

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIANA MARTINELLO

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO EM AMBIENTE
SIMULINK/MATLAB PARA SIMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2013

DIANA MARTINELLO

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO EM
AMBIENTE SIMULINK/MATLAB PARA SIMULAÇÃO DE UMA
TURBINA EÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Emerson G. Carati

PATO BRANCO

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO EM AMBIENTE SIMULINK/MATLAB PARA SIMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA**”, da acadêmica **Diana Martinello** foi considerado **APROVADO** de acordo com ata de defesa nº **27** de **2013**, a qual encontra-se na coordenação do curso de Engenharia Elétrica.

Fizeram parte da Banca os Professores

EMERSON GIOVANI CARATI (ORIENTADOR)

CESAR RAFAEL CLAURE TORRICO

JEAN MARC STEPHANE LAFAY

RAFAEL CARDOSO

DEDICATÓRIA

À minha família:

Alaides Martinello (Pai)

Neusa Aparecida R.C. Martinello (Mãe)

Vagner, Douglas e Renan Martinello (Irmãos)

AGRADECIMENTOS

À Deus. Pelo dom da vida, e ao amor com que tem me sustentado ao longo desta jornada.

À minha família. Pela compreensão dada nos dias de ausência e, por sempre me incentivar a prosseguir.

Ao corpo docente do curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco. Em especial ao Prof. Emerson G. Carati. Pelo apoio, dedicação e oportunidade dados, para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“O Senhor é meu pastor, nada me faltará.
Em verdes prados ele me faz repousar.
Conduz-me junto às águas refrescantes,
restaura as forças de minha alma. Pelos
caminhos retos ele me leva, por amor do seu
nome. Ainda que eu atravesse o vale escuro,
nada temerei, pois estais comigo.” (Salmo 22,
1-4a)

RESUMO

MARTINELLO, Diana. Estudo e Desenvolvimento de um Aplicativo em Ambiente *Simulink/Matlab* para Simulação de uma Turbina Eólica. 2013. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

Este trabalho aborda estudos referentes ao processo de conversão de energia em sistemas eólicos para geração de energia elétrica. Inicialmente, é apresentada uma análise de como na atualidade se dá o uso da energia eólica, no Brasil e no mundo, considerando que o uso da energia elétrica proveniente dos ventos vem crescendo a cada vez mais. A seguir, uma modelagem do sistema eólico é apresentada, desde a aerodinâmica da turbina ao gerador elétrico, incluindo análise mecânica do gerador. Tal modelagem é realizada com a finalidade de se desenvolver uma ferramenta de simulação para estes sistemas, utilizando o software Matlab/Simulink®. O objetivo desta ferramenta é simular as variáveis elétricas desenvolvidas no estator de um gerador síncrono a ímã permanente a partir de diferentes condições de velocidade de vento. Neste caso, o gerador empregado é um dos diferenciais deste trabalho, uma vez que em grande parte dos estudos se utilizam máquinas de indução. É apresentado ainda, um controlador que possui a finalidade de garantir ao sistema a extração da máxima potência do vento, sendo empregado de acordo com as características do sistema. Ainda, é incluído uma proposta de sistema de simulação do vento a partir de um motor de indução com acionamento por um inversor PWM, conectado ao eixo do gerador elétrico, de forma a desenvolver o torque e velocidade compatível com a velocidade do vento sobre uma turbina eólica. Realizada a implementação da ferramenta computacional, foram obtidos resultados para diferentes velocidades de vento e verificou-se que o coeficiente potência permaneceu praticamente constante, em torno de 45%. Este resultado mostra que o sistema de controle utilizado é capaz de converter o máximo de energia eólica em energia elétrica, em diferentes condições de vento. Ainda, a ferramenta permite que diversas grandezas sejam analisadas nestas condições, e podem ser utilizadas para o projeto de um sistema eólico real.

Palavras-chave: Energia Eólica, Turbina Eólica, Simulação, Gerador Síncrono a Ímã Permanente.

ABSTRACT

Martinello, Diana. Study and Development of an Application Ambience in Simulink / Matlab Simulation of a Wind Turbine. 2013. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

This work studies regarding the process of energy conversion systems for wind power generation. Initially, we present an analysis of how today takes the use of wind energy in Brazil and worldwide, considering that the use of electricity from the wind is growing every day. Next, a modeling of the wind system is presented, from the aerodynamics of the turbine to the electric generator, the generator including mechanical analysis. This modeling is performed in order to develop a simulation tool for these systems using the Matlab/Simulink®. The purpose of this tool is to simulate the electrical variables developed in the stator of a permanent magnet synchronous generator from the different conditions of wind speed. In this case, the generator employed is a differential of this work, since in most studies induction machines are used. It is still displayed, a controller which has the purpose of securing the system to extract the maximum power of the wind, being employed according to the system characteristics. Also, included is a proposed system for simulating the wind from an induction motor driven by a PWM inverter connected to the shaft of the electric generator in order to develop any torque and speed compatible with the speed of the wind turbine wind. Performed the implementation of computational tool, results were obtained for different wind speeds and it was found that the power coefficient remained almost constant around 45%. This result shows that the control system used is able to convert the maximum wind energy in electrical energy, with different wind conditions. Still, the tool allows that various magnitudes are analyzed under these conditions, and can be used for the design of a real wind system.

Keywords: Wind Power, Wind Turbine, Simulation, Permanent Magnet Synchronous Generator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais componentes de uma turbina eólica.	23
Figura 2.2 – Perfil de uma pá.	23
Figura 2.3 - Principais forças atuantes em uma pá da turbina eólica.	24
Figura 2.4 - Aerodinâmica de uma turbina eólica.	25
Figura 2.5 – Pot. mecânica na turb. eólica em função do controle de veld. no rotor.	26
Figura 2.6 - Etapa de conversão de energia em um sistema eólico.	28
Figura 2.7 - Coeficiente de Potência para vários ângulos de passo.	31
Figura 2.8 - Modelo mecânico de um gerador.	33
Figura 2.9 - Modelo mecânico simplificado de um aerogerador.	34
Figura 2.10 - Gerador Síncrono Trifásico com dois polos.	36
Figura 2.11 - Transformação de coordenadas abc em $dq0$	37
Figura 2.12 - Circuito elétrico em coordenadas $dq0$ para um PMSG.	39
Figura 3.1- Diagrama de blocos para o sistema.	41
Figura 3.2 - Regiões de Operação da Turbina.	42
Figura 3.3 - Malha de Controle para o sistema.	44
Figura 3.4 - Modl. para obtenção de pot. e torque da turbina eólica no Simulink®. ...	45
Figura 3.5 - Modelo do cálculo de potência da turbina eólica no Simulink®.	46
Figura 3.6 - Modelo para o cálculo do torque da turbina eólica no Simulink®.	46
Figura 3.7 - Determinação da velocidade angular no eixo da turbina eólica.	47
Figura 3.8 - Modelo elétrico da turbina eólica no Simulink®.	48
Figura 3.9 - Mod. para as correntes I_{ds}/I_{qs} no PMSG para turb. eólica Simulink®.	49
Figura 3.10 - Modelo do Controle de Potência elétrica no PMSG no Simulink®.	50
Figura 3.11 - Modelo para Potência elétrica no PMSG no Simulink®.	50
Figura 3.12 - Modelo para o torque elétrico resultante no PMSG.	51
Figura 3.13 - Diagr. de blocos do modelo da turb. implement. Matlab/Simulink®.	52
Figura 4.1 - Perfil de vento e C_p simulados.	53
Figura 4.2 – Variação da velocidade ang. Mecânica no eixo da turbina.	54
Figura 4.3 - Potência e Torque mecânico simulado.	55
Figura 4.4 - Corrente e tensão simuladas no estator do PMSG.	56
Figura 4.5 - Superposição das correntes e torques do modelo simulado.	57
Figura 4.6 – Diagrama de sistema em bancada para emulação de sistema eólico. ...	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais capacidades de energia eólica instalada no mundo 2010/2011 (MW).	17
Tabela 2 - Preço comercializado para a geração eólica em leilões nacionais.	19
Tabela 3 - Custo de instalação e geração das Principais Fontes de Energia Renováveis.....	20
Tabela 4 - Turbina eólica simulada.	27
Tabela 5 - Comparação entre as máquinas PMSG e DFIG	35

LISTA DE SIGLAS

DFIG	<i>Double-Fed Induction Generator</i> – Gerador de Indução Duplamente Alimentado
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
LER	Leilão de Reserva
LFA	Leilão de Fontes Alternativas
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> – Gerador Síncrono a Imã Permanente
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> – Ponto de Máxima Extração de Potência
PI	Proporcional Integral
TSR	<i>Tip Speed Rate</i> - Taxa de Variação de Velocidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. JUSTIFICATIVA.....	13
1.2. OBJETIVO GERAL.....	14
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. ENERGIA EÓLICA	16
2.1.1. Introdução à energia eólica.....	16
2.1.2. Turbinas eólicas.....	20
2.1.3. Conversão de energia.....	27
2.2. SIMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA	32
2.2.1. Modelagem mecânica de uma turbina eólica.....	32
2.2.2. Gerador síncrono a imã permanente	34
2.2.3. Modelo elétrico do PMSG	36
3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA TURBINA EÓLICA.....	41
3.1 Sistema de controle para a planta eólica.....	42
3.1.1 Controle de Velocidade.....	43
3.2 MODELOS DINÂMICOS DO AEROGERADOR	45
3.2.1 Modelo aerodinâmico para turbina eólica	45
3.2.2 Modelo mecânico.....	47
3.2.3 Modelo elétrico para o PMSG	48
4. RESULTADOS SIMULADOS OBTIDOS	53
4.1 Proposta de uma bancada de emulação para uma turbina eólica	58
5. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS	61
6. REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é sem dúvida uma das grandes responsáveis pelos avanços tecnológicos da sociedade moderna, equipamentos eletroeletrônicos, como o computador, televisão, aparelhos de som, aquecedores, e diversos outros equipamentos só funcionam graças à energia elétrica. Ante a face das grandes evoluções tecnológicas se tem a preocupação com o consumo de energia elétrica que, com proporcional crescimento alcançou em todo o mundo índices elevados. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu 3,6% em 2011, para 430,1 mil gigawatts-hora (GWh). Para atender ao aumento da demanda de energia, o acionamento de diversas usinas termelétricas a gás, que são altamente poluentes passa a entrar em operação, o que acarreta maiores problemas ambientais, com exceção da utilização do gás natural como insumo energético, que apresenta baixa presença de contaminantes se comparada com outras fontes fósseis de energia.

Para suprir a crescente demanda de energia elétrica, aliada à necessidade de minimizar problemas ambientais como o aquecimento global, iniciativas na busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias que visam à produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis, oriundas do vento, da água e do sol, tiveram uma grande evolução nos últimos anos.

As fontes renováveis de energia têm como principais vantagens a não emissão de gases poluentes e a disponibilidade na natureza, com grande potencial que pode ser convertido em eletricidade. Dentre as fontes alternativas de geração de energia, a geração de energia elétrica a partir dos ventos vem se tornando cada vez mais comum em todo o mundo, devido aos incentivos governamentais e aos avanços tecnológicos. No Brasil, programas como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), têm estimulado o crescimento em investimentos de turbinas eólicas, com objetivos de diversificar a matriz energética nacional (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006) e, incentivar a construção de pequenas fazendas eólicas, para pequenos produtores, o PROINFA é o maior programa do mundo de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, tendo para 2012 uma cota para financiamento de R\$ 2 bilhões (ANEEL, 2012).

Uma das principais vantagens do uso de energias renováveis é a possibilidade de suprir as necessidades energéticas de localidades mais remotas, de difícil acesso aos meios convencionais. Turbinas eólicas na faixa de 5 a 50 kW estão fornecendo energia para iluminação e aquecimento em comunidades isoladas da costa da Escócia e Nova Zelândia (CENTRO DE REFERÊNCIA EÓLICO, 2011). Ainda, uma das grandes aplicações da energia dos ventos são as fazendas eólicas interligadas à rede elétrica, muito comum na Alemanha e nos Estados Unidos.

As conexões de pequenos e médios produtores de energia em sistema de distribuição de energia possibilitaram o conceito de geração distribuída, uma vez que oferecem um custo menor ao se levar eletricidade a áreas mais remotas de difícil acesso, além de permitir que se construam geradores de dimensões bastante reduzidas, muito eficientes e fáceis de adquirir e de operar. Devido a isto, a geração distribuída pode oferecer um custo de produção menor que a distribuição centralizada e, qualidade de energia mais elevada para um consumidor se conectar a rede, o que torna a produção de energia elétrica a partir dos ventos atraente, uma vez que possibilita sua implementação em qualquer lugar, sujeita a condições favoráveis de vento (FERNANDO ANTÔNIO, 2008).

Quanto ao Brasil, não há dúvidas de que o país possui um vasto território propício para a geração distribuída com condições de vento favoráveis, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, uma vez que o território brasileiro é privilegiado quanto a sua disposição de energia solar ao longo do ano, o que favorece ao uso de inúmeras fontes de energia renováveis, como a solar, eólica e hidráulica.

O Brasil é um país com um promissor potencial eólico, ainda a ser explorado. Portanto, estudos para o desenvolvimento de novas tecnologias, constituem uma grande ferramenta como ponto de partida na utilização de energia eólica no país, uma vez que a demanda de energia elétrica brasileira vem crescendo significativamente.

1.1.JUSTIFICATIVA

Com o objetivo de se ter um bom aproveitamento do potencial elétrico disponível em uma massa de ar em movimento, inúmeros estudos vem sendo realizados no decorrer dos últimos anos, iniciados no final do século XIX, principalmente a partir da crise internacional do petróleo (1970). A reprodução computacional do comportamento de uma turbina eólica, incluindo simulação das grandezas mecânicas e elétricas, que afetam diretamente a conversão de energia, é uma das ferramentas mais apropriadas para o desenvolvimento de novas tecnologias visando o aproveitamento do potencial eólico de uma determinada região.

