOTOR DIESEL

O modelo padrão do motor a diesel e do regulador de velocidade é ilustrado em forma de diagrama de blocos na figura 4.13. Este modelo é amplamente utilizado e descreve bem

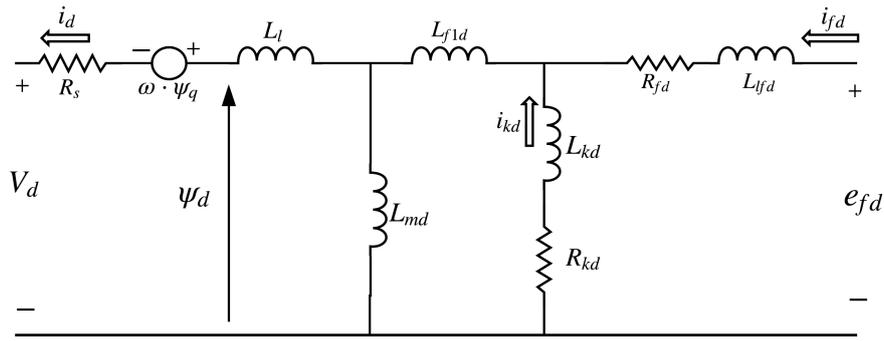


Figura 4.11: Representação do circuito no eixo direto

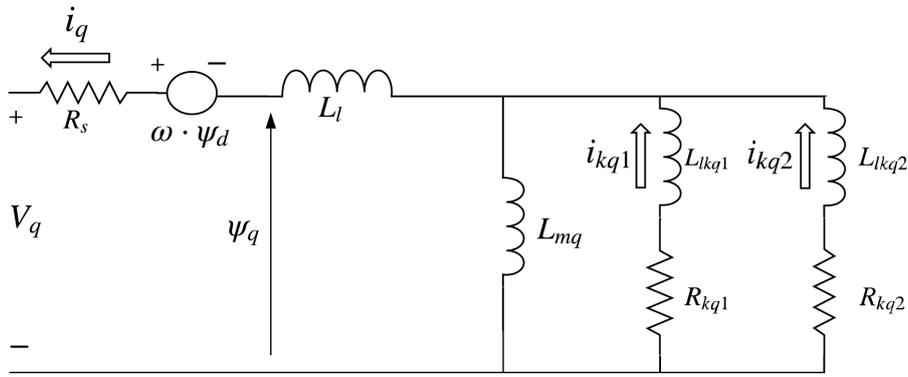


Figura 4.12: Representação do circuito no eixo em quadratura

o comportamento dinâmico de grupos geradores a diesel. O motor diesel e o atuador das válvulas são representados por funções de transferência de primeira ordem, com constantes de tempo T_D e T_{SM} , *respectivamente*.

O objetivo do controle integral é eliminar o erro de frequência no estado estacionário. O limitador de posição do atuador é ignorado na análise do domínio da frequência, onde modelos linearizados são usados (PAPATHANASSIOU; PAPADOPOULOS, 2001). A entrada do modelo é a frequência medida na rede e a saída é a potência mecânica necessária para estabilizar a frequência da rede no nível desejado.

4.5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO DO GERADOR DIESEL

Para validação do modelo do gerador diesel completo, foi considerado o gerador diesel alimentando uma carga de sozinho. A potência considerada para o gerador foi de 500 KVA, alimentando uma carga de 100 Kw (0.2 pu), as constantes T_{SM} e T_D foram consideradas 0.05s e 0.5s, *respectivamente*.

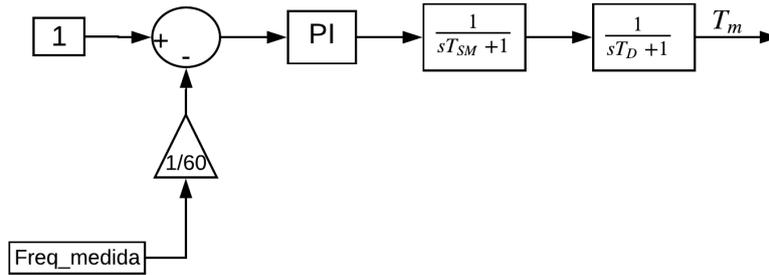


Figura 4.13: Diagrama em blocos do modelo do motor diesel e regulador de velocidade

Os ganhos proporcional e integral do controlador PI são, respectivamente, 20 e 4. Todos os parâmetros apresentados estão de acordo com PPATHANASSIOU (2001). A figura 4.14 mostra o resultado alcançado em PPATHANASSIOU (2001) e a figura 4.15 mostra o resultado alcançado pelo modelo proposto neste trabalho.

Como podemos observar, ambos os modelos apresentam a mesma dinâmica, para condições similares de carga, indicando que o modelo utilizado no presente trabalho está de acordo com a literatura disponível, confirmando, desse modo, a validação do modelo.

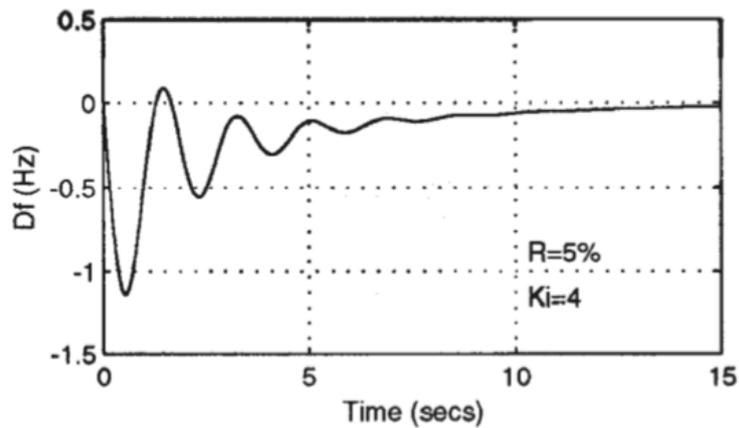


Figura 4.14: Desvio de frequência no modelo proposto em PPATHANASSIOU (2001)

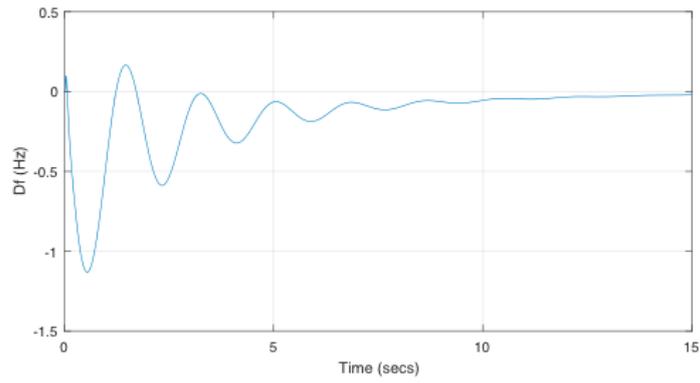


Figura 4.15: Desvio de frequência no modelo proposto neste trabalho

No próximo capítulo serão apresentados os diversos resultados obtidos com o modelo completo do sistema proposto, onde verificar-se-á o funcionamento do sistema como um todo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentaremos os resultados obtidos e discutiremos sobre as simulações realizadas utilizando-se o software MatLab/Simulink, para variadas situações a fim de determinar a validade da modelagem do sistema proposto. Foram realizadas três simulações diferentes. Na primeira simulação mantivemos a irradiação constante e realizamos um aumento de carga. Na segunda simulação mantivemos a carga constante e realizamos uma variação na irradiação e temperatura do sistema fotovoltaico. Faz-se necessária, ainda, uma terceira simulação onde apenas o sistema diesel está funcionando, tendo em vista que o sistema diesel é a fonte primária de energia.

5.1 PRIMEIRA SIMULAÇÃO

A primeira simulação foi dividida em dois momentos, inicialmente foi realizada a entrada, em rampa, de uma carga de 400 kW (80% da capacidade do gerador). Em seguida, foi realizada a entrada, em rampa, de uma carga de 46 KVA com fator de potência de 0.8, simulando o acionamento de um motor. Foram consideradas, ainda, uma irradiação constante de 1000 W/m^2 e temperatura de 30 graus celcius.

