

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JHONNY JAVIER BARZOLA IZA

**MANUTENÇÃO DE TENSÃO EM TRANSITÓRIOS DE CARGA –
ANÁLISE DE UMA MICRORREDE COM AEROGERADOR E
ARMAZENAMENTO EM BATERIAS**

VITÓRIA
2016

JHONNY JAVIER BARZOLA IZA

**MANUTENÇÃO DE TENSÃO EM TRANSITÓRIOS DE CARGA –
ANÁLISE DE UMA MICRORREDE COM AEROGERADOR E
ARMAZENAMENTO EM BATERIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Profa. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

Coorientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin.

VITÓRIA
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B296m Barzola Iza, Jhonny Javier, 1987-
Manutenção de tensão em transitórios de carga : análise de
uma microrrede com aerogerador e armazenamento em baterias
/ Jhonny Javier Barzola Iza. – 2016.
89 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

Coorientador: Jussara Fardin.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Turbina eólica. 2. Geração distribuída de energia elétrica.
3. Energia – Armazenamento – Baterias. 4. Energia eólica. 5.
Energia elétrica e calor – Cogeração. 6. Geradores síncronos a
ímã permanente (GSIP). 7. Microrrede (Sistemas de energia
elétrica). I. Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. II. Fardin Jussara.
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico.
IV. Título

CDU: 621.3

JHONNY JAVIER BARZOLA IZA

MANUTENÇÃO DE TENSÃO EM TRANSITÓRIOS DE CARGA –
ANÁLISE DE UMA MICRORREDE COM AEROGERADOR E
ARMAZENAMENTO EM BATERIAS

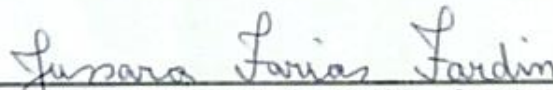
Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08 de 04 de 2016.

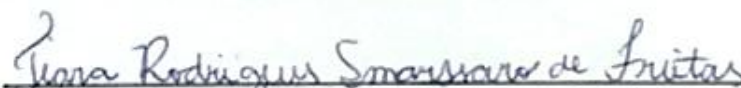
COMISSÃO EXAMINADORA



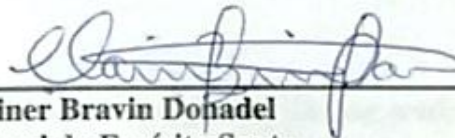
Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES



Profa. Dra. Jussara Farias Fardin - Coorientadora
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES



Profa. Dr. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES



Prof. Dr. Clainer Bravin Donadel
Instituto Federal do Espírito Santo

“Todos os homens sonham, mas não da mesma forma. Os que sonham de noite, nos recessos poeirentos das suas mentes, acordam de manhã para verem que tudo, afinal, não passava de vaidade. Mas os que sonham acordados, esses são homens perigosos, pois realizam os seus sonhos de olhos abertos, tornando-os possíveis.”

(Thomas Edward Lawrence)

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, o altíssimo e misericordioso, o fruto do mistério das perfeições. Verdadeira carne e verdadeiro sangue. O ser que amo e permite me aproximar com as pessoas que mais quero.

Gostaria agradecer à minha família pelo apoio cedido durante o período de realização do meu mestrado e a Heidi Urrego por fazer parte da minha vida.

Também quero agradecer a Pito, assim como aos meus amigos que me acompanharam durante a minha estadia no Brasil.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Domingos Simonetti e Prof.^a Jussara Fardin por todo o suporte oferecido, paciência e pela confiança depositada em mim na realização deste trabalho. Também gostaria de agradecer a todos os colegas de laboratório que foram fonte de motivação e descontração durante o período da pós-graduação. Em especial, gostaria de agradecer aos colegas: Flavio Oliveira, Daniel Carletti, Thiago Amorim, Arthur Amorim, Weder Nunes, Luciano Medina, Odair de Barros, Rommenigue Oliveira, Thiago Malavazi e muitos outros que fizeram parte desta caminhada.

Também gostaria agradecer de maneira especial professores da banca avaliadora Clainer Bravin e Tiara Rodrigues.

Por fim, agradeço ao sistema de governo atual no Equador e o Senescyt, pela concessão da minha bolsa de estudos, sem a qual esta jornada não teria chegado ao seu destino final.

Resumo

A geração distribuída, incorporada ou integrada, consiste de unidades geradoras isoladas e de menor potência que são conectadas ao longo do sistema de alimentação, diferente da geração concentrada de grandes usinas geradoras. As fontes de energia elétrica chamadas microfones são, por sua vez, de potência bem menor em relação à rede de distribuição onde são ligadas. A partir dessas fontes tais como painéis fotovoltaicos, pequenos sistemas de energia eólica, células de combustível, microturbinas e outras que são localizadas perto das cargas, o consumidor pode gerar sua própria energia elétrica e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Para conectar uma microfonte na rede de distribuição local, esta deve encontrar-se sincronizada com a rede principal. Para isso, é necessário que as diferenças de tensão, frequência e fase sejam mínimas e, assim, evitar uma desestabilização no sistema.

Nos aerogeradores, o nível de potência gerada é incerto em cada instante por causa do vento variável. Isto pode provocar desestabilização no sistema quando trabalha de maneira autônoma. É aqui onde os sistemas de armazenamento de energia são uma boa proposta para minorar essas variações, inclusive para conseguir um fluxo de potência constante.

Esta dissertação analisa a modelagem e simulação em PSCAD de uma turbina eólica com gerador síncrono de ímã permanente ligado a uma rede por meio de um conversor controlado em potência e tensão. Também considera a inserção de um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias, para mostrar o comportamento do aerogerador durante variações do vento e da carga na rede, com e sem o sistema de armazenamento acoplado. O sistema de armazenamento visa manter constante o fluxo de potência para a rede. Os resultados mostram a utilidade da abordagem.

Abstract

Distributed generation, incorporated or integrated, consists of isolated generating units connected through the supply system of less power than the concentrated generation of large power plants. The so-called microsources are, in turn, sources of electric power of much less power relative to the distribution network where they are connected. From these sources, such as photovoltaic panels, small wind power systems, fuel cells, microturbines and others, that are located near the loads, consumers can generate their own electricity and even supply the surplus to the distribution network of its location. To connect a microsource in the local distribution network, this must be in synchronism with the main network. Therefore, it is necessary that the differences in voltage, frequency and phase are negligible and thus avoid destabilizing the system.

In wind turbines, the power output level at each time is uncertain because of the variable wind. This may cause instability in the system when working autonomously. This is where energy storage systems are a good proposal to reduce these variations, even for getting a steady flow of power.

This dissertation analyzes the modeling and simulation in PSCAD of a wind turbine with a permanent magnet synchronous generator connected to a network through a controlled converter in power and voltage. It also considers the inclusion of an energy storage system based on batteries, to show the wind turbine behavior during wind and load variations, with and without the attached storage system. The storage system seeks to maintain constant power flow to the network. The results show the utility of the approach.

Sumário

| | |
|---|-----|
| Sumário..... | x |
| Lista de figuras | xii |
| Lista de tabelas | xiv |
| Nomenclatura | xv |
| Capítulo 1: Introdução | 16 |
| 1.1 Objetivos..... | 17 |
| 1.2 Trabalhos Relacionados..... | 17 |
| 1.3 Organização da Dissertação..... | 19 |
| Capítulo 2: Conceitos Fundamentais | 20 |
| 2.1 Geração Distribuída | 20 |
| 2.1.1 Vantagens da GD | 20 |
| 2.1.2 Desvantagens da GD | 21 |
| 2.2 Aerogeradores..... | 21 |
| 2.2.1 Vantagens dos aerogeradores | 22 |
| 2.2.2 Desvantagens dos aerogeradores | 22 |
| 2.2.3 Estrutura básica | 22 |
| 2.2.4 Mecanismos de controle | 24 |
| 2.2.5 Sistemas elétricos | 25 |
| 2.2.6 Qualidade da energia | 29 |
| 2.2.7 Aplicações | 30 |
| 2.3 Armazenamento de energia | 30 |
| 2.3.1 Armazenamento de energia cinética..... | 31 |
| 2.3.2 Armazenamento de energia elétrica | 33 |
| 2.3.3 Armazenamento de energia potencial | 38 |
| 2.4 Considerações finais | 40 |
| Capítulo 3: Modelagem do Sistema..... | 41 |
| 3.1 Modelagem da turbina | 41 |
| 3.1.1 Coeficiente de Betz..... | 41 |
| 3.1.2 Coeficiente de Anderson | 42 |
| 3.1.3 Coeficiente de Heier | 43 |
| 3.2 Modelagem do gerador síncrono | 47 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Modelagem do conversor e controle | 48 |
| 3.3.1 Controle GSC | 53 |
| 3.3.2 Controle MSC..... | 55 |
| 3.4 Bateria..... | 56 |
| 3.5 Conversor CC-CC..... | 56 |
| 3.6 Considerações Finais | 58 |
| | |
| Capítulo 4: Sistema proposto sem o armazenamento de energia | 59 |
| 4.1 Gerador | 59 |
| 4.2 Conversor MSC | 61 |
| 4.3 Inversor GSC | 63 |
| 4.4 Procedimento de Inicialização | 64 |
| 4.5 Resultados obtidos | 64 |
| 4.5.1 Carga de 1 pu..... | 67 |
| 4.5.2 Carga de 0,5 pu..... | 69 |
| 4.6 Comentários..... | 70 |
| | |
| Capítulo 5: Sistema proposto com o armazenamento de energia..... | 71 |
| 5.1 Bateria..... | 71 |
| 5.2 Conversor CC-CC..... | 71 |
| 5.3 Resultados obtidos | 73 |
| 5.4.1 Carga de 1 pu..... | 77 |
| 5.4.2 Carga de 0.5 pu..... | 79 |
| 5.4.3 Ilhamento | 80 |
| 5.5 Considerações finais | 82 |
| | |
| Capítulo 6: Conclusões | 83 |
| 6.1 Conclusões..... | 83 |
| 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros | 84 |
| | |
| 6.3 Produção Científica | 85 |
| | |
| Referências Bibliográficas | 86 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Estrutura básica de um aerogerador..... | 23 |
| Figura 2.2 - Sistemas elétricos dos aerogeradores de velocidade fixa | 26 |
| Figura 2.3 - Sistema elétrico dos aerogeradores de velocidade variável: (a) Gerador de Indução de dupla alimentação; (b) gerador síncrono multipolos a imã permanente | 27 |
| Figura 2.4 - Estrutura básica de um volante de inercia | 31 |
| Figura 2.5 - Topología do volante de inercia ligado ao elo CC | 32 |
| Figura 2.6 - Estrutura básica de uma bateria | 33 |
| Figura 2.7 - Topologias para baterias em aerogeradores..... | 34 |
| Figura 2.8 - Estrutura básica de um supercapacitor..... | 35 |
| Figura 2.9 - Topologia usada com supercapacitores | 36 |
| Figura 2.10 - Topologia usada com supercondutores..... | 38 |
| Figura 2.11 - Topologia usada para ar comprimido | 40 |
| Figura 3.1 - Coeficiente de potência de Betz. $C_p \times a$ | 42 |
| Figura 3.2 - Coeficiente de potência de Anderson ($\beta=0$). $C_p \times \lambda$ | 43 |
| Figura 3.3 - Coeficiente de potência simulink ($\beta=0$). $C_p \times \lambda$ | 44 |
| Figura 3.4 - Para ($\beta=0,5,10,15$), ($C_{p_max}=0.48, \lambda=8.1$). $C_p \times \lambda$ | 45 |
| Figura 3.5 - Valores de $K_p \times \omega_m$ para diferentes velocidades do vento..... | 46 |
| Figura 3.6 - Equações de transferência de torque..... | 47 |
| Figura 3.7 - Esquema principal do sistema de potência com VSC..... | 49 |
| Figura 3.8 - Esquema principal da VSC para o fluxo de potência | 49 |
| Figura 3.9 - Representações das transformadas de Clark e Park..... | 50 |
| Figura 3.10 - Representação geral das conversões a serem feitas no sistema de potência..... | 51 |
| Figura 3.11 - Representação da malha de corrente do controle GSC..... | 54 |
| Figura 3.12 - Representação da malha de tensão do controle GSC..... | 55 |
| Figura 3.13 - Circuito equivalente da bateria | 56 |
| Figura 3.14 - Conversor CC-CC para carga e descarga da bateria..... | 57 |
| Figura 3.15 - Malhas de controle para o conversor da bateria | 58 |
| Figura 4.1 - Fluxo de potência no MSC desde a turbina até o conversor AC_CC..... | 60 |
| Figura 4.2 - Cálculo do ângulo de fase no MSC com PLL | 60 |
| Figura 4.3 - Conversão da corrente do sistema trifásico a dq no MSC | 61 |
| Figura 4.4 - Malhas internas de corrente e externas potências MSC | 62 |
| Figura 4.5 - Conversão dos sinais dq a trifásico e geração do PWM no MSC..... | 62 |
| Figura 4.6 - Malhas de corrente internas e malha de tensão e potência no GSC | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.7 - Fluxo de potência no GSC desde o inversor CC_AC até a barra da rede..... | 64 |
| Figura 4.8 - Configuração do vento na entrada da turbina do aerogerador em (m/s)..... | 65 |
| Figura 4.9 - Potências ativas MSC (preto) e GSC (vermelho). Potências reativas MSC (verde) e GSC (ciano) sem ESS | 66 |
| Figura 4.10 - Tensão no elo CC com referência 620 VCC sem ESS | 67 |
| Figura 4.11 - Potência ativa na carga 1 pu (vermelho), potência ativa fornecida pela rede (verde) e potência reativa na rede (azul)..... | 68 |
| Figura 4.12 - Tensão e corrente (fase a) na carga para 1 pu sem ESS | 68 |
| Figura 4.13 - Potência ativa na carga 0.5 pu (vermelho), potência reativa na carga (ciano), potência ativa da rede (azul) e potência reativa da rede (verde) sem ESS | 69 |
| Figura 4.14 – Tensão e corrente (fase a) na carga para 0.5 pu sem ESS..... | 70 |
| Figura 5.1 - Circuito equivalente da bateria modelado no PSCAD..... | 71 |
| Figura 5.2 - Conversor CC-CC com indutor 0.17mH | 72 |
| Figura 5.3 - Controle do conversor CC_CC para função Buck e boost | 72 |
| Figura 5.4 - ESS com conversor CC_CC e controle ligados ao aerogerador..... | 73 |
| Figura 5.5 - Potências ativas MSC (verde) e GSC (vermelho). Potências reativas MSC (azul) e GSC (ciano) com ESS..... | 74 |
| Figura 5.6 - Tensão na bateria durante a simulação | 75 |
| Figura 5.7 - Corrente na bateria durante a simulação..... | 76 |
| Figura 5.8 - Tensão no elo CC com ESS..... | 77 |
| Figura 5.9 - Potência ativa na carga 1 pu (azul), potência ativa fornecida pela rede (vermelho) e potência reativa na rede (ciano) com ESS..... | 78 |
| Figura 5.10 - Tensão e corrente (fase a) na carga para 1 pu com ESS | 78 |
| Figura 5.11 - Potência ativa na carga 0.5 pu (azul), potência ativa fornecida pela rede (ciano) e potência reativa na rede (verde) com ESS | 79 |
| Figura 5.12 - Tensão e corrente (fase a) na carga para 0.5 pu com ESS | 80 |
| Figura 5.13 - Tensão e corrente na carga durante os 200ms de ausência da rede | 81 |
| Figura 5.14 - Potência fornecida à carga | 81 |
| Figura 5.15 - Ângulo de referência do eixo d do GSC..... | 81 |
| Figura 5.16 - Potências ativa e reativa fornecidas à carga com para fp 0,92 | 82 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos aerogeradores de velocidade fixa | 27 |
| Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens dos aerogeradores de velocidade variável | 28 |
| Tabela 2.3 - Causas dos principais distúrbios provocados pelos aerogeradores | 29 |
| Tabela 2.4 - Propriedades do conversor em aerogeradores | 30 |
| Tabela 3.1 - Valores obtidos de c_p para varios valores de beta | 45 |
| Tabela 4.1 - Valores obtidos de Potências ativas MSC e GSC sem ESS | 66 |
| Tabela 5.1 - Valores obtidos de Potências ativas MSC e GSC com ESS | 75 |

Nomenclatura

BT - Baixa Tensão

B2B – *Back to Back*

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

DC – *Direct current*; Corrente Contínua

DFIG – *Doubly-Fed Induction Generator*; Gerador de Indução de Dupla Alimentação

ESS – *Energy Storage System*; Sistema de Armazenamento de Energia

GD – Geração Distribuída

GIDA – Gerador de indução duplamente alimentado

GSIP – Gerador síncrono de ímã permanente

IG – *induction generator*; Gerador de Indução

MR – Mirorrede

PMSG – *Permanent magnet synchronous generator*; Gerador Síncrono a Imãs Permanentes

PWM - *Pulse-Width Modulation*; Modulação por Largura de Pulsos

Q - Potência Reativa

SG – *synchronous generator*; Gerador Síncrono

VSI - *Voltage Source Inverter*; Inversor de Tensão

WECS – *Wind energy conversion system*; Sistema de Geração Eólica

Capítulo 1: Introdução

Historicamente a energia elétrica tem sido gerada em grandes unidades, tais como usinas hidrelétricas, termelétricas e nucleares, para ser transmitida por meio de um extenso sistema de transmissão em alta tensão, e distribuída aos consumidores finais em média e baixa tensão.

O impacto ambiental causado na geração em grande escala está alterando o modelo de geração de energia atual a uma alternativa em pequena escala próxima às unidades de consumo denominada geração distribuída GD, trazendo consigo uma maior confiabilidade no fornecimento para o consumidor. Quando falamos de um grupo com estas pequenas fontes e sistemas de armazenamentos de energia ligadas entre si, e cargas próximas conectadas, diz-se que formou-se uma microrrede MR.

Para uma microfonte participar dentro do sistema elétrico, deve atender vários requisitos para sincronizar-se e, principalmente, não alterar a qualidade da energia na rede. Este é um problema quando a fonte de energia é pouco previsível como acontece na geração eólica e solar, cujos usos estão em constante crescimento.

Na geração eólica em particular existem várias configurações para otimizar o funcionamento delas. Os geradores de indução duplamente alimentados GIDA são os mais usados neste tipo de geração em maior potência, mas apresenta a desvantagem de necessitar de caixa de engrenagens para adaptar a velocidade do vento com a frequência da rede. Ultimamente os geradores síncronos de ímã permanente GSIP tem ganhado atratividade por permitir trabalhar com fluxo constante, velocidades baixas ao fazer uso de um grande número de polos e assim dispensar a caixa de engrenagens, embora seu custo ainda represente uma dificuldade em altas potências. Mas em potências menores GSIP tem sido a opção mais indicada pela robustez que representa para o sistema de alimentação. Também existem várias configurações e estratégias para manter os níveis de tensão constantes durante o controle do fluxo de potência gerado para a rede. Estes são implementados no controle do conversor que interliga a máquina eólica à rede, por meio de transformação de referencial das grandezas tensão e corrente, e controles com PLL.

Outra ferramenta usada para melhorar a resposta do sistema a variações são os sistemas de armazenamento de energia ESS. O seu funcionamento consiste em guardar o excesso de energia gerada em um momento para logo fornecê-la quando o sistema requer.

Com isto, obtemos um fluxo de potência quase constante em um sistema que pode trabalhar de maneira autônoma.

Com armazenamento de energia devemos considerar alguns parâmetros importantes como a potência gerada, o tempo de resposta requerido, preços e vida útil para escolher o mais apropriado. No entanto, as baterias são as mais populares entre estes sistemas juntamente com os supercapacitores por serem menos caros que outros sistemas mantendo boas características no funcionamento.

1.1 Objetivos

Esta dissertação propõe a modelagem e simulação em PSCAD de uma turbina eólica acionando um gerador síncrono de ímã permanente com controle de potência e tensão para tentar extrair a potência máxima gerada mantendo o nível de tensão na saída, assim como a modelagem e simulação de um banco de baterias para mostrar o comportamento da máquina eólica completa conectada à rede durante variações de vento e carga. Isto com e sem o sistema de armazenamento de energia, para avaliar vantagens e desvantagens de sua utilização.

Para completar os objetivos deste trabalho, segue-se os seguintes itens:

- Apresentar uma revisão bibliográfica dos tipos de máquinas eólicas atuais a partir de sua potencial participação na geração distribuída. Também, os tipos de armazenamento de energia mais usados e as suas características para identificar as existentes nessa área;
- Apresentar a modelagem do aerogerador considerando o fluxo de potência, como base para logo estabelecer as grandezas da máquina a ser estudada e depois desenvolver um controle necessário.
- Analisar uma estratégia de controle para a ligação de um armazenamento de energia no sistema com conversores CC-CC.
- Realizar simulações utilizando o programa computacional PSCAD para analisar o comportamento do sistema completo com e sem armazenamento de energia para variações de vento e efeitos causados na rede.

1.2 Trabalhos Relacionados

Os trabalhos relacionados ao tema desta dissertação e usados para a elaboração da mesma apresentam a turbina eólica com GSIP na GD, características, vantagens,

desvantagens e as estratégias de controle para os diferentes modos de operação com e sem armazenamentos de energia.

(Ricardo Márquez Dutra, 2001) faz um grande estudo sobre a evolução da energia eólica ao longo do tempo a nível mundial e, em particular, o potencial eólico no Brasil. Também analisa o impacto ambiental e a viabilidade técnica-econômica na instalação de aerogeradores sob valores normativos e as suas perspectivas.

(J. G. Sloomweg et al., 2003) estuda o impacto dos aerogeradores na dinâmica dos sistemas elétricos de potência. Analisa três configurações nos aerogeradores mais usadas. Logo, faz uma modelagem da turbina eólica da maneira mais aproximada possível com uma turbina real.

(Thomas Ackermann, 2005) agrupa vários autores e faz um estudo sobre configurações dos aerogeradores, tipos de geradores, efeitos dos conversores e analisa as vantagens e desvantagens de cada configuração.

(CEDRADT, 2006) trata aspectos gerais da geração eólica. Também descreve passo a passo a modelagem e construção de um aerogerador em PSCAD, para logo realizar testes e analisar o seu comportamento.

(Gabriele Michalke, 2008) faz um estudo sobre aerogeradores de velocidade variável, modelagem com GIDA e GSIP. Também avalia o seu impacto em sistemas de potência e controle.

(Olimpo Anaya-Lara et al., 2009) junta vários autores para uma análise sobre as diferentes configurações e funcionamentos dos aerogeradores de velocidade fixa e variável, também os tipos de controle mais usados em cada um deles com conversores.

(S. Benelghali, 2010) faz uma comparação entre geradores de indução GI, os GIDA, geradores síncronos GS e os GSIP para aerogeradores mostrando as vantagens e desvantagens de cada um. Destaca o rendimento do GSIP com um modelo mais robusto, e de pouca manutenção.

(Md MarufHossain, 2015) faz uma análise das diferentes configurações dos sistemas de conversão da energia do vento com geradores síncronos e de indução com e sem caixa de transmissão. Também estuda a necessidade de sistemas de armazenamento de energia ESS.

(Chandra Bajracharya, 2008) desenvolve um controle para conversor de fonte de tensão VSC para aerogeradores baseado em controle vetorial com malhas de corrente, potências e tensão do elo CC com o modelo matemático do sistema e simulações em PSCAD.

(Abdeldjalil Dahbi et al., 2014) realiza um controle do aerogerador com GSIP ligado à rede e analisa a extração máxima de potência, MPPT, de maneira experimental.

(Mohammed A. Badr et al., 2015) faz uma modelagem de aerogeradores com GSIP ligados à rede e uma análise de comportamento com múltiplas unidades agrupadas.

(Xu Guoyi et al., 2012) usa como sistema de armazenamento de energia a bateria em um aerogerador com GSIP para minimizar as variações de potência ativa na saída do aerogerador acima de 1 Hz.

(Nora Lachguer et al., 2011) usa um sistema de baterias no elo CC com conversor bidirecional para aerogeradores com GSIP e apresenta uma estratégia de controle para variações de carga e vento em simulink do matlab mostrando resultados positivos em baixas potências.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, conforme segue:

- Capítulo 2: Tem os conceitos fundamentais a respeito da geração distribuída e a participação dos aerogeradores. Também apresenta alguns conceitos das turbinas eólicas, geradores síncronos e vários tipos de armazenamento de energia que servem como embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 3: Apresenta a modelagem do aerogerador conectado a uma rede de distribuição e um banco de baterias que será ligado no elo CC com o conversor a ser usado. É feita a modelagem onde se pode estabelecer uma velocidade de vento na entrada do sistema, sendo transformada a energia elétrica com um GSIP para logo formar um fluxo de potência por meio de um conversor e inversor de seis pulsos (BACK TO BACK) com controle de potência e tensão no elo CC. Com isto, pode-se impor na saída potência ativa fornecida à rede;
- Capítulo 4: Este capítulo mostra as simulações do aerogerador com o controle para um comportamento a variações do vento com os resultados obtidos sem o banco de baterias ligado no elo CC;
- Capítulo 5: Apresenta os resultados obtidos através de simulações do aerogerador com variações no vento com o armazenamento de energia ligado no elo CC por meio de um conversor CC-CC para logo comparar o comportamento do sistema com e sem esse banco de baterias;
- Capítulo 6: É o capítulo dedicado às conclusões e contribuições desta dissertação, também sugestões e possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2: Conceitos Fundamentais

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos conceitos fundamentais que abrangem a geração distribuída e a participação dos aerogeradores de baixa potência. São apresentadas várias estruturas usadas, e modos de operação. Também são vistos os tipos de armazenamentos de energia mais utilizados.

2.1 Geração Distribuída

Devido aos benefícios em questões técnicas, ambientais e econômicas, o interesse pela integração de unidades de geração descentralizada, ou distribuída tem aumentado em anos recentes (Ricardo Márquez Dutra, 2001). A GD consiste basicamente de geração de energia elétrica por meio de fontes de energia de pequena potência em lugares tão próximos quanto possível para as cargas.

2.1.1 Vantagens da GD

A GD apresenta uma série de vantagens e desvantagens (Ronny González, 2003). Dentre as possíveis vantagens, destacam-se:

- A GD pode tirar necessidade de utilizar redes de transmissão longas e investimentos grandes em ativos fixos.
- Pode chegar a reduzir as perdas nas redes de distribuição porque há menos fluxo de energia através das linhas: o interesse em reduzir as perdas na transmissão é grande, pois representam energia, e portanto, investimento e dinheiro perdido.
- Aumento da confiabilidade do fornecimento de energia quando existe uma redução no uso de linhas de AT e a existência de várias fontes. O sistema apresentará menos falhas e terá reservas de geração.
- Controle de potência reativa e regulação de tensão na rede de distribuição: uma das maneiras de regular a tensão é através do uso de transformadores, ou conversores. Com a geração distribuída pode ser injetado reativo com a consequente melhoria dos níveis de tensão.
- Geração de energia limpa utilizando fontes renováveis.
- Automatização e descentralização da geração elétrica permitindo incentivar a competição no mercado de energia.

2.1.2 Desvantagens da GD

Para as possíveis desvantagens da utilização de GD, destacam-se as seguintes (Ronny González, 2003):

- Ainda há uma falta de conhecimento de tecnologias de geração distribuída. Muitos aspectos ainda estão sob investigação, com elevados custos associados por sua complexidade.
- As redes de distribuição são tipicamente projetadas para transportar o fluxo de energia em uma direção, enquanto a geração distribuída requer fluxos que se movem em ambas as direções. Assim, surge a necessidade de melhor planejamento do sistema.
- Maior complexidade nos procedimentos e na realização de manutenções.

As microfontes usadas em GD são, em sua maioria, fontes de energia renováveis ou de fontes que utilizam combustíveis de menor impacto ambiental, tais como: painéis fotovoltaicos, aerogeradores, células a combustível, microturbinas e pequenas centrais hidrelétricas.

2.2 Aerogeradores

Um aerogerador, ou sistema de geração eólica, consiste de um gerador elétrico acoplado ao eixo de um cata-vento (turbina eólica) e que converte energia eólica em energia elétrica.

Recentemente, a geração de energia eólica atraiu muito interesse em GD, e muitas estações de energia eólica estão em serviço em todo o mundo (Ricardo Márquez Dutra, 2001). Em estações de energia eólica, máquinas de indução tem sido largamente utilizados como geradores por serem mais baratos, mas o desenvolvimento de geradores síncronos de ímã permanente, a melhoria da conversão AC-CC, CC-AC e as suas vantagens para a qualidade da potência de saída tornou possível outras soluções para a melhoria do desempenho dos aerogeradores (CEDRAT, 2006). Entretanto, o custo do gerador a ímãs permanentes ainda não o tornou a solução principal em altas potências. Por outro lado, a sua robustez para aplicações em baixa potência o torna preponderante em GD de menor potência.

Por ser a energia eólica uma fonte de energia limpa, renovável, e ecológica, não significa que seu impacto ambiental seja nulo. É importante conhecer as características principais da energia que será utilizada em uma localidade, para tirar o melhor proveito de suas potencialidades sem prejudicar o meio ambiente.

A utilização de aerogeradores como fonte de energia renovável pode trazer várias vantagens e desvantagens (Cesar Moreira, 2007).

2.2.1 Vantagens dos aerogeradores

- O seu impacto ambiental em operação é mínimo ou não emite gases tóxicos, e não contribui para o efeito estufa e o aquecimento global.
- A produção de energia eólica apresenta nenhum impacto sobre as características físico-químicas do solo. Pode coexistir com outros usos da terra, tais como pastagem para o gado ou baixas agrícolas.
- O vento é uma energia inesgotável, abundante e renovável.
- A tecnologia não utiliza combustíveis poluentes, e o vento é um recurso próprio da região, tornando-se uma das fontes mais baratas.
- Em comparação com outras tecnologias aplicadas à eletrificação rural, a operação de um sistema eólico é muito barato e simples. O sistema não requer manutenção exceto uma revisão periódica.
- Projetos de energia eólica podem ser construídos em um período relativamente rápido.

2.2.2 Desvantagens dos aerogeradores

- Energia eólica requer a realização de máquinas grandes e, por conseguinte, caras.
- Para projetos isolados requer um mecanismo para armazenamento de energia gerada, a fim de ter energia quando não há vento suficiente.
- Em comparação com fontes de geração térmica, um projeto de energia eólica tem um custo inicial elevado.
- É uma opção viável e rentável apenas em lugares com muito vento, porém, não pode se aplicar em qualquer lugar.
- A partir de um ponto de vista estético, produz um impacto visual inevitável.
- Pode mudar o comportamento habitual de migração das aves.

2.2.3 Estrutura básica

Atualmente os requisitos de eficiência, confiabilidade, segurança e especialmente as grandes dimensões tornam os aerogeradores modernos equipamentos complexos, tanto do ponto de vista construtivo quanto do ponto de vista operacional (Cesar Moreira, 2007). Os aerogeradores podem apresentar eixo vertical ou horizontal (CRESESB, 2008).