Contudo, uma das dificuldades encontradas no estudo da geração eólica é justamente a reprodução do comportamento da turbina eólica para as várias condições de ventos, a fim de se prever futuros problemas e para estudo do melhor rendimento da mesma. Uma das soluções seria a construção de um protótipo em escala reduzida e sua utilização em um túnel de vento. Entretanto, tal solução é mais viável quando se tem por objetivo o estudo do comportamento aerodinâmico do sistema, não a reprodução da transformação de energia mecânica em energia elétrica, além de o custo ser elevado para construção de tal protótipo (ROCHA, 2008).

Outra solução é a construção em bancada de um sistema que emule o comportamento mecânico e elétrico de uma turbina, a partir de máquinas elétricas, juntamente com um sistema de simulação da mesma. Tal solução é particularmente interessante quando se deseja analisar o processo de conversão de energia e projetar sistemas de controle para o mesmo (ROCHA, 2008). O ponto de partida para se analisar tal sistema, e de grande importância, é o uso de uma ferramenta computacional que permita simulação dinâmica de um sistema, a análise de seu comportamento e variações dos parâmetros definidos.

1.2.OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo a elaboração de uma ferramenta computacional, em ambiente Simulink/Matlab, com possibilidade de simular o comportamento de um sistema eólico de geração de energia. Desta forma, a ferramenta a ser desenvolvida permitirá a simulação e a verificação de parâmetros e grandezas do sistema eólico para fins de projeto de sistemas de controle do mesmo.

1.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Têm-se como objetivos específicos do trabalho proposto:

1. Desenvolver um estudo do processo de conversão de energia em um sistema eólico para geração de energia elétrica, incluindo um estudo geral de geradores eólicos de pequeno porte e das estruturas elétricas aplicadas;
2. Realizar a modelagem mecânica dos elementos associados ao vento e a turbina eólica;
3. Desenvolvimento de uma ferramenta de simulação para o modelo mecânico;
4. Realizar a modelagem elétrica do gerador de ímã permanente (PMSG), conectado a uma turbina eólica;
5. Desenvolvimento de uma ferramenta de simulação para o modelo elétrico;
6. Integração das ferramentas mecânicas e elétrica em um único simulador;
7. Verificação do funcionamento através de comparação com resultados da literatura analisada.

O trabalho foi desenvolvido em etapas, visando à efetivação de cada objetivo proposto, seguindo cada item acima mencionado. O trabalho possui 6 capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Se dá a introdução do presente trabalho, seu escopo, a motivação e seu objetivo.

Capítulo 2 – Neste capítulo é apresentada uma visão geral de como está inserida no mundo a produção de energia elétrica a partir dos ventos. Após, é visto

como se dá o processo de conversão de energia elétrica a partir dos ventos. É feito um levantamento dos parâmetros e grandezas elétricas e mecânicas, presentes no decorrer da conversão eletromecânica de energia, bem como suas relações intrínsecas. Após, é apresentada a modelagem das etapas mecânicas e elétricas do processo.

Capítulo 3 – Neste capítulo é apresentado de que maneira se dará o processo de simulação do sistema proposto. Um diagrama de blocos é apresentado, ilustrando as etapas de simulação do trabalho proposto, de acordo com o mesmo já se pode verificar e levantar de que modo se dará o controle em malha fechada do um sistema eólico, a fim de se obter a máxima potência, para um perfil de vento na entrada do sistema.

Capítulo 4 – Apresentam-se os modelos dinâmicos do aerogerador, o modelo aerodinâmico para a turbina, o modelo mecânico do sistema e o modelo elétrico do gerador, já os incluindo no simulador do *Matlab/Simulink*®. Tem-se assim uma ferramenta de estudo do processo de conversão.

Capítulo 5 – Os resultados simulados são apresentados neste capítulo. Obtêm-se as grandezas elétricas no estator do Gerador a Imã Permanente, também como as grandezas mecânicas e as variáveis de controle.

Capítulo 6 – Finalizando o trabalho são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros que poderão envolver esta ferramenta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas seções a seguir é apresentado de que maneira se dá o processo de geração de energia elétrica a partir dos ventos. Inicialmente é apresentado o processo de formação da energia eólica, seguido da conversão em energia mecânica e em energia elétrica. São também apresentados os modelos matemáticos dos sistemas envolvidos.

2.1. ENERGIA EÓLICA

O aproveitamento da energia eólica geralmente é obtido pelo movimento das massas de ar que ao incidirem em uma turbina eólica, ou aerogerador, provocam seu movimento de rotação. Isto permite que um gerador elétrico conectado a extremidade desta turbina opere e gere eletricidade. O processo de conversão de energia passa por várias etapas. Estas podem ser estudadas e analisadas separadamente com o intuito de se obter a máxima extração do potencial energético contido na massa de ar, e desta forma, produzir eletricidade de modo proveitoso e competitivo com outras fontes de energia.

2.1.1. Introdução à energia eólica

Energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (ANEEL, 2002). Esta pode ser considerada como uma das formas de energia proveniente do sol, uma vez que os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera terrestre.

O ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares, gerando assim um movimento de ar, ou seja, o vento. “Cerca de aproximadamente 2% da energia solar, absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa

centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo” (CENTRO DE REFERÊNCIA EÓLICO, 2011). Seu aproveitamento geralmente ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade.

A energia eólica é uma das grandes apostas dos governos de todo o mundo, para suprir a demanda energética de seus países. Num período de 15 anos, a capacidade eólica mundial passou de 6,1GW para 238,4GW (cerca de 17 hidrelétricas de Itaipu). Mesmo com a crise econômica, o setor cresceu 21% em 2011 (GWEC, 2011), como pode ser observado na Tabela 1. Verifica-se também que a China produz 26.4% de toda a energia eólica gerada no mundo. Este crescimento foi praticamente o triplo do que o que ocorreu nos Estados Unidos, o segundo classificado no ranking mundial. O Brasil obteve um crescimento em torno de 60% e deve crescer ainda sete vezes em volume nos próximos três anos, para 7.098 MW até 2014, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Tabela 1 - Principais capacidades de energia eólica instalada no mundo 2010/2011 (MW).

País	MW em 2010	MW em 2011
China	44.733	62.733
EUA	40.298	46.919
Alemanha	27.191	29.060
Espanha	20.623	21.674
Índia	9.655	16.084
França	5.970	6.800
Itália	5.797	6.747
Reino Unido	5.248	6.540
Canadá	4.008	5.265
Portugal	3.706	4.083
Brasil	927	1.509
Total Mundial	197.637	238.351

Fonte: (GWEC, 2011)

Na América do Sul, o Brasil é o país que mais se destaca quanto à capacidade eólica explorada. O potencial eólico no Brasil, considerando ventos a mais de 50 m de altura, equivale à produção energética de 10 usinas de Itaipu (14 GW). Ainda, se melhor explorada pode chegar à marca de 30 usinas de Itaipu.

O Brasil consta com mais de 71 mil quilômetros quadrados do seu território nacional, com uma velocidades de vento superiores a 7 m/s, mais

expressivamente na costa dos estados do Nordeste, que propicia um potencial eólico da ordem de 272 TWh por ano de energia elétrica. Uma vez que o consumo nacional de energia elétrica é de 424 TWh por ano, o que corresponde a um pouco mais de 60% de toda a energia elétrica consumida no país ao ano (ANEEL, 2002). Ainda sim, atualmente o índice de aproveitamento eólico na matriz energética brasileira não chega a 1%, a capacidade instalada é muito pequena comparada à dos países líderes em geração eólica, como a China e Estados Unidos.

Uma das principais motivações para o uso de energia elétrica proveniente dos ventos é a possibilidade de uma fonte energética alternativa e renovável. Sabe-se que, cerca de 75% da potência elétrica no Brasil provem de energia hidráulica. Entretanto, o potencial hidráulico nacional vem estabilizando com o passar dos anos, uma vez que a fonte hidráulica é limitada, quanto ao número de rios. Em contra partida, há a necessidade de suprir a demanda nacional que vem crescendo ano após ano, com o desenvolvimento do país. Assim, os incentivos vigentes para o setor elétrico brasileiro, como o PROINFA, tem levado o mercado à construção de novos e modernos parques eólicos, como forma alternativa para geração de energia.

A produção de energia elétrica por meio dos ventos possui inúmeras vantagens além das vistas por ser uma fonte renovável, como a de possuir um tempo reduzido de construção do parque eólico, quando comparado a outras construções do ramo energético, possibilidade de uso do terreno de instalação para outros fins, como a agricultura ou pecuária e a facilidade da criação de sistemas híbridos, com uma planta de solar-eólica.

Quanto às desvantagens, nota-se a poluição visual, causada pelas grandes torres com os aerogeradores, sua instalação se dá em rotas de pássaros, o que causa um maior número de acidentes, como consequência havendo a necessidade de mais manutenção, além de ruído audível durante a rotação das pás. Tal ruído pode ser minimizado caso a turbina seja de pequeno porte.

Um dos maiores empecilhos para a popularização da energia eólica, quando no início de sua difusão estava em seu elevado custo de produção. Atribuído aos custos logísticos de implementação dos projetos, como à precariedade das estradas nordestinas, região onde se encontra o maior potencial eólico no país, e ao número restrito de ofertantes nacionais de aerogeradores associado às restrições de importação destes equipamentos. Atualmente se tem um maior número de ofertantes, com a crise nos mercados desenvolvidos, que colocou o Brasil em uma

posição de interesse dos fabricantes de aerogeradores, e a valorização da moeda brasileira barateou o custo dos investimentos. Mais do que isso, o governo ao longo dos anos tem o propósito de expandir esta fonte na matriz energética.

O resultado é um menor custo na geração eólica, o que resulta em um sistema tanto vantajoso quanto o térmico, que gira em torno de R\$ 140 a R\$ 150 por MWh (megawatt-hora). Nos três leilões já feitos, leilões de reserva (LER), leilões de fontes alternativas (LFA) e leilão de expansão com antecedência de três anos (A-3), o custo médio da eólica foi de R\$ 140 por MWh. A geração hidrelétrica, a mais barata do mercado, custa, em média, R\$ 110 por MWh. Há poucos anos, o custo para gerar energia elétrica pela força dos ventos ultrapassava os R\$ 200 por MWh, pois praticamente não havia fabricantes no país, e era preciso importar os equipamentos a custos elevados (JUNIOR, 2011).

Na Tabela 2 são apresentados os valores comercializados no ano de 2012 nos leilões de energia, quanto à geração eólica.

Tabela 2 - Preço comercializado para a geração eólica em leilões nacionais.

Leilões Realizados	Capacidade MW	Fator de Capacidade %	Preço R\$/MWh
LER 2009	1.806	43%	148,40
LER 2010	528	51%	122,69
LFA 2010	1.520	43%	134,13
A-3 2011	1.068	45%	99,48
LER 2011	861	50%	99,54

Fonte: (CCEE, 2012)

Com a evolução das tecnologias empregadas no sistema eólico, o custo dos equipamentos que era uma das principais dificuldades ao aproveitamento comercial da energia eólica, reduziu-se significativamente nas últimas duas décadas, com medidas favoráveis o custo da geração de eletricidade pelo vento caiu 90% nos últimos 25 anos, segundo a *U.S Department of Energy* e a *American Wind Energy Association*.

A maioria das turbinas em escala comercial, instalados hoje são de 2 MW de tamanho e custo de cerca de US \$ 3,5 milhões para cada unidade instalada. As turbinas com capacidade de 100 kilowatts custam cerca de US \$ 3.000 a \$ 5.000 por quilowatt de capacidade. Isso significa que uma máquina de 10 kW pode custar entre US \$ 35.000 e \$ 50.000 (As Energias Renováveis, 2012).

As turbinas modernas são projetadas para funcionar por 130 mil horas de operação, o que resulta em uma vida útil em torno de vinte anos. Estima-se um custo anual entre 1,5 a 2% do investimento, enquanto as turbinas com mais idade apresentam um custo em torno de 3% ao ano do investimento (ROSSI e OLIVEIRA, 2012).

Recentes desenvolvimentos tecnológicos, como sistemas avançados de transmissão, melhoramento aerodinâmico, estratégias de controle e operação das turbinas, têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos, o que permitiu um grande crescimento na exploração de tal recurso energético (Fontes Renováveis Eólica-CERPCH, 2011). A Tabela 3 apresenta o investimento para as principais fontes de energia renováveis.

Tabela 3 - Custo de instalação e geração das Principais Fontes de Energia Renováveis.

Fonte	Custo de Instalação (R\$/KW)	Fator de Capacidade (%)	Custo de Geração (US\$/MWh)
Eólica	900 a 1400	25 a 45	50 a 95
Biomassa	700 a 1000	45 a 85	45 a 105
PCH	700 a 1200	40 a 70	35 a 145
Solar	6000 a 10000	18 a 22	500 a 1160

Fonte: (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006).

Pode-se notar que a energia eólica possui grande competitividade com as demais fontes de energia renováveis. Também vale ressaltar que segundo o analista Peter Asmus, um dos especialistas em energia eólica, o tempo de retorno do investimento em um pequeno sistema eólico pode ficar entre cinco e dez anos em uma região com ventos adequados.

2.1.2. Turbinas eólicas

A extração e conversão de potência mecânica do vento em elétrica se dá com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores. A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no

mundo, e este número só tende a crescer (CENTRO DE REFERÊNCIA EÓLICO, 2011).

As turbinas são elementos que tiveram grande evolução, quanto ao seu modelo e potência desenvolvida, existem inúmeras escolhas, hoje existem protótipos de 3,6 MW e 4,5 MW sendo testados na Espanha e Alemanha. A capacidade média das turbinas eólicas instaladas na Alemanha em 2011 foi de 29,06 MW e na Espanha de 21,67 MW.