Foram consideradas, ainda, as seguintes condições:

- Sistema sempre funcionando em paralelo;
- Carga mínima deve ser pelo menos igual à geração fotovoltaica;
- Carga máxima não deve ser superior à geração total (gerador + fotovoltaico);
- Gerador diesel de 500 kVA, 220/380 V;
- Sistema fotovoltaico de 100 kW;
- Tensão no Link CC 950 V; e
- Inversor central.

5.1.1 TORQUE E VELOCIDADE DO GERADOR

A figura 5.1 mostra o correto funcionamento do regulador de velocidade do gerador diesel, fazendo com que o torque mecânico siga o torque elétrico a fim de que

haja a estabilidade de frequência do sistema. Na figura 5.2 a apresentamos a dinâmica da velocidade do rotor do gerador frente à entrada das cargas.

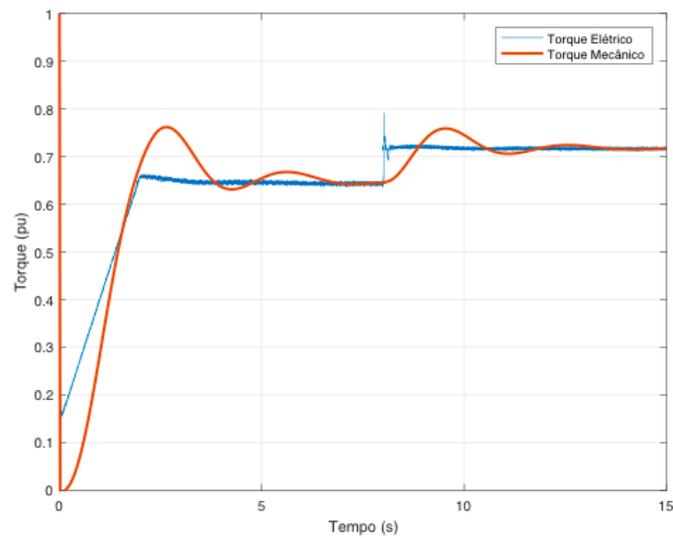


Figura 5.1: Torque elétrico x Torque mecânico

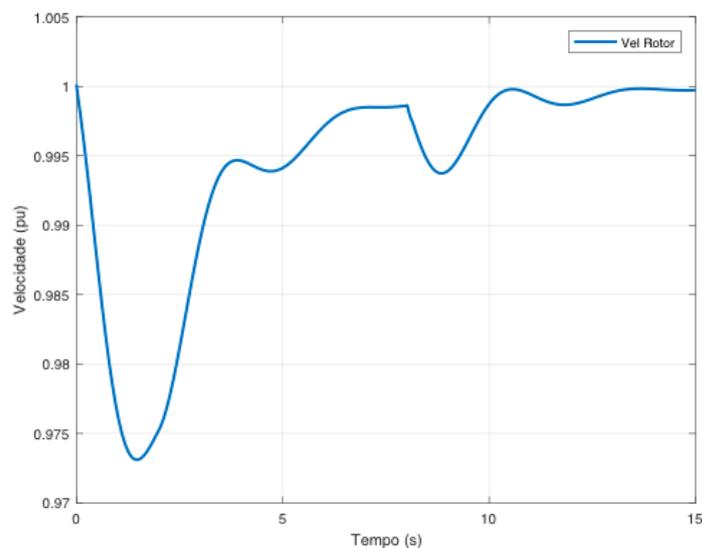


Figura 5.2: Velocidade do Rotor

Podemos observar que a dinâmica da velocidade do rotor confirma o resultado obtido nos torques elétrico e mecânico. Tendo em vista que quando o torque mecânico é menor que o torque elétrico temos uma queda de velocidade no gerador, já que o torque de aceleração será negativo. Na situação contrária, quando o torque elétrico é menor que o torque mecânico temos um torque de aceleração positivo, havendo um aumento na velocidade do rotor e conseqüentemente um incremento na frequência do sistema, como pode-se observar na figura 5.3.

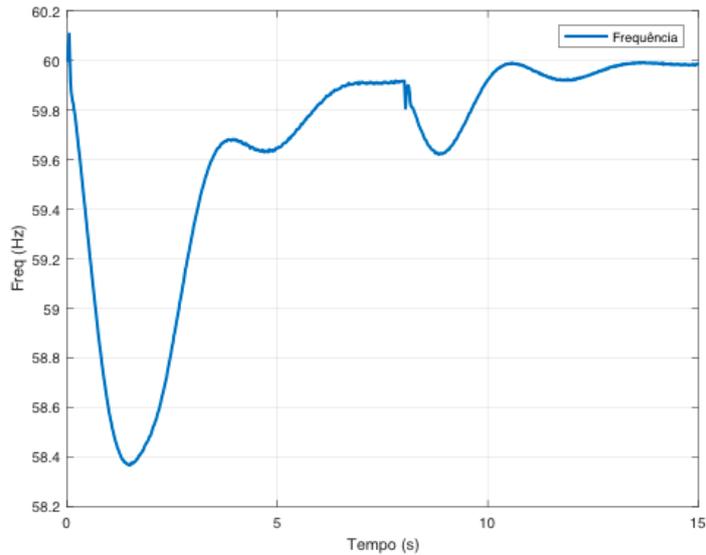


Figura 5.3: Frequência do sistema

5.1.2 BALANÇO DE POTÊNCIA ATIVA

Na figura 5.4 é mostrada a potência produzida no lado CC pelo sistema fotovoltaico. Podemos observar que o algoritmo do MPPT funciona corretamente, mantendo o sistema fotovoltaico sempre no ponto de máxima potência.

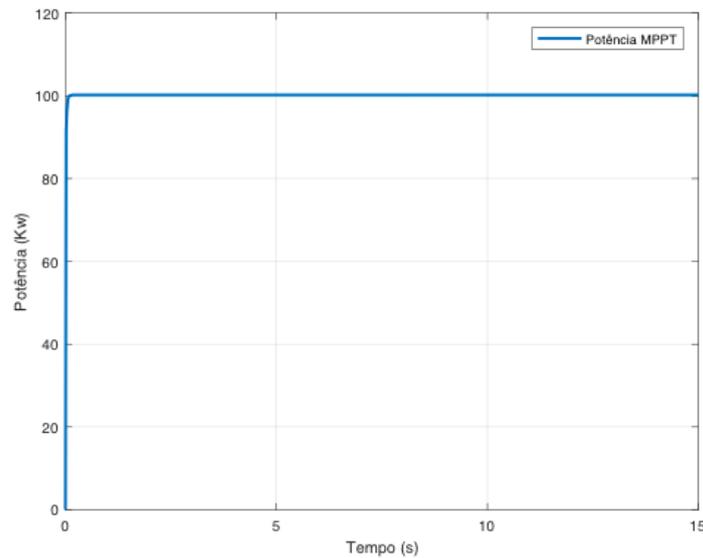


Figura 5.4: Potência produzida pelo sistema fotovoltaico

A figura 5.5 mostra a potência na saída do conversor CC-CA e a potência fornecida pelo gerador. De acordo com o gráficos da potência produzida pelo sistema fotovoltaico e da potência na saída do conversor CC-CA, vemos que o conversor CC-CA possui um rendimento de 97%, o que está de acordo com os inversores comerciais disponíveis.

Ainda na figura 5.5, observa-se o gráfico da potência fornecida pelo gerador, onde podemos perceber o acionamento em rampa da carga. Este acionamento em rampa proporciona melhoras na qualidade de energia, tendo em vista a redução da perturbação na tensão e um menor afundamento da frequência do sistema.

Na figura 5.6 observa-se a potência solicitada pela carga, nesse gráfico podemos confirmar as informações obtidas na figura 5.5, já que o gráfico da potência consumida na carga reflete a soma da potência gerada pelo sistema fotovoltaico e a produzida pelo gerador diesel.