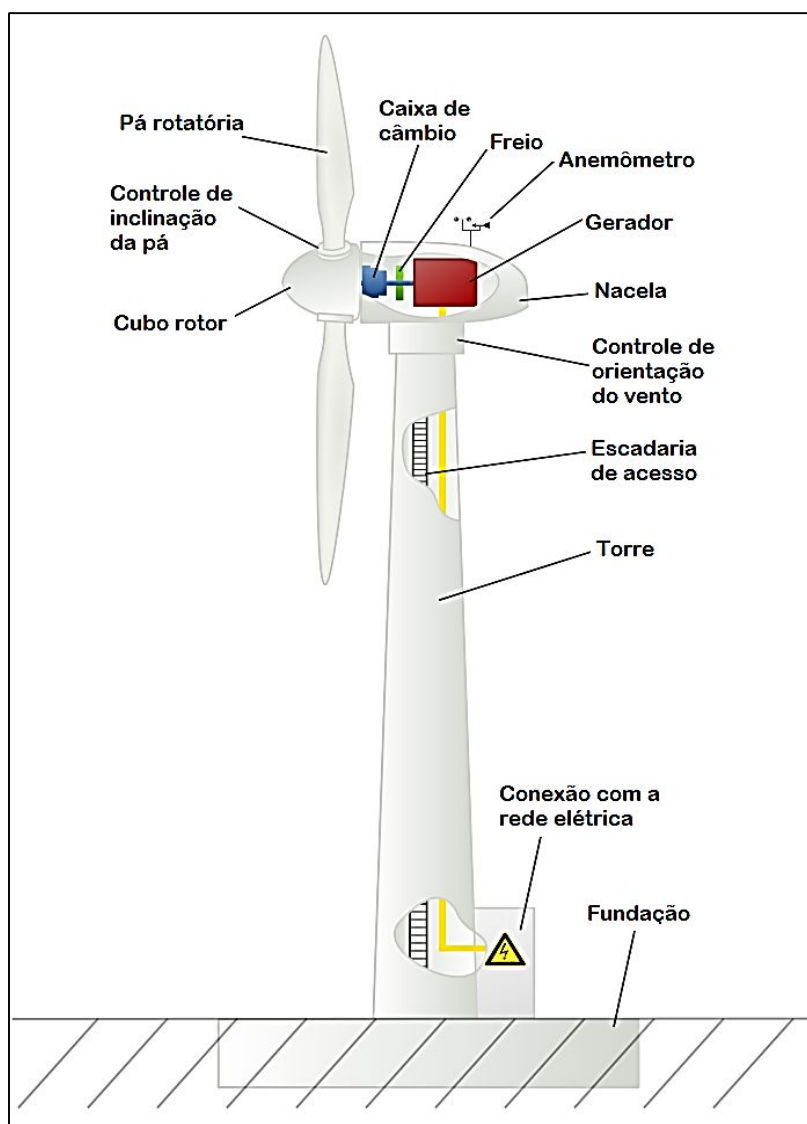
i) Eixo vertical:

Este tipo de aerogerador consegue funcionar a velocidades de vento pequenas e são pouco barulhentos. Quando o eixo é vertical, pode-se colocar uma turbina mais perto da outra devido a que a sua estrutura não produz efeito de travagem e não precisam de mecanismos de orientação do vento. No entanto, são menos eficientes e mais caros que os aerogeradores de eixo horizontal.

ii) Eixo horizontal:

São os mais conhecidos e eficientes, em particular os de três pás. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

Figura 2.1 – Estrutura básica de um aerogerador.



(Fonte: Cesar Moreira, 2007, modificado pelo próprio autor)

A figura 2.1 ilustra os componentes principais de um aerogerador moderno de eixo horizontal. Pode-se notar que são vários componentes os mencionados, além da turbina e do gerador, que ajudam no melhor desempenho do sistema.

- *Fundação*: A base onde é fixado o aerogerador. É de suma importância para a estabilidade da torre e o aterramento contra descargas atmosféricas;
- *Conexão com a rede elétrica*: É feita por meio de uma monitoração e controle constante do sistema e da rede a ser conectada;
- *Torre*: Tem forma tubular, levemente cônica. A sua função é sustentar a nacela e a turbina a uma altura adequada e sob qualquer condição de vento;
- *Controle de orientação do vento*: Este sistema mantém a turbina de frente com o vento;
- *Nacela*: nacela é o componente que abriga todos os mecanismos do gerador viabilizando o seu funcionamento;
- *Gerador*: Converte o conjugado mecânico obtido na turbina em energia elétrica;
- *Anemômetro*: Sensor de velocidade de vento que ajuda ao melhor desempenho do aerogerador;
- *Freio*: Consiste de um freio mecânico a disco instalado na saída da caixa de transmissão. Acionado em situações de emergência ou manutenção;
- *Caixa de câmbio*: Ou caixa de transmissão, é uma caixa de engrenagens que converte as velocidades baixas da turbina a velocidades compatíveis com as do eixo do gerador, em casos de gerador de poucos polos;
- *Pá rotatória*: Absorve a energia cinética do vento, e a converte em conjugado mecânico;
- *Controle de inclinação da pá*: Serve para manter um controle ático do ângulo de passo da turbina de rotação nas pás.
- *Cubo rotor*: Une as pás em torno do eixo da turbina;

2.2.4 Mecanismos de controle

A velocidade do vento apresenta variações significativas em curtas distâncias, sendo necessário tomar em consideração todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento antes da instalação de um aerogerador (CRESESB, 2008). Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar;

Estas informações podem ser obtidas a partir de mapas topográficos para analisar os obstáculos e determinar a viabilidade.

Existem diversas estratégias de controle para a extração da potência do vento nos aerogeradores, podendo ser mecânicos com sistemas de freios, aerodinâmicos com a configuração das pás e posição do rotor, ou eletrônicos com conversores e banco de capacitores. No entanto, as duas estratégias mais utilizadas de maneira aerodinâmica são o controle de passo e o controle passivo, estol (Thomas Ackermann, 2005).

i) Controle de passo:

Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, as pás mudam o seu ângulo de ataque para reduzir as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento para que o aerogerador produza a potência nominal sem sobrecarga de forma a não sofrer danos.

ii) Controle estol:

Neste controle, as pás do rotor são fixas. A geometria do perfil das pás é tal que quando a velocidade do vento é maior que a nominal, é criada uma turbulência provocando a redução da absorção de potência pela pá. Sem sustentação, o rotor deixa de acelerar.

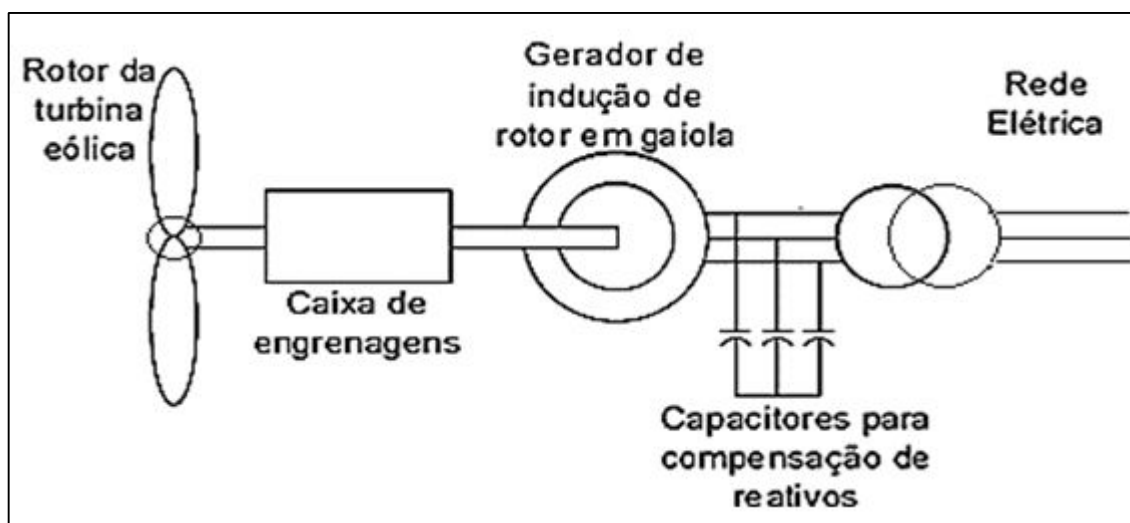
2.2.5 Sistemas elétricos

Os sistemas elétricos para aerogeradores podem se separar em dois grupos: aerogeradores de velocidade fixa e de velocidade variável. Os aerogeradores de velocidade fixa são mais robustos, no entanto, com menor eficiência e controle de potência (Monticelli, 2004).

i) Aerogeradores de velocidade fixa:

É o sistema mais antigo e consiste de um gerador de indução de rotor em gaiola ligado à turbina com um sistema de engrenagens e conectado diretamente à rede elétrica mantendo a velocidade constante (figura 2.2). Conseguem trabalhar a duas velocidades, mas constantes por meio da mudança do número de polos no rotor do gerador. Para evitar transitórios nocivos na rede na entrada em operação, são alimentados por conversores tipo soft-start.

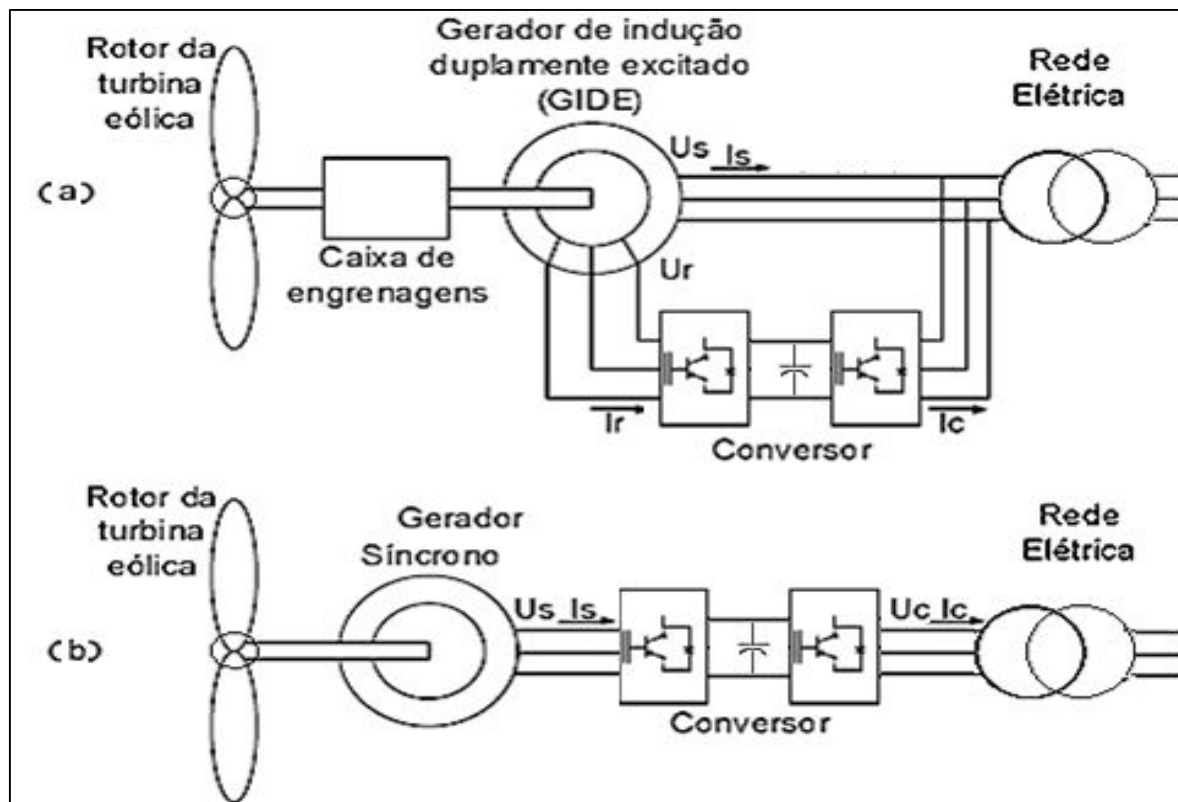
Figura 2.2 – Sistemas elétricos dos aerogeradores de velocidade fixa.

**ii) Aerogeradores de velocidade variável:**

Os aerogeradores com velocidade variável podem usar geradores síncronos ou assíncronos, onde a sua conexão ao sistema elétrico é feita por meio de conversores como se mostra na figura 2.3. O objetivo é o desacoplamento da velocidade de rotação do rotor com a frequência elétrica da rede, melhorando o desempenho aerodinâmico.

Modernamente em potências maiores é utilizado o gerador de indução de rotor bobinado GIDA, cujo estator é ligado diretamente à rede, e o rotor tem sua saída retificada por um conversor chamado MSC (*machine side converter*, conversor do lado da máquina) e depois passa por um inversor ligado à rede chamado GSC (*grid side converter*, conversor do lado da rede) (figura 2.3–a). Permite melhor controle da potência ativa bem como controlar o perfil reativo do gerador.

Figura 2.3 – Sistema elétrico dos aerogeradores de velocidade variável: (a) Gerador de Indução de dupla alimentação; (b) gerador síncrono multipolos a ímã permanente.



No gerador síncrono a ímã permanente, a tensão produzida pelo gerador é retificada e a corrente contínua resultante é invertida. Por meio do conversor a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico, mesmo que na saída do gerador a frequência seja variável devido às variações da velocidade.

As vantagens e desvantagens dos dois sistemas são mostrados na tabela 2.1 e na tabela 2.2 em detalhe.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens dos aerogeradores de velocidade fixa.

| Velocidade fixa | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Vantagens | Desvantagens |
| Fácil manutenção | Caixa de engrenagens |
| Sistema robusto | Banco de capacitores |
| Sistema mais barato | Demanda de potência reativa |
| Sem conversores | Precisa de uma rede forte |
| Sem controle de velocidade | Perdas na linha e reativo na rede |

O uso de geradores de indução de velocidade fixa requer a instalação de um banco de capacitores para compensar o reativo demandado no estator, e também a necessidade de um sistema de partida. As variações de potência obtidas pela variação do vento pode desestabilizar a rede ao ocasionar a injeção de reativos na rede, afetando o nível de tensão e provocando perdas nas linhas. Isto torna o sistema menos eficiente (Thomas Ackermann, 2005). É por isso que devem ser conectadas a uma rede consideravelmente forte.

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens dos aerogeradores de velocidade variável.

| Velocidade variável | | | |
|---|---|--|---|
| Maquinas assíncronas | | Máquinas síncronas | |
| Vantagens | Desvantagens | Vantagens | Desvantagens |
| Controle da frequência e potência | Harmônicos devido aos conversores | Controle da frequência e potência | Harmônicos devido aos conversores |
| Melhor desempenho aerodinâmico | Maior complexidade | Melhor desempenho aerodinâmico | Maior complexidade |
| Banco de capacitores de menor dimensão ou não precisa | Precisa construção de controle no rotor com conversores | Sem caixa de engrenagens para máquinas de velocidades baixas | Inversor de potência Nominal do gerador |
| Conjunto MSC-GSC de 30% da potência nominal | Precisa caixa de engrenagens | Pode usar ímã permanente, fluxo constante | Sistema mais caro |
| | | Maior eficiência | |

Para aerogeradores de velocidade variável, usar geradores de indução tem várias vantagens em comparação com os de velocidade fixa, pois o reativo do estator pode ser fornecido desde a rede com um conversor de frequência usando um GIDA dispensando o banco de capacitores. Também é possível reduzir o tamanho do banco capacitivo utilizando

controle resistivo no rotor para velocidade variável limitada (Thomas Ackermann, 2005), mas é uma prática em desuso dado o seu baixo rendimento. No caso de aerogeradores com máquinas síncronas é necessário um conversor de frequência maior, pois deverá processar toda a potência do gerador. No entanto, pode não precisar de uma caixa de engrenagens se for de muitos polos (multipolos), e trabalhar com fluxo constante se usar ímã permanente GSIP, sendo um gerador de controle direto (Olimpo Anaya-Lara et al., 2009). Os GSIP são normalmente feitos com um número alto de polos e diâmetro grande.

2.2.6 Qualidade da energia

A rede deve ser considerada como um componente capaz de absorver toda a potência gerada pelos aerogeradores, com tensão e frequência constantes oferecendo energia de boa qualidade segundo as normas estabelecidas (CRESESB, 2008). As perturbações provocadas pela conexão de aerogeradores sobre a rede elétrica devem ser mantidas dentro de limites técnicos. As principais causas destes distúrbios são apresentadas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Causas dos principais distúrbios provocados pelos aerogeradores.

| Distúrbios | Causa |
|-----------------------------|--|
| Elevação e queda de tensão | Valor médio da potência entregue |
| Flutuações de tensão | Operações de chaveamento Efeito de sombreamento da torre Erro de passo da pá Erro de mudança de direção Distribuição vertical do vento Flutuações da velocidade do vento Intensidade de turbulências |
| Harmônicos | Conversores de frequência Controladores tiristorizados Capacitores |
| Consumo de potência reativa | Componentes indutivos ou sistemas de geração |

(Fonte: CRESESB, 2008)

Quando a rede é fraca não poderá ser analisada como barramento infinito, e a qualidade da energia deve ser uma das principais questões a serem observadas com a utilização de aerogeradores, pois a rede não conseguirá absorver as perturbações injetadas nela (Thomas Ackermann, 2005). Vários destes distúrbios são provocados pelo conversor. Na tabela 2.4 se mostra as propriedades do conversor em aerogeradores e as suas vantagens e desvantagens de instalação.

Tabela 2.4 – Propriedades do conversor em aerogeradores.

| Propriedades | Vantagens | Desvantagens |
|------------------------|--|---|
| Controle de frequência | <ul style="list-style-type: none"> • Otimização da energia • Acionamento suave • Controle de carga • Opção “sem engrenagens” • Redução do ruído | <p>Mais caro</p> <p>Perdas de chaveamento</p> |
| Controle de potência | <ul style="list-style-type: none"> • Potência ativa e reativa controlável • Fonte de energia reativa local • Melhoria na estabilidade de tensão • Melhoria da qualidade de energia | <p>Harmônicos</p> |

2.2.7 Aplicações

Os aerogeradores podem ser usados de três maneiras: em sistemas isolados, em sistemas híbridos e em sistemas interligados à rede. Estes sistemas necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, de uma unidade de armazenamento de energia (CRESESB, 2008). Isto traz outro campo de estudo, onde o tipo de armazenamento de energia a usar dependerá das características desejadas do sistema.

2.3 Armazenamento de energia

Os sistemas armazenadores de energia são reservatórios controlados por conversores com um fluxo de potência bidirecional com diferentes características, e que permitem manter os níveis de tensão e frequência durante certas adversidades na operação de um sistema elétrico. São usados para garantir a qualidade de energia, incluso em caso de ilhamento.

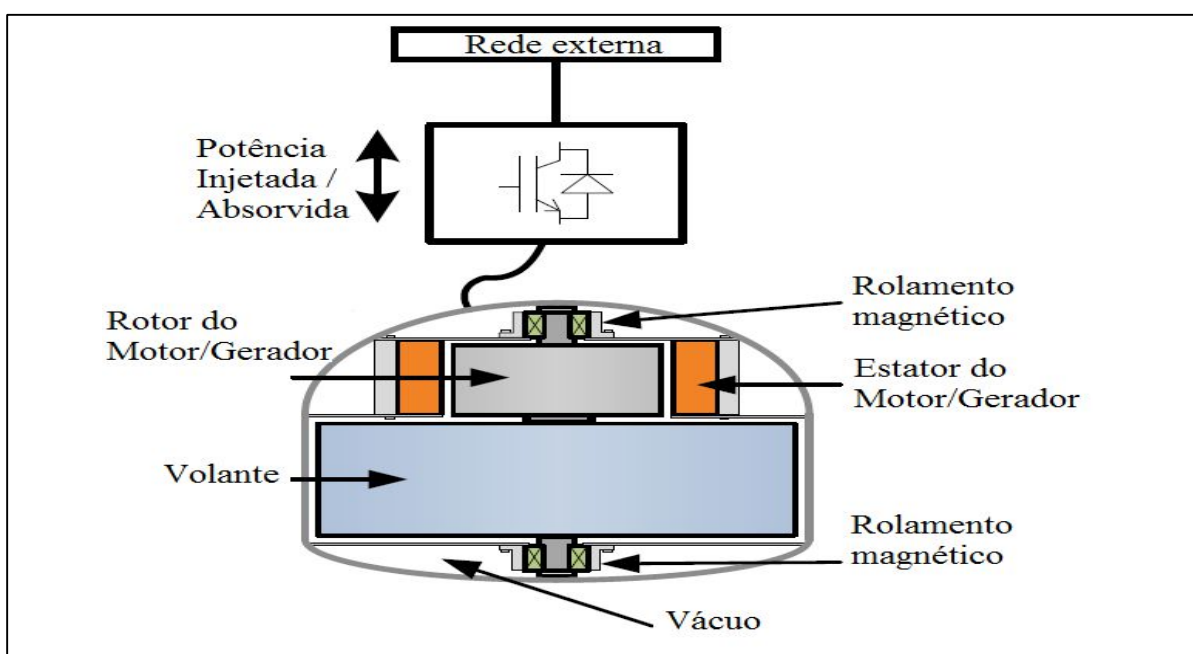
Podem ser classificados de acordo ao tipo de energia armazenada em: armazenamento de energia cinética, elétrica e potencial.

2.3.1 Armazenamento de energia cinética

i) Volante de inércia:

É um sistema eletromecânico que armazena energia cinética por meio de uma massa acoplada com o rotor de uma máquina elétrica, e que gira sobre dois rolamentos magnéticos, a fim de diminuir o atrito a alta velocidade. Toda a estrutura é colocada sob vácuo para reduzir o atrito. O esquema deste sistema é apresentado na figura 2.4.

Figura 2.4 – Estrutura básica de um volante de inércia.



(Fonte: Francisco Diaz, 2013, modificado pelo próprio autor)

A energia armazenada (E) é dependente ao quadrado da velocidade de rotação (w^2) e o seu momento de inércia do rotor (J), de acordo com a equação da energia cinética (2.1). O momento de inércia (J) é definido por uma constante de inércia dada pelo formato, pela massa do rotor (m) e pelo quadrado do seu raio (r^2), como mostrado na equação (2.2). Assim, a escolha do material é um ponto chave no desempenho do sistema.

$$E = \frac{1}{2}Jw^2 \quad (2.1)$$

$$J = kmr^2 \quad (2.2)$$

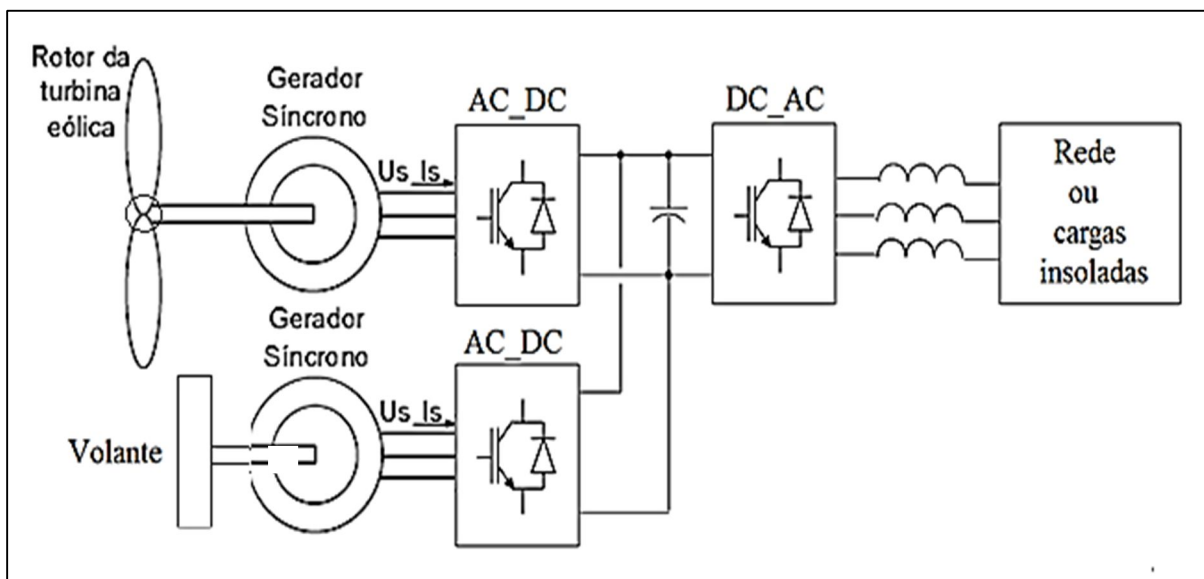
A potência nominal é limitada pelo conversor. A energia é transferida para o volante de inércia quando a máquina funciona como um motor, e o volante acelera, carregando o dispositivo de armazenagem com energia cinética. A energia armazenada será reconvertida de cinética em energia elétrica por meio do conversor em caso de déficit, perdendo velocidade. O volante de inércia pode, assim, ser utilizado como regulador de potência durante curtos períodos de tempo para a melhoria da qualidade de energia elétrica (Seifeddine Belfedhal et al., 2011).

Comercialmente, os tipos de máquinas utilizadas são síncronas de ímã permanente de baixa velocidade e de alta velocidade. A primeira opera em revoluções por minuto (rpm), medido em milhares, enquanto que a última opera em rpm medido em dezenas de milhares e é construída de material compósito avançado (Francisco Diaz, 2013).

Também apresenta boas características em rendimento, aproximadamente 90%, longa vida útil, faixa de temperatura operacional ampla, e liberdade de descarga acentuada. Por outro lado, não são dispositivos adequados para a descarga de energia de longa duração devido a que os volantes de inércia apresentam perdas permanentes altas de auto-descarga, aproximadamente 20% da capacidade armazenada por hora.

O volante de inércia para aerogeradores com GSIP pode ser configurado no elo CC onde precisa de um conversor AC-CC (Long Zhou et al., 2014) como é apresentado na figura 2.5, ou no GSC onde precisaria um conversor AC-CC e outro CC-AC (Long Zhou, Wenjun Liu et al., 2014).

Figura 2.5 – Topologia do volante de inércia ligado ao elo CC.



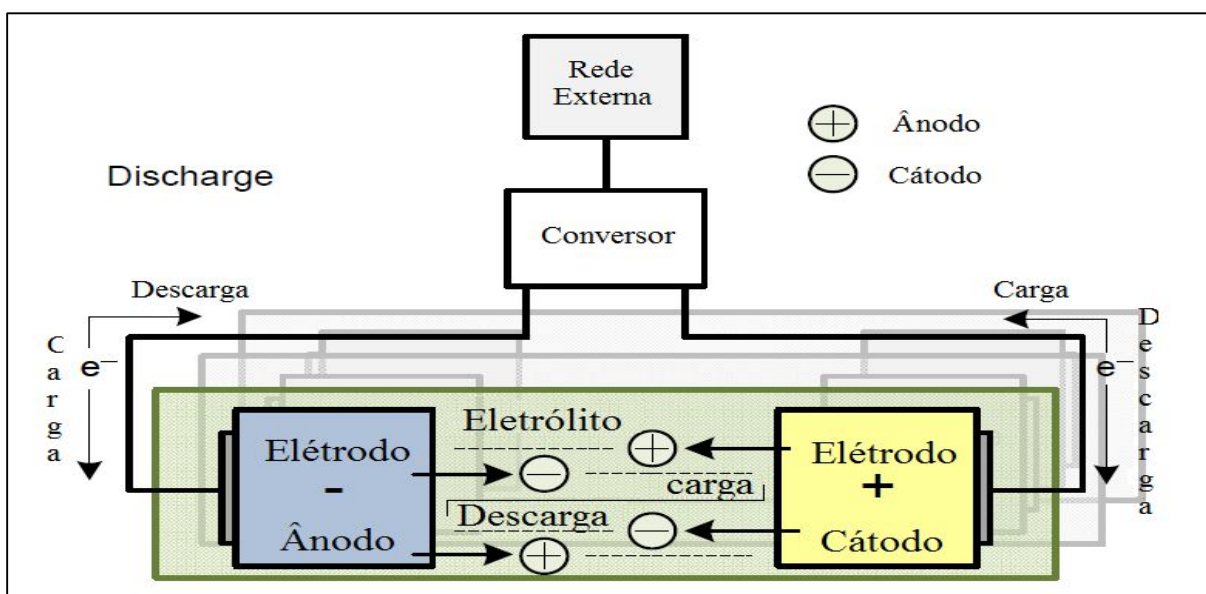
2.3.2 Armazenamento de energia elétrica

i) Baterias:

Ultimamente são as mais usadas como ESS no mercado devido à sua rápida resposta e relativamente menor preço do que outros sistemas de armazenamento. Consiste de um conjunto de células, ligadas em série ou em paralelo, ou ambos, a fim de obter a tensão e a capacidade desejadas de energia armazenada sob a forma de energia eletroquímica.

Cada célula é constituída por dois condutores elétrodos chamados ânodo e cátodo, com um eletrólito no meio que permite a troca de íons entre os dois elétrodos como se mostra na figura 2.6. Ânodo, cátodo e eletrólito são colocados dentro de um recipiente selado e conectado a uma fonte ou carga externa (Francisco Diaz, 2013).

Figura 2.6 – Estrutura básica de uma bateria.



(Fonte: Francisco Diaz, 2013, modificado pelo próprio autor)

- Ânodo: eletrodo negativo que envia elétrons para o circuito externo e sofre oxidação durante a reação eletroquímica;
- Cátodo: eletrodo positivo que recebe elétrons do circuito externo e sofre redução durante a reação eletroquímica;
- Eletrólito: meio onde ocorre a transferência de íons entre ânodo e cátodo.

As baterias são um tipo de armazenamento que apresenta constante desenvolvimento (Francisco Diaz et al., 2012). A energia armazenada E em uma bateria depende da sua

capacidade (Q) e a sua tensão, onde essa capacidade, é a quantidade de carga elétrica que pode oferecer com tensão nominal. Esta capacidade é medida em Ampère-hora.