A instalação de um sistema de geração nesta faixa de potência requer um investimento elevado. Por outro lado, um sistema de geração com potência na faixa de 1kW a 10kW apresenta custo reduzido, podendo ser adquirido e conectado a rede em larga escala por pequenos produtores de energia. Neste trabalho se utiliza como base de estudo, uma turbina eólica que opera na faixa de 1kW a 10 kW.

O controle da posição das turbinas, quando se deseja extrair máxima potência, bem como para limitar sua extração à potência nominal do gerador, é feito com dois princípios de controle aerodinâmico. “O mais passivo é o chamado controle estol e o ativo é chamado de controle de passo. No método passivo, ou estol, as pás são montadas fixas no rotor, neste método a regulação de potência é autoinduzida pelo vento. O que se nota é a simplicidade do sistema, pois este não possui nenhum sistema de atuação, tal método é usado para a operação em velocidade fixa” (CENTRO DE REFERÊNCIA EÓLICO, 2011).

Em turbinas que utilizam o método ativo, ou controle de passo, para limitar a potência, o controlador monitora a potência constantemente. Quando a potência excede um limite pré-estabelecido, o controlador envia um comando para o atuador de ângulo de passo (β) para mover as pás de forma a reduzir a potência capturada dos ventos. Então, as pás do rotor devem ser capazes de girar em torno de seu eixo longitudinal. Tal método de operação é muito mais confiável, permitindo controle da extração da potência, sendo mais caro. Ainda assim, os fabricantes preferem tal sistema de controle de passo, pois oferecem mais possibilidades de influenciar a operação das turbinas eólicas.

O rendimento das pás de um aerogerador é dado pelo coeficiente de potência C_p . O coeficiente de potência pode atingir um valor máximo de até 0,593, isto significa que, se o processo de extração de energia do vento não tiver perdas, somente 59,3% da energia disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica. Na prática o C_p é menor do que 0,593, pois

depende das características mecânicas das turbinas. O valor de C_p depende das características de velocidade do vento incidentes nas pás, bem como da posição das mesmas, enfim sua aerodinâmica. Para tanto, faz-se necessário o conhecimento das partes de uma turbina, apresentadas na Figura 2.1, também os componentes principais de uma turbina eólica são listados abaixo (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006).

Anemômetro: Mede a velocidade do vento e transmite para o controlador.

Pás: O vento incide sobre as pás gerando uma força de sustentação, que irá mover o rotor.

Freio: O freio a disco pode ser mecânico, elétrico ou hidráulico, e é utilizado como um sistema auxiliar para parar a turbina em condições adversas de operação. O freio principal de turbina eólica é o freio aerodinâmico

Controlador: É utilizado para a partida e/ou desligamento da turbina, através do monitoramento de todas as partes da turbina.

Caixa de engrenagem: Conecta o eixo de baixa velocidade com o eixo de alta velocidade e aumenta a velocidade rotacional de, aproximadamente, 10-60 rpm para, aproximadamente 1200-1800 rpm, que é a velocidade requerida para os geradores assíncronos. Existem configurações que não utilizam caixa de engrenagem, devido à utilização de geradores síncronos que operam em baixa velocidade.

Gerador: O gerador mais utilizado para turbinas é o gerador assíncrono, embora algumas turbinas utilizem geradores síncronos.

Eixo de alta velocidade: Aciona o gerador assíncrono.

Eixo de baixa velocidade: Devido ao TSR das turbinas eólicas, a velocidade de rotação do rotor está na faixa de 10 a 60 rpm.

Casa de máquinas: Protege todos os componentes da turbina incluindo o conjugado de acionamento, o gerador, mancais e demais acoplamentos (dependem da configuração da turbina).

Passo: Utilizado para limitar a potência de saída para valores do vento acima da velocidade nominal da turbina eólica.

Rotor: As pás e o cubo do rotor são chamados de rotor.

Torre: As torres podem ser feitas de aço tubular, de treliças ou de concreto. Como a velocidade do vento aumenta com a altura, as torres são altas para capturar mais energia.

Mecanismo de orientação direcional: O mecanismo de orientação direcional é usado para manter o rotor de frente para o vento quando o vento mudar de direção.

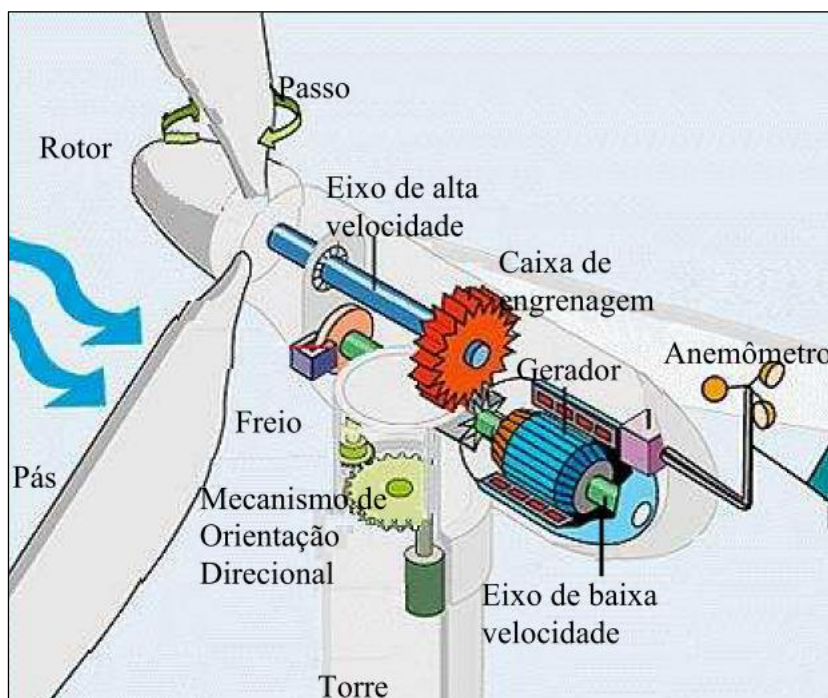


Figura 2.1 – Principais componentes de uma turbina eólica.
Fonte: (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006).

As turbinas eólicas podem utilizar dois tipos de forças aerodinâmicas, a Força de Arrasto e a Força de Sustentação, podendo ser vistas na Figura 2.2. A força de sustentação surge em virtude do diferencial de pressão que existe entre a superfície superior e inferior de uma pá e tende a empurrá-la para cima, já a força de arrasto é uma força que oferece resistência aerodinâmica ao movimento das pás, que tende a aumentar quando a velocidade do vento aumenta.

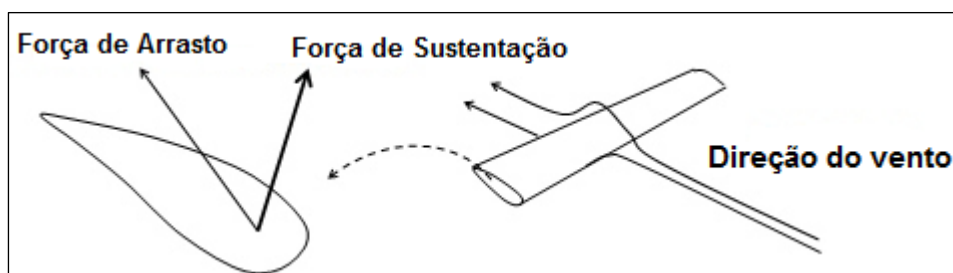


Figura 2.2 – Perfil de uma pá.
Fonte: (LAYTON, 2011).

Para o controle da potência extraída do vento em turbinas eólicas modernas de médio e grande porte pode ser feito pelas variações dos ângulos de passo (β) e ataque (α), que mudam a posição das pás em relação a velocidade do vento, alterando sua resposta aerodinâmica e assim alterando a potência extraída. O ângulo de ataque é o ângulo formado entre o vento relativo e o eixo da pá, o ângulo de passo é formado entre a velocidade da turbina e o eixo da pá. “A força de sustentação é produzida perpendicularmente em relação à velocidade do vento resultante (V_r), que é formada pela subtração vetorial da velocidade do vento incidente (V_w) com a velocidade da pá da turbina eólica (V_p). A força de arrasto é produzida na mesma direção de V_r . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção de V_p , é que produz torque na turbina eólica” (PAVINATTO, 2005), conforme é visto na Figura 2.3.

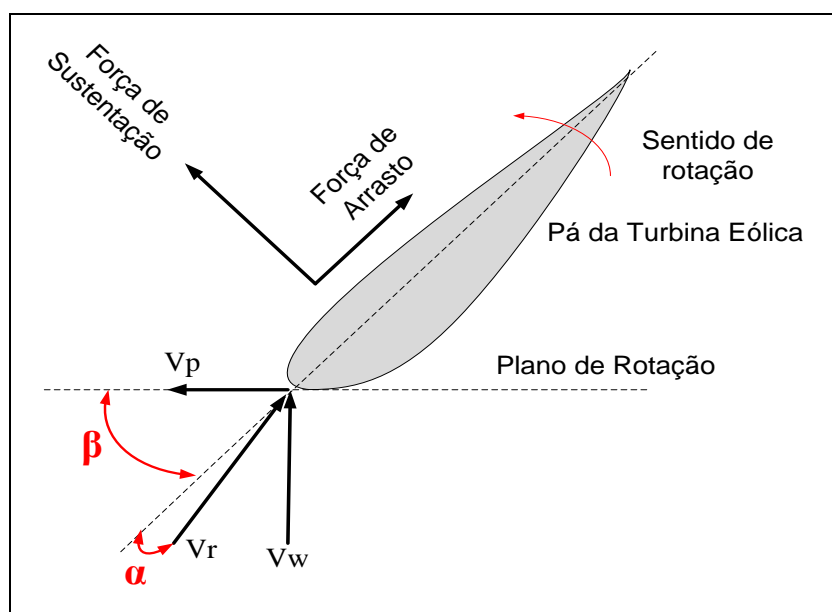


Figura 2.3 - Principais forças atuantes em uma pá da turbina eólica.
Fonte: Adaptado de (PAVINATTO, 2005).

Na Figura 2.1, tem-se que:

- V_p - Velocidade da pá da turbina [m/s];
- V_r - Velocidade resultante na pá da turbina [m/s];
- V_w - Velocidade de incidência do vento [m/s];
- β - Ângulo de passo;
- α - Ângulo de ataque.

Em turbinas de vento que utilizam a força de arrasto para movimentar seu rotor, o C_p é menor que 0,2. Um exemplo de turbinas que utilizam a força de arrasto

são os moinhos de vento, em serviços de moer grãos. Tais turbinas são aí empregadas por possuírem alto torque e baixa velocidade (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006). Turbinas que utilizam a força de sustentação, com perfil aerodinâmico para o movimento do rotor, C_p pode alcançar 0,5 (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006) e podem operar em elevadas velocidades e possuem baixo torque. Em aplicações para a geração de energia elétrica por meio dos ventos, as turbinas que utilizam a força de sustentação, com perfil aerodinâmico, são as mais utilizadas, pois possuem maior rendimento quanto à extração de potência.

O perfil aerodinâmico das turbinas eólicas que utilizam a força de sustentação resulta em uma variação da velocidade do vento que incide nas pás. Assim, cria-se uma região em com diferença de pressão, na superfície mais arredondada da pá se tem uma maior velocidade do vento, logo menos pressão, na outra extremidade plana da pá, se tem uma menor velocidade de vento, portanto maior pressão. Com essa diferença de pressão é que se torna possível uma turbina presa a um eixo fixo exercer um movimento de rotação, conforme pode ser visto na Figura 2.4.

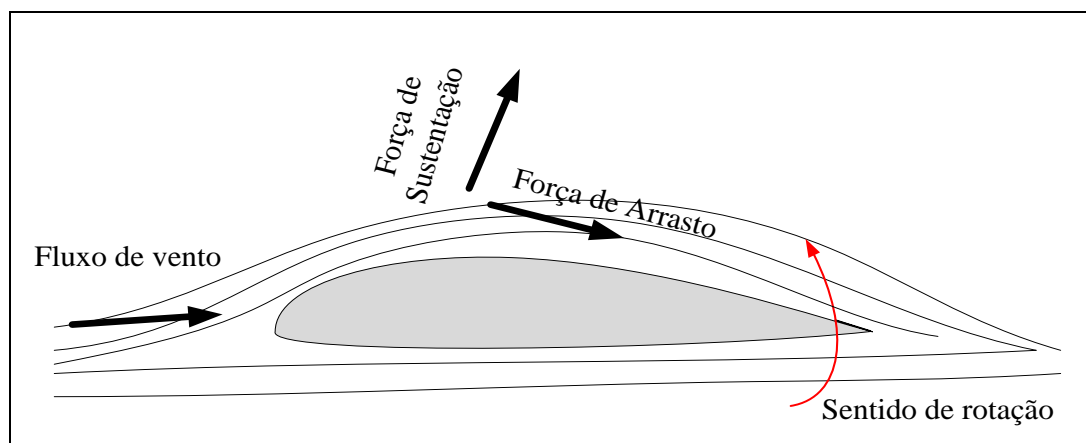


Figura 2.4 - Aerodinâmica de uma turbina eólica.
Fonte: Autoria própria.

As turbinas eólicas podem operar em dois tipos de velocidade, velocidade variável e de velocidade fixa. Inicialmente o uso de turbinas com velocidade fixa eram as utilizadas. Neste conceito utiliza-se uma caixa de engrenagem acoplada a um gerador, geralmente do tipo de indução de gaiola de esquilo, sendo diretamente conectado a rede elétrica por meio de um transformador.

Em operação com velocidade fixa, a velocidade da turbina é determinada pela frequência da rede e pelo número de polos do gerador, tais turbinas são

projetadas para se obter a máxima eficiência em apenas uma velocidade do vento, em outras velocidades ocorre uma perda de eficiência, bem como resulta em variações do conjugado, podendo causar estresses mecânicos e problemas na qualidade de energia. Tal sistema tem por vantagem ser mais robusto e mais barato (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006).