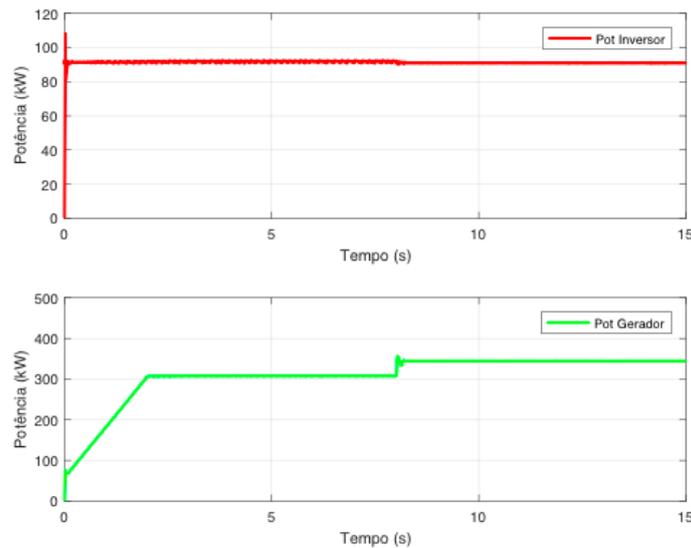


Figura 5.5: Potência a tiva do inversor e do gerador

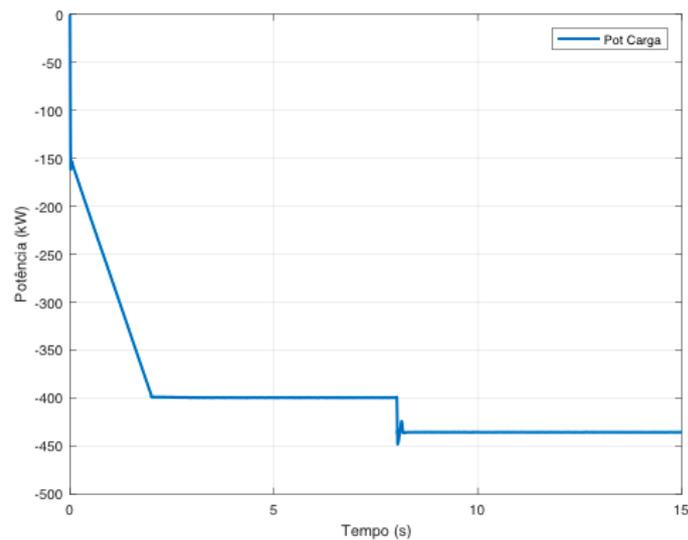


Figura 5.6: Potência ativa consumida pela carga

5.1.3 COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

A compensação de reativos está sendo realizada pelo inversor, dessa maneira o inversor funciona como regulador de tensão sistema e o gerador enxerga a carga sempre com um fator de potência unitário. Como mostrado nas figuras 5.7 e 5.8, inicialmente temos a situação de uma carga puramente resistiva, onde a potência reativa demanda é zero. No segundo momento temos a entrada uma carga indutiva e observamos que o inversor é capaz de fornecer toda a potência reativa solicitada pela carga.

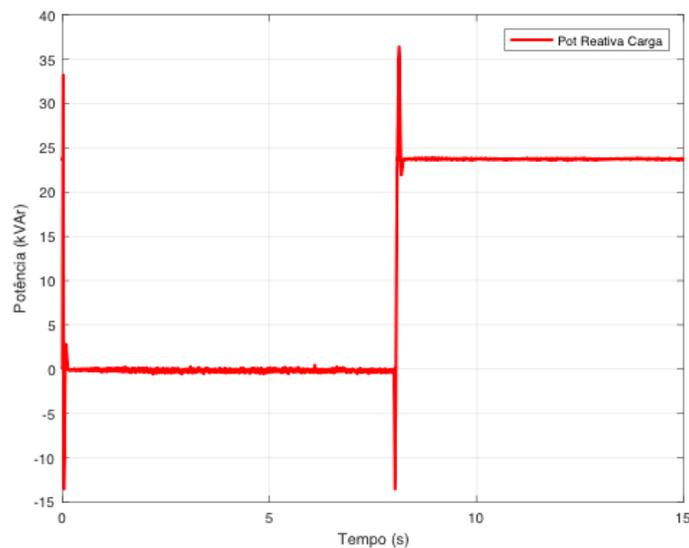


Figura 5.7: Potência reativa solicitada pela carga

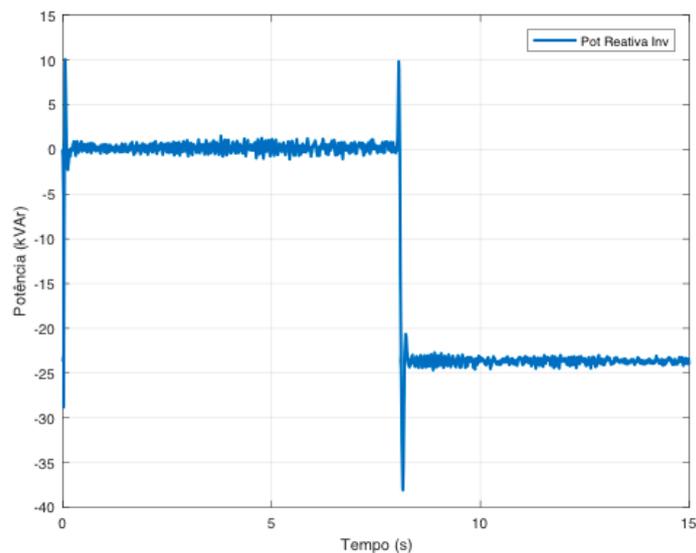


Figura 5.8: Potência reativa produzida pelo inversor

5.1.4 TENSÃO NO BARRAMENTO

A figura 5.9 mostra o gráfico da tensão eficaz no barramento CA, podemos observar o correto controle do módulo da tensão CA, corroborando o bom funcionamento do inversor como regulador de tensão, já que mesmo entrando uma carga indutiva no sistema não tivemos alteração no nível de tensão fornecida.

Na figura 5.10 podemos observar a forma senoidal da tensão, com uma pequena perturbação no momento em que o inversor reage a entrada da carga indutiva. Esse resultado é esperado, tendo em vista que o inversor precisa se adaptar a nova situação, gerando uma corrente atrasada em relação a tensão para que seja realizada a compensação de reativos.