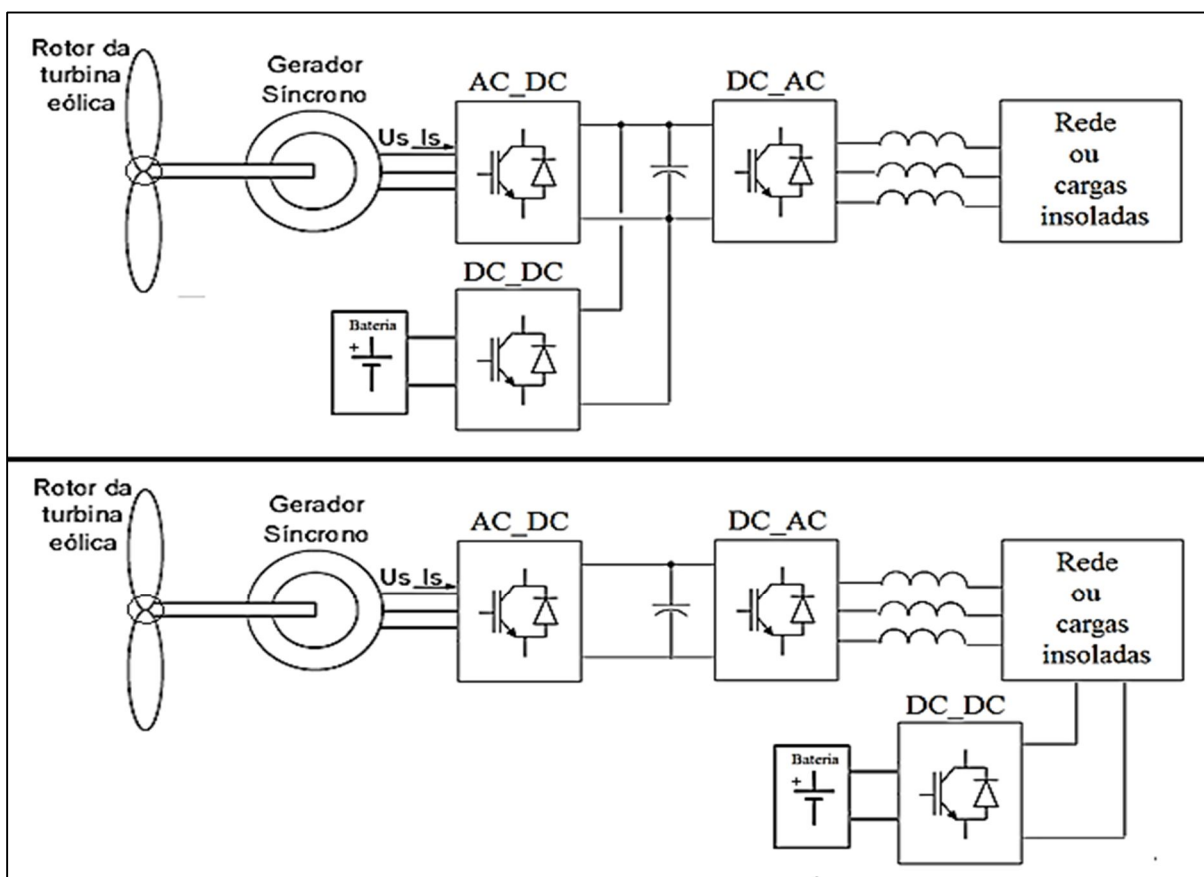
$$E = Pt \tag{2.1}$$

$$Q = it \tag{2.2}$$

Uma pequena célula tem menos capacidade do que uma célula maior com a mesma composição, embora elas possam desenvolver a mesma tensão em circuito aberto (Anitha Sarah Subburaj et al., 2014). Com isto, existem muitos tipos de baterias que são construídos na atualidade de diversos materiais que conseguem uma eficiência maior que 80%, tempo de vida até 15 anos e autodescarga menor a 1%. As mais conhecidas são: bateria de chumbo ácido, bateria de níquel cádmio (Ni- Cd), bateria de sódio-enxofre (NAS), bateria de íon-lítio (Li-ion), baterias de fluxo (FBESS).

A figura 2.7 mostra as duas topologias mais usadas para aerogeradores onde o controle é desenvolvido por meio de conversores entre a bateria e a fonte conseguindo fornecer ao sistema durante a presença de variações do vento.

Figura 2.7 – Topologias para baterias em aerogeradores.

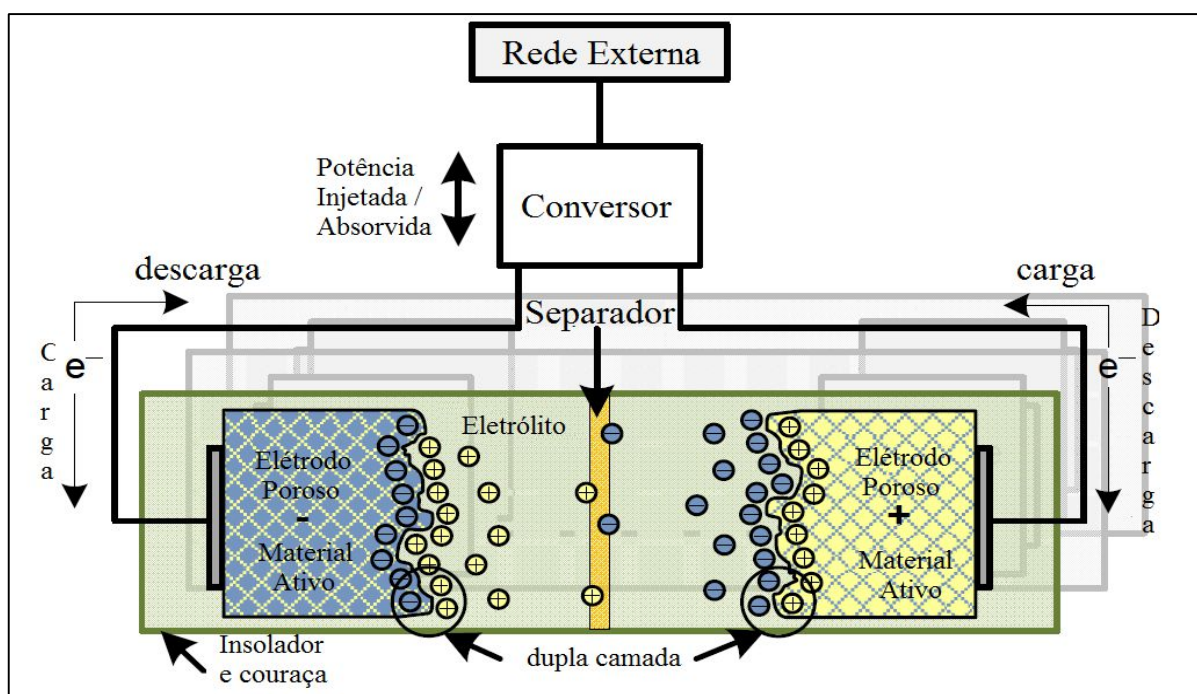


Entretanto, uma opção de proposta recente é a ligação em paralelo com supercapacitores aumentando o tempo de vida esperado das baterias (Nishad Mendis et al., 2014).

ii) Supercapacitor:

Assim como as baterias, supercapacitores são baseados em células eletroquímicas que contêm dois eletrodos condutores, um eletrólito e uma membrana porosa através do qual é permitido o trânsito de íons entre os dois eletrodos como é mostrado na figura 2.8.

Figura 2.8 – Estrutura básica de um supercapacitor.



(Fonte: Francisco Diaz, 2013, modificado pelo próprio autor)

Supercapacitores são também conhecidos como ultracapacitores ou capacitores de dupla camada. De fato, esta estrutura cria dois capacitores (devido a ambas as interfaces, eletrólito-eletrodo negativo e eletrólito - eletrodo positivo), e por esta razão, eles são chamados capacitores de dupla camada (Francisco Diaz, 2013).

A energia armazenada nos condensadores é diretamente proporcional à sua capacitância (C) e o quadrado da tensão (ΔV) entre os terminais do elemento, enquanto que a capacitância (C) é proporcional à área do eletrodo (A) da superfície e a permissividade do meio, assim como é inversamente proporcional à distância (d) entre os eletrodos segundo as equações 2.3 e 2.4 (Gee A. M. et al., 2013).

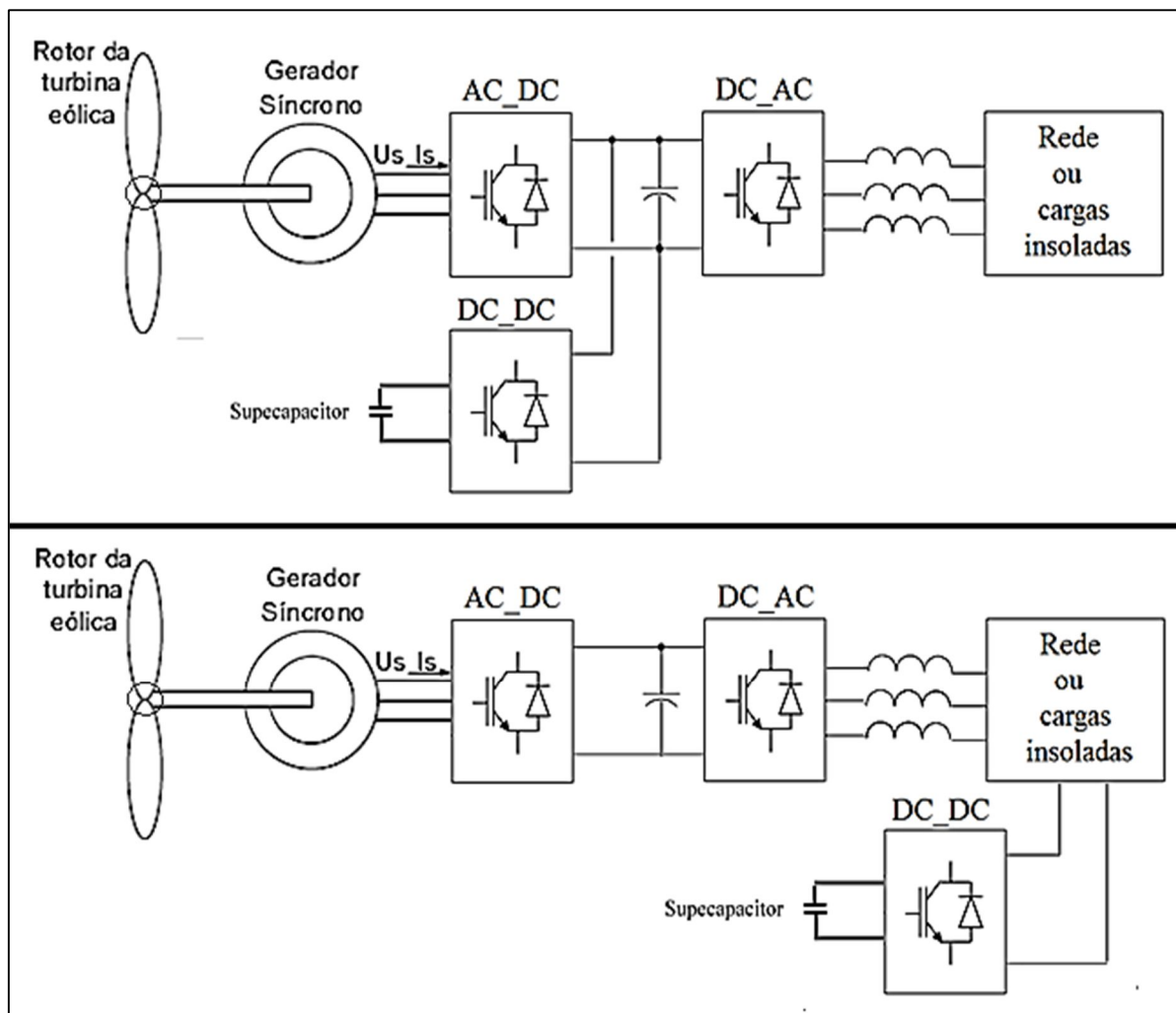
$$E = \frac{1}{2} C \Delta V^2 \tag{2.3}$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \tag{2.4}$$

Devido à sua tensão de célula de aproximadamente 3 volts ser baixo, a tensão e a capacidade desejadas do supercapacitor são alcançados pela conexão série e paralelo de um conjunto de células. Existem dois tipos de supercapacitores, dependendo do desenho dos eléctrodos: simétricos e assimétricos. Os supercapacitores simétricos utilizam a mesma matéria para os seus eléctrodos positivos e negativos, ao contrário dos assimétricos.

Os supercapacitores são normalmente ligados por meio de conversores AC-CC ou CC-AC como se mostra na figura 2.9.

Figura 2.9 – Topologia usada com supercapacitores.



Comumente são utilizados eléctrodos de carvão ativado e em sistemas comerciais, devido a um menor custo e alta capacidade de 100 a 1000 vezes por volume de unidade em

relação a capacitores eletrolíticos convencionais. Também oferece uma tempo de vida longo livre de manutenção com carga e descarga rápidas, mas a custo de alta auto-descarga de 20% em 12 horas. As suas características tornam os supercapacitores ótimos para aplicações de curta duração, que nos aerogeradores é uma peça importante para mitigar as variações da potência do vento (Xiao Li et al., 2008).

Outra aplicação é um sistema híbrido, que consiste da utilização de um sistema de baterias ligado em conjunto com um supercapacitor com o objetivo de aumentar o tempo de vida das baterias (Nishad Mendis et al., 2014). O inconveniente deste sistema é o seu elevado preço, aproximadamente 5 vezes maior que só as baterias chumbo-ácidas.

iii) Supercondutor:

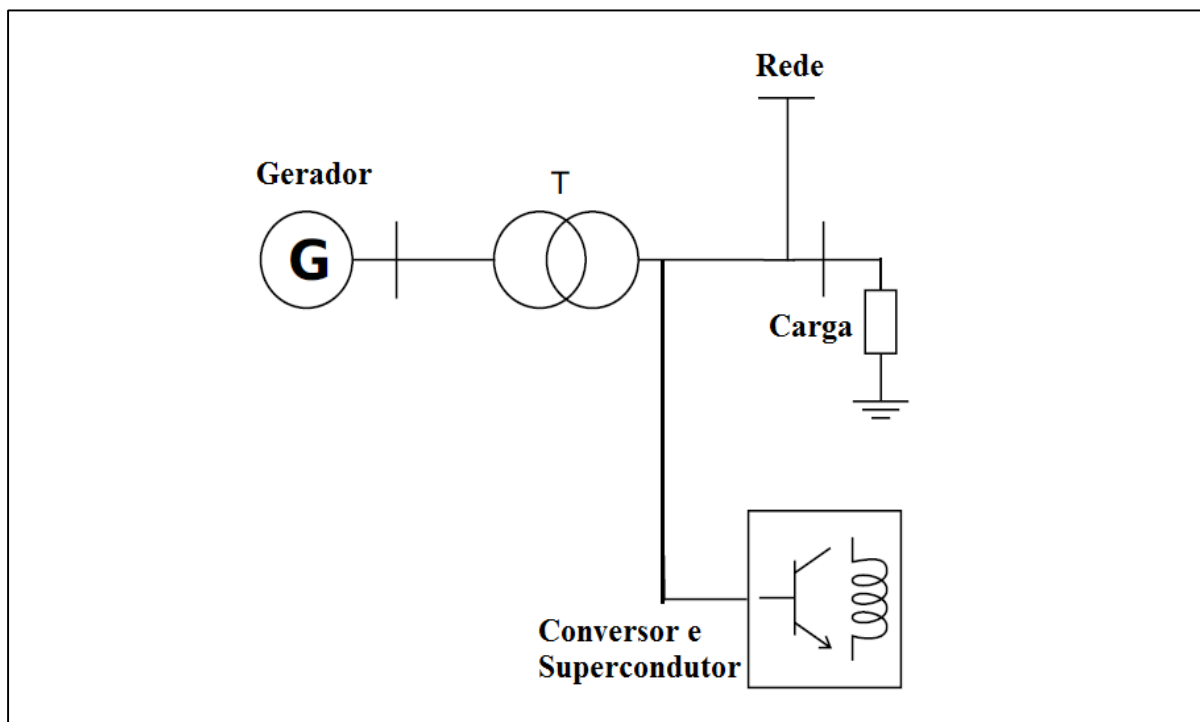
É uma tecnologia relativamente recente baseado em armazenamento de energia num campo magnético, que é criado por uma corrente contínua através de uma grande bobina supercondutora a uma temperatura criogênica. A energia armazenada (U) é calculada como o produto da autoindutância da bobina e o quadrado da corrente circulando por ele, como em um indutor, como mostrado na equação (2.8) (Knut Erik Nielsen et al., 2010).

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2.8)$$

A corrente máxima que pode passar através do supercondutor é dependente da temperatura. Com efeito, quanto menores forem as temperaturas de funcionamento, maiores as correntes de operação que podem ser alcançados mantendo a característica supercondutora. As bobinas supercondutoras podem ser classificadas em função da temperatura crítica do material como bobinas de alta temperatura (HTS), e bobinas de baixa temperatura (LTS) (Francisco Diaz, 2013). As bobinas de alta temperatura de transição tem apresentado grande desenvolvimento em anos recentes.

Com temperatura criogênica, se obtém densidades de energia mais elevadas que outros sistemas de energia como discos de inércia ou baterias, com eficiência maior que 90%, mas com o custo de precisar um sistema de resfriamento.

A figura 2.10 mostra a configuração de armazenamento de energia em sistema eólico empregando bobina supercondutora, sendo ainda um sistema novo com pouca participação comercial, porém caro.

Figura 2.10 – Topologia usada com supercondutores.

(Fonte: Knut Erik Nielsen et al., 2010, modificado pelo próprio autor)

Nos aerogeradores, resulta um sistema eficiente para diminuir variações de potência em um curto tempo, mesmo que sejam grandes, pois o supercondutor consegue armazenar uma grande densidade de potência (Knut Erik Nielsen et al., 2010). Com isto, atinge uma maior estabilidade nas microfuentes. Entretanto pode apresentar custo inviável em pequenas gerações. Também, é um indicado seu uso para sistemas de transmissão HVDC em longas distâncias (Jack Mc Call et al., 2010)

2.3.3 Armazenamento de energia potencial

i) Reservatório de água:

Consiste em um sistema de armazenamento de energia em grande escala. A utilização deste sistema pode ser dividido em aplicações de escala de tempo de 24 h, assim como aplicações envolvendo um armazenamento de energia mais prolongada no tempo, incluindo vários dias.

O seu princípio de funcionamento é baseado na gestão da energia potencial gravitacional da água, através do bombeamento a partir de um reservatório inferior para o

reservatório superior durante períodos de baixo consumo de energia (Francisco Diaz, 2013). Este sistema de armazenamento é muito utilizado no mundo e pode atingir uma eficiência de 75 – 85% (Bahtiyar Dursun et al., 2010). Quando a demanda de potência é alta, a água flui a partir do reservatório superior para o reservatório inferior, ativando as turbinas para gerar eletricidade. A energia armazenada é proporcional ao volume de água no reservatório superior e a altura da cascata. Com isto, temos que a potência obtida é descrita segundo a equação 2.10, onde (η) é a eficiência do gerador, (ρ) é a densidade da água, (Q) é a vazão volumétrica, (g) a aceleração da gravidade e (h) a extensão da queda.

$$P = \eta\rho Qgh \quad (2.10)$$

É um sistema a longo prazo e que pode ser construído para grande ou pequena escala (S. S. Choi et al., 2008). O inconveniente deste sistema é o espaço utilizado, e dependendo da extensão pode afetar ecossistemas inteiros.

ii) Ar comprimido:

Neste tipo de sistema, a energia é armazenada na forma de ar comprimido em um reservatório, que pode ser uma caverna de armazenamento subterrâneo ou tanque a pressão onde a energia armazenada atende às equações dos gases (2.11). Na equação, (p) é a pressão, (V) é o volume, (n) o número de mols da amostra gasosa, (R) é uma constante dos gases ideais e (T) a temperatura. A energia armazenada (W) a temperatura constante entre um estado a e b é proporcional à pressão (p_a), ao volume (V_a) e ao logaritmo natural da divisão das pressões (p_a) com (p_b) descrito na equação (2.12).

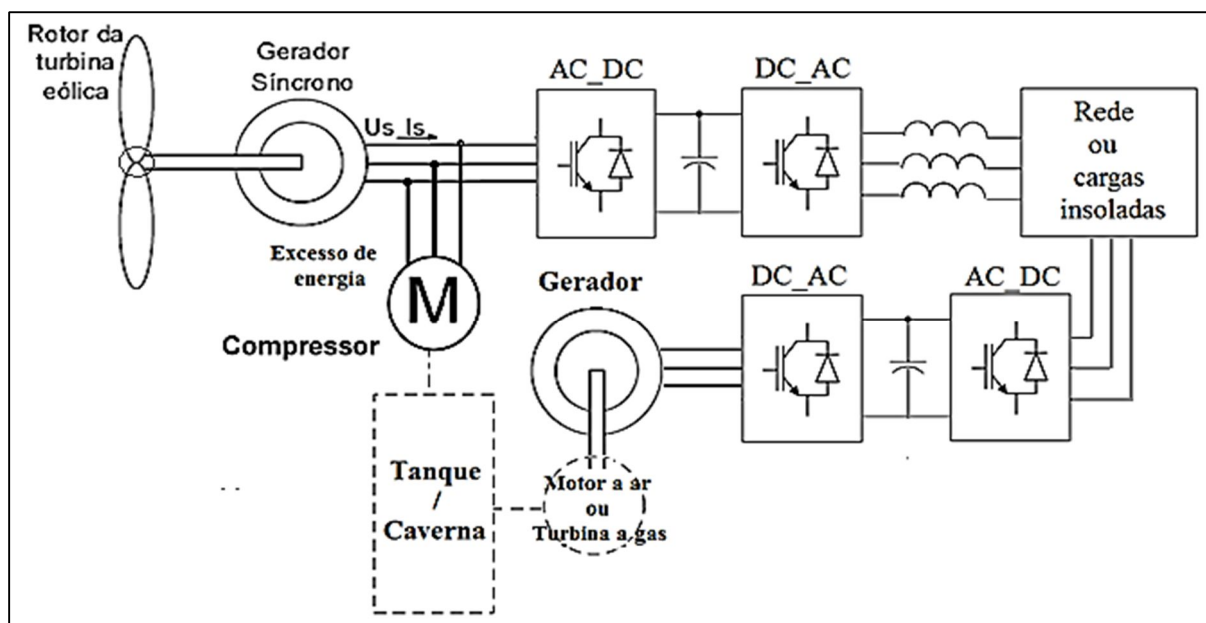
$$pV = nRT \quad (2.11)$$

$$W = p_a V_a \ln\left(\frac{p_a}{p_b}\right) \quad (2.12)$$

Quando é necessária energia para ser injetada na rede, o ar comprimido é retirado da cavidade de armazenamento e jogado em um motor a ar ou em uma turbina a gás. No caso dos sistemas com turbina a gás, o ar é aquecido e depois expandido em um conjunto de turbinas de alta e baixa pressão com gás natural, que convertem a maior parte da energia do ar comprimido em energia cinética de rotação. O escape da turbina é utilizada para aquecer o ar da caverna no caso das turbinas a gás. A turbina ou o motor a ar está ligado a um gerador elétrico a fim de se obter energia elétrica (Francisco Diaz, 2013).

Normalmente, estes sistemas são baseados na tecnologia de turbinas a gás convencional. A topologia mais usada do sistema é mostrada na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Topologia usada para ar comprimido.



Atualmente, a utilização de sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido (CAES) não é grande. No entanto, esta tecnologia tem atraído muito interesse. O objetivo do ar comprimido nos aerogeradores é armazenar o excesso de geração de energia eólica (Hao Sun et al., 2010).

As partes fundamentais deste sistema são os trocadores de calor, que são bastante caros no caso de turbinas a gás. O tempo de vida de instalações CAES é de aproximadamente 40 anos, com um rendimento de 70% aproximadamente. No entanto, existem várias novas topologias sem turbina a gás que conseguem atingir um rendimento de 90% (Mohsen Saadat et al., 2012). Uma vez que a auto-descarga do sistema é muito baixa, sistemas CAES são consideradas instalações de armazenamento a longo prazo.

2.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma revisão sobre os conceitos fundamentais dos aerogeradores, a sua participação na geração distribuída e a possível necessidade de um sistema de armazenamento de energia. Foram apresentados também os sistemas elétricos clássicos para um aerogerador. Assim, os diferentes tipos de gerador implementados em cada sistema também foram abordados. Este capítulo se caracteriza como um pré-requisito essencial no entendimento da estrutura de uma turbina eólica para posterior entendimento das respostas a serem obtidas em um aerogerador com máquina síncrona de ímã permanente e a participação de um banco de baterias como sistema de armazenamento de energia.

Capítulo 3: Modelagem do Sistema

Para uma análise mais completa do comportamento de um aerogerador, é necessário modelar o seus componentes até a rede onde será conectado. Neste capítulo, são apresentadas todas as modelagens do sistema, desde a turbina que recebe a energia do vento para convertê-la em energia elétrica, um gerador síncrono de ímã permanente, e o conversor *back-to-back* interligando a geração à rede de forma a obter o fluxo de potência desejado. As equações das turbinas serão representadas por meio de simulações usando como plataforma o PSCAD, apresentando-se suas curvas características. Além disso, inclui as equações para os outros componentes do sistema, apresenta a modelagem da bateria a ser ligada no elo CC para armazenamento de energia, e o conversor que efetua sua carga/descarga.

3.1 Modelagem da turbina

A energia cinética captada do vento pelas pás da turbina eólica é descrita como:

$$Ec = \frac{1}{2} m V_v^2 \quad (3.1)$$

Onde (m) é a massa do rotor e (V_v) a velocidade na que está girando. Logo, a potência teórica que podemos tirar do vento é descrita como:

$$P_{teórica} = \frac{1}{2} \rho A V_v^3 \quad (3.2)$$

A potência tem como parâmetros a densidade do ar ($\rho = 1.22 \text{ Kg/m}^3$), a superfície das pás (A) e a velocidade na que está girando (V_v). Na prática, a potência obtida é menor devido a que o meio não é ideal, e o vento por detrás das pás é diferente de zero. Isto quer dizer que a potência disponível pode ser expressa como:

$$P_m = C_p P_{teórica} \quad (3.3)$$

O valor (C_p) representa um coeficiente de potência, o qual descreve um comportamento de acordo à velocidade do vento presente. Este coeficiente de potência foi estabelecido por vários autores por meio de equações matemáticas com o fim de acompanhar o mais fielmente possível o comportamento real da turbina, como apresentado a seguir.

3.1.1 Coeficiente de Betz

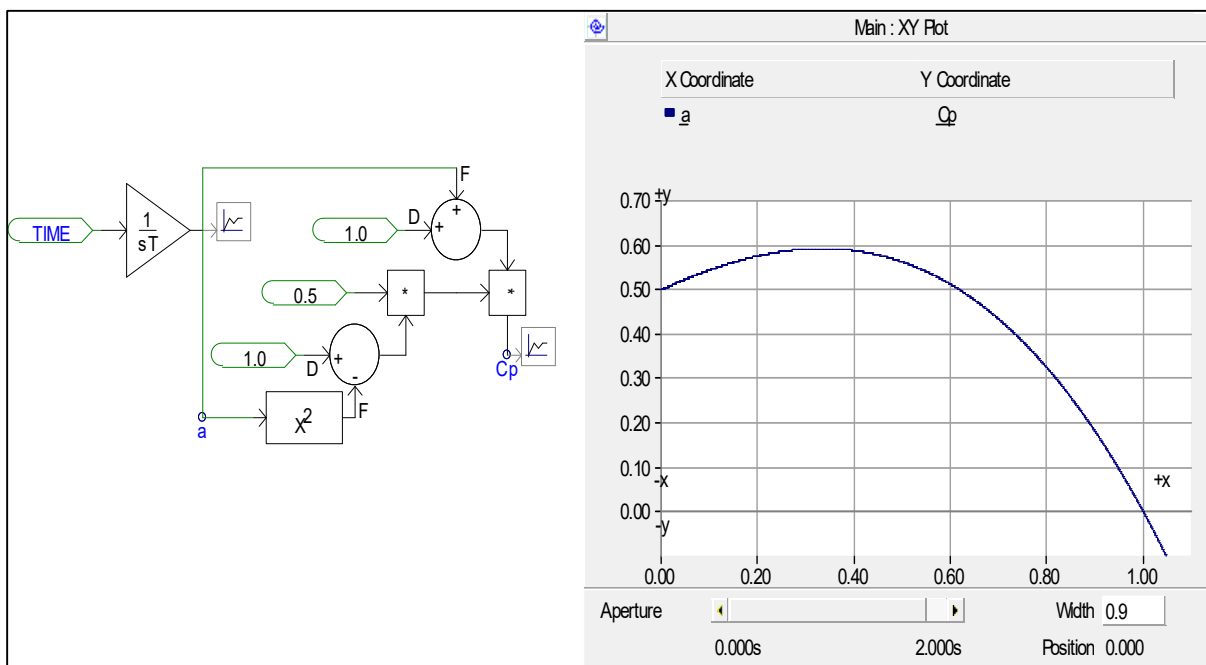
O coeficiente de Betz, obtido a partir das equações de Bernoulli, estabelece (C_p) como a relação do vento atrás com o vento presente na frente das pás (a), dentro de uma equação quadrática, vista na equação (3.5). A sua obtenção no software de simulação PSCAD, e o seu

respectivo comportamento, são mostrados na figura 3.1. O aerogerador é limitado a extrair como máximo um 59,3 % da energia disponível no vento, limite teórico de aproveitamento da potência do vento. Na realidade as turbinas conseguem extrair uma faixa de 25-45% da energia disponível no vento (Olimpo Anaya-Lara et al., 2009).

$$a = V_{atras}/V_{frente} \tag{3.4}$$

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - a^2)(1 + a) \tag{3.5}$$

Figura 3.1 – Coeficiente de potência de Betz. C_p x a .



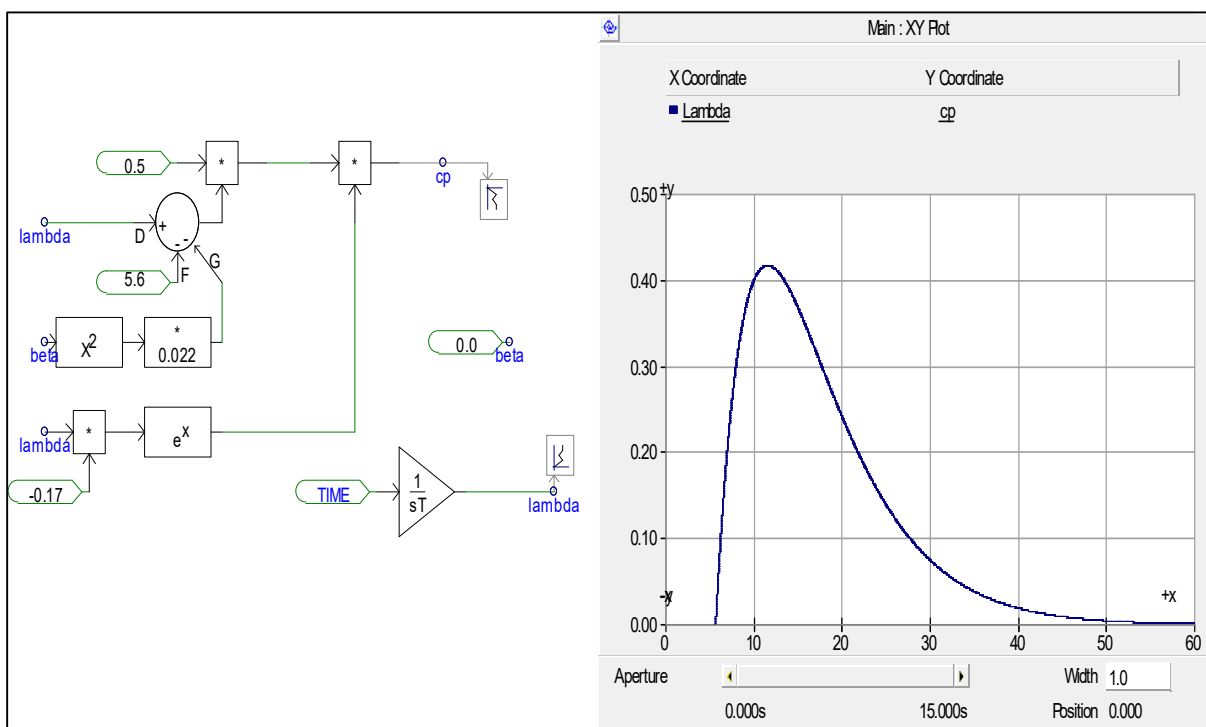
3.1.2 Coeficiente de Anderson

O coeficiente de Anderson representa com maior realidade o aproveitamento energético efetivo de uma turbina eólica. O PSCAD o oferece como modelo padrão, para aerogeradores de altas potências, relacionando a velocidade do vento (V_v) com a da turbina (W_m) e o ângulo de passo (β) das pás, equação (3.6). A figura 3.2 mostra sua geração em PSCAD e a respectiva curva comportamental resultante.