Uma turbina que opera com velocidade variável, possui maior eficiência aerodinâmica. Nesta operação é inserido entre o gerador e a rede elétrica um conversor, permitindo a variação contínua da velocidade de rotação da turbina. Sendo controlada a variação do ângulo de passo β e de ataque α , de modo a se obter a maior potência fornecida pelo vento. Em tal operação o conversor possui a função de manter no ponto de conexão com a rede elétrica uma frequência constante de 50 ou 60 Hz, dependendo da localidade (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006).

Na Figura 2.5 tem-se a variação da potência mecânica do vento em função da velocidade no eixo da turbina, para um dado perfil de velocidade do vento. Nota-se que a operação em velocidade variável trás consigo um melhor aproveitamento da potência disponível no vento, por exemplo, para uma velocidade do vento de 7m/s a potência mecânica extraída é de 0,4 MW aproximadamente, contra cerca de 0,1 MW em operação com velocidade fixa. O ponto de máxima extração de potência dos ventos também é representado como sendo o pico da curva seguinte.

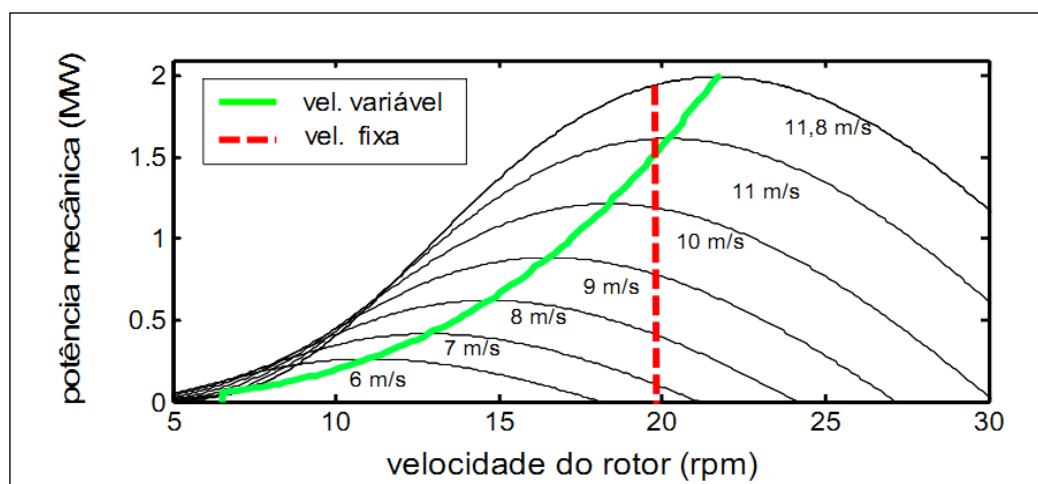


Figura 2.5 – Pot. mecânica na turbina eólica em função do controle de velocid. no rotor.
 Fonte: (ROCHA, 2008).

A turbina a ser simulada neste trabalho possui como referência de análise, o perfil que corresponde a uma turbina real fabricada pela ENERSUD, modelo VERNE 555 que pode gerar até 6kW, ideal para alimentar consumidores de pequeno porte, suprir energia de demandas industriais ou rurais. Apenas alguns parâmetros foram adaptados, as características gerais da turbina simulada são listadas na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Turbina eólica simulada.

Parâmetros	Especificações
Potência Nominal	6,8 KW
Corrente	6 A
Tensão	754,5 V
Resistência Estatórica do PMSG	0,67 Ω
Indutância Estatórica do PMSG (Lqs, Lds)	13,47mH
Fluxo Permanente	2,39 Wb
Par de polos	12
Inércia da Turbina	30 Kg.m ²
Cp Máximo	0,46
Velocidade máxima no rotor	300 rpm ou 31,4 rad/s
Raio da Turbina	2,77 m

2.1.3. Conversão de energia

A partir do conhecimento das forças que atuam sobre as pás de um aerogerador, estudos e análises podem ser realizados para o desenvolvimento de projetos de turbinas eólicas aplicados a geração de eletricidade.

A Figura 2.6 apresenta o processo de conversão de energia em um sistema eólico, no qual se tem a energia cinética do vento que é convertida em energia mecânica na turbina e, então em energia elétrica por meio do gerador elétrico.

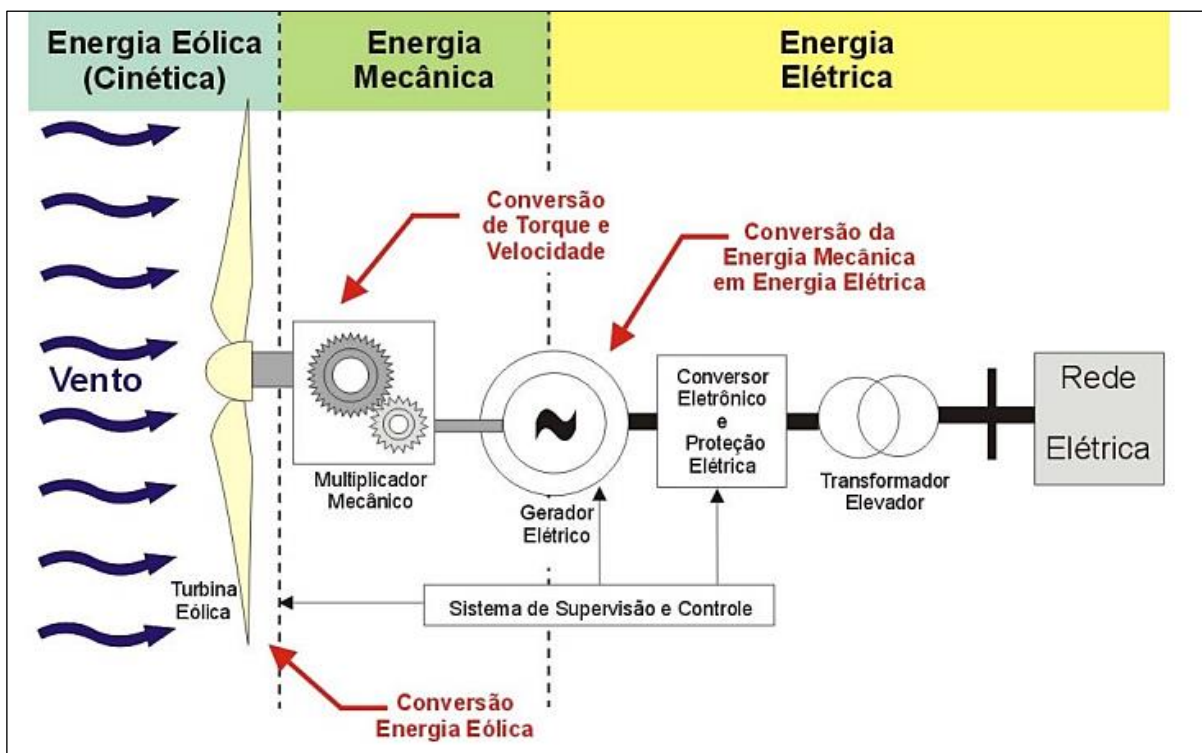


Figura 2.6 - Etapa de conversão de energia em um sistema eólico.
Fonte: (PAVINATTO, 2005)

Na Figura 2.4 é possível observar as três etapas presentes em um processo de conversão eólico. Inicialmente se dá a conversão aerodinâmica, a energia cinética associada a uma coluna de ar, que se desloca a uma velocidade, num movimento de translação que, ao se colidir com as pás de uma turbina a fazem girar, obtendo-se deste modo energia mecânica. A potência mecânica, disponível inicialmente nas pás e posteriormente no eixo de uma turbina, é responsável pelo movimento de rotação no eixo do aerogerador, tendo-se como resultado a velocidade e torque mecânico no eixo. Para a conversão elétrica no sistema, a velocidade e torque mecânico são variáveis de entrada para o modelo elétrico, no qual se tem no estator do gerador a tensão e corrente elétrica resultante do processo de conversão.

2.1.3.1 Conversão de energia aerodinâmica

O processo de conversão aerodinâmico pode ser descrito por expressões matemáticas obtidas a partir das Leis da Física.

A obtenção de tais expressões parte do cálculo de energia cinética, disponível em uma certa massa de ar. Para tanto, a energia é dada por

$$E_c = \frac{mV_w^2}{2} \quad (2.1)$$

onde E_c é a Energia cinética (J), m a Massa do ar (kg) e V_w é a velocidade do vento (m/s).

Uma turbina eólica é classificada, normalmente, pela potência e não pela energia, logo

$$P_w = \frac{dE_c}{dt} = \frac{\dot{m}V_w^2}{2} \quad (2.2)$$

onde P_w é a potência disponível no vento (W), t o tempo (s) e \dot{m} a taxa de variação da massa.

A taxa de variação da massa é dada pela Equação (2.3).

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho AV_w \quad (2.3)$$

Onde, ρ é a densidade do ar (1,225 kg/m³ ao nível do mar), A a área de varredura e x uma dada distância percorrida pelo vento, tem-se a equação da potência mecânica disponível no vento:

$$P_w = \frac{\rho AV_w^3}{2} \quad (2.4)$$

Desta forma, a potência do vento é convertida em potência mecânica no rotor da turbina. Entretanto, segundo (EQUIPE DE P&D CEEE, 2006), a turbina eólica não pode extrair completamente a potência disponível no vento. Em 1926, Betz e Glauert descobriram que a máxima potência que pode ser extraída por uma turbina eólica é dada por

$$P_w = \frac{\rho AV_w^3}{2} C_p \quad (2.5)$$

onde:

ρ - Densidade do ar (1,225kg/m³ ao nível do mar);

A - Área de varredura das pás (m²);

V_w - Velocidade do vento incidente na turbina (m/s);

C_p - Coeficiente de Betz ou Coeficiente de Potência.

A aerodinâmica e a posição da turbina em relação ao fluxo de vento resultam no rendimento de um aerogerador, dado por C_p , como dito na seção 2.1.2. Uma vez que, o valor de C_p depende da relação entre a velocidade das pás da turbina e a velocidade do vento, tal relação também é conhecida por *Tip Speed Rate* (TSR – Taxa de Variação de Velocidade) ou simplesmente λ , utilizada na modelagem do sistema, logo:

$$\lambda = \frac{\omega_T \cdot R}{V_w} \quad (2.6)$$

onde:

R - Raio da turbina (m);

ω_T - Velocidade angular mecânica no eixo da turbina (rad/s);

V_w - Velocidade linear incidente do vento (m/s).

Quando se tem controle sobre a posição das pás, se tem controle sobre a potência extraída de uma turbina. As forças de sustentação e de arrasto sofrem influência do ângulo de ataque α e de passo β na turbina, como pode ser notado na Figura 2.1. Segundo Rasila (2003), a força de arrasto é máxima para um ângulo de ataque próximo a 90° e mínimo para um ângulo de 0° , a força de sustentação é máxima para um ângulo de ataque de aproximadamente 15° , acima desse valor, a força de sustentação começa a reduzir. Deste modo, por meio do monitoramento e controle de α e β , pode-se ter controle sobre a potência extraída do vento pelo aerogerador.

Uma forma de controle da potência desenvolvida por uma turbina é feito com base no controle do ângulo de passo β , pois o mesmo é mais facilmente obtido na etapa de medição que o ângulo de ataque α e, de mais simples controle. Assim, o coeficiente de potência pode ser expresso em função do ângulo de passo e do TSR, dado por $C_{p(\lambda,\beta)}$.

É possível se obter uma curva de operação, na qual para diferentes β se tem um C_p em função do λ , uma curva característica é apresentada na Figura 2.7.

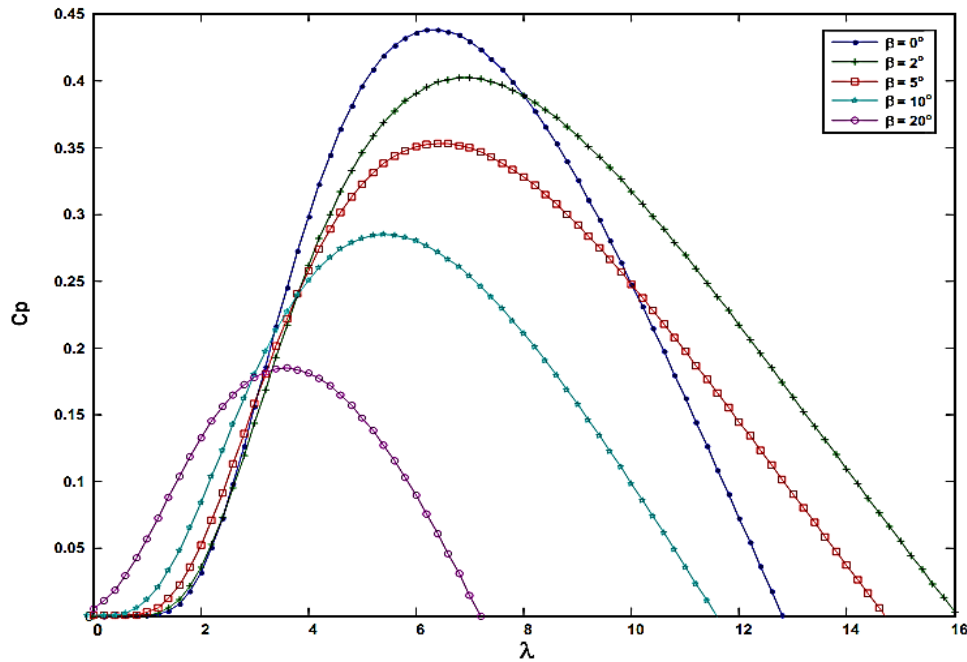


Figura 2.7 - Coeficiente de Potência para vários ângulos de passo.
Fonte: Adaptado por (BERNARDES, 2009).