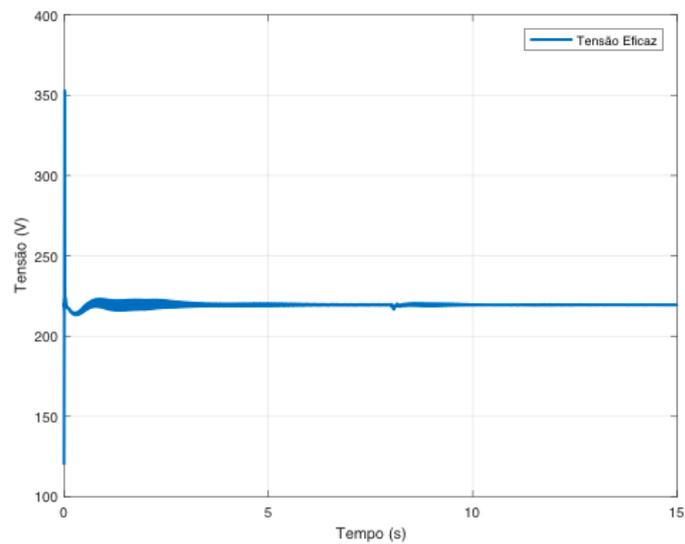


Figura 5.9: Tensão eficaz no barramento CA

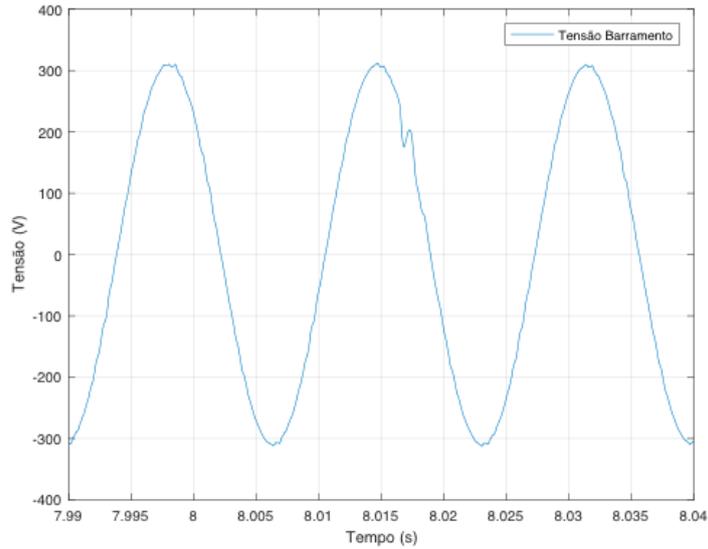


Figura 5.10: Tensão senoidal no barramento CA

5.1.5 CORRENTES

Na figura 5.11 observamos as correntes fornecidas pelo inversor, pelo gerador e consumida na carga. Vemos que a corrente produzida pelo inversor está adequada, mostrando o correto funcionamento do algoritmo de controle de corrente do inversor. Podemos perceber que após a entrada da carga indutiva a corrente do inversor passa a ficar levemente atrasada em relação a corrente do gerador, ratificando a compensação da potência reativa pelo inversor.

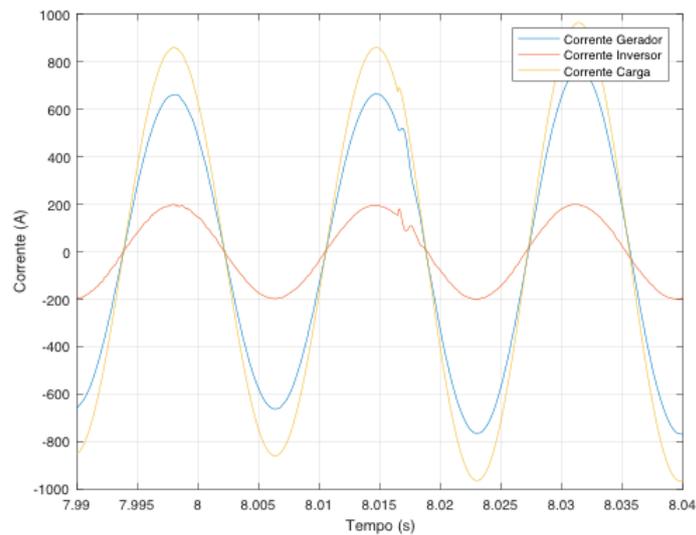


Figura 5.11: Correntes na carga, do inversor e do gerador

Similarmente ao gráfico da tensão, podemos ver uma pequena perturbação na corrente

após a entrada da carga indutiva, como já foi abordado esse resultado é esperado, pois o inversor precisa atrasar a corrente produzida em relação a tensão.

5.2 SEGUNDA SIMULAÇÃO

Da mesma forma que a primeira simulação, a segunda simulação foi dividida em dois momentos. Inicialmente foi realizada a entrada, em rampa, de uma carga de 400 kW (80% da capacidade do gerador). Em seguida, após 8 (oito) segundos, permanecendo constante a carga, foi realizada a variação, da irradiação e da temperatura na células.

No primeiro instante temos uma irradiação de 800 W/m^2 e temperatura de 36°C .

No segundo instante temos uma irradiação de 1000 W/m^2 e temperatura de 45°C .

5.2.1 TORQUE E VELOCIDADE DO GERADOR

A figura 5.12 mostra o funcionamento do regulador de velocidade para a situação apresentada anteriormente. Podemos perceber que o gerador enxerga o aumento da irradiação como um alívio de carga. Este resultado já é esperado, tendo em vista que o gerador só produz a diferença de potência entre o que o sistema fotovoltaico gera e o que a carga solicita, como o sistema fotovoltaico passou a produzir mais potência a parcela produzida pelo gerador foi reduzida.

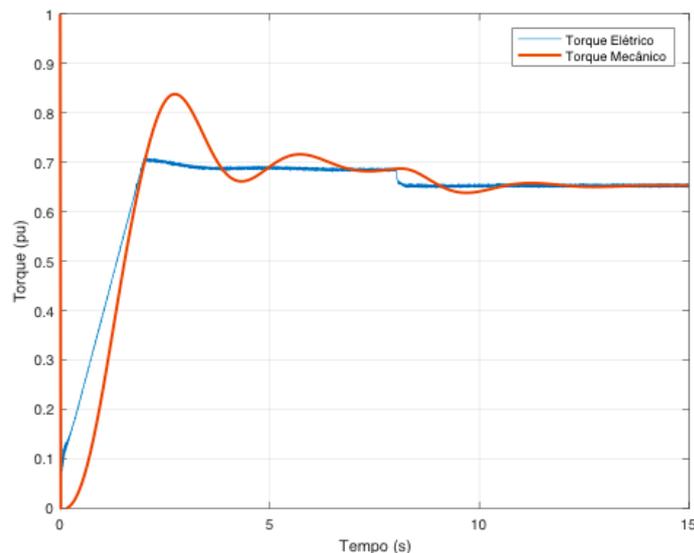


Figura 5.12: Torque Elétrico x Mecânico

As figuras 5.13 e 5.14 mostram, respectivamente, a velocidade do rotor do gerador e a frência do sistema. Como podemos ver, ao incrementar-se a potencia produzida

pelo sistema fotovoltaico e reduzir a potência solicitada do gerador, temo um aumento da velocidade do rotor. Tendo em vista a mesma explicação abordada na primeira simulação, temos neste caso um aumento na velocidade do rotor, já que o torque de aceleração será positivo. Como a frequência do sistema é consequência direta da velocidade do rotor, nas máquinas síncronas, temos um aumento na frequência do sistema.

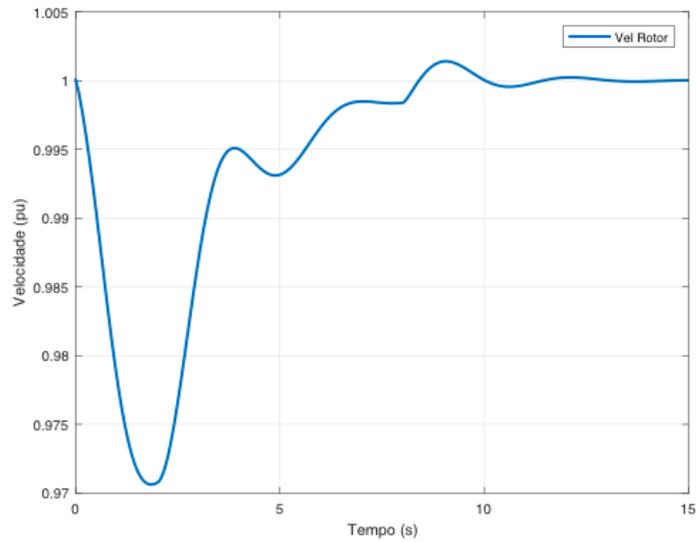


Figura 5.13: Velocidade do rotor

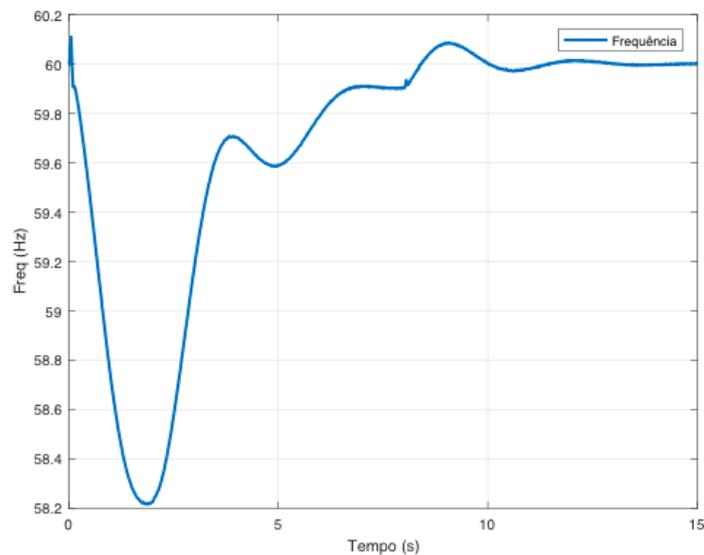


Figura 5.14: Freqüência do sistema

5.2.2 BALANÇO DE POTÊNCIA ATIVA

Na figura 5.15 observamos a potência CC na entrada inversor. O gráfico mostra o correto funcionamento do MPPT para o caso de variação na irradiação e temperatura

nos painéis. Onde temos um aumento da potência fornecida pelo sistema fotovoltaico ao incrementar-se a irradiação.