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2}(\lambda - 0.22\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\lambda} \tag{3.6}$$

$$\lambda = 2.237 \frac{V_v}{W_m} \tag{3.7}$$

Figura 3.2 – Coeficiente de potência de Anderson ($\beta = 0$). $C_p \times \lambda$.



3.1.3 Coeficiente de Heier

O Simulink do Matlab utiliza como coeficiente de potência a modelagem de Heier (Siegfried Heier, 2014), com melhor resposta e mais usada atualmente, porém será o modelo usado para a modelagem da turbina deste trabalho.

A modelagem utiliza as equações (3.7) e (3.8), cuja implementação em PSCAD e curva resultante é apresentada na figura 3.3. O valor de lambda está definido pelo raio do rotor, pela velocidade mecânica de operação e pela velocidade do vento. As constantes presentes na equação têm como valores estabelecidos $C_1=0,5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0,4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$ e $C_6 = 0,0068$.

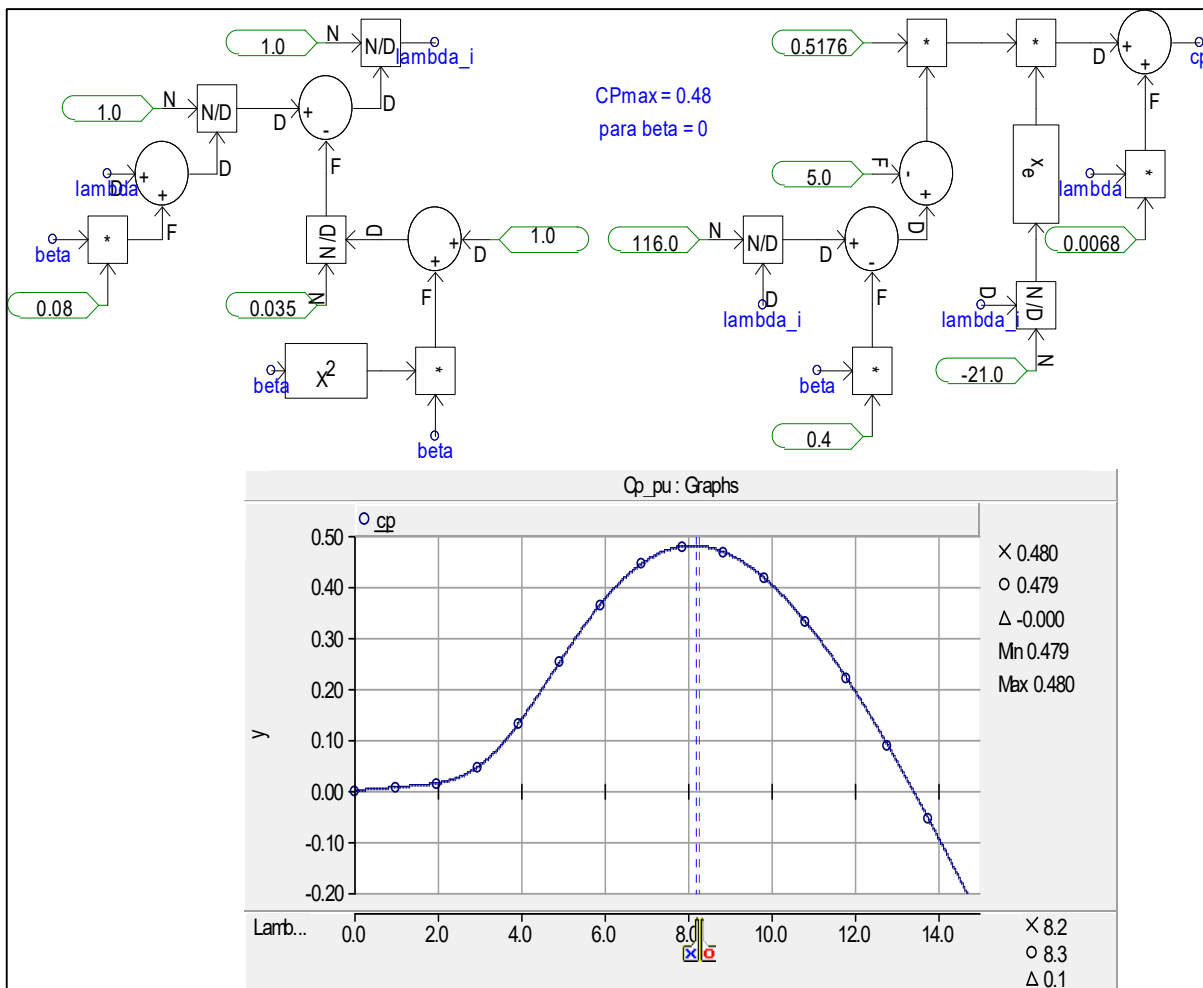
Nos últimos anos os ganhos ($C_1 - C_6$) utilizados em ($C_p(\lambda, \beta)$) mudaram um pouco de valor para melhor representar o comportamento das turbinas, em função de aplicação de técnicas mais modernas de fabricação (Thomas Ackermann, 2005).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.8)$$

$$\lambda = \frac{RW_m}{V_v} \tag{3.9}$$

Figura 3.3 – Coeficiente de potência simulink ($\beta = 0$). $C_p \times \lambda$.



Pode-se observar que neste caso o ângulo de passo provocará a presença de várias curvas possíveis no caso de levar um controle aerodinâmico. No entanto, quando (β) é zero, obtemos o maior valor do coeficiente ($C_p = 0,48$) com $\lambda = 8,1$. Isto é mostrado na tabela 3.1 e na figura 3.4 no teste para alguns valores de β em graus ($\beta = 0$), ($\beta = 5$), ($\beta = 10$), e ($\beta = 15$).

Figura 3.4 – Para $(\beta = 0,5,10,15)$, $(C_{p_max} = 0.48, \lambda = 8.1)$. $C_p \times \lambda$.

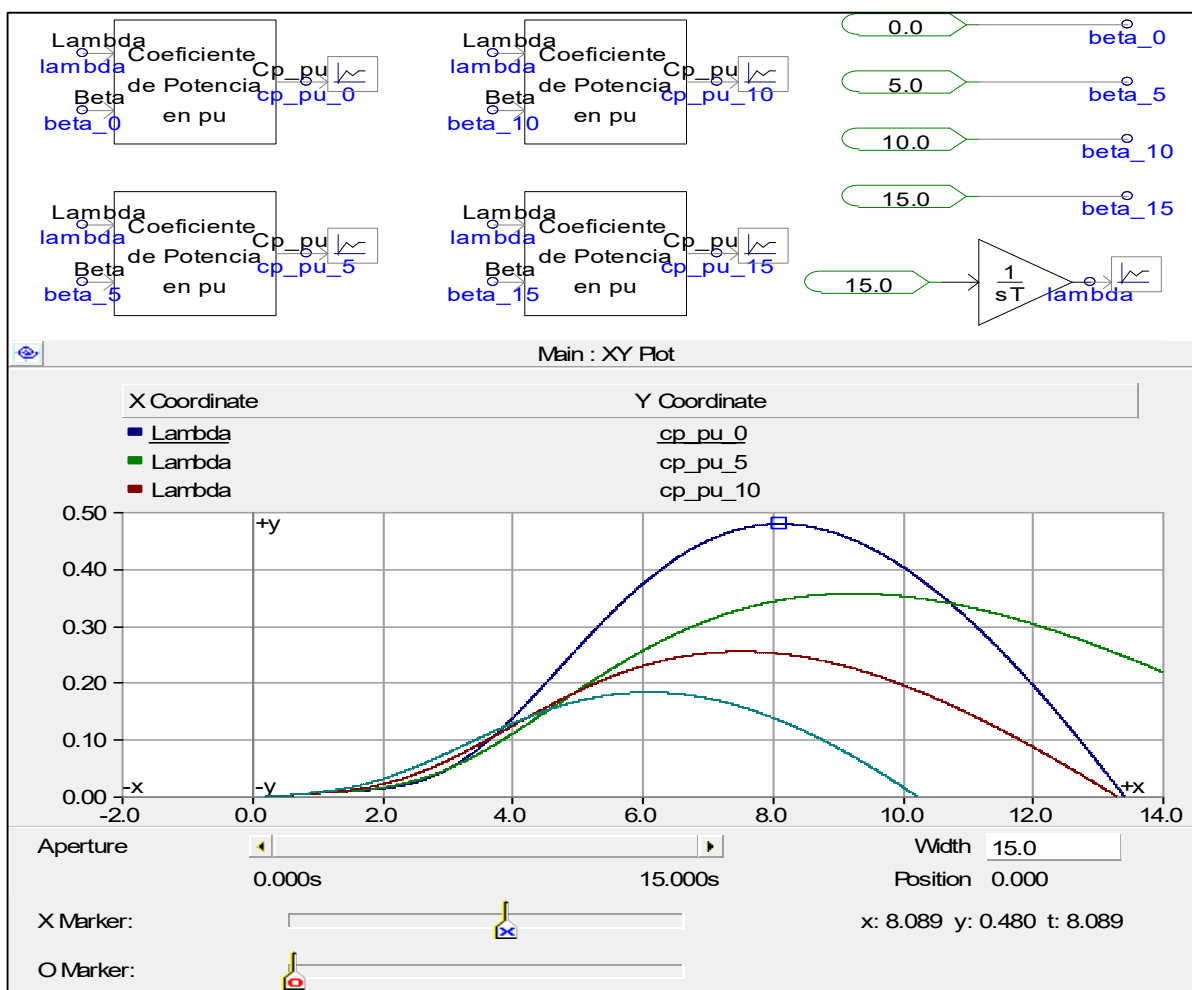


Tabela 3.1 – Valores obtidos de cp para vários valores de beta.

| Beta | Cp | Lambda |
|---------------|------|--------|
| 0 (azul) | 0.48 | 8.1 |
| 5 (verde) | 0.36 | 9.2 |
| 10 (vermelho) | 0.26 | 7.8 |
| 15 (ciano) | 0.19 | 6.1 |

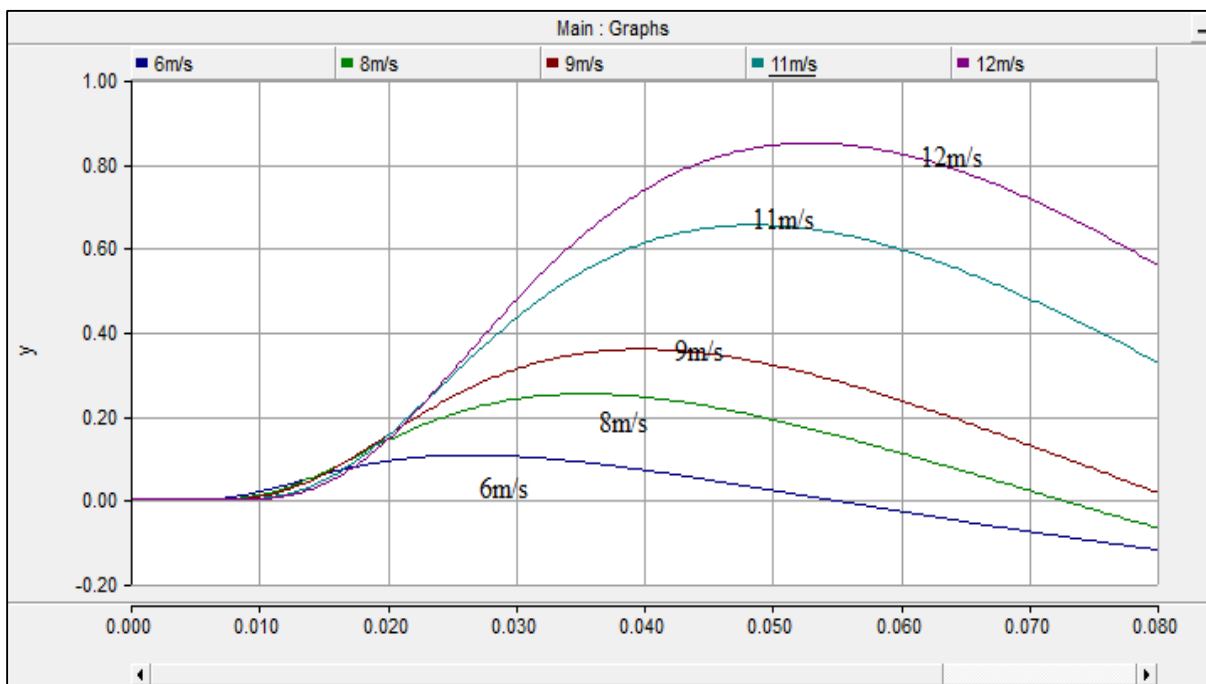
Considerando as equações (3.2) e (3.3) da potência mecânica do vento (P_m) tem-se agora a equação (3.10). Ou, de maneira normalizada, a equação (3.11), onde K_p representa um ganho para (C_{p_pu}) nominal e (V_{v_pu}) nominal.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V_v^3 \quad (3.10)$$

$$P_m = K_p C_{p_pu} V_{v_pu}^3 \quad (3.11)$$

Este valor pode ser observado na curva do aerogerador para as diferentes velocidades de vento aplicadas como é representado na figura 3.5.

Figura 3.5 –Valores de $K_p \times W_m$. Isto, para diferentes velocidades do vento.

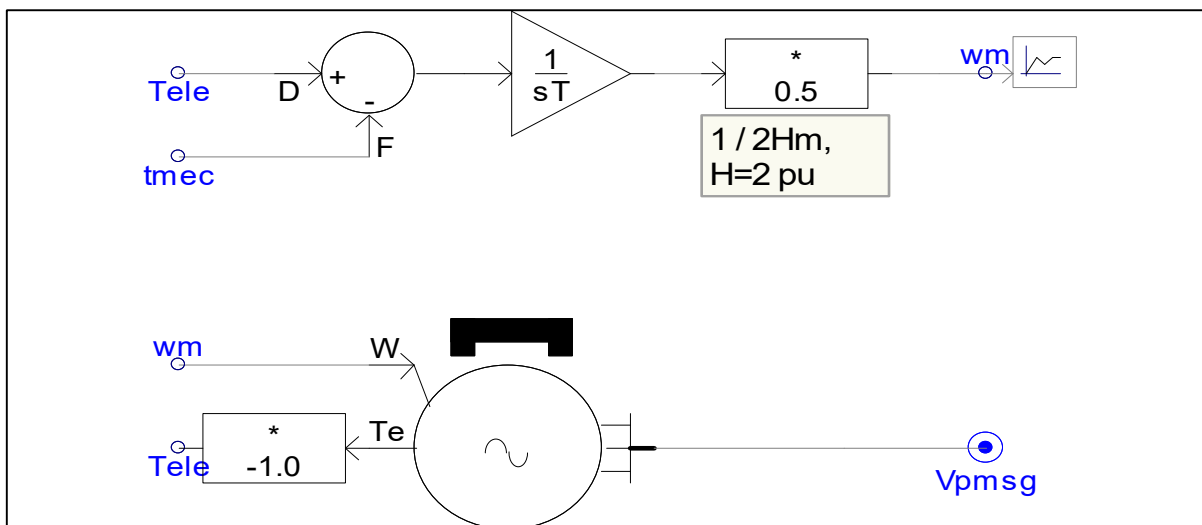


Considerando que as perdas de transmissão são desprezíveis e sem a utilização de caixa de engrenagens, e sabendo que o torque mecânico é uma relação entre a potência mecânica e a velocidade angular conseguida na turbina, chega-se à equação (3.12). O torque T_m é transferido diretamente ao eixo do gerador síncrono. Como consequência, ocorre o giro do rotor do gerador e, se há carga conectada, aparece um torque elétrico T_e . Desprezando o atrito no sistema, e considerando a inércia H_m do conjunto, a equação dinâmica do sistema pode ser obtida (equação (3.13)). Esta configuração é mostrada na figura 3.6, construída no PSCAD.

$$T_m = \frac{P_m}{W_m} = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho R A V_v^2}{\lambda} \quad (3.12)$$

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{1}{2H_m} (T_m - T_e) \quad (3.13)$$

Figura 3.6 – Equações de transferência de torque.



3.2 Modelagem do gerador síncrono

De acordo com (Thomas Ackermann, 2005), os valores de tensões de um gerador síncrono de rotor bobinado com referência no sistema dq0 para o estator respondem às equação (3.14), (3.15) e (3.16) representadas em magnitudes por unidade.

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} - W_m \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (3.14)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} + W_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (3.15)$$

$$u_{fd} = R_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (3.16)$$

Da mesma maneira com o fluxo elétrico temos no sistema dq0 as equações (3.17), (3.18) e (3.19) em magnitudes por unidade.

$$\psi_{ds} = -(L_{dm} + L_{\sigma s}) i_{ds} + L_{dm} i_{fd} \quad (3.17)$$

$$\psi_{qs} = -(L_{qm} + L_{\sigma s}) i_{qs} \quad (3.18)$$

$$\psi_{fd} = L_{fd} i_{fd} \quad (3.19)$$

No caso das máquinas de ímã permanente, as expressões para definir o campo (u_{fd}) e (ψ_{fd}) são zero, pois são referidas no campo. A equação (3.17) é redefinida como equação

(3.20) para uma quantidade de fluxo do magneto permanente (ψ_{pm}) presente no rotor acoplado às bobinas do estator:

$$\psi_{ds} = -(L_{dm} + L_{\sigma s})i_{ds} + \psi_{pm} \quad (3.20)$$

Após isso, considerando o $(\frac{d\psi}{dt})$ nulo chega-se às equações (3.21), (3.22), e (3.23) que correspondem também às equações do gerador síncrono oferecido no PSCAD.

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} - W_m(L_{qm} + L_{\sigma s})i_{qs} \quad (3.21)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} + W_m(L_{dm} + L_{\sigma s})i_{ds} \quad (3.22)$$

$$u_{fd} = R_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (3.23)$$

As expressões $(\frac{d\psi}{dt})$ são consideradas nulas nas equações das tensões porque as constantes de tempo associadas são pequenas. Logo, a equação que descreve o torque é definida na relação desses fluxos com as correntes no sistema dq0, e é mostrada na equação (3.24).

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (3.24)$$

E as potências ativa e reativa são descritas pelas equações (3.25) e (3.26), respectivamente.

$$P_s = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \quad (3.25)$$

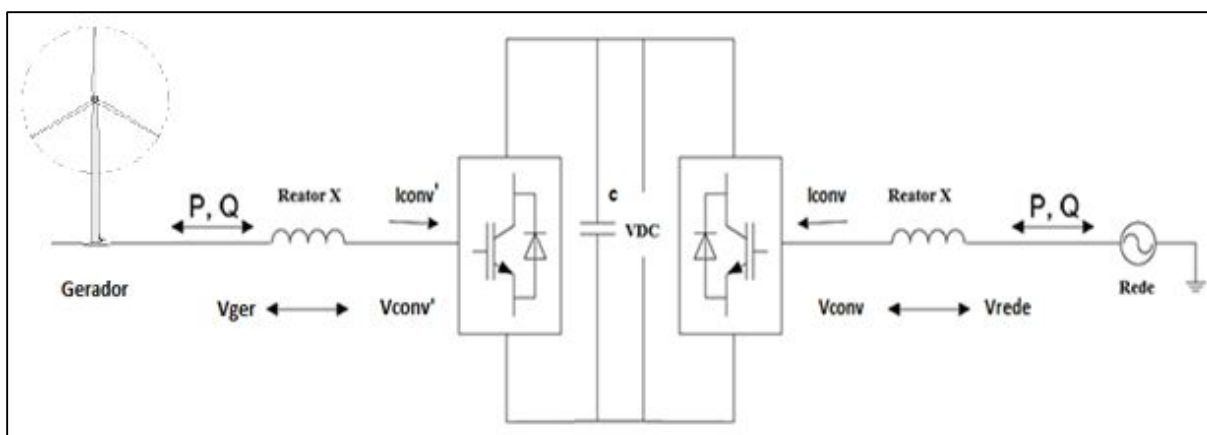
$$Q_s = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} \quad (3.26)$$

3.3 Modelagem do conversor e controle

Um sistema aerogerador a imãs permanentes em geral usa um conversor chamado *back-to-back* (B2B), de tipo fonte de tensão. Consiste de dois inversores de tensão ligados por um elo CC com capacitor. Os conversores conectam-se pelos respectivos lados CA, no caso em questão, a tensões de frequência diferente. O conversor conectado ao aerogerador é dito MSC (*machine side converter*, conversor do lado da máquina), enquanto o outro inversor é

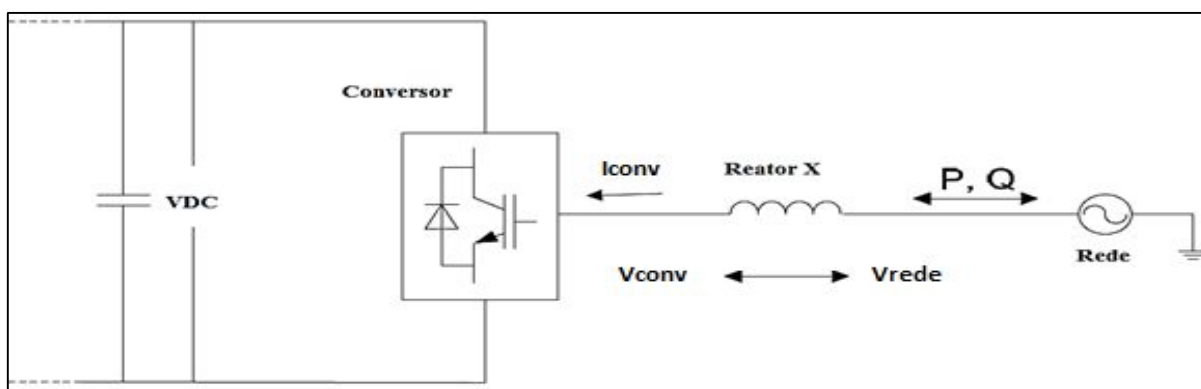
conectado à rede e dito GSC (*grid side converter*, inversor do lado da rede). Como ambos lados CA atuam como fonte de tensão, faz-se necessário a inclusão de reatores de fase e / ou filtros passa-alta na conexão ao gerador ou à rede (Chandra Bajracharya, 2008). Esta estrutura é apresentada na figura 3.7.

Figura 3.7 – Esquema principal do sistema de potência com VSC.



Pode-se analisar a operação do B2B como uma fonte conectada a uma rede de transmissão, atendendo às equações do fluxo de potência mostrado na figura 3.8.

Figura 3.8 – Esquema principal da VSC para o fluxo de potência.



Este fluxo de potência se comporta conforme as equações (3.27) e (3.28) para um valor de (ϕ) ajustado de maneira independente pelo controle do chaveamento. Com isto o conversor pode operar nos quatro quadrantes da característica P-Q:

$$P = \frac{V_{conv} V_{rede} \sin(\phi)}{x} \quad (3.27)$$

$$Q = \frac{V_{rede}(V_{rede} - V_{conv} \cos(\phi))}{x} \quad (3.28)$$

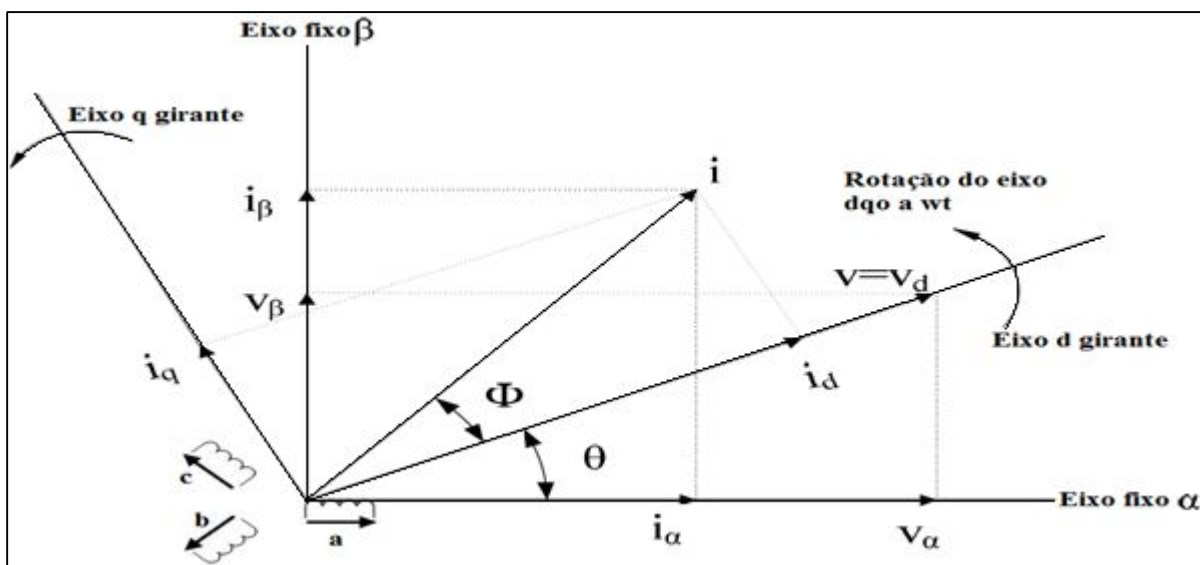
O controle consiste basicamente na transferência de energia por meio do método de controle vetorial, sendo ultimamente o método mais usado. Com o controle vetorial modela-se o sistema trifásico com transformações de eixo e, junto com conversores PWM, obtém-se um controle independente de potências ativa e reativa oferecendo várias vantagens. Uma grande característica deste sistema é que os vetores de correntes e tensões CA se tornam vetores constantes em regime, onde erros podem ser ajustados com controladores PI.

A representação do sistema trifásico é desenvolvida pelo sistema de transformação dq, que coordena o sistema trifásico estacionário a um sistema rotativo dq por meio de dois passos:

- A transformação do sistema trifásico estacionário ao sistema bifásico de coordenadas estacionárias ($\alpha\beta$).
- A transformação do sistema ($\alpha\beta$) de coordenadas estacionárias ao sistema de coordenadas rotatórias dq.

As transformadas de Clark são usadas para converter estas variáveis ao sistema ($\alpha\beta$), e as equações de Park para transformá-las ao sistema dq apresentado na figura 3.9 de maneira vetorial. Pode-se observar que o ângulo ($\theta = \omega t$) representa a posição do eixo (d) em relação ao eixo fixo (α).

Figura 3.9 – Representações das transformadas de Clark e Park.

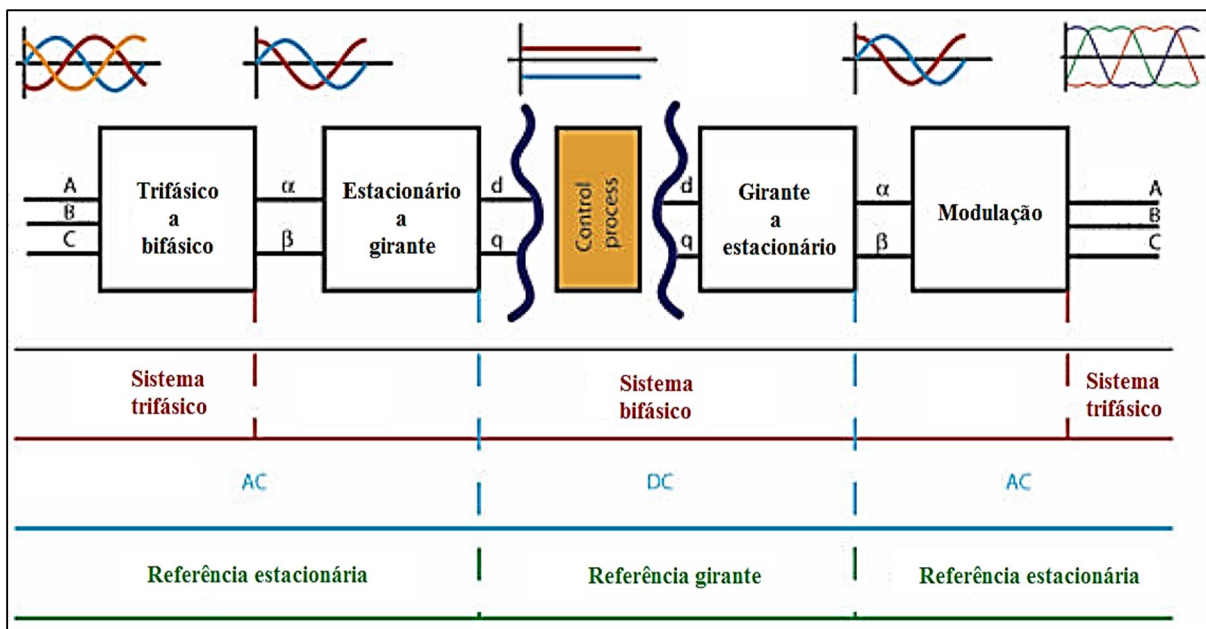


Neste caso, a posição angular do vetor tensão será:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}}\right) \quad (3.29)$$

A figura 3.10 apresenta a representação geral do sistema de potência em blocos com as conversões a serem feitas durante o processo desde a fonte trifásica estacionária, virando um sistema bifásico estacionário por equações de Clark para depois virar um sistema bifásico girante por equações de Park. Após isso, passa por equações inversas de Park e Clark para voltar ao sistema trifásico estacionário novamente.

Figura 3.10 – Representação geral das conversões a serem feitas no sistema de potência.



(Fonte: Chandra Bajracharya, 2008, modificado pelo próprio autor)

Durante este processo a referência dq deverá ser sincronizada com a frequência da rede. Para isto, partimos das equações obtidas no lado da rede com a figura 3.8.

Considerando o conversor ligado na rede, definem-se as tensões e correntes na rede como v_{abc} e i_{abc} respectivamente. As tensões e correntes na saída do conversor são v_{conv} e i_{conv} , respectivamente (i_{conv} está definido como a corrente que flui da rede para o inversor). Por último tem-se um indutor entre o conversor e a rede cuja resistência vale R e indutância L. Logo se obtém a equação (3.30).

$$V_{abc} = Ri_{abc} + L \frac{d}{dt} i_{abc} + v_{conv} \quad (3.30)$$

Representando no eixo dq, as tensões e correntes expressas no sistema bifásico girante à velocidade w , eixos dq, ficam da forma da equação (3.31). As tensões sintetizadas pelo conversor no eixo síncrono de referência dq são v_{d_conv} e v_{q_conv} , e as tensões da rede v_d e v_q . As correntes i_d e i_q obtidas da equação (3.31) aplicando Laplace estão descritas nas equações (3.32) e (3.33).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{d_conv} \\ V_{q_conv} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$i_d(sL + R) = v_d - v_{d_conv} + wLi_q \quad (3.32)$$

$$i_q(sL + R) = v_q - v_{q_conv} - wLi_d \quad (3.33)$$

De maneira similar, obtém-se no lado da saída que:

$$I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_L \quad (3.34)$$

A relação de potência entre a fonte de entrada CA e a saída CC responderá à equação (3.35) para V_{dc} e I_{dc} como tensão e corrente no elo CC, respectivamente.