Pode-se obter a partir do gráfico da Figura 2.5, uma expressão genérica para C_p em função do ângulo de passo β e do TSR λ . Dado pela Equação 2.7.

$$C_{p(\lambda, \beta)} = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-c_5 \frac{1}{\lambda_i}} \quad (2.7)$$

Na qual, os parâmetros c_1 , c_2 , c_3 , c_4 e c_5 dependem da característica aerodinâmica da turbina. Para uma turbina moderna estes parâmetros são obtidos empiricamente (BAZZO, 2007), onde $c_1 = 0,5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0,4$, $c_4 = 5$ e $c_5 = 21$.

O parâmetro λ_i é definido em função de λ e do ângulo de passo β , dado pela Equação 2.8.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,008\beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^3} \quad (2.8)$$

Deste modo, a potência extraída de uma massa de ar em *Watt*, de uma turbina que utiliza a força de sustentação é dada por

$$P_w = \frac{\rho A V_w^3}{2} C_{p(\lambda, \beta)} \quad (2.9)$$

A relação entre o torque mecânico e a potência mecânica é dada por

$$T_m = \frac{P_w}{\omega_m} \quad (2.10)$$

onde ω_m é velocidade angular mecânica do eixo da turbina (rad/s).

Substituindo a Equação (2.9) e (2.6) em (2.10), obtém-se o torque em função da velocidade do vento incidente nas pás, em m/s, do coeficiente de potência C_p e características físicas das pás, apresentado na Equação (2.11).

$$T_m = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V_w^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.11)$$

Em posse com as equações referentes à extração mecânica de energia, por meio do modelo aerodinâmico, se pode realizar a modelagem mecânica e elétrica, e sua implementação quanto à simulação.

2.2. MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA

Para se realizar a simulação de um sistema eólico, faz-se necessário estabelecer os modelos mecânicos e elétricos do sistema e, então o sistema de controle. O projeto do controle de um sistema requer um modelo dinâmico da planta, neste caso uma turbina eólica. Tendo-se o modelo dinâmico da planta, a simulação pode então ser realizada.

2.2.1. Modelagem mecânica de uma turbina eólica

A dinâmica de uma turbina eólica pode ser modelada por duas massas girantes, que representam o rotor da turbina eólica e o eixo do gerador, a conexão entre ambos pode ser feita com uma caixa multiplicadora de velocidade, com relação K_e , ou com um acoplamento direto, o eixo de conexão pode possuir certo amortecimento e rigidez, como pode ser visto na Figura 2.8.

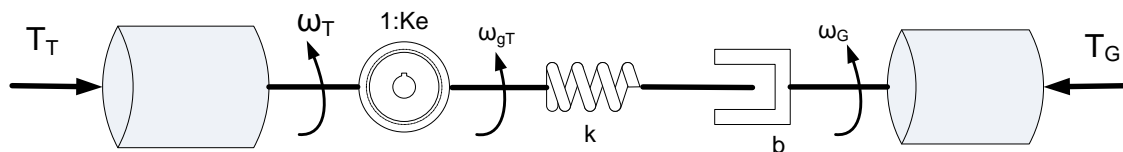


Figura 2.8 - Modelo mecânico de um gerador.
Fonte: Adaptado de (ROCHA, 2008).

onde:

- J_T - Momento de inércia da turbina eólica;
- J_G - Momento de inércia do gerador;
- T_T - Torque da turbina;
- T_G - Torque do gerador;
- ω_T - Velocidade angular da turbina;
- ω_{gT} - Velocidade angular da turbina vista pelo gerador;
- ω_G - Velocidade angular no eixo do gerador;
- k - Rigidez do eixo de conexão;
- b - Amortecimento do eixo de conexão;
- K_e - Relação de multiplicação de velocidade.

Assim, as equações para o referido sistema ficam

$$\begin{cases} T_T^g = K_e^{-1} \cdot T_T \\ \omega_g = K_e \cdot \omega_T \\ J_{T+g} = J_g + K_e^{-2} \cdot J_T \end{cases} \quad (2.12)$$

em que

- T_T^g - Torque total no eixo do aerogerador visto pelo gerador;
- ω_g - Veloc. ang. no eixo do aerogerador visto pelo gerador;
- J_{T+g} - Momento de Inércia total do sistema.

A turbina eólica que será simulada neste trabalho, opera com rotação variável, sujeita a diversas condições de velocidade de vento e, não havendo conexão direta do gerador com a rede elétrica, a dinâmica do eixo pode ser desprezada. Assim, utiliza-se um modelo de apenas uma massa com inércia equivalente. Logo, obtém-se o modelo simplificado da Figura 2.9.

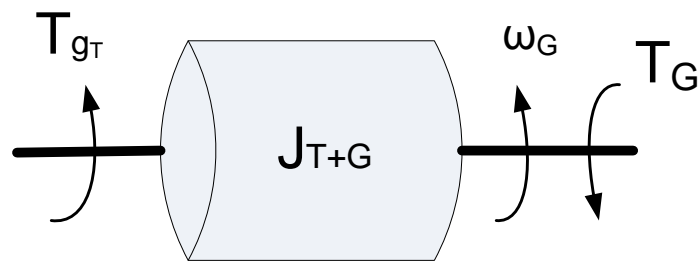


Figura 2.9 - Modelo mecânico simplificado de um aerogerador.
 Fonte: Adaptado de (ROCHA, 2008).

O PMSG pode possuir um grande número de polos, atuando em uma frequência nominal baixa, fazendo com que sua velocidade de operação seja da mesma ordem da turbina, não necessitando do multiplicador de velocidade. Esta é uma das grandes vantagens do uso de um PMSG em sistemas de geração, uma vez que as caixas de velocidade são responsáveis por grande número de manutenção das turbinas, ainda, sem a mesma o custo de uma turbina eólica diminui consideravelmente. A equação mecânica referente à planta do sistema, sem o uso das caixas de engrenagens, considerando o amortecimento e rigidez de conexão do eixo nula, é dado pela Equação (2.13)

$$T_{gT} - T_g = J_{T+g} \dot{\omega}_g \quad (2.13)$$

Onde,

T_{gT} - Torque da turbina visto pelo gerador;

$\dot{\omega}_g$ - Derivada da Velocidade angular da turbina.

2.2.2. Gerador síncrono a imã permanente

Com a atuação dos geradores eólicos em velocidade variável, Geradores Síncronos a Imã Permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator* - PMSG) e Geradores de Indução Duplamente Alimentado (*Double-Fed Induction Generator* - DFIG), vêm emergindo em suas aplicações. Os DFIGs possuem vantagens por apresentarem reduzida potência dos conversores de potência do circuito rotórico, consequentemente diminuindo o custo do sistema e aumentando sua eficiência. Porém a necessidade de uma manutenção periódica, devido à utilização de escovas no circuito rotórico, e a necessidade da caixa de engrenagem, são empecilhos em

sua utilização. Visando suprir as desvantagens dos sistemas que utilizam os DFIGs, os PMSGs foram sendo empregados.

Geradores Síncronos a Imã Permanente são máquinas elétricas CA, síncronas polifásicas com imãs permanentes no rotor, onde os enrolamentos de campo são substituídos por imãs permanentes de alto produto energético. Seus cálculos são muitos semelhantes aos das máquinas síncronas polifásicas, apenas considerando que a máquina é excitada por uma corrente de campo de valor constante.

Com a utilização de imãs permanentes para excitação, se evita perdas no cobre do rotor. Logo, a eficiência do gerador é aumentada, o projeto construtivo é simplificado, há maior confiabilidade, entre outras vantagens. Por estas razões apresentadas, a maioria dos aerogeradores de pequeno porte utilizam geradores síncronos a imã permanente. Nestas aplicações os geradores são acionados diretamente pela turbina eólica, sem utilização de caixa de engrenagens (ADEGAS, 2006). Como pode ser visto na Tabela 5, tem-se uma relação entre prós e contras de geradores de indução e a imã permanente.

Tabela 5 - Comparação entre as máquinas PMSG e DFIG

Tipo	Prós	Contras
PMSG	<ul style="list-style-type: none"> *atuação em toda sua faixa de velocidade; *possibilidade de não utilização caixa de engrenagens; *baixa manutenção, pois não se tem o uso de escovas; *controle completo da potência ativa e reativa; *não possui sistema de energização de campo. 	<ul style="list-style-type: none"> *custo dos imãs permanentes, dependente das oscilações de mercado; *se gerador com multipolos, torna o sistema mais pesado.
DFIG	<ul style="list-style-type: none"> *limitada faixa de atuação de velocidade (+- 30% em torno da velocidade síncrona); *custo reduzido, devido a reduzida potência dos conversores de potência do circuito rotórico; *controle completo da potência ativa e reativa gerada. 	<ul style="list-style-type: none"> *necessidade de anéis deslizantes; *necessidades de caixas de engrenagens.

A planta a ser simulada consiste em uma turbina eólica com potencial de geração de até 6,8 kW.

2.2.3. Modelo elétrico do PMSG

Os geradores síncronos a imã permanente fazem parte da classe das máquinas síncronas trifásicas. Assim, pode-se verificar a modelagem matemática para uma máquina síncrona qualquer, posteriormente obter o modelo para uma máquina síncrona a imã permanente. Também, pode-se verificar a vantagem das máquinas a imã permanente quanto à análise do circuito equivalente, pois possuem menor número de variáveis. Na Figura 2.10 tem-se um gerador síncrono de polos saliente trifásico, utilizado para determinação das equações do modelo elétrico.

Para o gerador síncrono de polos salientes, o estator é conectado em estrela, os enrolamentos “as”, “bs” e “cs” são distribuídos senoidalmente, deslocados em 120° entre si. O rotor, de dois polos, possui os enrolamentos Pr, já que se trata de um gerador síncrono, os sinais “x” e “•”, indicam o sentido que circula a corrente elétrica, entrada e saída respectivamente. Quando se faz a análise de um PMSG, é feita uma substituição do circuito do rotor por elementos magnéticos. Na Figura 2.8 estão também representados os eixos magnéticos dos enrolamentos “a”, “b” e “c” do estator, enquanto que os eixos magnéticos do rotor são representados pelos eixos de quadratura “q” e eixo direto “d”, que serão analisados a seguir.

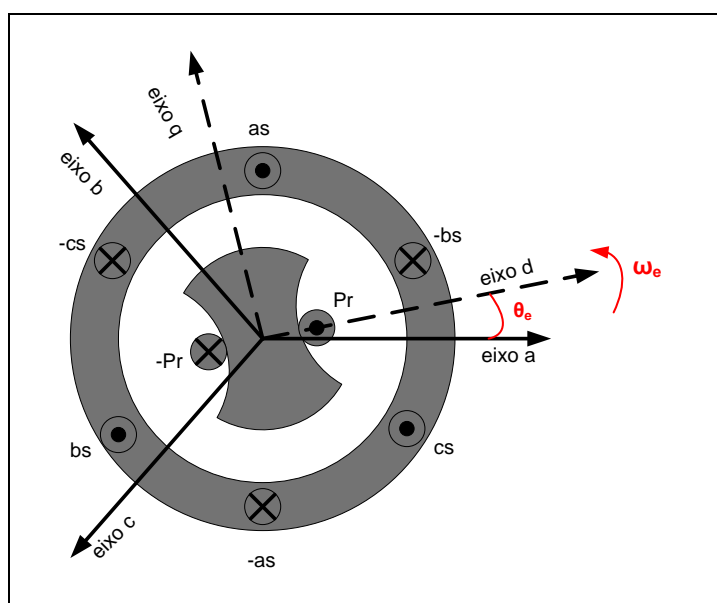


Figura 2.10 - Gerador Síncrono Trifásico com dois polos.
 Fonte: Adaptado de (BERNARDES, 2009).

Um método de análise e controle de máquinas elétricas é a utilização da transformação de coordenadas abc para $dq0$, tal transformação nada mais é que uma mudança no plano referencial, uma vez que a transformação $dq0$, também conhecida por transformação de Park, é o estudo dos parâmetros de uma máquina em um plano que gira na mesma velocidade síncrona do eixo do rotor (BERNARDES, 2009).

Quando se faz a transformação de Park, os cálculos referentes para a malha de controle simplificam, e as relações entre as grandezas são mais facilmente trabalhadas, sem modificar o resultado e ainda permitindo um desacoplamento magnético das variáveis. Na Figura 2.11 é apresentado como se dá a transformação das coordenadas abc em $dq0$.

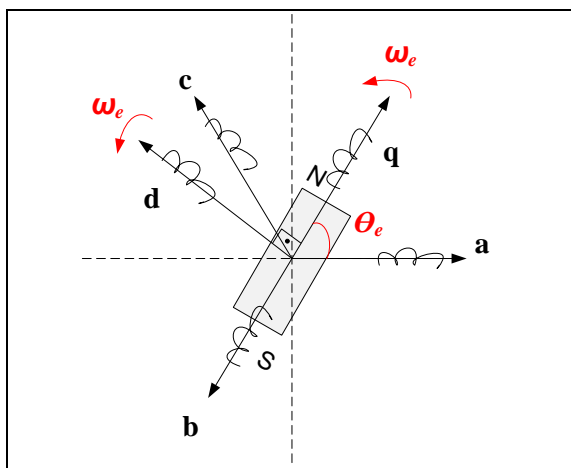


Figura 2.11 - Transformação de coordenadas abc em $dq0$.
Fonte: (BERNARDES, 2009).