Na figura 5.16 vemos a compensação de potência entre o sistema fotovoltaico e o gerador diesel. Ao ocorrer um incremento da potência fornecida pelo sistema foto voltaico há uma redução da potência fornecida pelo gerador. A figura 5.17 mostra a potência constante solicitada pela carga, que reproduz, exatamente a soma das potências fornecidas pelo sistema fotovoltaico e gerador.

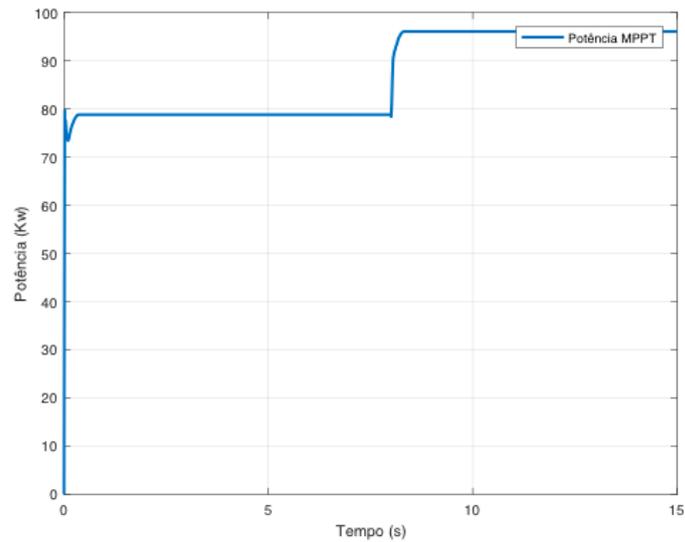


Figura 5.15: Potência produzida pelo sistema fotovoltaico

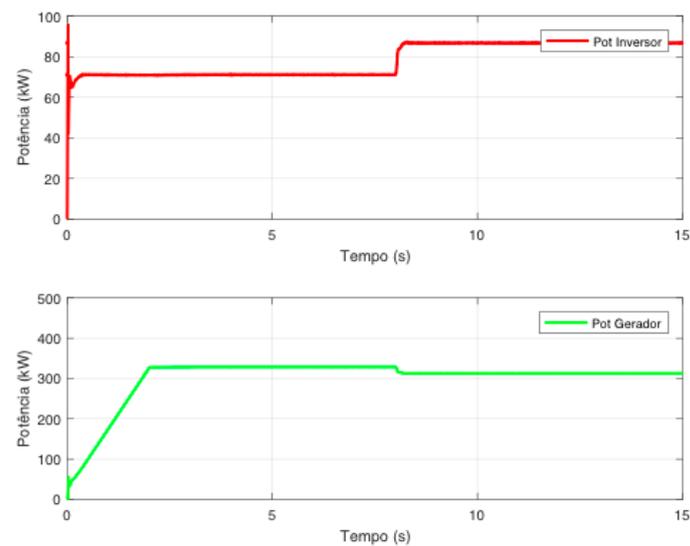


Figura 5.16: Potência CA do inversor e do gerador

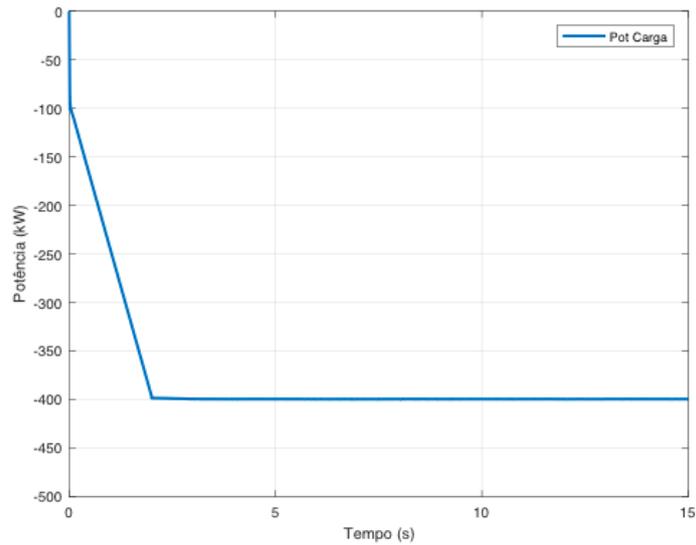


Figura 5.17: Potência solicitada pela carga

5.2.3 TENSÃO NO BARRAMENTO

A figura 5.18 mostra a tensão no Link CC, onde temos uma tensão constante de 950 V. Esse gráfico mostra que o conversor está realizando a entrega de potência corretamente ao lado CA. Pois, caso o inversor transmitisse mais potência do que o sistema fotovoltaico produz, teríamos uma queda na tensão do link CC, já que os capacitores forneceriam a potência extra transmitida pelo inversor. No caso contrário, se o inversor transmitisse menos potência do que a produzida pelo sistema fotovoltaico, teríamos um aumento da tensão no link CC, já que os capacitores armazenariam a energia excedente.

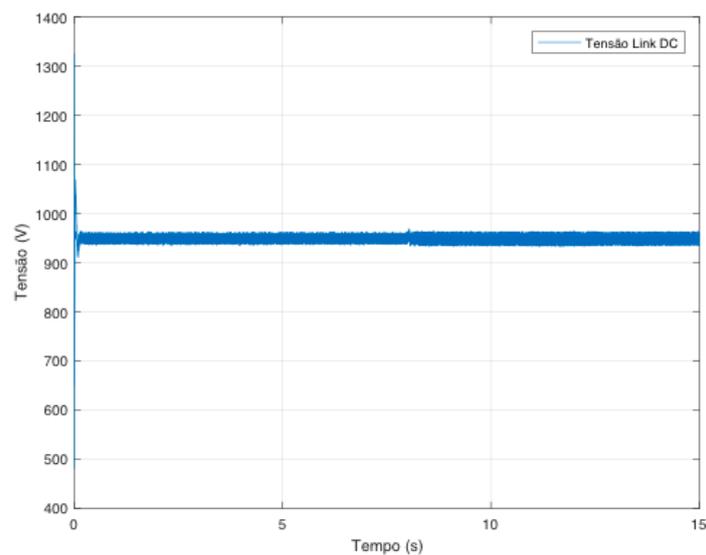


Figura 5.18: Tensão no Link CC

Podemos inferir, ainda, da figura 5.18 o funcionamento satisfatório do conversor CC-CC boost, tendo em vista que a tensão de máxima potência do sistema fotovoltaico varia de acordo com a irradiação. Porém, o conversor CC-CC realiza o controle de tensão na entrada do conversor CC-CA, mantendo-a constante, a fim de manter constante a tensão de saída no lado CA do conversor.

As figuras 5.19 e 5.20 mostram, respectivamente, a tensão eficaz no lado CA e a forma senoidal da tensão CA. Destaca-se, aqui, que não vemos nenhuma perturbação na tensão CA quando da variação da irradiação e temperatura. Este resultado está correto, tendo em vista que os problemas de regulagem de tensão surgem quando temos a presença de reativos na rede. Ao variarmos a irradiação temos alteração apenas no balanço de potência ativa, onde a questão principal torna-se o controle de frequência do sistema.