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) = V_{dc} I_{dc} \quad (3.35)$$

O vetor da tensão na rede é definido na direção do eixo d, logo se pode assumir um fluxo virtual na rede atuando no eixo q e conseqüentemente $V_q = 0$. Com isto, se define as potências ativa e reativa nas equações (3.36) e (3.37), respetivamente, para serem injetadas ou absorvidas desde a rede. Estas equações mostram que se pode obter um controle de correntes de forma independentes.

$$P = \frac{3}{2} V_d I_d \quad (3.36)$$

$$Q = -\frac{3}{2} V_d I_q \quad (3.37)$$

A posição da tensão no eixo d definida pelo ângulo θ na rede é um valor importante para o controle independente das potências ativa e reativa. Este valor θ é calculado por técnicas de seguimento de fase como o PLL, permitindo com isto realizar o correto chaveamento dos dispositivos de potência e controlar o fluxo de potência ativa e reativa com valores de referência por meio de malhas de controle em cascata. O sistema de controle empregado consiste de malhas internas de corrente, mais rápidas, e malhas exteriores de potências ou tensão (dependendo da aplicação) de atuação mais lenta.

3.3.1 Controle GSC

O controle do conversor GSC (inversor ligado à rede) tem malhas internas de corrente, uma malha de tensão do elo CC, e uma de potência reativa (Nora Lachguer et al., 2011). O objetivo é transferir a energia elétrica do elo CC à rede.

As malhas de controle de corrente são construídas com um regulador PI para os eixos direto e em quadratura, representado como $R(s)$ na equação (3.38):

$$R(s) = K_p + \frac{K_t}{s}; (i_{ref} - i_s)R(s) = V'_{conv}(s) \quad (3.38)$$

Em coordenadas dq:

$$V'_{d_{conv}} = - (i_{d_{ref}} - i_d) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (3.39)$$

$$V'_{q_{conv}} = - (i_{q_{ref}} - i_q) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (3.40)$$

Para a análise dos laços de controle, o inversor é considerado uma fonte de tensão controlada em tensão, com um atraso na resposta devido ao chaveamento dado por $T_a = T_{switch}/2$. A função de transferência (FT) entre a tensão de referência V'_{conv} e a tensão de saída V_{conv} do inversor é apresentada na equação (3.41).

$$Y(s) = \frac{1}{1 + T_a s}; V'_{conv}(s)Y(s) = V_{conv}(s) \quad (3.41)$$

Substituindo a equação (3.39) e (3.40) na (3.41), têm-se as tensões sintetizadas pelo inversor em coordenada dq, dada nas equações (3.42) e (3.43):

$$V_{d_conv} = (i_{dref} - i_d) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{1 + sT_a} \quad (3.42)$$

$$V_{q_conv} = (i_{qref} - i_q) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{1 + sT_a} \quad (3.43)$$

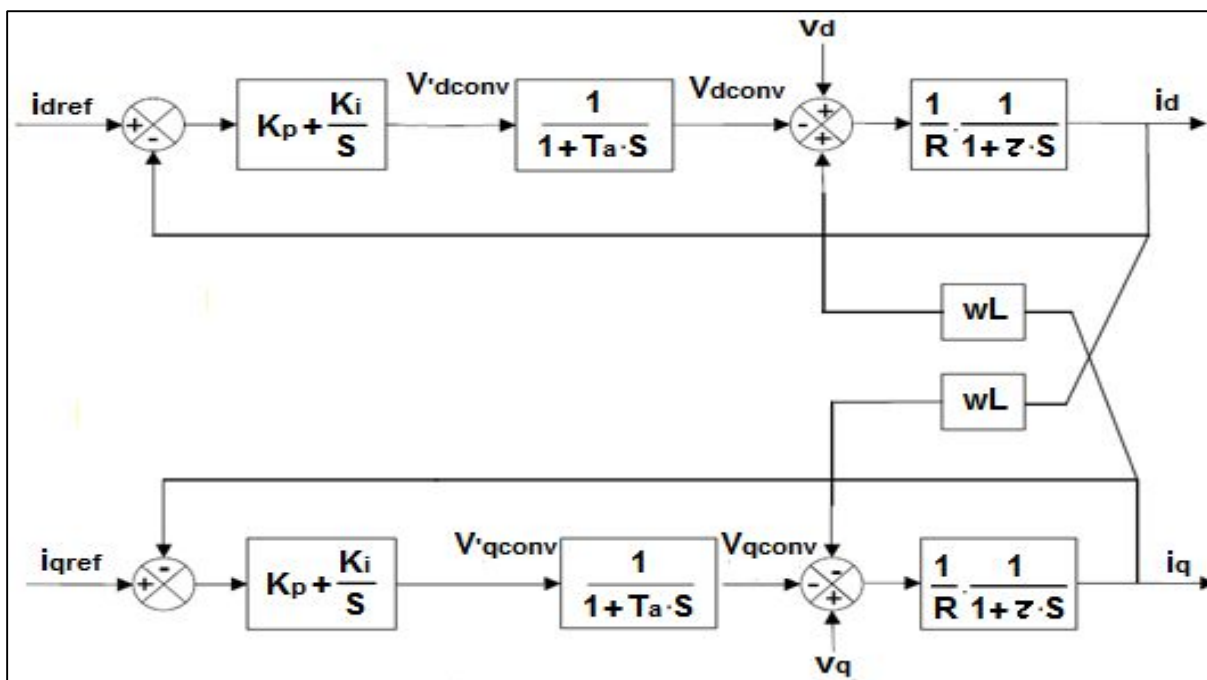
Utilizando as equações (3.32) e (3.33) em laplace, e chamando $G(s) = \frac{1}{R} \frac{1}{1 + s\tau}$, onde $\tau = \frac{L}{R}$, obtêm-se as equações (3.44) e (3.45):

$$i_d = \left[\frac{v_d - v_{d_conv} + wL i_q}{G(s)} \right] \quad (3.44)$$

$$i_q = \left[\frac{v_q - v_{q_conv} - wL i_d}{G(s)} \right] \quad (3.45)$$

Com as equações (3.42), (3.43), (3.44) e (3.45) pode-se desenhar o diagrama de blocos das malhas de corrente como mostrado na figura 3.11. Para análise de controle de corrente, as entradas referentes à tensão da rede e acoplamento cruzado são consideradas nulas

Figura 3.11 – Representação da malha de corrente do controle GSC.



(Fonte: Chandra Bajracharya, 2008, modificado pelo próprio autor)

Usando o método empregado por (Chandra Bajracharya, 2008) durante a sintonização do controle obtemos que para as malhas de corrente os ganhos serão segundo (3.46).

$$K_p = \frac{\tau R}{2T_a} ; T_i = \tau \quad (3.46)$$

Do mesmo jeito, para a malha de tensão será tomando um valor de referência CC com o valor no elo CC para construir a função de transferência por meio de um PI regulador ($R(s)$) mostrado na equação (3.47) para $T_{iv} = K_{pv}/K_{iv}$.

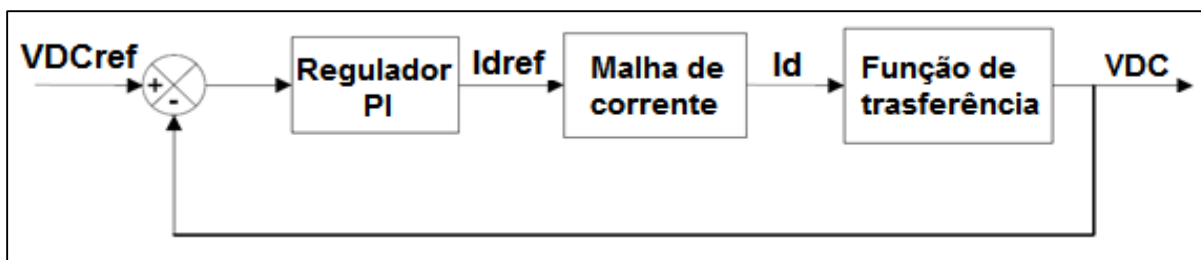
$$\{V_{dc_{ref}}(s) - V_{dc}(s)\}(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}) = i_{d_{ref}}(s) \quad (3.47)$$

Lembrando da situação de $V_q = 0$ e da equação (3.35), podemos reescrever a equação como:

$$I_{dc} = \frac{3}{2} \frac{v_d}{V_{dc}} i_d \quad (3.48)$$

O regulador PI é seguido pela malha interior de corrente e depois pela função de transferência do sistema com os mostra na figura 3.12.

Figura 3.12 – Representação da malha de tensão do controle GSC.



3.3.2 Controle MSC

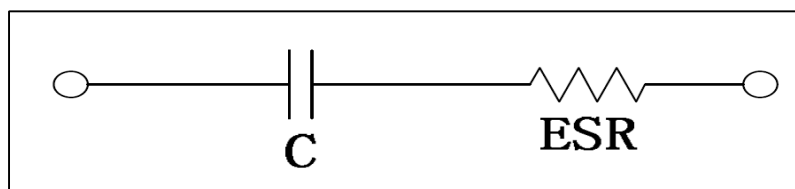
Para o lado do gerador o sistema é parecido, temos o fluxo de potência desde o gerador para o link CC com malhas de corrente internas para os eixos d e q, uma malha exterior de potência ativa para o eixo d e uma malha de potência reativa no eixo q.

3.4 Bateria

A bateria, supercapacitor e volante de inércia são os sistemas mais usados atualmente como ESS, no entanto, a bateria continua sendo a de maior participação por sua eficiência, resposta rápida e valor aceitável no mercado.

Atualmente existem várias modelagem para representar a bateria e as suas características de comportamento por meio de configurações baseadas em resistores e capacitores. A modelagem da bateria para este caso será representada de como circuito equivalente de resistor (ESR) e capacitor (C) em serie como é mostrado na figura 3.13.

Figura 3.13 – Circuito equivalente da bateria.



Este circuito RC representa o circuito equivalente da bateria modelada, onde o capacitor tem um valor muito alto para conseguir armazenar a energia elétrica necessária e trabalhar como uma fonte na descarga, e ESR é a resistência série equivalente da bateria. A carga e descarga da bateria será realizada por um conversor com controle de corrente, logo a tensão no capacitor equivalente C e nos terminais da bateria vem dadas pelas equações (3.49) e (3.50), respectivamente. I_c é a corrente média injetada (ou retirada, negativa) pelo conversor na bateria durante um intervalo de tempo Δt (por exemplo o período de chaveamento), e $V_c(t_0)$ é a tensão inicial do capacitor.

$$V_c = V_c(t_0) + \frac{I_c}{C} \Delta t \quad (3.49)$$

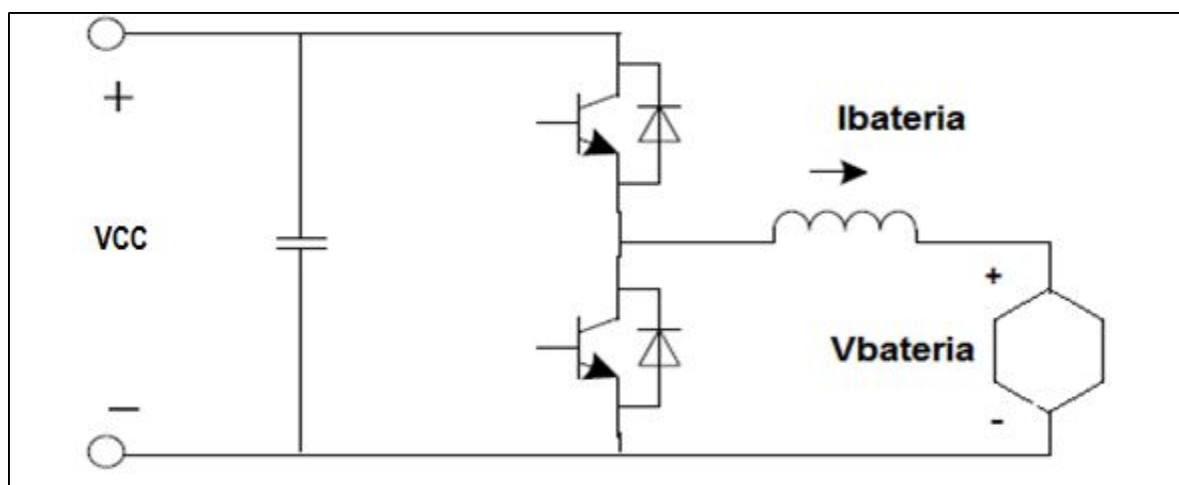
$$V_{BAT} = V_c + ESR \times I_c \quad (3.50)$$

3.5 Conversor CC-CC

A conexão da bateria no sistema pode ser efetuada tanto no elo CC, como diretamente na rede por meio de um conversor inversor. Por ser elemento de equilíbrio de fluxo de potência, a bateria fica exposta a grandes variações de potência.

Para ligar a bateria ao sistema desde o elo CC é necessária a participação de um conversor CC-CC com certas características, assim como foi necessário um conversor para ligar o gerador à rede. Neste caso deve-se saber que a bateria fará um trabalho de carga e descarga a diferentes níveis de tensão CC (Nishad Mendis, 2014). Para conseguir chegar aos níveis de tensão para carga e descarga para aerogeradores é usado um Buck/Boost apresentado na figura 3.14.

Figura 3.14 – Conversor CC-CC para carga e descarga da bateria.



Para cargas o conversor trabalha como um conversor Buck, ou seja que abaixa o nível de tensão para carregar a bateria e no caso de liberação de energia da bateria para o sistema o conversor fará as vezes de boost para elevar o nível de tensão (Xu Guoyi et al., 2012).

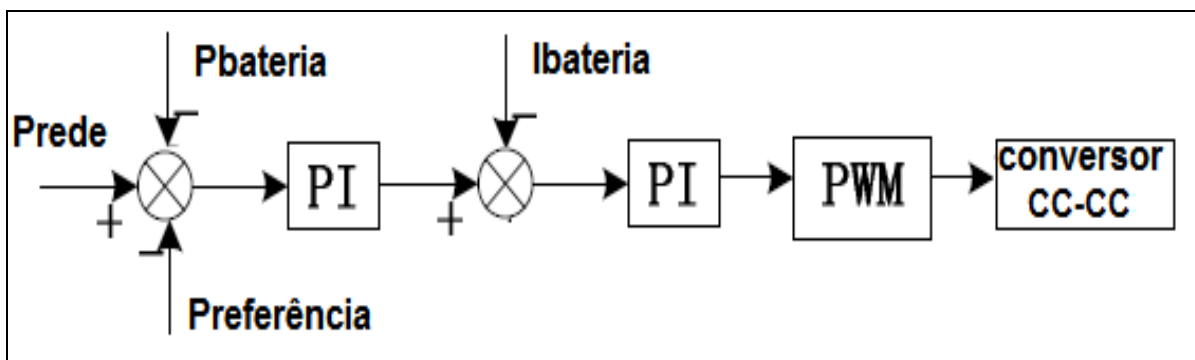
A equação (3.51) serve para dimensionar o indutor do conversor.

$$L = \frac{V_o}{V_i} \frac{V_i - V_o}{\Delta I_o F_{pwm}} \quad (3.51)$$

Onde (V_i) e (V_o) representam as tensões de entrada e saída, I_o representa a corrente de saída e F_{pwm} representa a frequência do PWM.

Para gerar os disparos necessários no conversor deve ser implementado um controle que manterá o nível de potência na saída com a carga e descarga da bateria como é apresentado na figura 3.15.

Figura 3.15 – Malhas de controle para o conversor da bateria.



A potência a ser imposta à rede é $P_{\text{preferência}}$. A diferença entre a potência que efetivamente está sendo injetada na rede, P_{rede} , e a referência representa a falta ou excesso de potência, utilizada para carregar ou descarregar a bateria, conforme o caso, selecionando se o conversor operará como elevador ou abaixador. É comparada com o fluxo de potência na bateria e, após passar por um regulador PI, gera uma referência de corrente que, após outro regulador, define a razão cíclica do conversor CC-CC

3.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o equacionamento e modelagem do sistema a ser estudado. Contemplou desde a turbina eólica, gerador síncrono, desenvolvimento das malhas de controle no GSC com malhas internas de correntes e externas de tensão no elo CC, e no MSC com malhas internas de corrente para os eixos dq e malhas externas para controle das potências obtidas no gerador. Tudo isto, de uma maneira geral para definir as grandezas do aerogerador. Viu-se também, a necessidade do PLL para o seguimento de fase nas correntes que representa um valor importante para o controle dos conversores em coordenadas dq, e a estrutura básica da bateria a ser simulada com o seu conversor CC-CC controlado.

Capítulo 4: Sistema proposto sem o armazenamento de energia

Para a análise do sistema, neste capítulo são apresentados os cálculos e simulação de um aerogerador proposto de 25kW a 380 volts de tensão de linha. Logo, são desenvolvidos os controles nomeados no capítulo anterior para obter o fluxo de potência, assim como os resultados do comportamento do aerogerador ligado a uma barra infinita com variações de vento a diferentes cargas. A modelagem de um banco de baterias é também apresentado com um conversor CC_CC que no próximo capítulo será introduzido no sistema.

4.1 Gerador

Os valores nominais do gerador já são os valores base, e valem:

$$S_b = \text{Potência CA} = 25kW$$

$$V_b = \text{tensão pico CA} = (\sqrt{2/3})(V_{LL,rms}) = (\sqrt{2/3})380 = 311 V$$

$$I_b = \text{corrente pico CA} = (2/3)(S_b/V_b) = (\sqrt{2/3})311 = 53,59 A$$

$$Z_b = \text{impedância CA} = (V_b/I_b) = 5.80 \text{ ohms}$$

$$f_b = \text{frequência} = 60 \text{ Hz}$$

Lembrando a equação de fluxo de potência (3.23), pode-se estabelecer um fluxo base para determinar as características do aerogerador, o cálculo do reator na entrada do conversor MSC e a saída do conversor GSC de acordo a figura 3.7. Assume-se um ângulo de abertura de 30° entre a tensão sintetizada pelo gerador e a do inversor, para obter o fluxo de potência nominal. Com 25kW no conversor MSC e considerando a resistência como 10% do valor da reatância:

$$P = V_{conv}V_{rede} \text{sen}(\theta) = 25KW = \frac{380^2}{2X_T}$$

$$X_T = 2.888$$

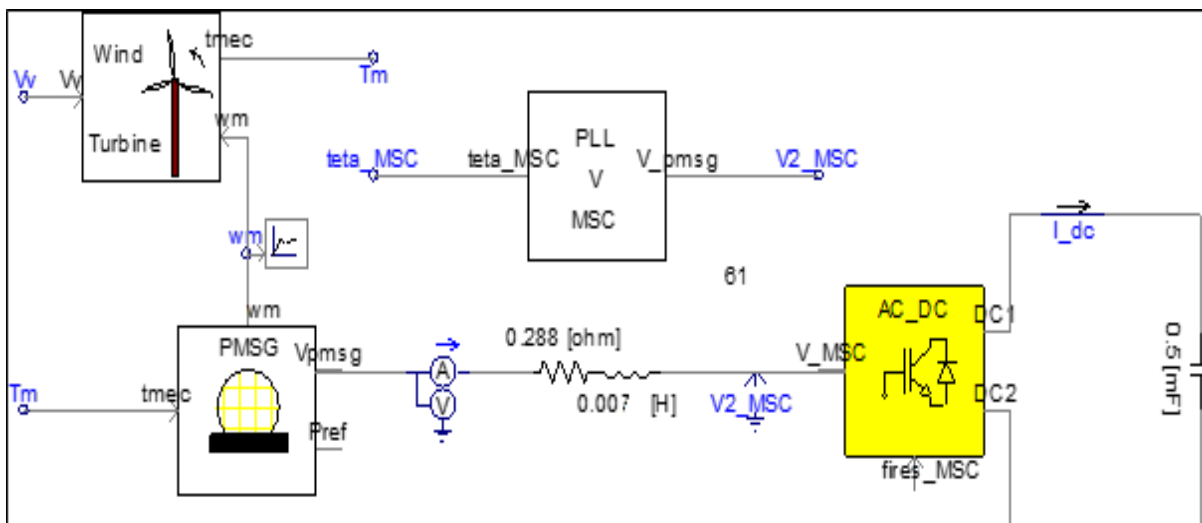
$$90\%X_T = X_L = 2\pi fL = 2.59$$

$$R = 10\%(X_T) = 0.288 \text{ ohms}$$

$$L = \frac{2.59}{2\pi 60} = 0.007 H$$

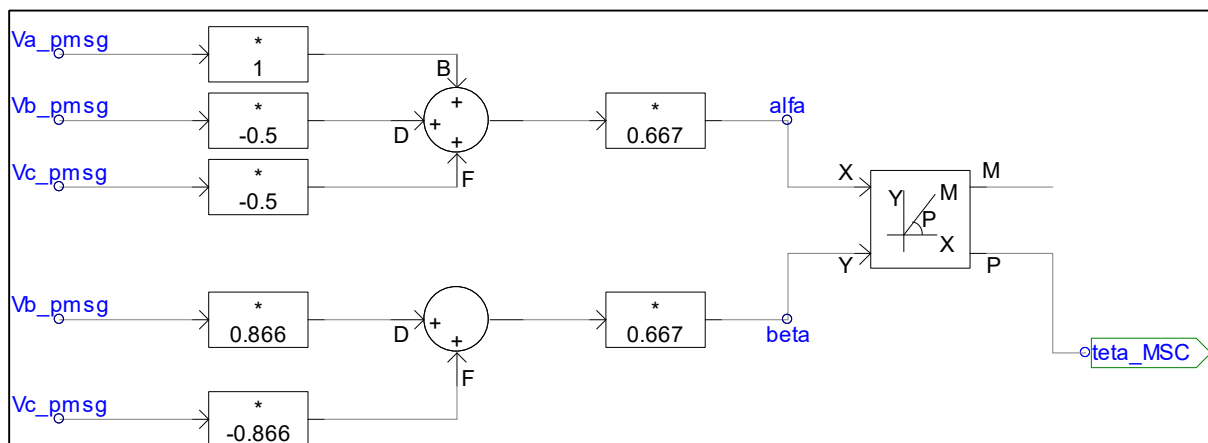
Geradores tipo GSIP de baixa potência apresenta como valores típicos uma reatância em torno de 5% (0,05pu) e resistência estática de 15 (0,01pu). Aplicando ao gerador de 25 kW / 380V, encontra-se para resistência estática 0,02888 Ω , e para indutância 0,76mH. A figura 4.1 mostra o diagrama elaborado em PSCAD.

Figura 4.1 –Fluxo de potência no MSC desde a turbina até o conversor AC_CC.



O sinal de tensão é medido na entrada do retificador controlado AC_DC no MSC por meio de um detector de fase PLL, construído a partir das equações do sistema alfa beta. Primeiro passa-se o sinal trifásico ao sistema bifásico alfa beta e depois se extrai o ângulo de fase $teta_MSC$, que será o valor de referência para o controle no AC_DC no MSC, segundo mostrado na figura 4.2.

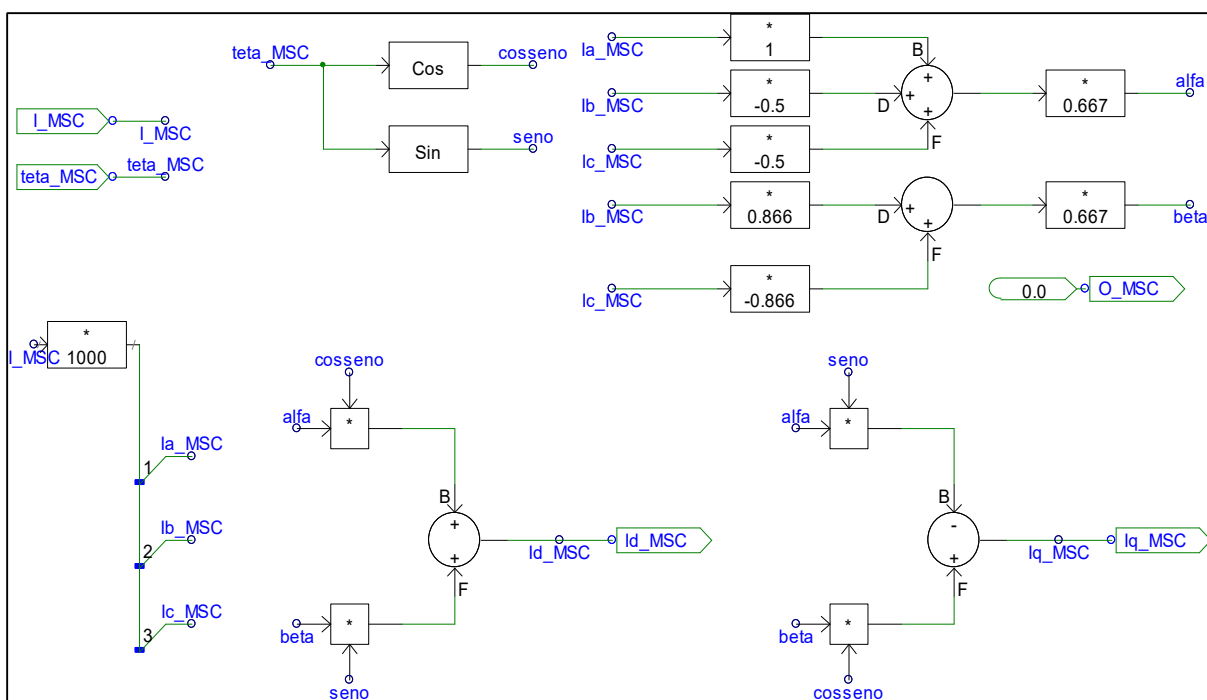
Figura 4.2 – Cálculo do ângulo de fase no MSC com PLL.



4.2 Conversor MSC

A corrente trifásica medida no lado MSC é transformada ao sistema alfa beta como é mostrado na figura 4.3 para logo ser convertida ao sistema dq com o valor de fase “teta_MSC” conseguido pelo PLL na tensão de entrada do conversor AC_CC. Estes sinais servirão para as malhas internas de corrente no controle.

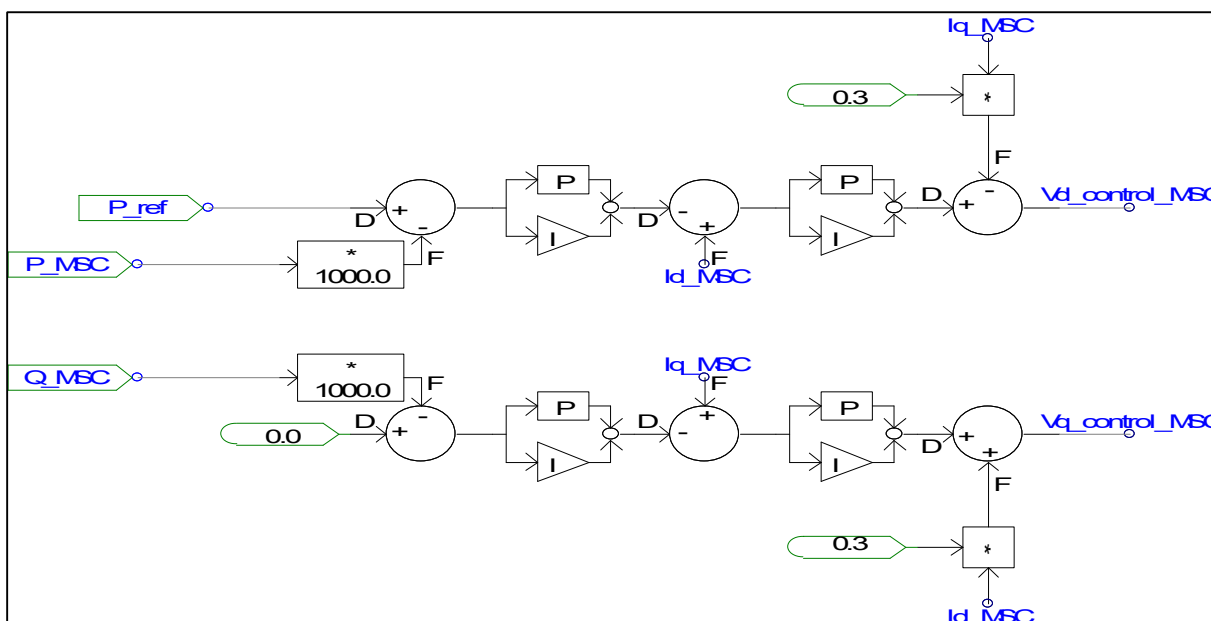
Figura 4.3 – Conversão da corrente do sistema trifásico a dq no MSC.



Os sinais d e q de corrente obtidos irão passar num controlador PI de acordo as equações apresentadas no capítulo 3 para o controle no MSC e GSC como na figura 4.4. Estes, para malhas de corrente tem os ganhos estabelecidos pelas equações (3.42) com $K_p = 3,8$; $T_i = 0,03$.

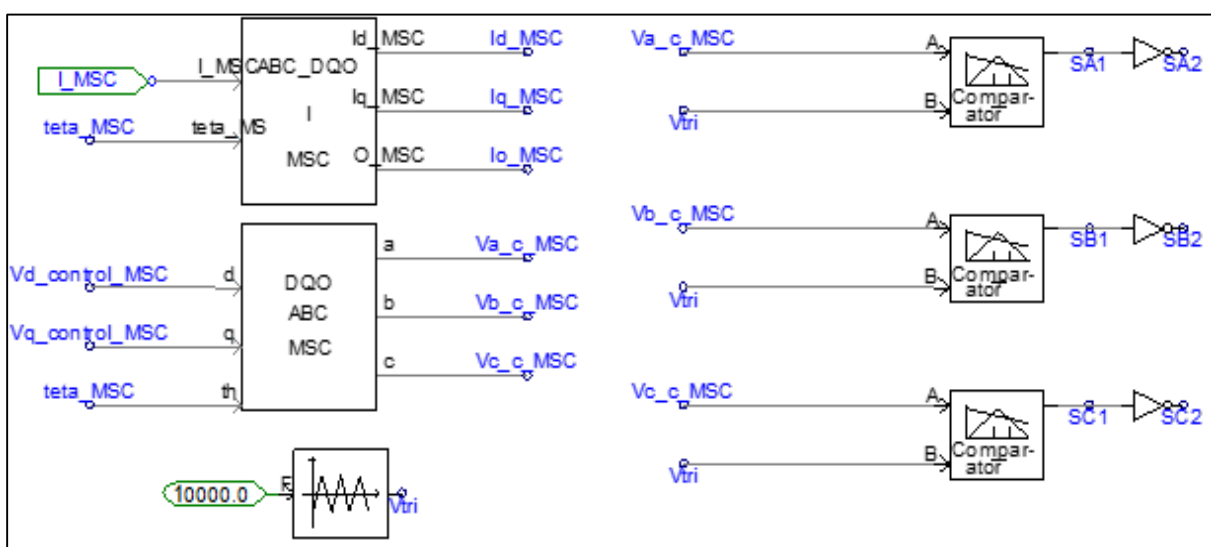
Logo, malhas externas são utilizadas para o controle das potências ativa e reativa com ganhos estimados por meio de testes na simulação com $K_p = 2,1$; $T_i = 0,065$. Em geradores a imã permanente usualmente a potência reativa de referência é zero, pois o fluxo é estabelecido pelos imãs.