O plano $dq0$ está como que fixado no eixo do rotor, girando na mesma velocidade ω_e , com uma posição inicial Θ_e , a transformação das grandezas abc em $dq0$ é dada pela matriz transformação K , conforme dado em (BERNARDES, 2009), e apresentado na Equação (2.14).

$$K_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen}(\theta_e) & -\text{sen}\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

A componente do eixo 0 é omitida, pois o sistema é composto por fases equilibradas. Após aplicar a transformação sobre as equações referentes às grandezas elétricas de uma máquina (BERNARDES, 2009), tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde,

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

e ψ_{pm} é o fluxo permanente, característico de cada rotor. Deste modo as equações de tensão em coordenadas dq0 podem ser expressas por

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{d}{dt} i_d \\ V_q = R_s i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_{pm}) + L_q \frac{d}{dt} i_q \end{cases} \quad (2.17)$$

ou

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R_s i_d}{L_d} + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s i_q}{L_q} - \frac{\omega_e}{L_q} (L_d i_d + \psi_{pm}) + \frac{V_q}{L_q} \end{cases} \quad (2.18)$$

na qual:

V_q = Tensão no enrolamento do estator, referente ao eixo q;

V_d = Tensão no enrolamento do estator, referente ao eixo d;

i_q = Corrente no enrolamento do estator, referente ao eixo q;

i_d = Corrente no enrolamento do estator, referente ao eixo d;

ω_e = Velocidade angular do plano de referência;

L_q/L_d = Indutância do enrolamento de estator, no plano qd0;

R_s = Resistência estática.

e para as indutâncias se tem:

$$L_d = \frac{3}{2}(L_s - L_m)$$

$$L_q = \frac{3}{2}(L_s + L_m)$$
(2.19)

onde:

L_s = Indutância própria do enrolamento;

L_m = Indutância mútua.

Para o gerador elétrico utilizado tem-se que $L_d=L_q=L$, uma vez que se trata de um PMSG com rotor de polos salientes (CIMPOERU, 2010). O circuito elétrico para o gerador elétrico é apresentado na Figura 2.12.

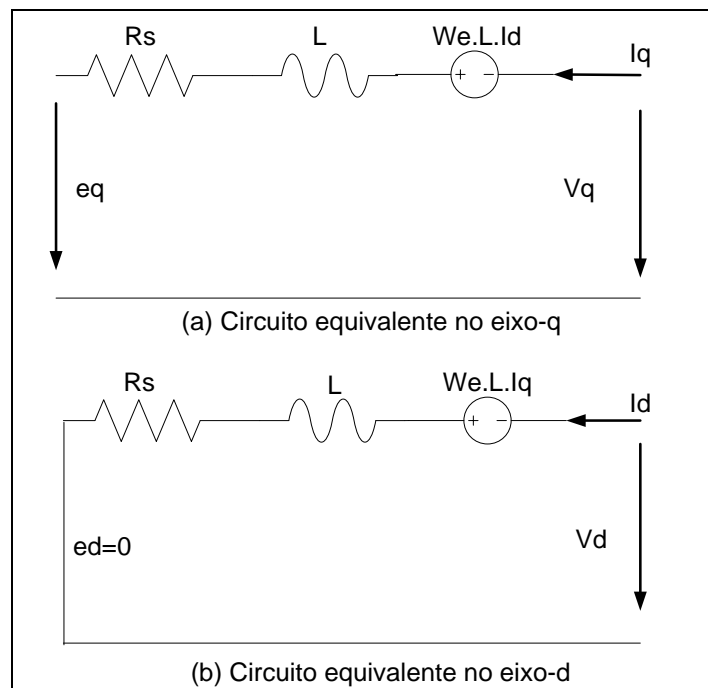


Figura 2.12 - Circuito elétrico em coordenadas dq0 para um PMSG.
Fonte: Adaptado de (BERNARDES, 2009).

Quanto à potência elétrica de cada fase disponível no estator do gerador, esta é dada pelo produto da tensão e corrente instantânea (BERNARDES, 2009).

$$P_e = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c$$
(2.20)

Utilizando a matriz de transformação, dada pela Equação (2.14), a potência em coordenadas $dq0$ é dada por:

$$P_e = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (2.21)$$

E substituindo (2.18) em (2.21), obtém-se:

$$P_e = \frac{3}{2} \left(R_s (i_d^2 + i_q^2) + i_d \frac{d}{dt} \psi_d + i_q \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_e (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right) \quad (2.22)$$

Na Equação (2.22) o primeiro termo é referente à potência elétrica dissipada na resistência do estator, o segundo termo é referente à taxa de variação de energia armazenada na indutância do gerador, já o terceiro termo é a taxa de potência que é convertida de mecânica para elétrica.

O conjugado exercido pelo gerador é expresso pela equação (2.23), onde N_p é o número de par de polos do gerador.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{N_p}{2} (\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2.23)$$

A partir das equações que descrevem cada modelo, pode-se desenvolver um aplicativo que simule o comportamento da planta eólica.

3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA TURBINA EÓLICA

Considerando o modelo aerodinâmico, mecânico e elétrico apresentados no Capítulo 2, será desenvolvido aqui um aplicativo de simulação computacional para os referidos sistemas. A sequência estabelecida para a simulação das condições de vento em uma turbina real, que reproduz as condições transitórias e permanentes de uma turbina real, é apresentada no diagrama de blocos a seguir (vide Figura 3.1).

O sistema dinâmico possui como variável de entrada a velocidade do vento, cujo perfil pode ser determinado pelo usuário, fornecendo na saída a potência e demais parâmetros elétricos envolvidos no processo. O modelo eólico apresenta toda a modelagem da aerodinâmica da turbina, sendo regido pelas equações apresentadas no Capítulo 2. O modelo mecânico é composto pela equação mecânica da velocidade da turbina, dada pela Equação (2.13). No modelo elétrico tem-se a determinação das variáveis elétricas que compõem o sistema, bem como o controle do sistema em malha fechada. Este controle é realizado a fim de se obter a máxima potência e determina um torque elétrico, que por sua vez impõem uma determinada rotação no eixo da turbina.

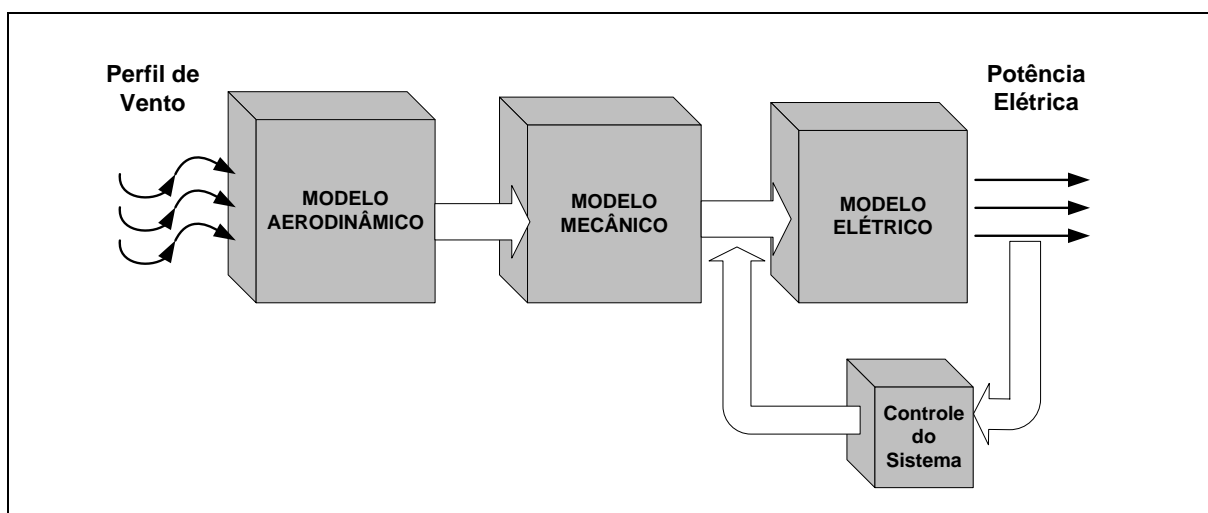


Figura 3.1- Diagrama de blocos para o sistema.

Fonte: Autoria própria.

Em um sistema de geração eólico a rotação da turbina depende do torque requisitado pelo gerador. Se a potência de saída do gerador for controlada por

conversores, pode-se escolher a rotação do conjunto turbina/gerador, a fim de se obter a máxima potência do vento. Isto se faz impondo torque no gerador, o qual é dado em função da máxima potência, determinada pela maximização do coeficiente de potência, que pode ser obtida para uma certa velocidade do vento e uma rotação correspondente. O controle em malha fechada do mesmo possui como finalidade extrair a máxima potência do vento, independente da velocidade do mesmo. Isto pode ser realizado utilizando um algoritmo que maximize o coeficiente de potência, considerando ângulo de passo nulo. Para isso, o algoritmo implementado maximiza a parcela referente ao torque, fixando referência de corrente no eixo direto igual a zero.

3.1 SISTEMA DE CONTROLE PARA A PLANTA EÓLICA

Em turbinas eólicas de velocidade variável, que empregam o uso de PMSGs, a relação entre velocidade do vento e potência extraída segue a curva apresentada na Figura 3.2. Deste modo, o controle do sistema de geração atua de acordo com as variações da velocidade do vento.

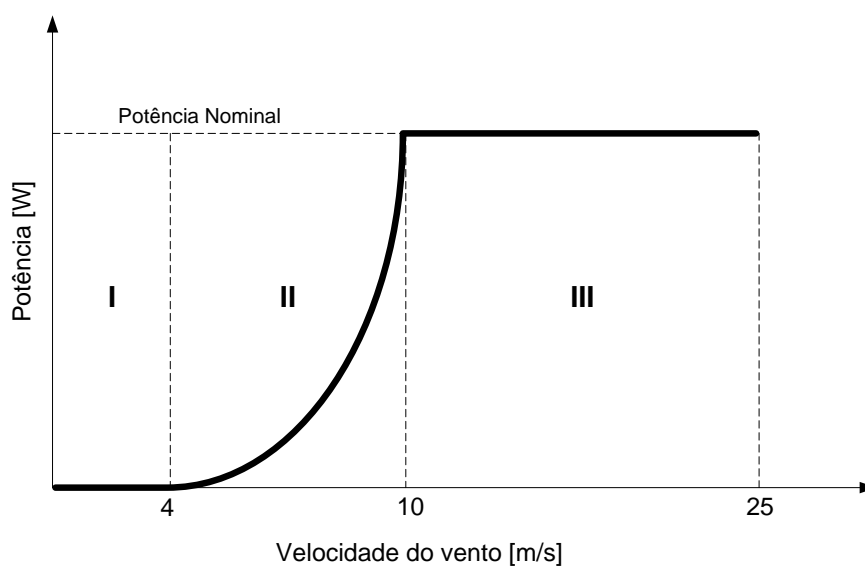


Figura 3.2 - Regiões de Operação da Turbina.
Fonte: Adaptado de (BERNARDES, 2009).

A região I determina a velocidade mínima de operação de uma turbina, geralmente entre 2 e 5m/s. A região II é onde ocorre a operação normal do sistema, na qual deseja-se obter a máxima extração de potência de acordo com o controle empregado, com técnicas de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), que se pode dar de duas maneiras, pelo controle do ângulo de passo β e pelo controle da velocidade do gerador.

O controle de passo é utilizado para regular a potência aerodinâmica extraída do vento, assim evita-se que o gerador exceda sua potência nominal, evitando possíveis danos mecânicos a toda planta eólica. O controle de velocidade é utilizado para assegurar que a máquina siga as variações de velocidade do vento a um perfil pré-definido, para se obter um máximo valor de λ . Este objetivo é conseguido através do controle do conversor de potência do lado do gerador. O conversor em sistemas eólicos tem por finalidade ajustar a velocidade de rotação do gerador. O controle do conversor gera um fasor de tensão, composto por V_d e V_q , presentes na Eq. (2.18) que descreve o modelo elétrico. Assim, o conversor do lado da máquina opera como uma fonte de tensão.

Na região III a turbina deve manter constante a velocidade da turbina, na sua potência nominal. Neste caso, o ângulo de passo β aumenta, e o coeficiente de potência irá cair para manter a potência nominal de saída constante. Em turbinas eólicas de baixa e média potência, o controle do ângulo de passo raramente é acionado, sendo só definido para o valor ideal, para este projeto não se tem um controle do mesmo, sendo este fixado em 0° .

3.1.1 Controle de Velocidade

De acordo com a Eq. (2.18) nota-se que existe um acoplamento cruzado entre os eixos “d” e “q” para o sistema, dados pelos termos $\omega_e i_q$ e $\omega_e i_d$. Para tanto, uma estratégia de controle pode ser utilizada para compensar este acoplamento (YIN et al., 2007). Logo, duas novas entradas são definidas:

$$\begin{cases} u_d = \omega_e L i_q + V_d \\ u_q = -\omega_e L i_d - i_q + V_q \end{cases} \quad (3.1)$$

Com base nos modelos, têm-se dois circuitos de corrente, que utilizam controles do tipo Proporcional/Integral (PI), dados por PI_1 e PI_2. Os controladores utilizados possuem ganhos ajustados de acordo com as constantes de tempo do sistema. Na Figura 3.2 têm-se a malha de controle, com dois *loops*, o mais interno regula a corrente e o segundo, mais externo, controla a velocidade, sendo esse último mais rápido que o anterior, ou seja, com um menor tempo integral. Tal algoritmo caracteriza o MPPT, uma vez que determina o rastreamento para se obter uma máxima potência para um perfil de velocidade do vento, gerando-se um λ ótimo. No controlador de velocidade proposto, $\Delta\omega$ é a variação da velocidade angular elétrica, dada por:

$$\Delta\omega = \omega_{eref} - \omega_e \quad (3.3)$$

em que ω_{eref} é obtido a partir do modelo da turbina (YIN et al., 2007).

Para a turbina simulada, ω_{eref} é obtido a partir da velocidade do vento com ganho 31,4. Após o controlador, os dois sinais de tensão gerados Vd e Vq , são utilizados na entrada do modelo elétrico do PMSG dado na Eq. (2.18), para simular as demais grandezas Id e Iq , Te , e e_q .