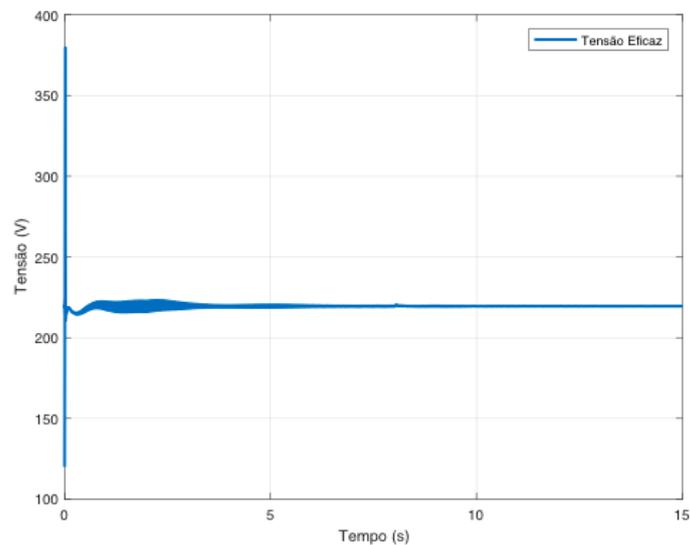


Figura 5.19: Tensão eficaz no barramento CA

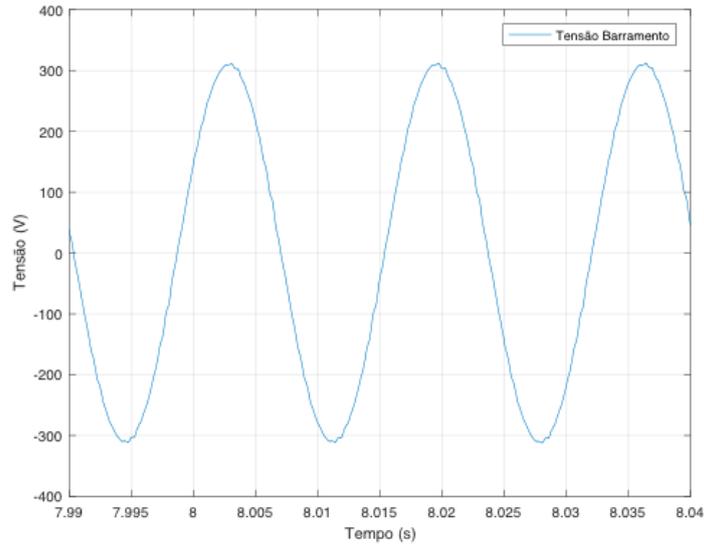


Figura 5.20: forma senoidal da tensão CA

5.2.4 CORRENTES

A figura 5.21 mostra as correntes na carga, do inversor e do gerador. O gráfico mostra todas as correntes com a forma senoidal, conforme esperado, e todas em fase, já que não temos potência reativa sendo solicitada pela carga. O gráfico mostra, ainda, o correto funcionamento do inversor CC-CA como fonte de corrente, onde a corrente produzida pelo inversor está bem adequada e livre de grandes distorções.

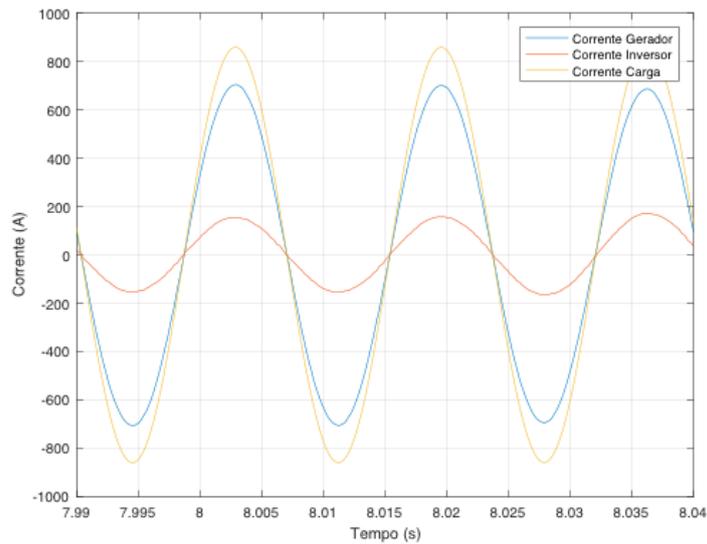


Figura 5.21: Correntes na carga, do inversor e do gerador

5.3 TERCEIRA SIMULAÇÃO

Para a terceira simulação foi utilizada a mesma situação da primeira simulação, porém apenas o sistema diesel está suprindo a carga. A simulação foi dividida em dois momentos, inicialmente foi realizada a entrada, em rampa, de uma carga de 400 kW (80% da capacidade do gerador). Em seguida, foi realizada a entrada, em rampa, de uma carga de 46 KVA com fator de potência de 0.8, simulando o acionamento de um motor. Foram consideradas, ainda, uma irradiação constante de 1000 W/m^2 e temperatura de 30 graus celcius .

5.3.1 TORQUE E VELOCIDADE DO GERADOR

Na figura 5.22 podemos observar a dinâmica do torque mecânico no caso em que apenas o gerador está suprindo a carga. O resultado obtido é semelhante aos obtidos anteriormente, porém o valor do torque é mais elevado, tendo em vista que toda a potência solicitada pela carga é suprida pelo gerador.

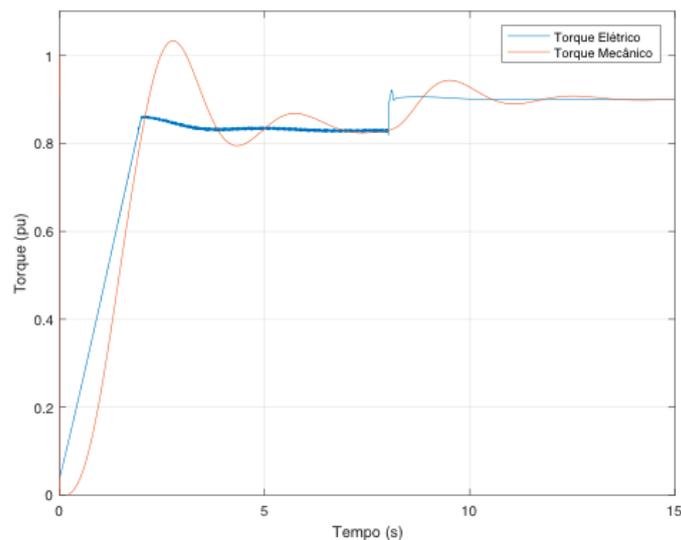


Figura 5.22: Torque Mecânico x Torque Elétrico

5.3.2 COMPENSAÇÃO DE REATIVOS E POTÊNCIA ATIVA

A figura 5.23 mostra a potência reativa produzida pelo gerador. Nesta situação o controle de tensão é realizado pelo sistema diesel. Esta característica torna-se necessária, já que o gerador diesel é a fonte principal de energia e em momentos que o sistema fotovoltaico não esteja produzindo energia, o sistema diesel deve ser capaz de realizar a compensação de reativos.

A figura 5.24 mostra a potência ativa fornecida pelo gerador diesel. O resultado mostra-se de acordo com o esperado, já que a potência fornecida corresponde à potência total solicitada pela carga.