Figura 4.4 – Malhas internas de corrente e malhas externas de potências MSC.



Após passar as malhas externas de potência ativa no eixo d e reativa no eixo q, assim como as malhas internas de corrente nos eixos d e q, os sinais obtidos $V_{d_control_MSC}$ e $V_{q_control_MSC}$ são convertidos com transformada inversa de acordo com as equações de Park e Clark da teoria para sinais trifásicos e finalmente gerar o PWM de seis disparos que irão ao conversor por meio de comparadores com um sinal triangular na frequência de chaveamento de 10 KHz. Isto é apresentado na figura 4.5 em blocos com os seis sinais de saída.

Figura 4.5 – Conversão dos sinais dq a trifásico e geração do PWM no MSC.

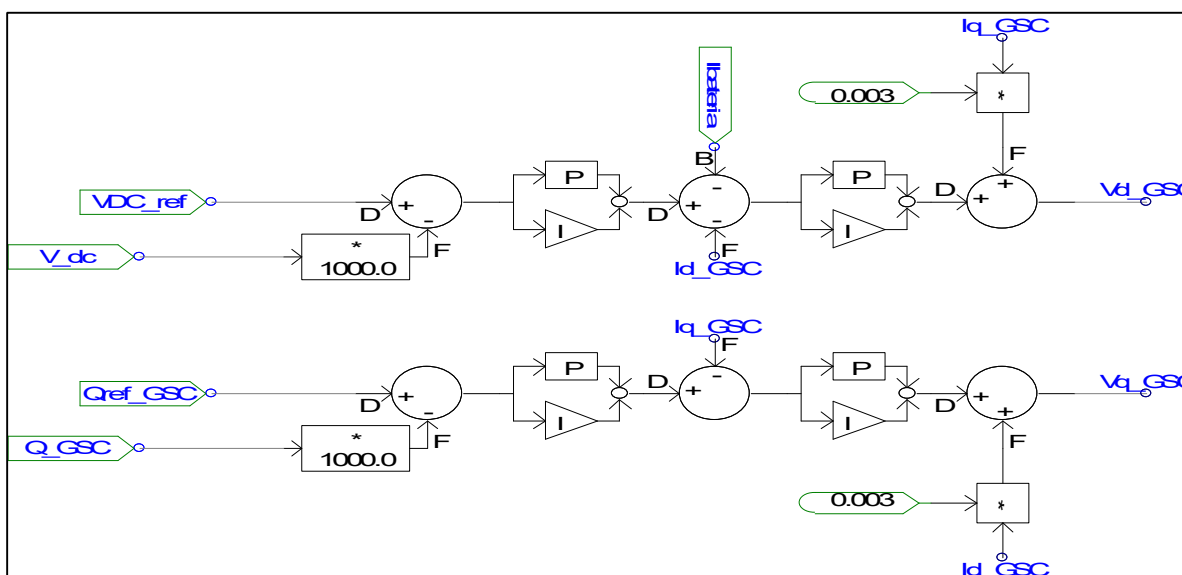


4.3 Inversor GSC

Da mesma maneira como foi apresentado o controle para o conversor MSC, o inversor GSC tem um controle por meio da leitura da tensão existente na rede para obter o ângulo θ_{GSC} como referência para as malhas de controle durante as transformações no controle apresentado na figura 4.6. Para as malhas internas de corrente os ganhos são obtidos segundo as equações (3.42) nos eixos dq com $K_p = 1$; $T_i = 0,025$.

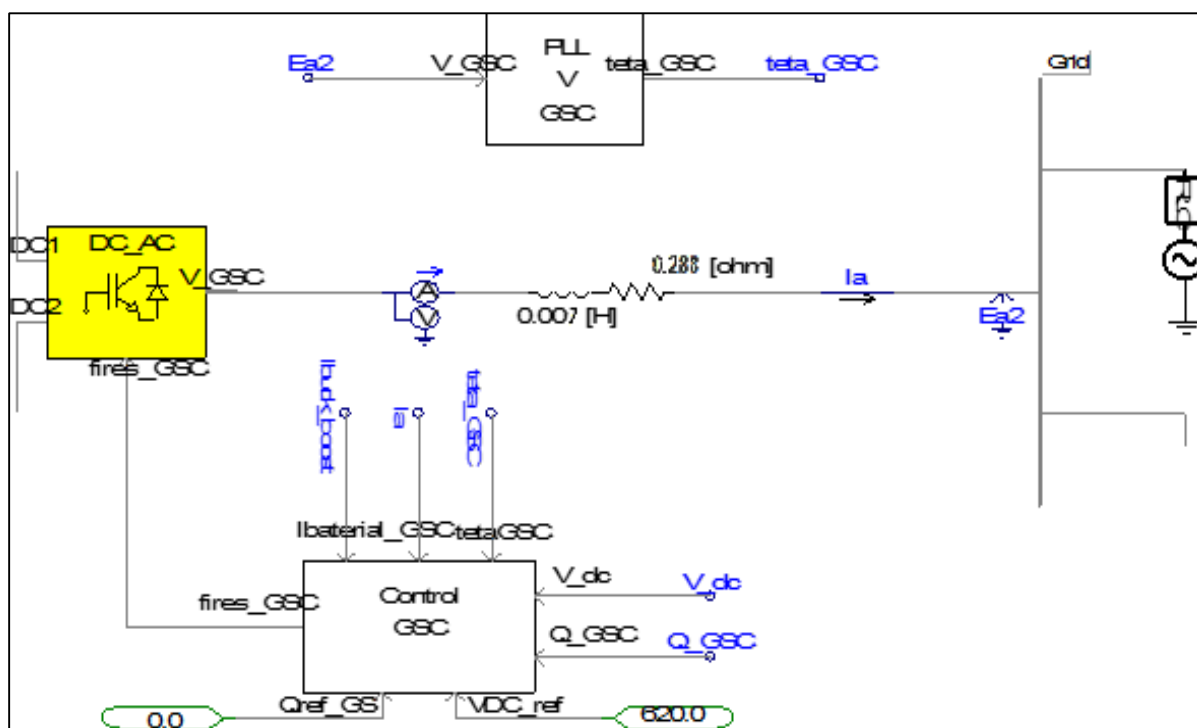
Para malhas externas para potência reativa no eixo q e com a diferença de controle no eixo d para nível de tensão no elo CC, estabelecido nesse caso para 620 V, também se tem ganhos obtidos por meio de testes como foi efetuado no controle de potência do MSC, obtendo $K_p = 2$; $T_i = 0,055$. Na saída tem-se os seis disparos do inversor DC_AC ligado à rede por meio do reator.

Figura 4.6 – Malhas de corrente internas e malha de tensão e potência no GSC.



Após ter obtido os ganhos do controle do GSC e tê-lo conectado, o resultado será um fluxo de potência que será variável de acordo com a velocidade do vento na entrada da turbina do aerogerador. Essa saída será ligada na rede por meio de um reator. Tomando como base a potência máxima a ser transferida (25kW), e com tensão de linha de 380V, tem-se como indutor de acoplamento os mesmos valores calculados para o MSC. A figura 4.7 mostra o esquema da interconexão GSC – rede em PSCAD.

Figura 4.7 – Fluxo de potência no GSC desde o inversor CC_AC até a barra da rede.

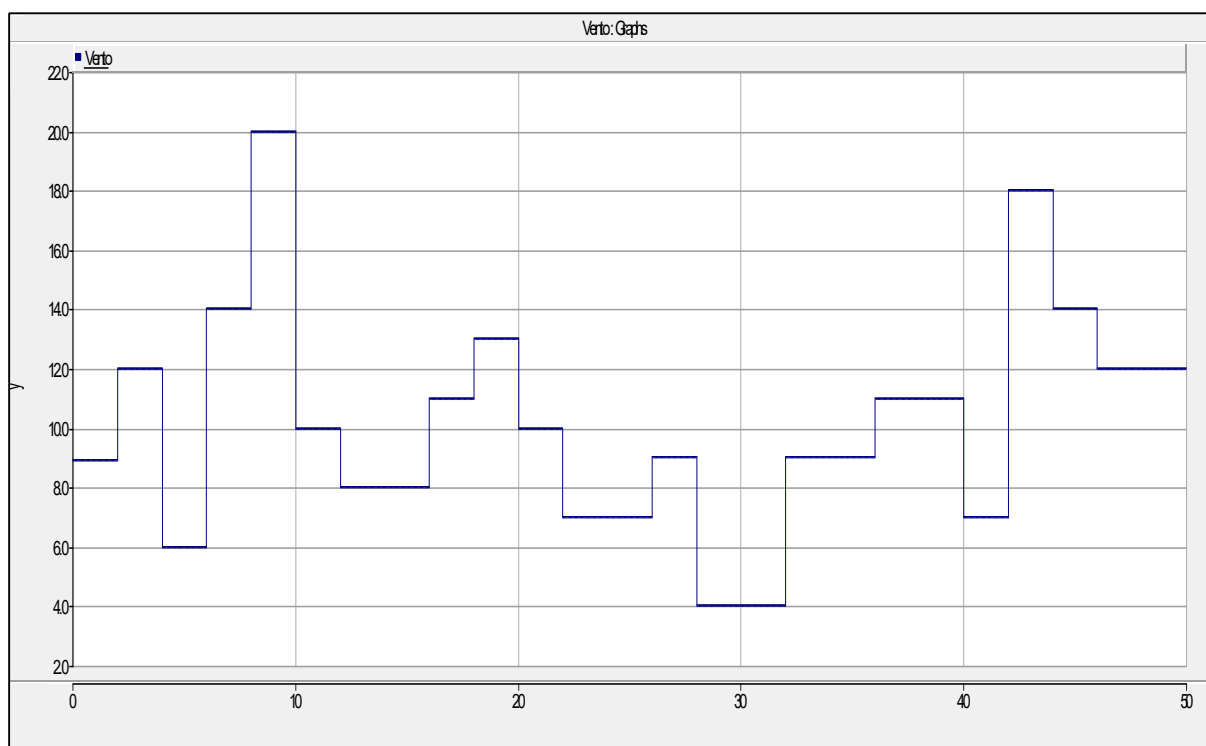


4.4 Procedimento de Inicialização

O processamento inicial do sistema responde a várias condições estabelecidas para o correto funcionamento do fluxo. De início, o barramento CC não é ligado à rede no lado do GSC. A potência disponibilizada pelo aerogerador é utilizada para carregar o capacitor do elo CC. Após o nível de tensão alcançar um valor aproximado à tensão nominal, a conexão com a rede é habilitada. O GSC é sincronizado, conectado flutuando e só então o fluxo de potência é liberado.

4.5 Resultados obtidos

A simulação feita para a obtenção de resultados sem o sistema de armazenamento de energia descreve um comportamento de acordo com as variações de vento a cada 2 segundos em uma simulação de 50 segundos. Este comportamento do vento mostrado na figura 4.8 trabalha em uma faixa de 4 a 20 metros por segundo para conseguir observar o comportamento do aerogerador em detalhe segundo as equações da sua modelagem. Nesse caso o valor nominal do vento está em 12 metros por segundo.

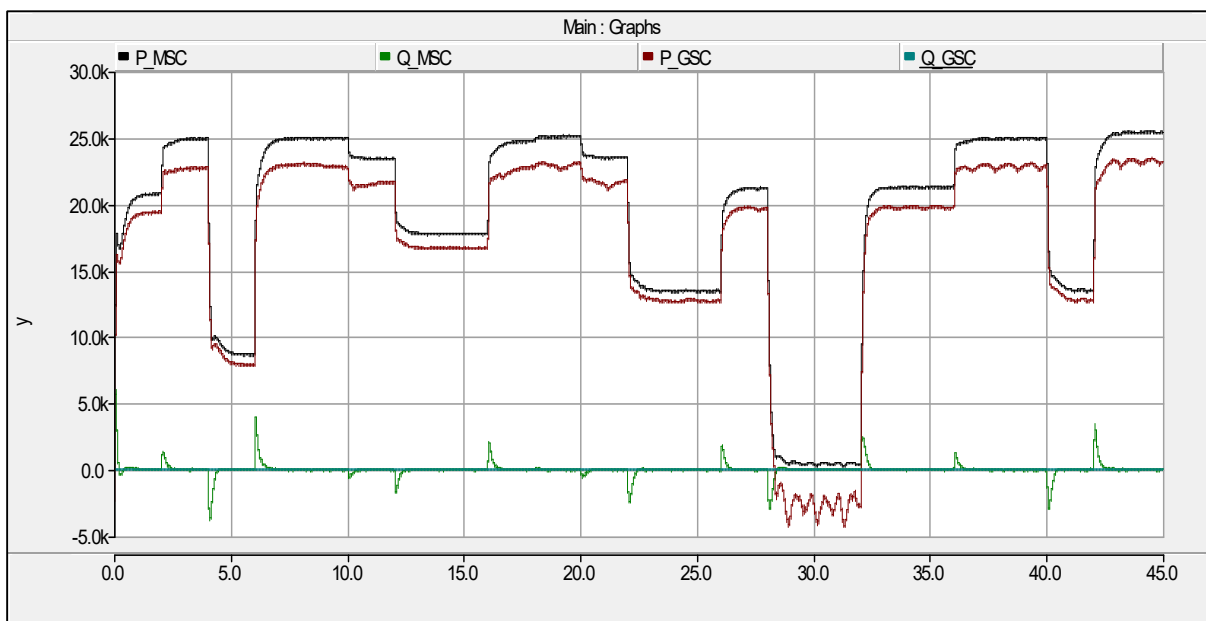
Figura 4.8 – Configuração do vento na entrada da turbina do aerogerador em (m/s).

As cargas para este experimento assumem dois valores, sendo no primeiro caso 1 pu, e no segundo caso 0,5 pu, para variações de vento determinadas durante uma simulação de 50 segundos com o aerogerador ligado à rede para conseguir observar o comportamento em geral do sistema.

Com as variações de vento têm-se como resultado vários níveis de potência elétrica na saída do gerador na faixa de zero a vinte e cinco quilowatts. Na figura 4.9 são apresentadas as potências ativa e reativa na saída do gerador MSC e as potências ativa e reativa na saída do inversor GSC de acordo à velocidade do vento na entrada da turbina para afirmar o correto funcionamento do controle de potência no MSC.

A saída tem eficiência de 92% devido à potência dissipada no conversor, inversor e linhas. Isto quer dizer que está sendo fornecido à barra da rede 23 quilowatts quando temos vento nominal de 12 metros por segundo na entrada do aerogerador. Pode-se observar uma compensação de potência reativa no gerador (verde) quando acontecem variações de potência ativa (preto) provocadas pela variação do vento. Também a potência fixada para o valor nominal de 25 quilowatts no gerador quando o vento sobrepassar os 12 metros por segundo, extraíndo a máxima potência em cada situação.

Figura 4.9 – Potências ativas MSC (preto) e GSC (vermelho). Potências reativas MSC (verde) e GSC (ciano) sem ESS.



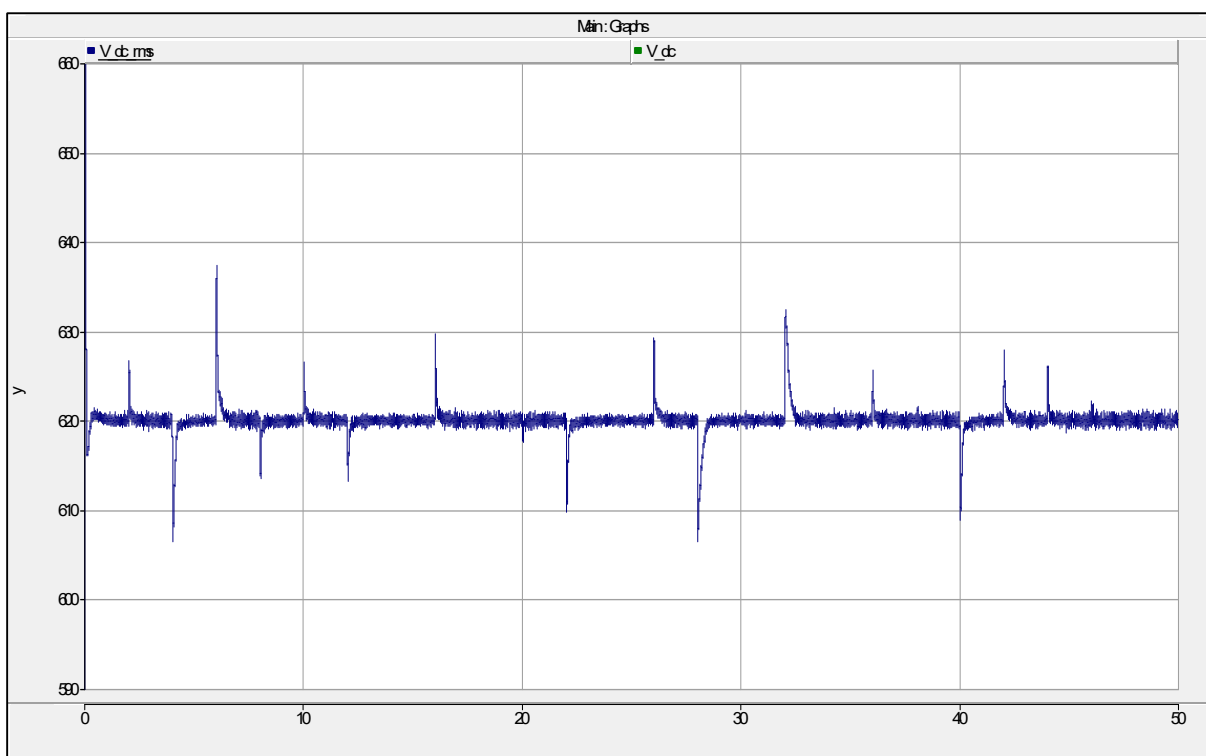
Na tabela 4.1 são apresentados em detalhe os valores de potência ativa obtidos para cada 2 segundos de variação do vento no lado MSC e GSC. Aos 28 segundos a turbina recebe um vento de 4 m/s e a potência gerada é praticamente zero, incluso consome potência. Neste momento o B2B poderia ser desligado da rede ou tentar a possível participação de um ESS.

Tabela 4.1 – Valores obtidos de Potências ativas em kW MSC e GSC sem ESS.

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Tempo (s) | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
| Vento (m/s) | 9 | 12 | 6 | 14 | 20 | 10 | 8 | 8 | 11 | 13 | 10 | 7 | 7 |
| Potencia Ativa MSC (kW) | 21 | 25 | 8.7 | 25 | 25 | 23.4 | 17.7 | 17.7 | 24.8 | 25 | 23.5 | 13.5 | 13.5 |
| Potencia Ativa GSC (kW) | 19.5 | 23 | 8.2 | 22 | 17.7 | 21.6 | 16.5 | 16.5 | 22.8 | 22.7 | 21.7 | 12.7 | 12.7 |
| Tempo (s) | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 | 42 | 44 | 46 | 48 | 50 |
| Vento (m/s) | 9 | 4 | 4 | 9 | 9 | 11 | 11 | 7 | 18 | 14 | 12 | 12 | 12 |
| Potencia Ativa MSC (kW) | 21 | 0.4 | 0.4 | 21 | 21 | 24.8 | 24.8 | 13.5 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Potencia Ativa GSC (kW) | 19.5 | -2 | -2 | 19.5 | 19.5 | 22.8 | 22.8 | 12.8 | 19 | 22.5 | 23 | 23 | 23 |

A figura 4.10 mostra a tensão RMS no elo DC entre o conversor MSC e o inversor GSC durante os 50 segundos da simulação. Pode-se observar pequenos picos durante as transições de vento cada 2 segundos. No entanto, as variações não passam de 2.4 % dos 620 VCC estabelecidos como referência para verificar o funcionamento correto do controle de tensão.

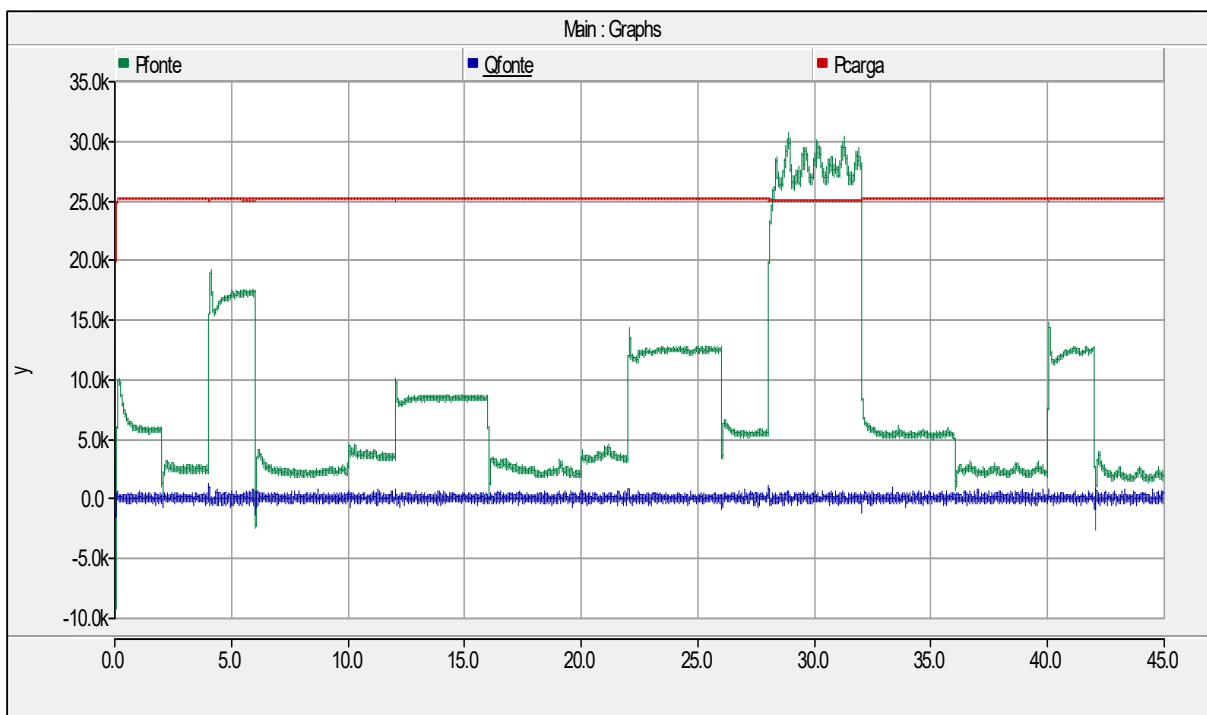
Figura 4.10 – Tensão no elo DC com referência 620 VDC sem ESS.



4.5.1 Carga de 1 pu

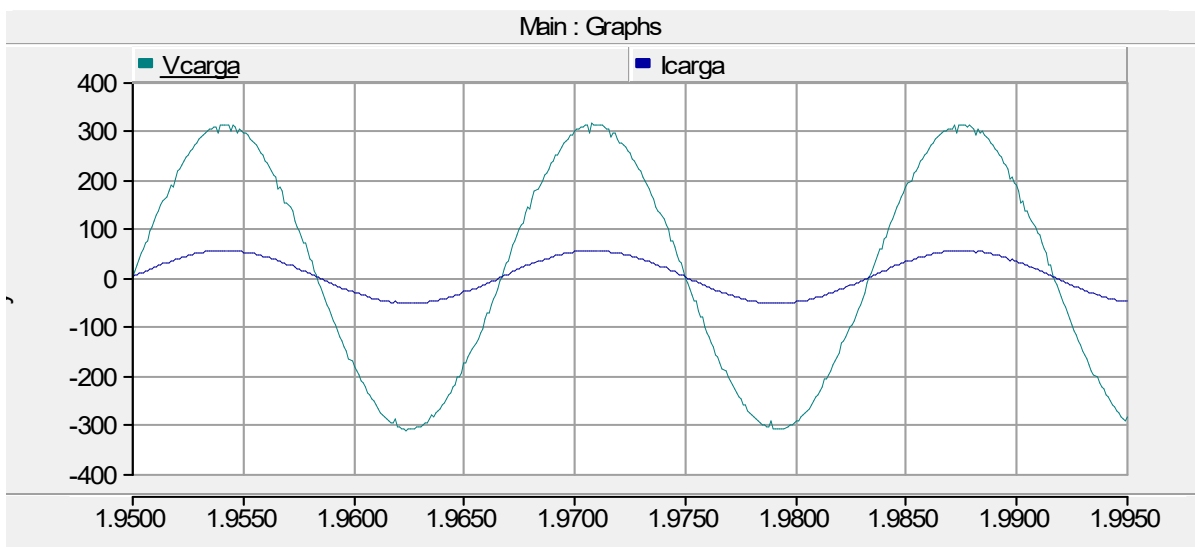
Com esta primeira simulação foi colocada uma carga para 1 pu na barra da rede. A potência do aerogerador não será suficiente para alimentar a carga na barra da rede. Porém, esta potência faltante é suprida por meio da rede, como é mostrado na figura 4.11. A potência na carga não sofre grandes variações, mas a rede fornece níveis de potência faltantes do aerogerador de acordo às variações do vento na sua turbina. A rede não é afetada com a potência recebida do aerogerador devido a que é considerada uma barra infinita e o conteúdo harmônico inserido à rede é baixo.

Figura 4.11 – Potência ativa na carga 1 pu (vermelho), potência ativa fornecida pela rede (verde) e potência reativa na rede (azul).



Com a curva de potência obtida na carga com poucas variações na figura 4.11, pode-se observar na figura 4.12 que os níveis de tensão e corrente tomadas de uma fase na carga apresentam pequenas oscilações produto do chaveamento, mas apresentam uma forma quase senoidal para tensão de 311 V, pico, e para corrente 53,6 A, pico.

Figura 4.12 – Tensão e corrente (fase a) na carga para 1 pu sem ESS.

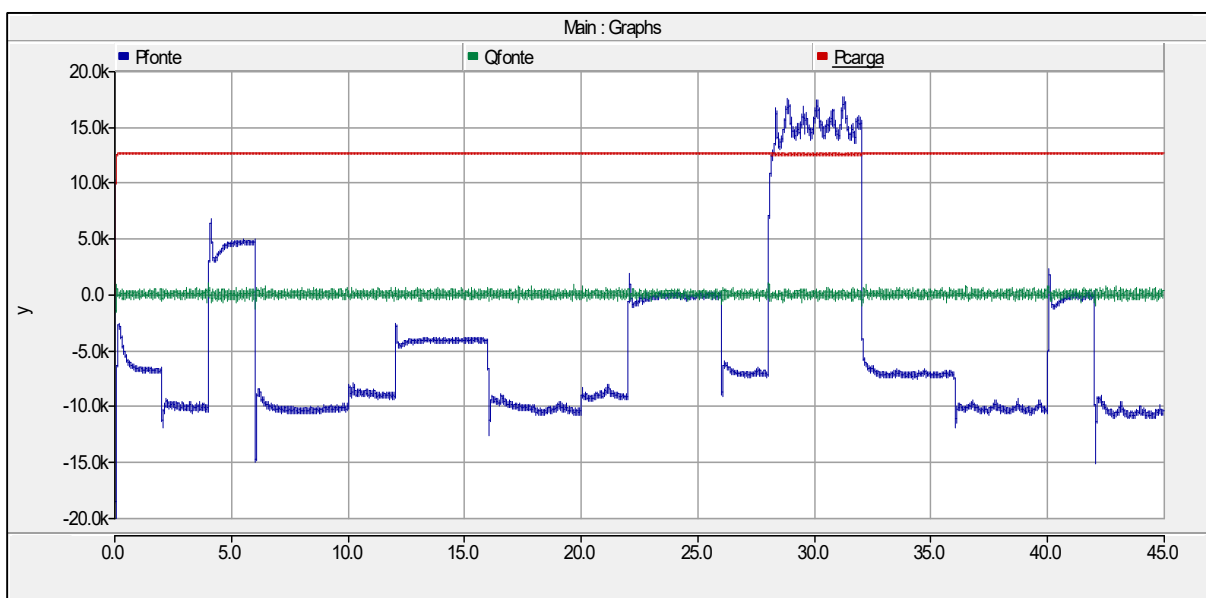


4.5.2 Carga de 0,5 pu

Para a segunda simulação foi colocada uma carga de 0,5 pu na barra da rede que representa 12,5 quilowatts. Quando a potência do aerogerador não é suficiente para alimentar a carga na barra da rede, esta potência faltante é suprida por meio da rede, como é mostrado na figura 4.13. A potência na carga não sofre grandes variações, mas a rede fornece níveis de potência faltantes do aerogerador de acordo às variações do vento na sua turbina.

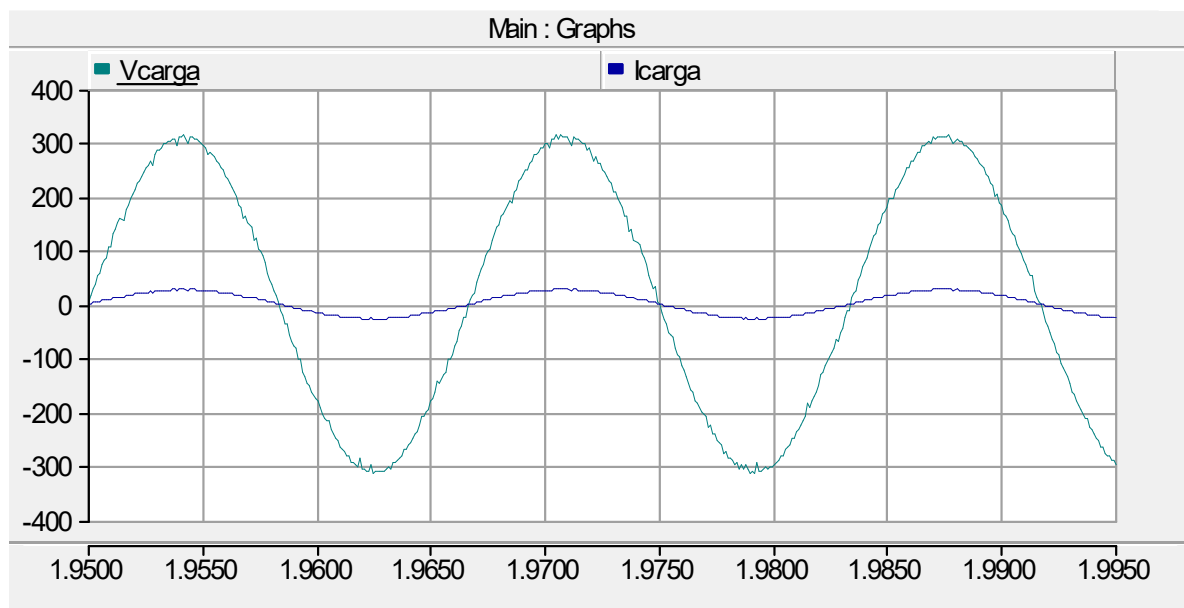
Com 0,5 pu também se tem o caso que a energia elétrica fornecida pelo aerogerador é maior que a requerida. Neste caso a potência será enviada à rede, e é apresentado na figura 4.13 como potência negativa. A rede não é afetada com a potência recebida do aerogerador devido a que é considerada uma barra infinita e o conteúdo harmônico inserido à rede é baixo.