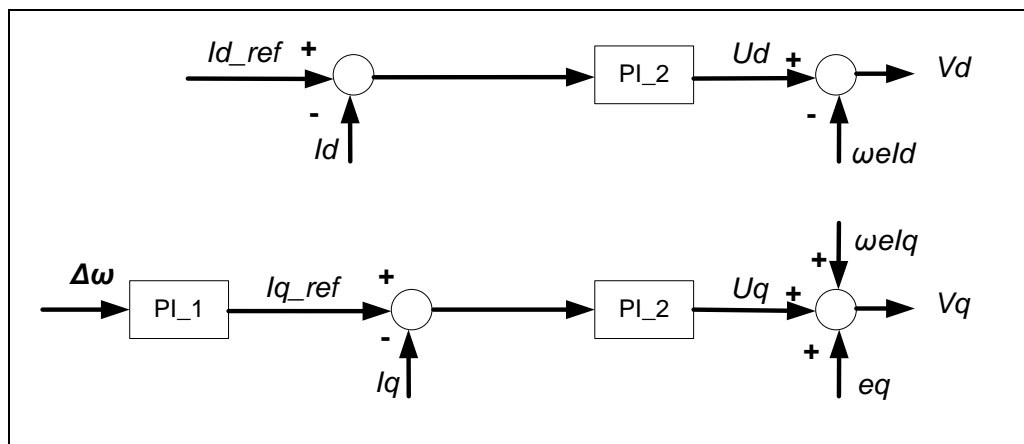


Figura 3.3 - Malha de Controle para o sistema.
Fonte: Adaptado de (YIN et al., 2007)

A partir do controle de velocidade da turbina pode-se reunir em uma mesma planta as etapas que compõem todo o sistema proposto.

3.2 MODELOS DINÂMICOS DO AEROGERADOR

Neste capítulo são apresentados os blocos implementados (“modelos”) a partir dos modelos matemáticos desenvolvidos para a simulação do comportamento mecânico e elétrico. São utilizados parâmetros de um aerogerador com potência elétrica de até 6,8 kW. Os modelos são abordados individualmente, tendo os diagramas de implementação do modelo da turbina eólica, seguidos da equação matemática final que o descreve, conforme desenvolvidas no Capítulo 2.

3.2.1 Modelo aerodinâmico para turbina eólica

O modelo aerodinâmico é composto pela etapa de conversão da energia cinética, contida em uma massa de ar, em energia mecânica que será aproveitada no eixo do gerador elétrico. A Figura 3.4, apresenta o modelo correspondente às Equações (2.9) a (2.11), nas quais se obtém a potência e torque mecânico para o referido sistema. Este modelo tem como variáveis de entrada um perfil de velocidade do vento, gerado pelo Simulink® e, a velocidade angular do eixo do aerogerador, realimentada pelo modelo mecânico.

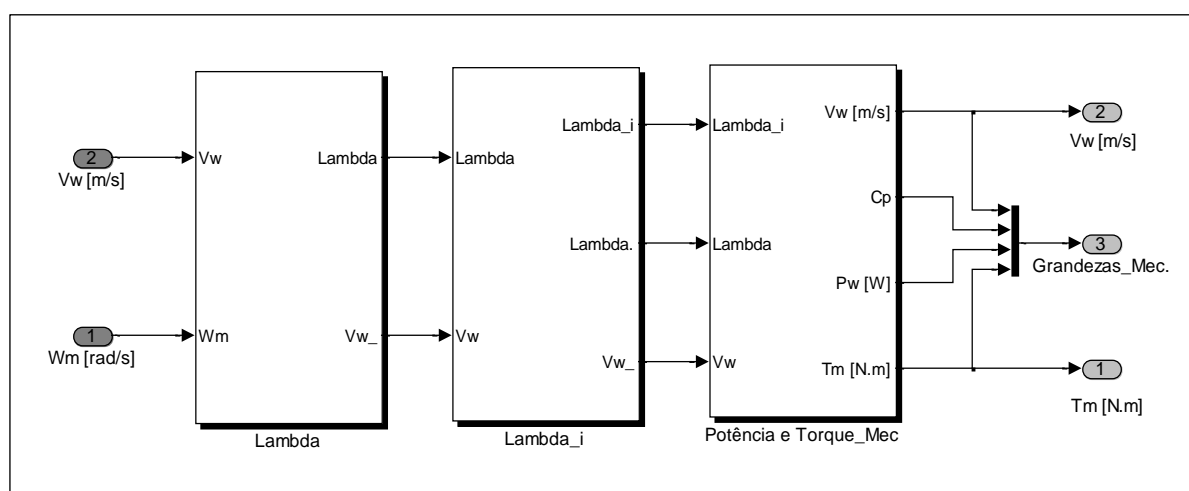


Figura 3.4 - Modelo para obtenção de potência e torque da turbina eólica no Simulink®.

Após se ter um perfil de velocidade do vento incidente, se obtém a razão entre as velocidades do vento e a das pás no aerogerador λ , também conhecida

como TSR, aqui nomeada como a variável “Lambda”, usada para se determinar a variável “Lambda_i”, a qual será usada na obtenção do coeficiente de potência C_p .

A potência e torque mecânico, a partir da velocidade do vento incidente, são então determinadas. Tal operação pode ser visualizada na Figura 3.5, na qual se obtém a potência mecânica gerada pelo vento para este modelo.

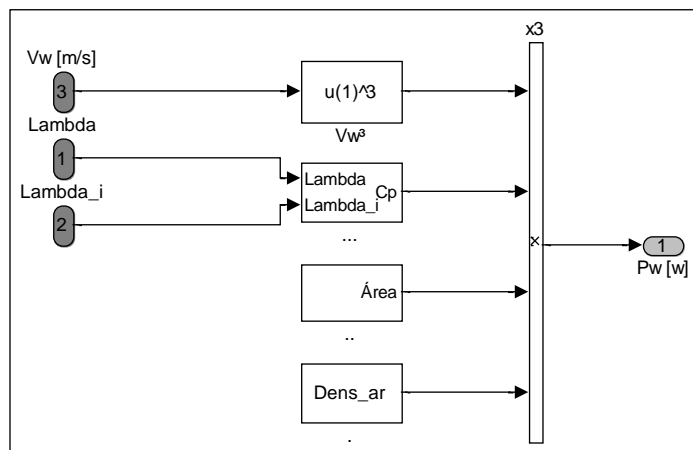


Figura 3.5 - Modelo do cálculo de potência da turbina eólica no Simulink®.

A Equação (2.9) é empregada em tal modelo:

$$P_w = \frac{\rho A V_w^3}{2} C_{p(\lambda, \beta)} \quad (2.9)$$

O torque mecânico disponível, também é obtido em função da velocidade do vento e de C_p .

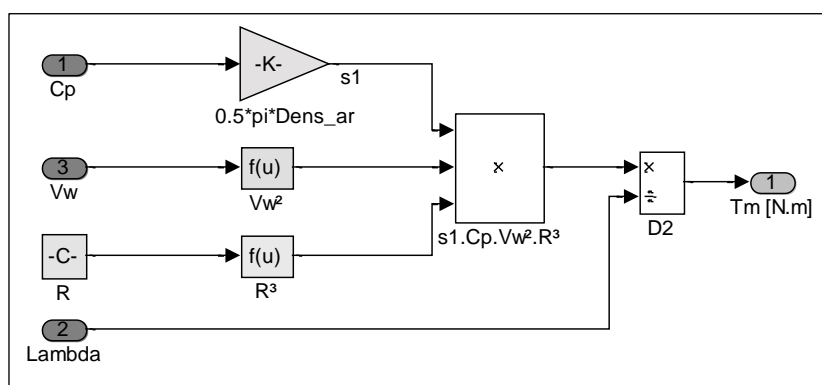


Figura 3.6 - Modelo para o cálculo do torque da turbina eólica no Simulink®.

A Equação (2.11) descreve tal modelo:

$$T_m = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V_w^2 C_{p(\lambda, \beta)} \quad (2.11)$$

Após determinados o valor de potência e torque mecânicos disponíveis instantaneamente em uma massa de ar em movimento, a velocidade angular no eixo de rotação que compreende tal movimento é obtida.

3.2.2 Modelo mecânico

Este modelo representa o comportamento da velocidade angular da turbina eólica, em função dos torques elétrico e mecânico, conforme apresentado na Equação (2.13).

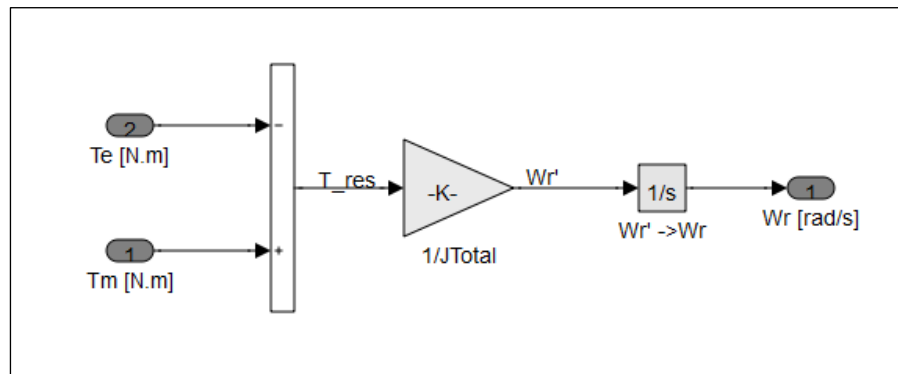


Figura 3.7 - Determinação da velocidade angular no eixo da turbina eólica.

O modelo é regido pela Equação a seguir:

$$T_{gT} - T_g = J_{T+g} \dot{\omega}_g \quad (2.13)$$

Para esta simulação é desprezado o efeito do torque de sombreamento. Este representa uma oscilação no torque gerado devido ao movimento das pás na passagem da mesma pela torre da turbina em sua extremidade inferior. Esta simplificação é aplicada uma vez que tal turbina possui uma potência nominal baixa, e portanto o torque de sombreamento possui efeito reduzido sobre o torque resultante final da turbina.

3.2.3 Modelo elétrico para o PMSG

A partir dos modelos da seção 4.2 obtém-se a energia mecânica disponível no eixo do aerogerador. Uma vez que este eixo é também o eixo do rotor do gerador, pode-se determinar as grandezas elétricas resultantes para um dado valor de velocidade angular no eixo da turbina. Nesta etapa, apresenta-se a obtenção das correntes Id e Iq no estator do PMSG, bem como do torque e potência elétrica e, das tensões Vd e Vq a partir de controladores PI. Tal processo pode ser visualizado na Figura 3.8.

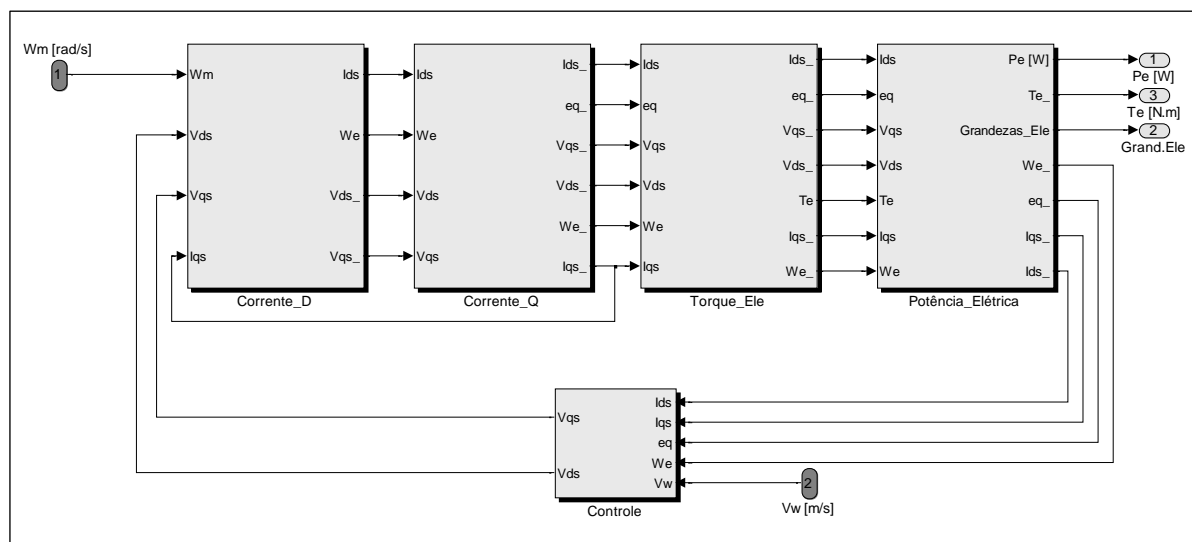


Figura 3.8 - Modelo elétrico da turbina eólica no Simulink®.

Tem-se como variável de entrada no modelo, a velocidade angular mecânica resultante no eixo do gerador, obtida no modelo anterior. Também, determina-se os parâmetros elétricos para o gerador simulado. A partir disto, é possível obter as correntes Id e Iq , de acordo com as equações do modelo anteriormente determinadas, conforme pode ser visto na Figura a seguir.

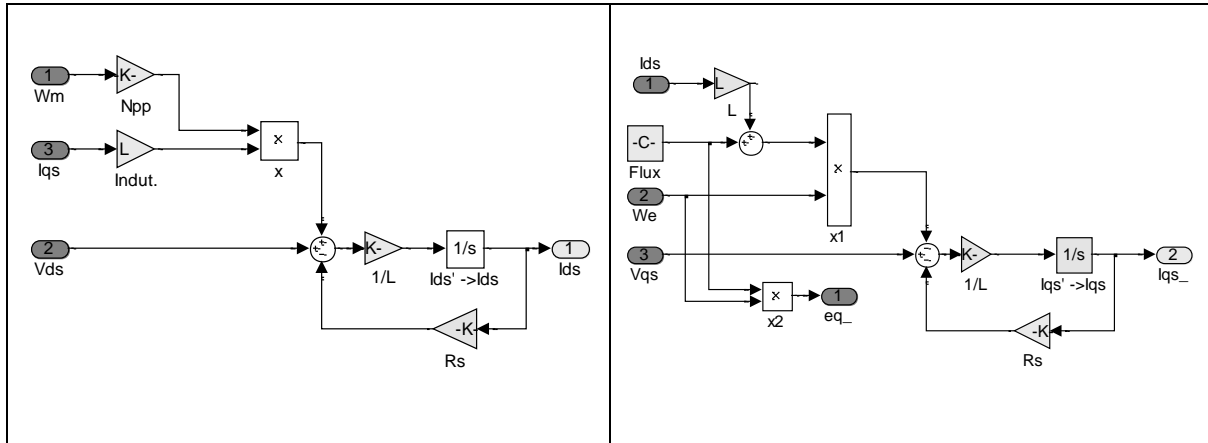


Figura 3.9 - Modelo para as correntes I_{ds}/I_{qs} no PMSG para turbina eólica no Simulink®.