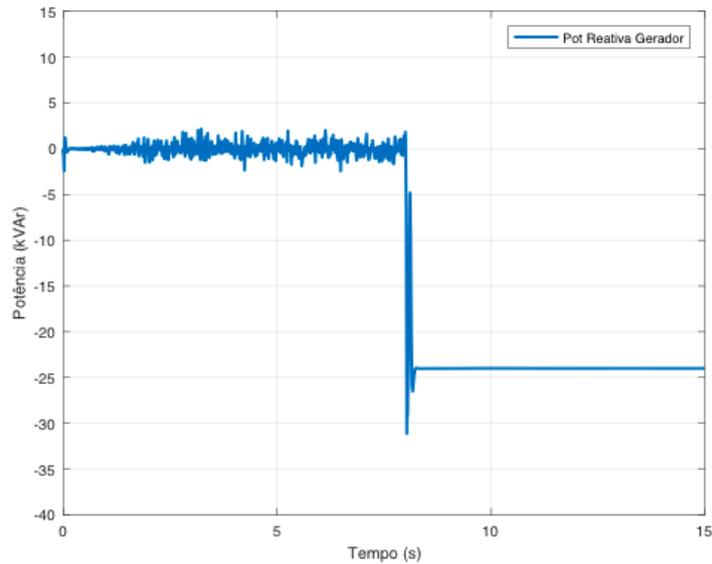


Figura 5.23: Potência reativa fornecida pelo gerador

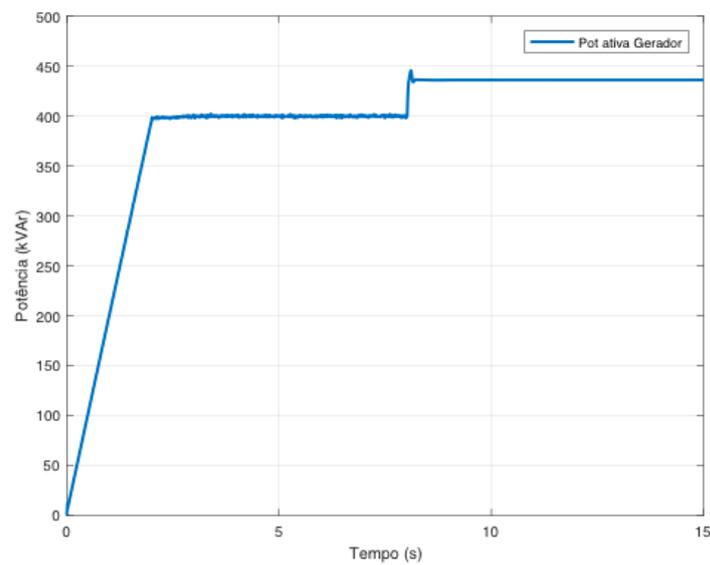


Figura 5.24: Potência ativa fornecida pelo gerador

5.3.3 TENSÃO E CORRENTE DO GERADOR

Na figura 5.25 podemos ver que a corrente fornecida pelo gerador está senoidal, como esperado e sem grande distorção após o aumento de carga.

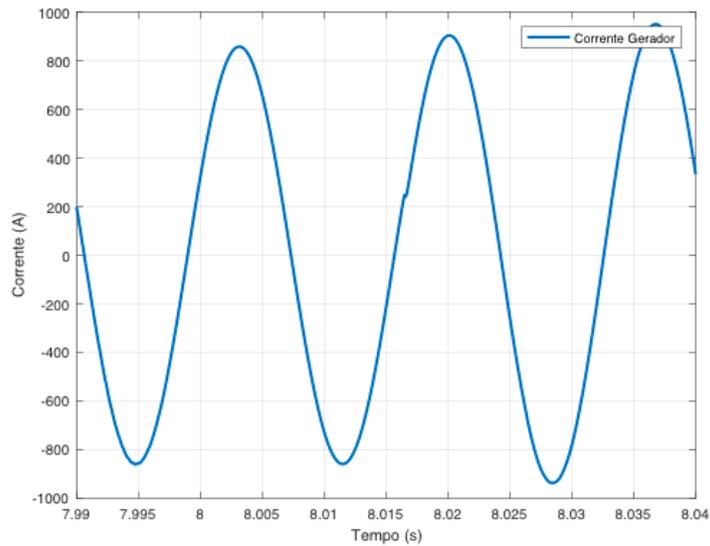


Figura 5.25: Corrente do gerador

A figura 5.26 mostra a tensão senoidal, produzida pelo gerador diesel. A tensão apresenta uma pequena perturbação após o aumento de carga, porém esta é, rapidamente, corrigida pelo regulador de tensão do gerador diesel.

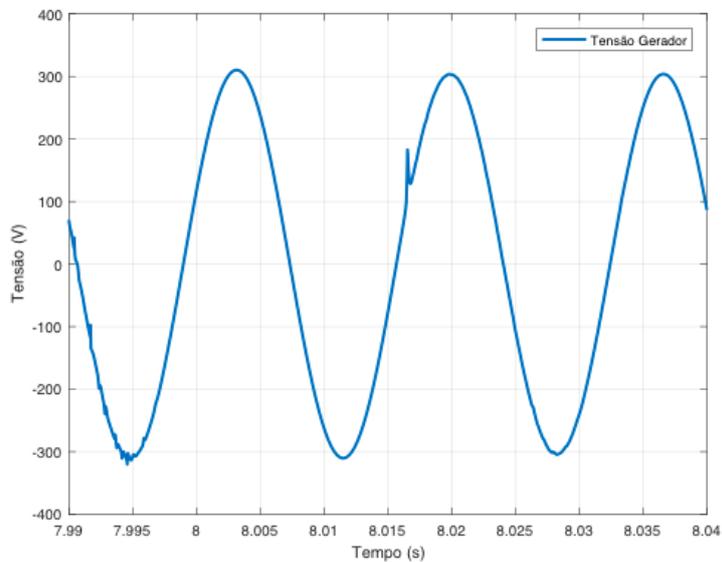


Figura 5.26: Tensão do gerador

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi realizar a integração de um sistema de geração fotovoltaico com um sistema de geração diesel. A filosofia de funcionamento do sistema assemelha-se ao sistema conectado a rede, porém demanda maior cuidado, principalmente, com a manutenção da frequência do sistema. Tendo em vista que as máquinas síncronas possuem grande sensibilidade às variações de carga, diferentemente de uma rede elétrica forte.

Para isso foi feita uma abordagem teórica dos principais componentes e métodos de controle disponíveis para esse tipo de integração. Em seguida apresentamos componentes e método de controle escolhidos para a modelagem, bem como o detalhamento do funcionamento de cada módulo do sistema. O modelo proposto consistem em um sistema fotovoltaico com seguidor de máxima potência conectado a um gerador diesel a través de um conversor CC-CA, trifásico, e um conversor CC-CC boost. A estratégia de controle baseia-se na teoria da transformada de Park, já que o sistema de controle escolhido foi PI. O controlador PI mostra-se ineficiente para rastreamento de sinais variantes no tempo, por isso o uso da transformada de Park torna-se necessário, pois as componentes abc (senoidais) são transformadas em sinais estacionários nas coordenadas dq0.

A modelagem e simulação do sistema foi realizada utilizando-se o software Simulink®/MATLAB®.

Atraves da analise das simulacoes, observou-se que o sistema de controle PI, baseado na teoria dq0, foi capaz de fornecer uma tensao senoidal em fase com a tensao da rede e, tambem, fornecer a maxima potencia gerada pelo modulo fotovoltaico. Sendo capaz, ainda, de responder satisfatoriamente às variações de carga, temperatura e irradiação.

Outra característica importante que se pode observar através das simulacoes e que o sistema e capaz compensar o reativo da carga, evitando que o gerador necessite fornecer qualquer energia reativa, atuando, assim, como regulador de tensão do sistema. Porém, de acordo com os resultados obtidos na terceira simulação, podemos observar que o gerador diesel também é capaz de realizar a compensação de reativos nos momentos em que o sistema fotovoltaico não esteja funcionando.

Com isso, conclui-se que o modelo proposto se comportou como esperado e que este

pode ser utilizado como um pontape inicial para futuros trabalhos de maior profundidade.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi apresentada apenas uma dentre diversas abordagens possíveis da integração de um sistema fotovoltaico a um sistema de geração à diesel. Além disso, dentro da própria modelagem estudada, os presentes autores enfrentaram dificuldades em algumas situações, que podem, inclusive, ser exploradas em futuros trabalhos. Dentro desse contexto, listam-se aqui algumas sugestões para diferentes tratamentos sobre o tema deste trabalho.