Figura 4.13 – Potência ativa na carga 0.5 pu (vermelho), potência reativa na carga (ciano), potência ativa da rede (azul) e potência reativa da rede (verde) sem ESS.



Para uma carga de 0,5 pu o nível de potência também teve poucas variações e os valores de tensão 311 V, pico e corrente 27 A pico, também apresentaram formas quase senoidais. Isto é apresentado na figura 4.14 com oscilações pequenas devido ao chaveamento no inversor GSC.

Figura 4.14 – Tensão e corrente (fase a) na carga para 0,5 pu sem ESS.



4.6 Comentários

Verificou-se com os resultados de simulação deste capítulo que a modelagem do sistema foi feita de forma adequada. Os ganhos calculados atuaram da forma esperada, levando a resultados que confirmam que a plataforma de simulação elaborada em PSCAD responde de forma adequada e atende aos estudos que estão sendo realizados. As variações de potência obtidas vão de acordo ao vento presente nas pás da turbina, sendo variável e imprevisível.

Capítulo 5: Sistema proposto com o armazenamento de energia

Para a realização dos testes com o sistema de armazenamento de energia ligado ao sistema do aerogerador, deve-se dimensionar o conversor a ser ligado na bateria e a densidade que terá a bateria para conseguir observar resultados positivos nas simulações do PSCAD. Por isto, neste capítulo se apresentarão os cálculos pertinentes para dimensionar a bateria e o conversor, para logo realizar as simulações completas e compará-las com as simulações obtidas no sistema sem o ESS do capítulo anterior.

5.1 Bateria

O banco de baterias a colocar no elo CC é modelado como proposto no capítulo 3, para um circuito RC serie com as equações (3.46) e (3.47). Cada bateria é controlada para chegar a uma valor nominal de 48 volts com uma faixa de carga até 55 volts e descarga de 20 volts. Também limita a sua corrente a 300 amperes, que representa um 10% do valor nominal da sua capacidade 3000 Amperes por hora e um valor de resistência serie ESR habitual em baterias de 0,03 ohms.

Figura 5.1 –Circuito equivalente da bateria modelado no PSCAD.



5.2 Conversor CC-CC

Para o conversor CC-CC é considerado um bidirecional Buck/Boost, que é o conversor mais comum nesta configuração. Este conversor usa um indutor de 0,17mH calculado segundo a equação (3.47), e um sinal PWM estabelecido para 10 kHz. O conversor e seu controle são apresentados nas figuras 5.2 e 5.3 com um sinal de habilitação nos transistores para manter a carga e descarga dentro dos limites.

Como função *buck* o conversor injeta a partir do barramento CC uma corrente média de valor apropriado na bateria para carregá-la, controlando o liga/desliga da chave conectada ao positivo do elo CC, enquanto a chave ligada ao terra do elo CC é mantida inativa. Como função *boost* a corrente é extraída da bateria e injetada no elo CC, através do controle do

liga/desliga da chave conectada ao terra, enquanto a chave ligada ao positivo do elo CC é mantida inativa.

O controle, mostrado na figura 5.3, tem uma malha interna, de corrente, e uma de potência, externa, para controlar a energia que entra e sai da bateria com um valor de referência ajustável de potência

Figura 5.2 – Conversor CC-CC com indutor 0.17mH.

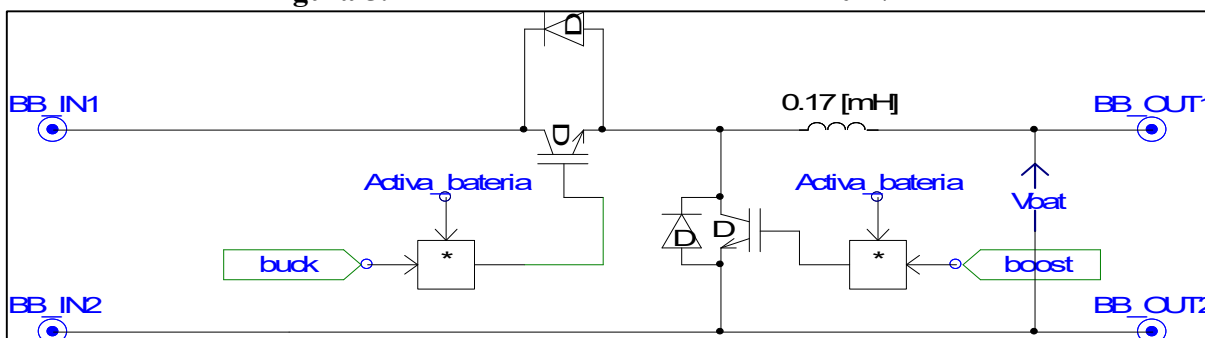
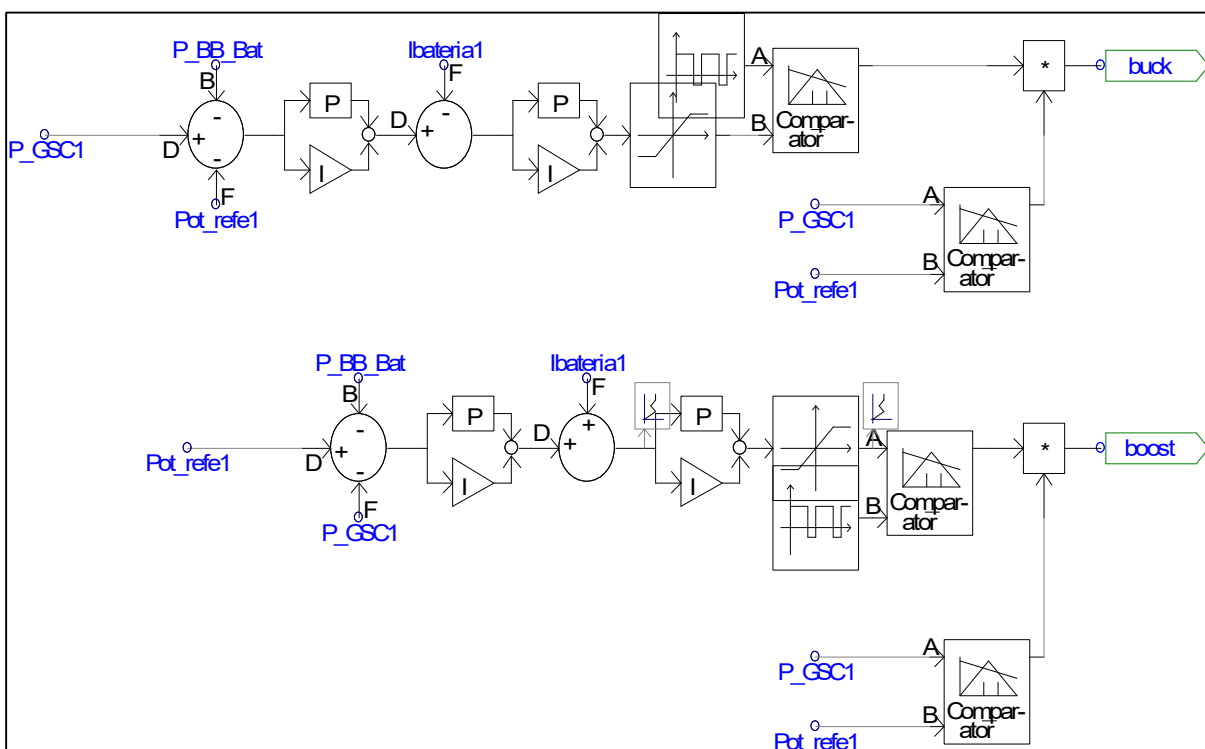
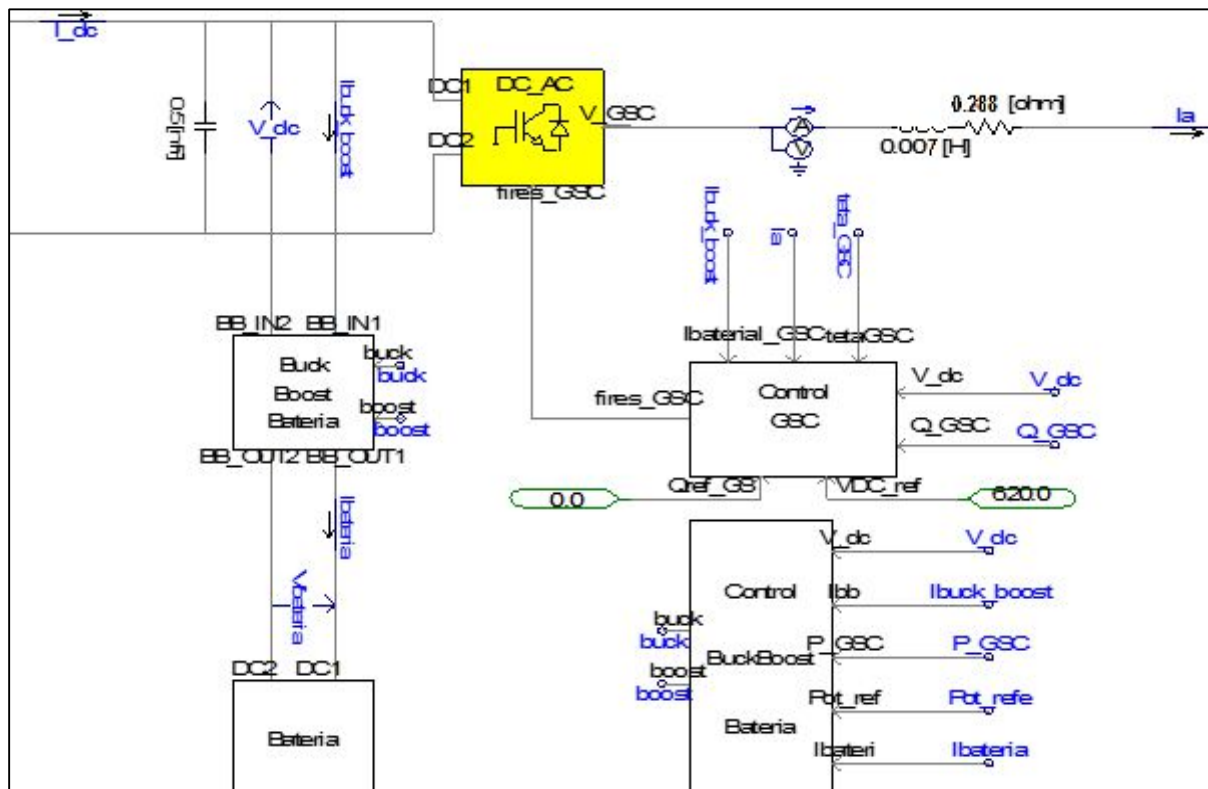


Figura 5.3 – Controle do conversor CC_CC para função Buck e boost.



A figura 5.4 mostra o sistema completo em blocos já com o ESS ligado no elo CC por meio do conversor bidirecional e com o bloco de controle que recebe a corrente que entra e sai da bateria para realizar os disparos.

Figura 5.4 –ESS com conversor CC_CC e controle ligados ao aerogerador.



5.3 Resultados obtidos

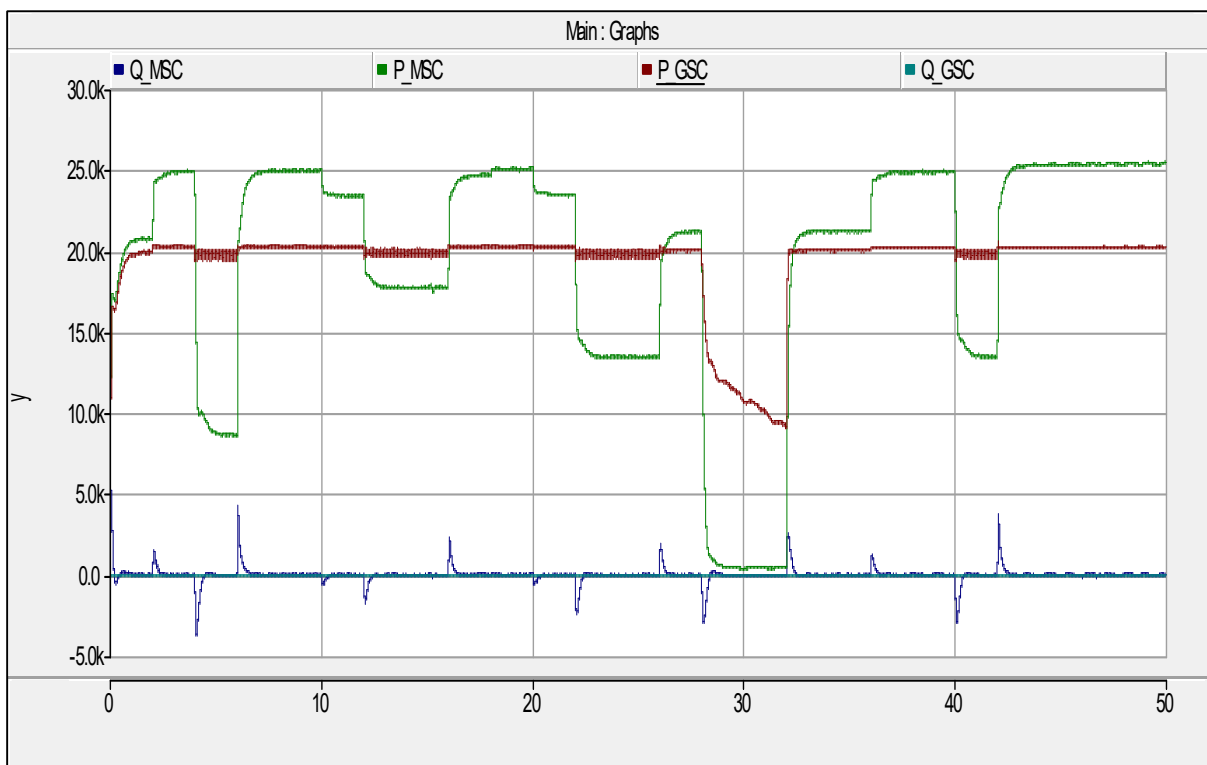
Como foi feito no capítulo 4, a carga será atribuída para valores de (1 pu) e (0,5 pu) para variações de vento em cada momento para uma simulação de 50 segundos com o aerogerador ligado à rede para conseguir observar o comportamento em geral do sistema.

Para as simulações com o ESS é estabelecido o mesmo padrão de vento variável cada 2 segundos como no capítulo 4 para observar as principais diferenças destas duas configurações, com e sem o ESS.

Na figura 5.5, pode-se observar claramente o primeiro resultado com o sistema de armazenamento ao colocar como referência de potência 20 quilowatts na saída. A potência fornecida à rede (vermelho) desde o gerador tem um fluxo quase constante durante os 50 segundos de simulação, incluso em variações grandes de vento, onde a potência de entrada MSC (verde) sofre grandes variações e a potência reativa no gerador MSC (azul) apresenta pequenos bicos devido às mudanças de potência provocadas pela variação de vento a cada 2 segundos. A potência faltante é fornecida pelo banco de baterias ligado no elo CC. Aos 28

segundos da simulação a potência injetada na rede reduz-se de forma significativa. Isto acontece devido ao vento na turbina cair para 4 metros por segundo, levando a potência no gerador quase a zero. Devido à variação ocorrida no vento de 22s a 26s, a bateria estava a meia-carga, e não consegue fornecer toda a potência indicada pela potência de referência.

Figura 5.5 –Potências ativas MSC (verde) e GSC (vermelho). Potências reativas MSC (azul) e GSC (ciano) com ESS.

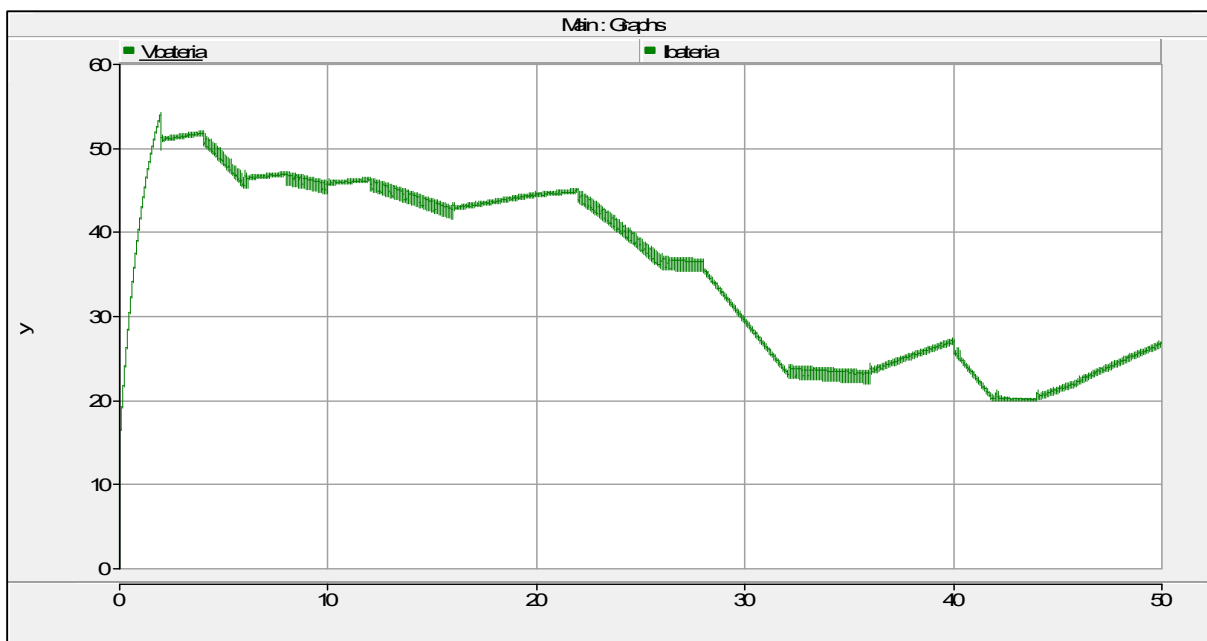


A figura 5.6 comprova esta explicação, pois mostra o nível de tensão da bateria durante os 50s de simulação. Sempre que a tensão sobe a bateria está sendo carregada, e quando desce a bateria está fornecendo potência ao sistema.

Outro caso pode ser visto aos 40 segundos da simulação, com 18 quilowatts e logo aos 42 segundos com 19 quilowatts na saída devido a que a bateria foi descarregada até o limite de tensão mínimo estabelecido.

Seguindo a figura 5.6 do nível de tensão CC na bateria (verde), observamos que aos 42 segundos a bateria chega aos 20 V estabelecidos como tensão mínima de descarregamento provocando que o conversor CC-CC pare de funcionar até obter um novo carregamento. Isto acontece aos 44 segundos, com um vento de 14 metros por segundo na turbina e 24,5 quilowatts de potência de entrada MSC, acima dos 20 quilowatts de referência, provocando o carregamento do banco de baterias

Figura 5.6 – Tensão na bateria durante a simulação.



A tabela 5.1 apresenta os valores de potências ativas obtidos durante a simulação para MSC e GSC.

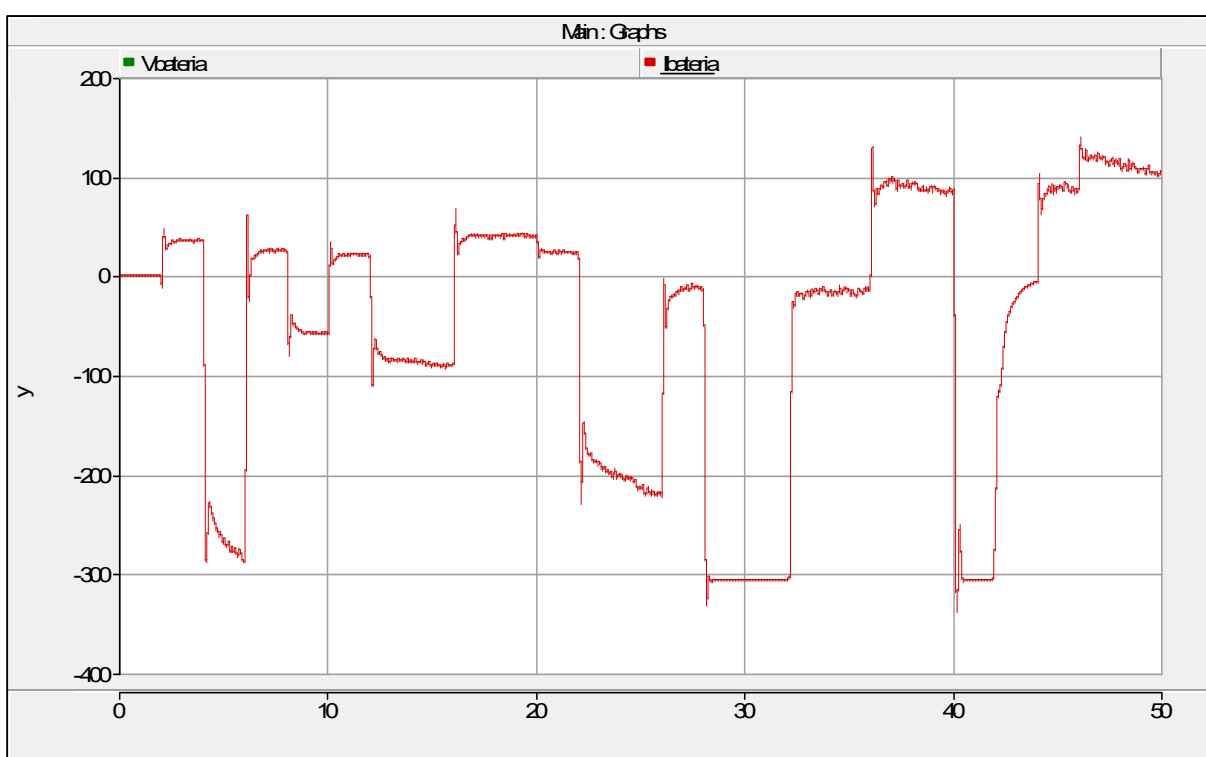
Tabela 5.1 – Valores obtidos de Potências ativas MSC e GSC com ESS.

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Tempo (s) | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
| Vento (m/s) | 9 | 12 | 6 | 14 | 20 | 10 | 8 | 8 | 11 | 13 | 10 | 7 | 7 |
| Potencia Ativa MSC (KW) | 21 | 25 | 8.7 | 25 | 25 | 23.4 | 17.7 | 17.7 | 24.8 | 25 | 23.5 | 13.5 | 13.5 |
| Potencia Ativa GSC (KW) | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Tempo (s) | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 | 42 | 44 | 46 | 48 | 50 |
| Vento (m/s) | 9 | 4 | 4 | 9 | 9 | 11 | 11 | 7 | 18 | 14 | 12 | 12 | 12 |
| Potencia Ativa MSC (KW) | 21 | 0.4 | 0.4 | 21 | 21 | 24.8 | 24.8 | 13.5 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Potencia Ativa GSC (KW) | 20 | 9 | 7 | 20 | 20 | 20 | 20 | 18 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 |

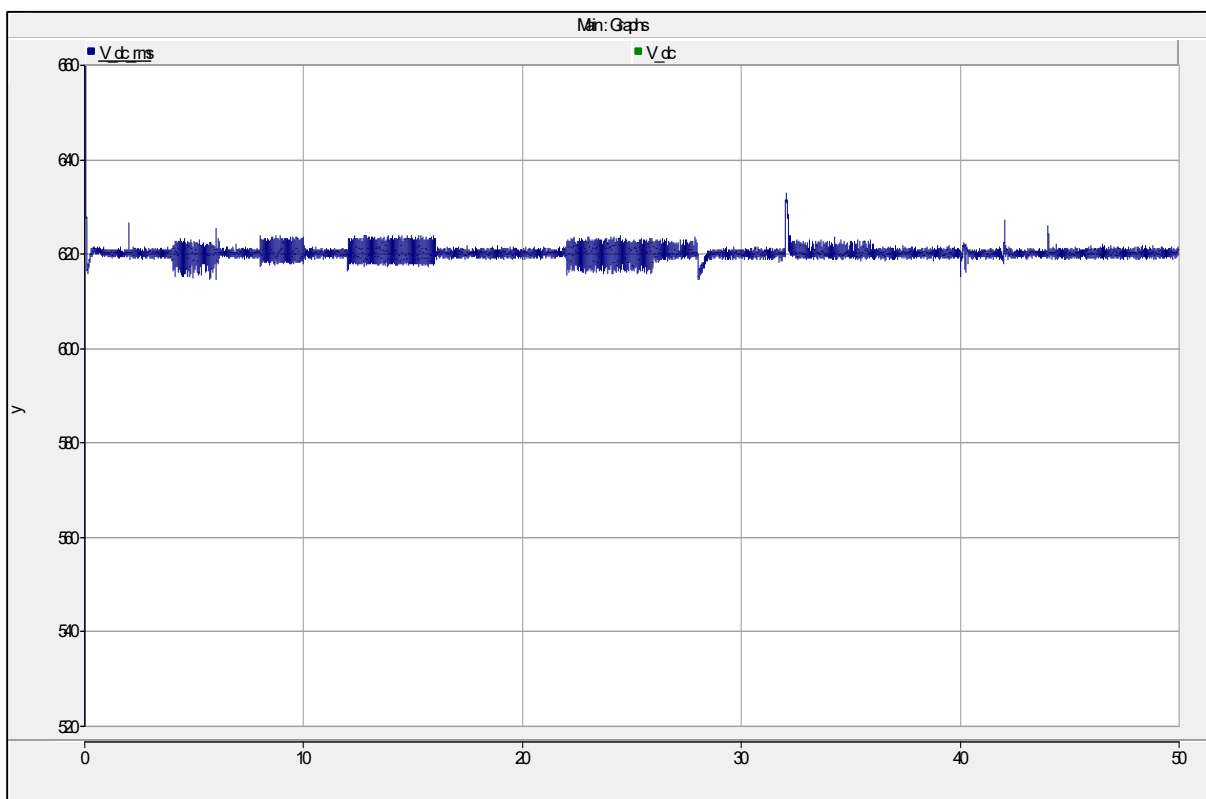
A figura 5.7 apresenta o comportamento da corrente (vermelho) que entra e sai da bateria, com o limite fixado de 300 amperes. Quando a corrente é positiva, significa que a bateria está sendo carregada pelo conversor CC-CC e, quando a corrente é negativa, significa que o banco de baterias está fornecendo potência ao elo CC por meio do conversor.

Aos 42 segundos da simulação, temos que a corrente negativa tende a chegar a zero devido ao descarregamento da bateria analisado da figura 5.6 e tabela 5.1. Mas, aos 44 segundos temos novamente um carregamento representado com corrente positiva na figura 5.7.

Figura 5.7 – Corrente na bateria durante a simulação.



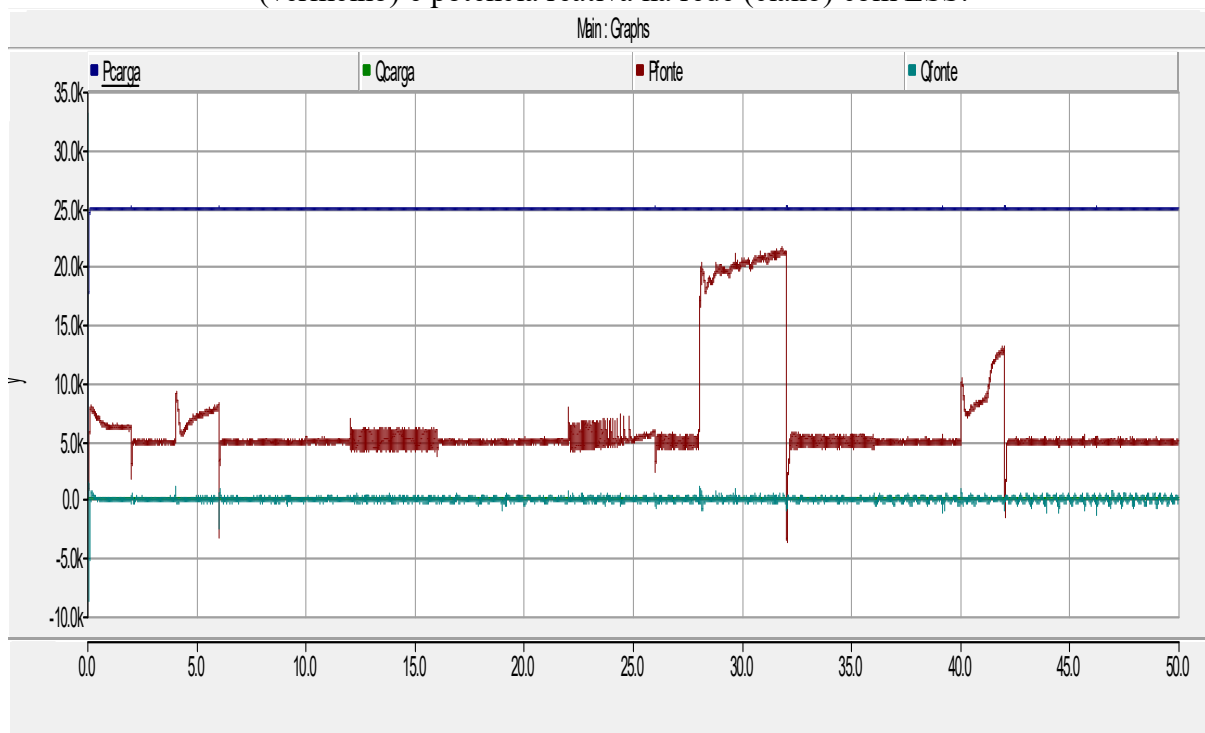
A tensão no elo CC da figura 5.8 (azul) apresenta pequenos picos durante as transições de potência como foi no caso das simulações sem o sistema de armazenamento mas agora também apresenta pequenas perturbações durante os descarregamentos da bateria de até 30 VCC. No entanto representa só um 4.8% da tensão que se mantém dentro dos limites para este tipo de aplicações.

Figura 5.8 –Tensão no elo CC com ESS.