- Os controladores PI presentes na modelagem tiveram seus ganhos ajustados na base de tentativa e erro, quando não disponíveis os parâmetros na literatura, sendo os valores ótimos destes diferentes para cada simulação desejada. Logo, pode-se considerar o estudo de uma forma de controle otimizada, que automatize o processo de seleção de ganhos, ou outra abordagem computacional, de modo a minimizar o esforço do projetista;
- Em um sistema isolado, como o proposto, torna-se vital a incorporação de um banco de baterias para armazenar a energia excedente do sistema fotovoltaico em condições de baixa carga. Tal implementação não foi escopo deste trabalho.
- Há a possibilidade de uma abordagem mais eficiente no controle de frequência do sistema. Existem estudos de sistemas de controle mais elaborados que o droop de frequência aqui proposto, onde utiliza-se o próprio banco de baterias do sistema fotovoltaico para gerar a frequência de referência do sistema.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. 193 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- BLAADJERG, F.; IONEL, D. M. **Renewable energy devices and systems with simulations in MATLAB® and ANSYS®**. 1. ed. Flórida: CRC Press, 2017. 402 p.
- CALAÇA, L. E. M. **Projeto de um sistema de conversor multinível para painéis fotovoltaicos**. 2016. 154 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Redes de energia) – Universidade de Madeira, Funchal, Portugal, 2016.
- CHAPMAN. **Fundamentos de Máquinas elétricas**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2013. 698 p.
- DE ALMEIDA, P. M. **Contribuições ao estudo de conexões de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica sem filtros passivos: Projeto de controladores digitais para redução do conteúdo harmônico**. 2013. 193 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.
- FITZGERALD; KINGSLY. **Máquinas elétricas**. 7. ed. São Paulo: Bookman, 2014. 724 p.
- GAUTAM,PRAJJWALL. Three-Phase Hysteresis Band Current Controlled Inverter (with MATLAB/SIMULINK model). Disponível em: <<http://www.circuitzoom.com/three-phase-hysteresis-band-current-controlled-inverter/>>. Acesso em: 01/08/2018.
- GTES. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 01/08/2018.

- HALAWANI; ÖZVEREN. A hybrid power system for remote areas in Jordan. **Analysis, operation, planning and design of small scale autonomous power systems that can work in an "ON/OFF - GRID" modes**, v. 1, p. 2394–0697, 2015.
- KIM, Y.-S.; KIM, E.-S. ; MOON, S.-I. Frequency and voltage control strategy of stand-alone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 31, p. 2394–0697, 2016.
- MATHWORKS. Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/synchronous-machine.html>>. Acesso em: 01/07/2018.
- MOHAN, N.; UNDERLAND, T. ; ROBBINS, W. **Power electronics : converters, applications, and design**. 3. ed. Nova Jersey: John Wiley Sons, 2003. 802 p.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2015. 801 p.
- PAPATHANASSIOU, S. A.; PAPADOPOULOS, M. P. Dynamic characteristics of autonomous wind– diesel systems. **Renewable Energy**, v. 2, p. 293–311, 2001.
- PATHAK, S. M.; SATARKAR, M. Three level active neutral point clamped inverter with sinusoidal pwm control. **International Journal Of Current Engineering And Scientific Research**, v. 7, p. 2394–0697, 2017.
- PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; DA SILVA PEREIRA, E. J.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B. ; MACEDO, W. N. **Sistemas Híbridos Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396 p.
- RAZALI, A. M.; RAHMAN, M. ; RAHIM, N. A. Implementation of d-q decoupling and feed-forward current controller for grid connected three phase voltage source converter. **2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting**, v. 1, p. 2394–0697, 2014.
- ROCHA, CAMILO. As dificuldades para a expansão da energia solar no Brasil. Disponível em: <<https://www.nexojornal.com.br/expresso/2018/01/10/As-dificuldades-para-a-expansão-da-energia-solar-no-Brasil>>. Acesso em: 01/08/2018.

- RODRIGUES, P. M. P. M. **Estrutura de um conversor multinível para aplicação em qualidade de energia eléctrica.** 2011. 67 f. Tese (Dissertação para obtenção de grau em Mestre em Engenharia Electronica e de Computadores) – Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
- STRANDT, A. R. **Comparison of three space vector PWM methods for a three-level inverter with a permanent magnet machine load.** 2013. 67 f. Tese (Master's thesis) – Marquette University, Milwaukee, Estados Unidos, 2013.
- TILLMANN, C. A. C. **Motores de Combustao Interna e seus Sistemas.** 1. ed. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2013. 166 p.
- XIN, H.; WANG, Z.; GAN, D.; YANG, T. ; LIU, Y. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage. **IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY**, v. 4, p. 2394–0697, 2013.
- ZELJKO; MIKLOSEVIC ; JERKOVIC. Synchronous generator modeling using matlab. **Faculty of Electrical Engineering, University of Osijek, Croatia**, v. 1, p. 293–311, 2010.

8 APÊNDICES

APÊNDICE 1: TRANSFORMADAS DE PARK

De acordo com ALMEIDA (2013), para se compreender as transformadas de Clarke e Park deve-se conhecer o fasor espacial. Ele consiste em uma grandeza trifásica instantânea, que pode ser tensão ou corrente, e transporta informação da amplitude, ângulo de fase e frequência. Das tensões trifásicas senoidais balanceadas temos que:

$$v_a = V \cos(\omega t + \theta_0) \quad (8.1)$$

$$v_b = V \cos(\omega t + \theta_0 - \frac{2}{3}\phi) \quad (8.2)$$

$$v_c = V \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{2}{3}\phi) \quad (8.3)$$

em que V , θ_0 e ω são a amplitude, o ângulo de fase e a frequência angular das tensões, respectivamente. Para um conjunto de tensões trifásicas, o fasor espacial pode ser definido como:

$$v = \frac{2}{3}(e^{j0}v_a + e^{j\frac{2}{3}\phi}v_b + e^{j\frac{4}{3}\phi}v_c) \quad (8.4)$$

Substituindo as equações das tensões trifásicas balanceadas em (7.4) e pela identidade $e^{j\theta} = (\cos\theta + j\sin\theta)$ pode-se chegar em:

$$v = (V e^{j\theta_0}) e^{j\omega t} \quad (8.5)$$

onde o fasor espacial $v(t)$ é o mesmo fasor $v e^{j\theta_0}$ que gira no sentido anti-horário com velocidade angular ω . As tensões e correntes trifásicas podem ser representadas pela projeção do fasor espacial em um sistema de coordenadas ortogonais denominado coordenadas $\alpha\beta$

$$v = v_{\alpha\beta} = v_\alpha + jv_\beta \quad (8.6)$$

A transformação das coordenadas $\alpha\beta$ para dq é dada por:

$$V_{dq} = v_d + jv_q = v_{\alpha\beta} e^{-j\varrho(t)} = (v_\alpha + jv_\beta) e^{-j\varrho(t)} \quad (8.7)$$

Escolhendo-se $\varrho(t)$ como ωt resulta em:

$$v_d + jv_q = V e^{j(\omega t + \theta_0)} e^{-j\omega t} = V e^{j\theta_0} \quad (8.8)$$

que não é uma grandeza variante no tempo. Desta forma, v_d e v_q são grandezas CC.

APÊNDICE 2: CÓDIGO DO ALGORITMO P&O

```
persistent V_{ant} P_{ant} V_{MAXant};
```

```
dataType = 'double';
```

```
if isempty(V_{ant})
```

```
    V_{ant}=0;
```

```
    P_{ant}=0;
```

```
    V_{MAXant}=D_ini;
```

```
end
```

```
P= V*I;
```

```
dV= V - V_{ant};
```

```
dP= P - P_{ant};
```

```
if dP != 0
```

```
    if dP < 0
```

```
        if dV < 0
```

```
            D = V_{MAXant}t + deltaV;
```

```
        else
```

```
            D = V_{MAXant} - deltaV;
```

```

        end

    else

        if dV < 0

            D = V_{MAXant} - deltaV;

        else

            D = V_{MAXant} + deltaV;

        end

    end

end

else D=V_{MAXant};

end

if D >= Dmax | D<= Dmin

    D=V_{MAXant};

end

V_{MAXant}=D;

V_{ant}=V;

P_{ant}=P;

```