5.4.1 Carga de 1 pu

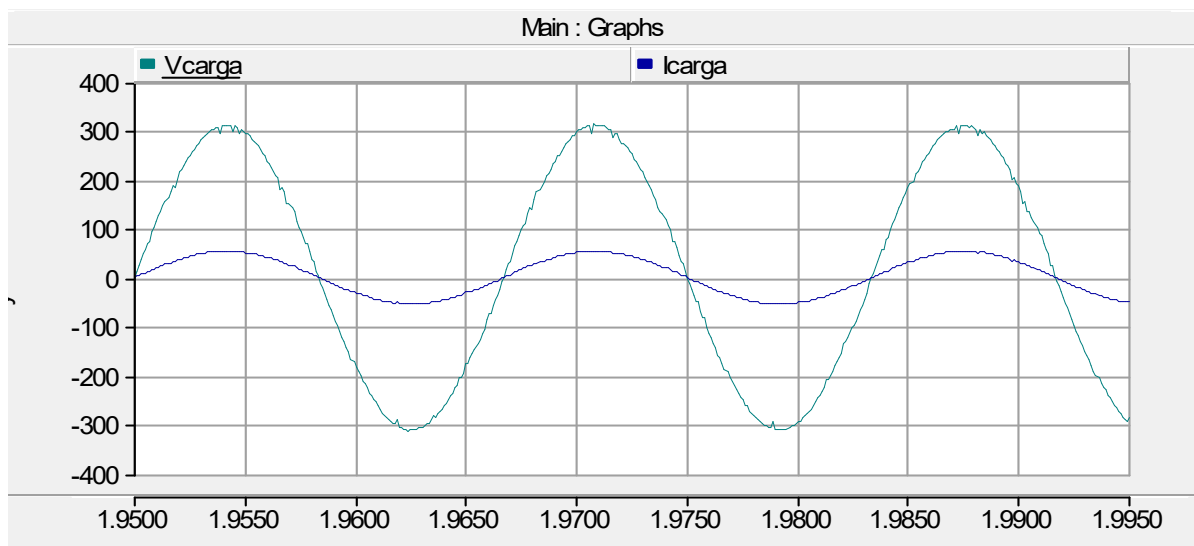
Com a primeira simulação foi colocada uma carga para 1 pu na barra da rede que representa 25 quilowatts. A potência do aerogerador ajustada a 20 quilowatts não será suficiente para alimentar a carga na barra da rede. Porém, esta potência faltante é suprida por meio da bateria e a rede, como é mostrado na figura 5.9. A potência na carga (azul) não sofre grandes variações, mas a rede (vermelho) fornece níveis de potência faltantes de 5 quilowatts até os 28 segundos quando o vento cai a 4 metros por segundo e a potência da bateria não consegue suprir a potência faltante no aerogerador. Então, a rede fornece a potência da carga nesse período de tempo, até o aerogerador e o banco de baterias se recuperarem.

Figura 5.9 – Potência ativa na carga 1 pu (azul), potência ativa fornecida pela rede (vermelho) e potência reativa na rede (ciano) com ESS.



Com a curva de potência obtida na carga com poucas variações (figura 5.9), pode-se observar na figura 5.10 que os níveis de tensão e corrente tomadas de uma fase na carga só apresentam pequenas oscilações produto do chaveamento, mas apresentam uma forma essencialmente senoidal para tensão de 311 V e para corrente 53,6 A.

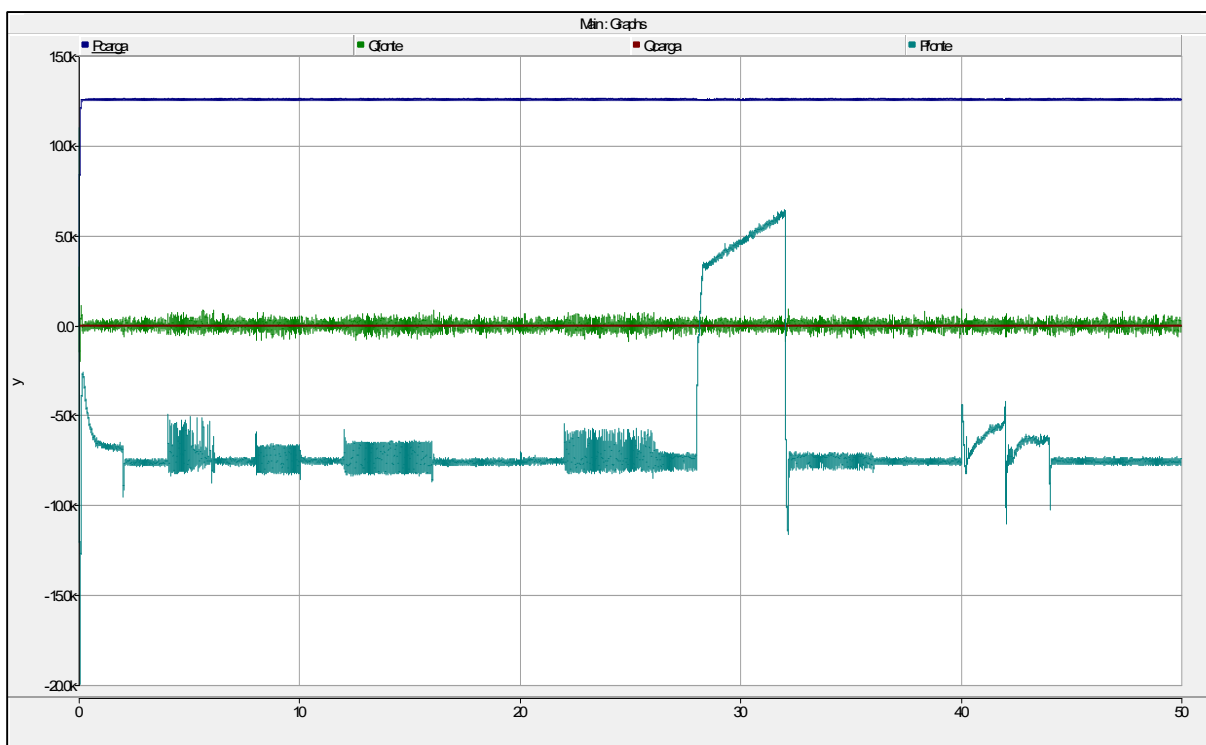
Figura 5.10 – Tensão e corrente (fase a) na carga para 1 pu com ESS.



5.4.2 Carga de 0.5 pu

Para a segunda simulação, apresentada na figura 5.11, foi colocada uma carga de 0,5 pu na barra da rede, o que representa 12,5 quilowatts. Quando a potência do aerogerador não é suficiente para alimentar a carga na barra da rede, esta potência faltante é suprida por meio do banco de baterias com a energia que foi armazenada quando a potência do MSC estava acima da referência de 20 quilowatts.

Figura 5.11 – Potência ativa na carga 0.5 pu (azul), potência ativa fornecida pela rede (ciano) e potência reativa na rede (verde) com ESS.

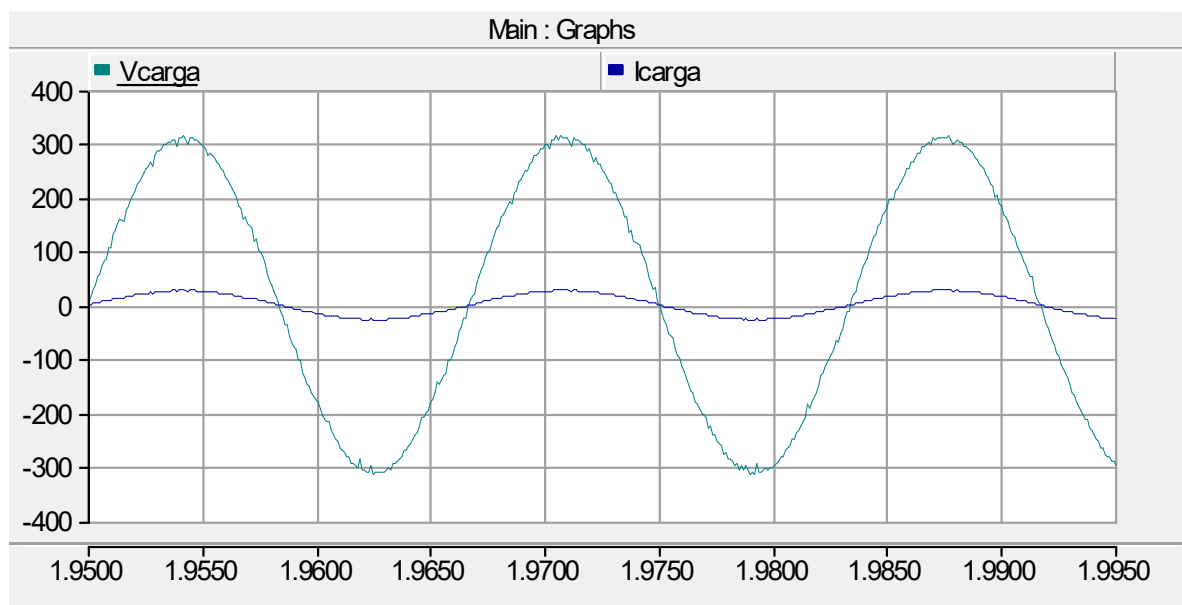


Com 0,5 pu também temos o caso que a energia elétrica fornecida pelo aerogerador é maior que a requisitada. A potência na carga (azul) não sofre grandes variações, e a rede (ciano) fornece 7,5 quilowatts de potência excedentes dos 20 quilowatts do aerogerador e bateria estabelecidos na referência. Isto é visualizado na figura como potência negativa.

Pode-se observar aos 28 segundos de simulação que a rede fornece potência à carga devido a que a potência do aerogerador e baterias não é suficiente para alimentar a carga com vento de 4 metros por segundo e potência do gerador quase zero. A rede não é afetada com a potência recebida do aerogerador devido a que é considerada uma barra infinita.

Para uma carga de 0,5 pu o nível de potência também teve poucas variações e os valores de tensão 311 V e corrente 27 A também apresentaram formas quase senoidais. Isto é apresentado na figura 4.14 com oscilações pequenas devido ao chaveamento no inversor GSC.

Figura 5.12 – Tensão e corrente (fase a) na carga para 0.5 pu com ESS.



5.4.3 Ilhamento

Simulou-se também uma condição de falta da rede (ilhamento). Para esta simulação foi considerado que um supervisor nos informa que há uma condição de ilhamento. Considera-se também que a informação tarda meio período de rede a ser processada, quando então o controle inibe a geração de ângulo pelo PLL do esquema e passa a fazê-lo de forma autônoma com base em uma frequência de 60Hz. A ausência da rede ocorre de 5s a 5,2s (intervalo de 200ms).

A figura 5.13 mostra a tensão e corrente na carga durante os 200ms de ausência da rede, para carga de 1 pu e fp unitário. A figura 5.14 mostra a potência fornecida à carga, e a figura 5.15 o ângulo de referência do eixo d do GSC. Visualiza-se que a qualidade da energia fornecida deteriora-se com a presença de ruído no sinal, mas consegue manter frequência e valores razoáveis de tensão.

Figura 5.13 - Tensão e corrente na carga durante os 200ms de ausência da rede.

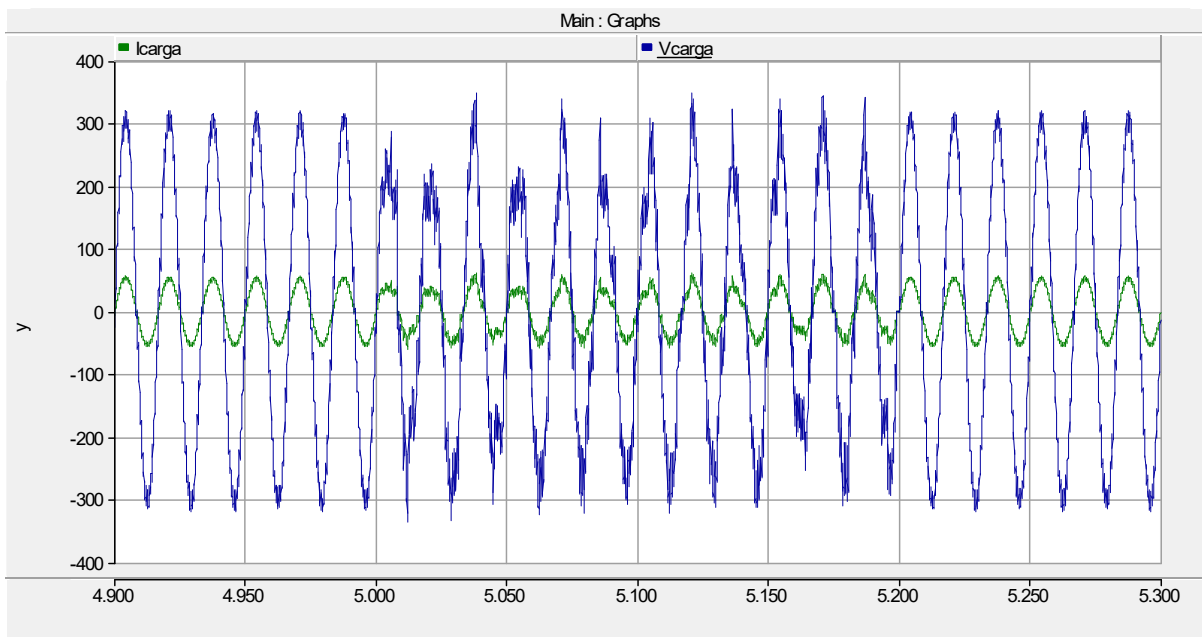


Figura 5.14 - Potência fornecida à carga.

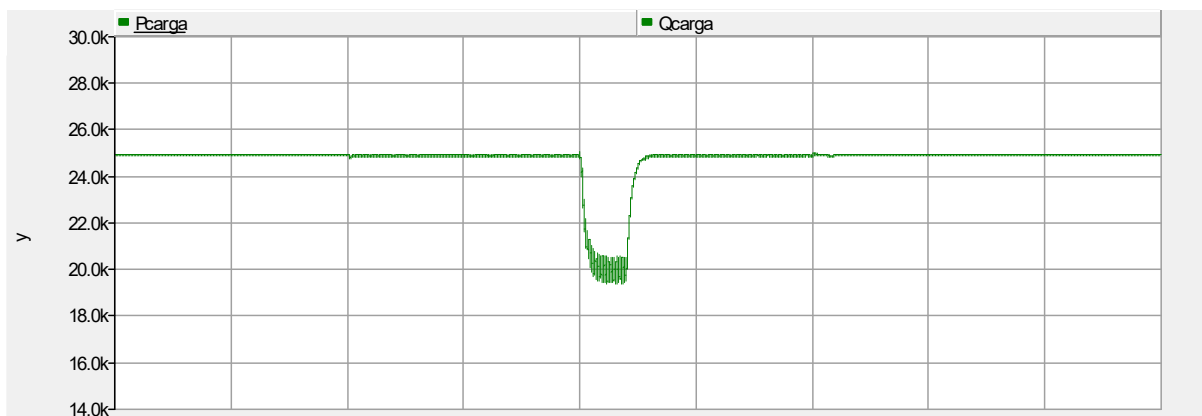
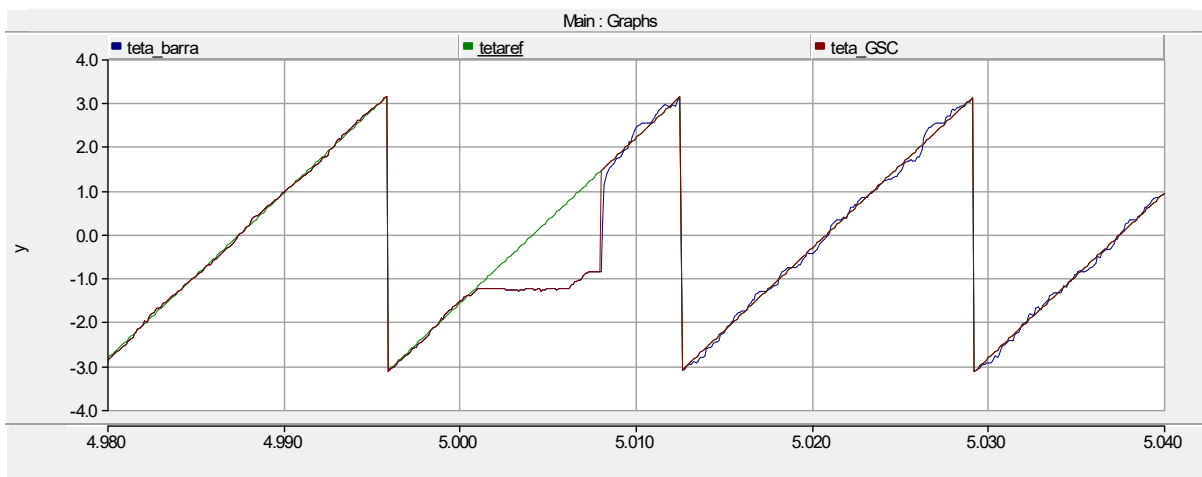
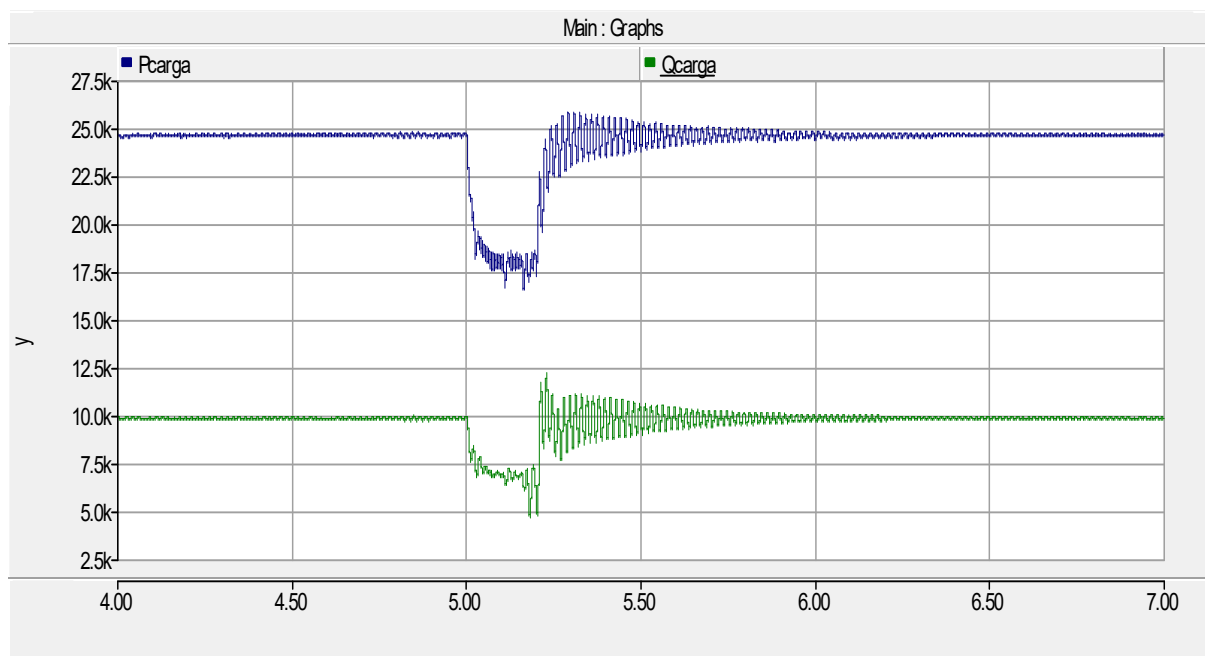


Figura 5.15 - Ângulo de referência do eixo d do GSC.



A figura 5.16 mostra as potências ativa e reativa fornecidas à carga com para $\text{fp } 0,92$ ($P=25\text{kW}$, $Q=10\text{kvar}$).

Figura 5.16 - Potências ativa e reativa fornecidas à carga com para $\text{fp } 0,92$.



5.5 Considerações finais

Para este capítulo foi ligada a bateria no elo CC por meio de um conversor CC-CC e analisado o comportamento do aerogerador e da bateria durante variações de vento, tentando manter o fluxo de potência constante durante todo o tempo. Considerou-se cargas de 1pu e 0,5 pu.

Os resultados mostram que o suporte de potência assegurado pelas baterias é importante na manutenção do nível de potência injetada pela GD à rede. Verifica-se que a abordagem utilizada de controle do fluxo de potência entre gerador-elô CC, elô CC-rede e elô CC-baterias opera satisfatoriamente.

O teste em situação ilhada, com filosofia simples de manutenção da alimentação pela geração eólica e baterias, possibilitou a continuidade de fornecimento de energia à carga, ainda que em condições não tão boas de qualidade.

Capítulo 6: Conclusões

6.1 Conclusões

Neste trabalho foi realizada a modelagem de um aerogerador de acordo a um estudo feito nessa área sobre tipos de aerogeradores e configurações, para chegar a um sistema com entrada de vento na turbina, gerador síncrono de ímã permanente e potência elétrica na saída que é ligada a uma rede elétrica por meio de um conversor e inversor, configurados como B2B (*back-to-back*). Isto, com controle em potência de entrada no conversor e controle da tensão CC no inversor. Foi também modelado um sistema de armazenamento de energia. Como sistema mais versátil foi escolhido um banco de baterias com conversor CC-CC para ser ligado no elo CC, com o objetivo de compensar a potência faltante que o aerogerador não consiga fornecer quando não exista suficiente vento na turbina. Reciprocamente, pode armazenar a potência excedente. Com isto, é possível obter um fluxo de potência quase constante para a rede.

A modelagem da turbina desenvolvida no PSCAD apresentou respostas favoráveis de acordo com as equações de Heier, sendo um modelo atual para representar o comportamento de um aerogerador.

O GSIP permite o funcionamento a fluxo constante por meio do ímã permanente e velocidades baixas por meio da quantidade de polos para eliminar a necessidade de conversores mecânicos. No entanto, o GSIP também tem a desvantagem que com velocidade variável aparece a necessidade de um conversor de frequência de potência nominal do gerador. Usa-se o conversor back to back estabelecido com o controle de potência (MSC) e tensão no elo DC (GSC) permite manter a qualidade da energia entregue na saída durante as transições de potência provocadas pelas variações do vento.

Existe uma grande quantidade de maneiras de armazenar energia segundo o tipo de energia e características de resposta, as quais podem ser aproveitados para tornar as fontes de energia renováveis mais eficientes. A bateria é o ESS mais usado para este tipo de sistema e foi escolhido para as simulações por se ajustar melhor aos requisitos em tempo de resposta, densidade de potência, eficiência e preço de mercado juntos, em comparação com outros sistemas. Com banco de baterias, o conversor CC-CC bidirecional buck/boost é o mais usado para ligar o banco no elo CC, pois permite carregar e descarregar a bateria com uma construção robusta. A capacidade do armazenamento de energia é importante, pois dependendo da aplicação, pode levar a que o sistema consiga funcionar de maneira autônoma

como um sistema de alimentação ininterrupta, usado para lugares onde não chega o serviço de rede elétrica ou para sistemas que não são ligados a redes fortes, pois as variações de potência no aerogerador poderiam desestabilizar a rede. Nesse caso, não depende de uma ligação com a rede, assim também poderia conseguir interagir com a rede de maneira híbrida, mas durante um processo de sincronização com a rede para seguir a sequência e um controle de carga.

A participação do ESS é grande devido a que o vento é variável o tempo todo. Isto quer dizer, que o tempo de vida da bateria é curto para esta aplicação. Para evitar que isto aconteça, normalmente é acoplado um supercapacitor em paralelo para minimizar as variações de curto tempo.

As simulações elaboradas em PSCAD mostraram que estão adequadas ao estudo proposto, e mais, podem ser empregadas em estudos adicionais apenas adicionando as tarefas desejadas. Verificou-se a importância do armazenamento de energia para manter o fluxo de potência à rede constante, e também, visualizou-se que podem ocorrer situações em que a energia armazenada é evacuada a valores que baixam dos limites aceitáveis de confiabilidade do sistema, indicando a necessidade de conhecimento do ciclo energético local para adequado dimensionamento do sistema.

Também se verificou que um sistema rudimentar de operação em condições de ilhamento garantiu a continuidade de fornecimento de potência à carga, ainda que em condições de qualidade inferior à anterior.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Alguns tópicos pertinentes ficam como sugestão para trabalhos futuros:

- Adicionar ao sistema um supercapacitor modelado e observar os resultados na participação da bateria durante transições de potência.
- Excursionar com o desligamento da rede por tempos curtos e extensos de até vários segundos, para análise de sobrevivência do sistema em condições de ilhamento;
- Desenvolvimento de uma bancada com GSIP para verificação experimental dos resultados e compará-los com os resultados obtidos nas simulações.
- Escolher e modelar outro sistema de armazenamento de energia para tempos maiores de até vários minutos que possa manter o fluxo de potência com base a um estudo detalhado.

- Avaliar o uso de filtros LCL na conexão do GSC à rede, em termos de complexidade e influência na qualidade da tensão na carga e tensão sob ilhamento.
- Desenvolver técnicas de operação em condições de ilhamento de forma a melhorar a qualidade da tensão fornecida.
- Estudar e ampliar técnicas de detecção de situações de ilhamento.

6.3 Produção Científica

Durante a realização deste trabalho, um artigo foi apresentado pelo mestrando em congresso científico internacional:

- Artigo: Energy storage systems for power oscillation damping in distributed generation based on wind turbines with PMSG, apresentado no Congresso internacional IEEE Chilecon 2015, ocorrido entre 28 e 30 de Outubro de 2015, em Santiago de Chile/ Chile.
- Citação: J. Barzola, D. L. Simonetti and J. F. Fardin, "Energy storage systems for power oscillation damping in distributed generation based on wind turbines with PMSG," 2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), Santiago, 2015, pp. 655-660. doi: 10.1109/Chilecon.2015.7404640

Referências Bibliográficas

- Ackermann, T. (2005). Wind power in power systems. Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005. John Wiley & Sons, Ltd.
- Bajracharya, C. (2008). Control of VSC-HVDC for Wind Turbines. Norwegian University of Science and Technology. MSC thesis, June 2008.
- Belfedhal, S., Berkouk, E. (2011). Modeling and Control of Wind Power Conversion System with a Flywheel Energy Storage System. International Journal of Renewable Energy Research, vol. 1, No 3, pp 43-52, 2011.
- Benelghali, S., Benbouzid, M., Charpentier, J., F. (2010). Comparison of PMSG and DFIG for Marine Current Turbine Applications. XIX International Conference on Electrical Machines. ICEM 2010, Rome.
- CEDRAT (2006). PSCAD: Power System Simulation. Wind turbine applications technical paper. January 2006.
- CRESESB (2008). Centro de referência para Energia Solar e eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia Eólica Princípios e Tecnologias. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 11 outubro 2015.
- Dahbi, A., Hachemi, M., Nait-Said, N., Nait-Said, M. (2014). Realization and control of a wind turbine connected to the grid by using PMSG. Energy conversion and management. Department of electrical engineering, Batna University. Algérie, 2014.
- Diaz, G., F. (2013). Contributions of Flywheel Systems in Wind Power Plants. PHD Thesis of Catalonia Institute for Energy Research. Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona-Spain, July 2013.
- Diaz, G., F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Villafavila-Robles, R., A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications (2012). Renewable and Sustainable Energy Reviews. Departamento de ingeniería eléctrica de la universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona-España, 2012.
- Dursun, B., Albayaci B. (2010). The Contribution of Wind-hydro pumped Storage Systems in Meeting Turkey's Electric Energy Demand. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Department of electrical engineering, Kirlareli University. Turkey, 2010.

- Gee, A., M., Robinson, F., Dunn, R. (2013). Analysis of Battery Lifetime Extension in a Small-Scale Wind-Energy System Using Supercapacitors. *IEEE transactions on Energy Conversion*, vol 28, No1. March, 2013. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Bath, UK.
- Heier, S. (2014). *Grid Integration of Wind Turbines*. John Wiley & Sons, Ltd. Kassel University, Kassel- Germany, 2014.
- Hossain, M., Hasan, M., A. (2015). Future research directions for the wind turbine generator system. *Renewable and sustainable energy reviews*. Department of electrical and computer engineering, University of Memphis. Memphis, USA, May 2015
- Lachguer, N., Tahar, M. (2011). Control strategy of Permanent Magnet Synchronous Generator for Stand Alone Wind Power Generation System. *Laboratory of electronics and instrumentation, Faculty of Science Semlalia, Cadi Ayyad University. Marrakesh, Morocco, 2011.*
- Li, X., Hu, C., Liu, C., Xu, D. (2008). Modeling and Control of Aggregated Super-Capacitor Energy Storage System for Wind Power Generation. *Department of Electrical Engineering, Zhejiang University. China, 2008.*
- Marquez, R. (2001). Viabilidade técnico-económica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro. *Dissertação de mestrado, Universidade federal do rio de janeiro. Programa de pos-graduação de engenharia, fevereiro 2001.*
- Mendis, N., Muttaqi, K., Perera, S. (2014). Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Insolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems. *IEEE Transactions on smart grid*, vol 5, No 2. March, 2014.
- Michalke, G. (2008). *Variable Speed Wind Turbines-Modelling, control, and Impact on Power Systems*. PHD thesis. Technische Universität Darmstadt. Department for Renewable Energies Institute of Electrical Power Systems. RISO National Laboratory. Darmstadt-Germany, 2008.
- Mohammed, A., B., Ahmed, M., A., Mona, A., B. (2015). Comparison between aggregation techniques for PMSG wind farm. *International conference on technologies and materials for renewable energy. Environment and sustainability, TMREES15.*

- Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (1995). Power electronics: converters, applications, and design. 2nd ed., John Willey & Sons, Inc.
- Monticelli, P., M. (2004). Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante. Dissertação de mestrado no programa de Pos-graduação de engenharia elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, MG-Brasil, 2004.
- Moreira, A., C. (2007). Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso. Tese de doutorado na escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. Brasil, 2007.
- Nielsen, K., Molinas, M. (2010). Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) in Power Systems with Renewable Energy Source. Department of Electric Power Engineering NTNU. Trondheim-Norway, 2010.
- Rashid, M. H., Eletrônica de potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações. Makron Books, 1999.
- Saadat, M., Li, P., Y. (2012). Modeling and Control of a Novel Compressed Air Energy Storage System for Offshore Wind Turbine. American control conference Fairmont Queen Elizabeth, Motreal, Canada. June, 2012.
- Slootweg, J., G., Polinder, H., Kling W. L. (2003). Representeing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations. IEEE Transactions on energy conversion, vol 18, No 4, december 2003.
- Subburaj, A., S., Harral, M., A., Bayne, S., Giesselmann, M. (2014). Analysis of Equivalent Circuit of the Battery Connected to the Grid. Electrical and computer engineering of Texas Tech University. Lubbock, Texas, 2014.
- Sun, H., Wang, J., Guo, S., Luo, X. (2010). Study on Energy Storage Hybrid Wind Power Generation Systems. Proceedings of the world Congress on Engineering, vol 2. London, Uk. July, 2010.
- Zhou, L., Tang, X., Qi, Z. (2014). Control method for flywheel array energy storage system in energy harvesting from electric railway. Institute of electrical engineering, Chinese Academy of sciences. Beijing-China, 2014.

- Zhou, L., Tang, W., Liu, W. (2014). Direct power control method for grid-connected flywheel array energy storage system. International conference on power system technology. Institute of electrical engineering, Chinese Academy of Sciences. Neijing-China,2014.
- Xu, G., Xu, L., Morrow, D., Chen, D. (2012). Coordinated DC voltage control of wind turbine with embedded energy storage system. IEEE transactions on energy conversion, vol 27, No 4. University of Belfast, UK. December, 2012.