O modelo da Figura (4.6) é descrita pela Equação (2.18).

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R_s i_d}{L_d} + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s i_q}{L_q} - \frac{\omega_e}{L_q} (L_d i_d + \psi_{pm}) + \frac{V_q}{L_q} \end{cases} \quad (2.18)$$

As tensões V_d e V_q são utilizadas na determinação de I_d e I_q , e também para determinar o torque e potência elétrica no estator do PMSG. Assim, é obtida a tensão e_q , oriunda do circuito equivalente para o PMSG. O torque elétrico é determinado a partir de I_q , uma vez que as indutâncias L_d e L_q são iguais, devido ao gerador possuir rotor com polos salientes. A corrente I_{ds} é inicializada em zero, para se obter a orientação de campo na sincronização dos eixos “d” e “q” e, toda a magnitude da corrente no estator é dada em I_{qs} . O sinal das equações de corrente, referentes a parcela de ω_e é invertido, uma vez que o sentido das correntes são para o modelo do gerador e não motor.

A estrutura do modelo, tendo-se o controle de velocidade do sistema é apresentada na Figura 3.10.

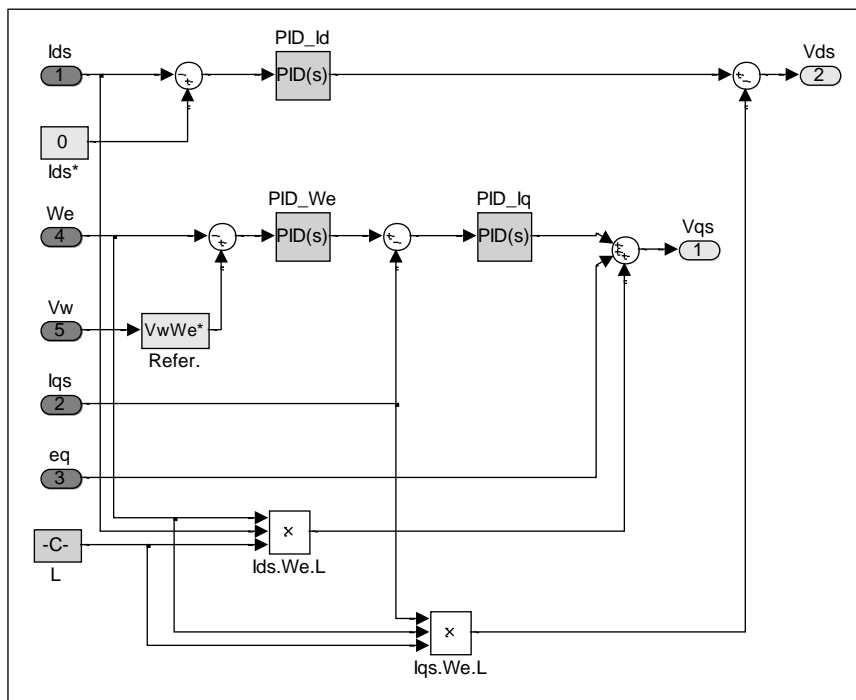


Figura 3.10 - Modelo do Controle de Potência elétrica no PMSG no Simulink®.

Os modelos de potência e torque elétrico são apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12, que descrevem respectivamente as Equações (2.22) e (2.23).

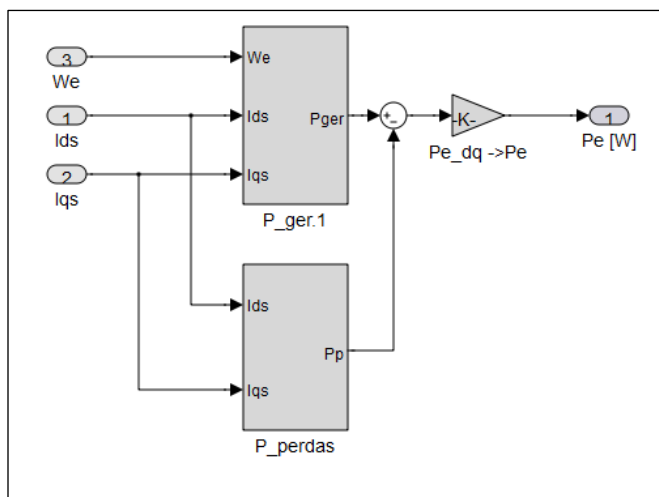


Figura 3.11 - Modelo para Potência elétrica no PMSG no Simulink®.

A Equação (4.1) descreve este modelo, sendo omitida a parcela de potência referente à taxa de variação de energia armazenada na indutância do gerador. No modelo tem-se a diferença entre as potências geradas, a partir do modelo mecânico e, da potência perdida, resultante da resistência estática do gerador.

$$P_e = \frac{3}{2} (R_s(i_d^2 + i_q^2) + \omega_e(\psi_d i_q - \psi_q i_d)) \quad (4.1)$$

O torque elétrico é determinado a partir de I_q , uma vez que as indutâncias L_d e L_q são iguais, sendo o mesmo descrito pela Equação (4.2).

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{Np}{2} (\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (4.2)$$

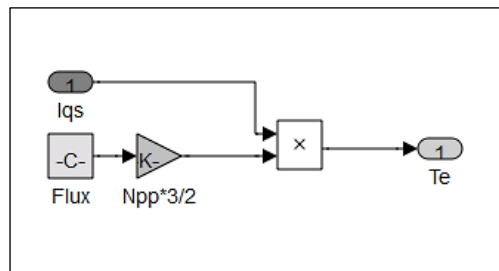


Figura 3.12 - Modelo para o torque elétrico resultante no PMSG.

O modelo dinâmico completo, incluindo os modelos aerodinâmico, mecânico e elétrico, é apresentado na Figura 3.13 a seguir.

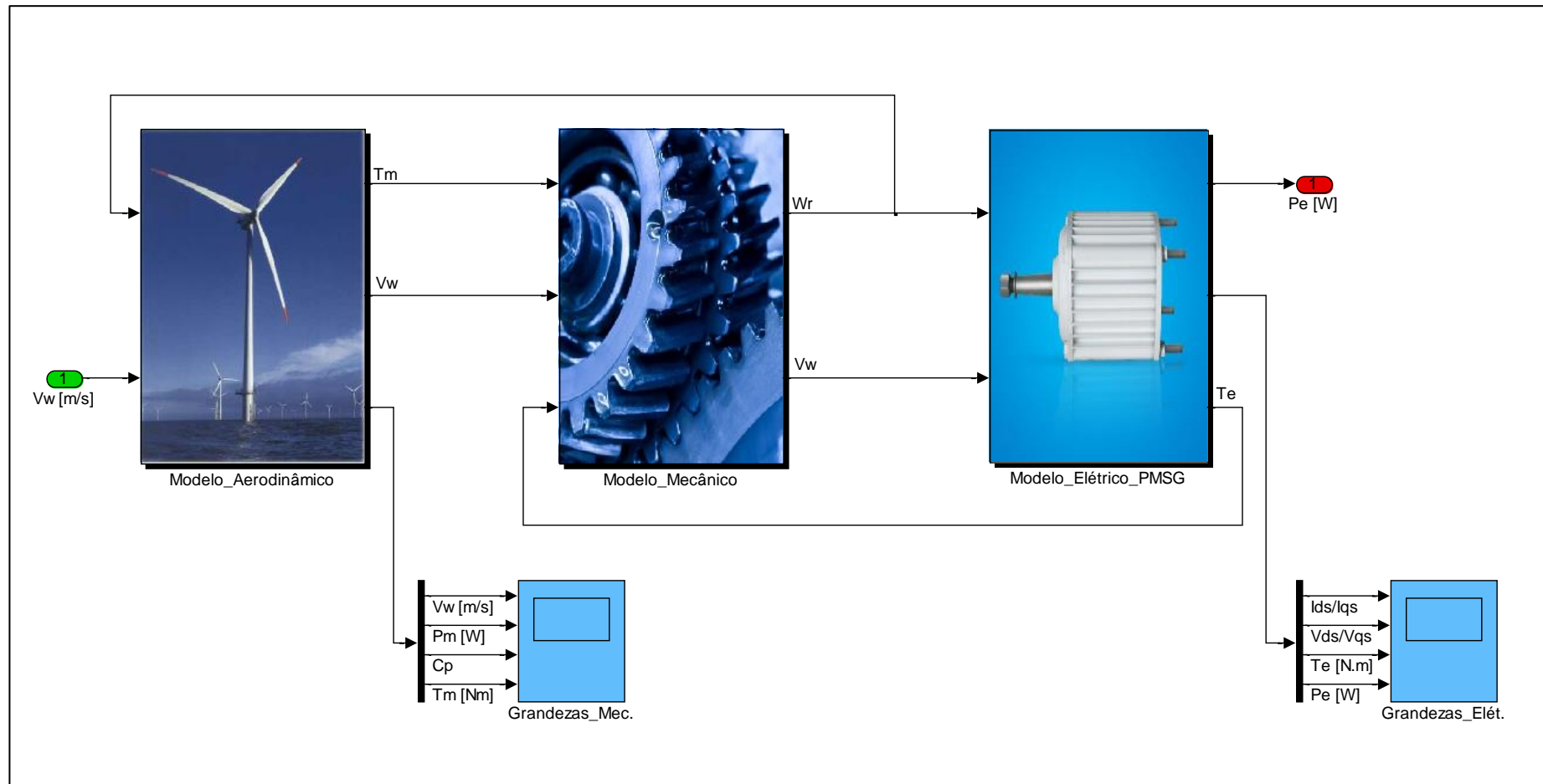


Figura 3.13 - Diagrama de blocos do modelo da turbina implementado no Matlab/Simulink®.

4. RESULTADOS SIMULADOS OBTIDOS

A partir dos diagramas obtidos, pode-se simular o comportamento da turbina eólica referida. Um perfil de vento de duração de 120s é simulado, deste modo obtém-se um valor de C_p para cada valor de velocidade do vento, conforme é apresentado na Figura 4.1.

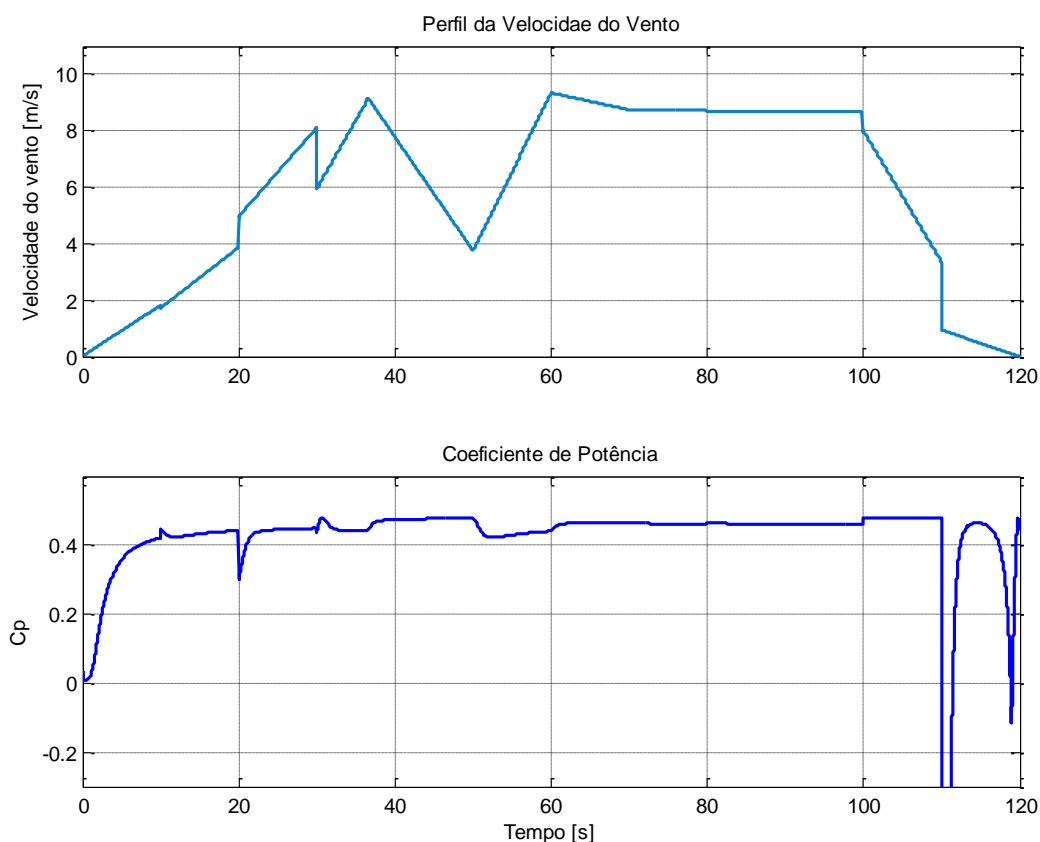


Figura 4.1 - Perfil de vento e C_p simulados.

O valor de C_p máximo obtido fora de 0,45, o que significa que de toda a energia cinética disponível dos ventos, apenas 45% desta pode ser aproveitada no erogerador. O nível de C_p mantém-se praticamente constante ao longo da simulação.

Com o rastreamento do ponto de máxima potência ou *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), que é baseado na relação de velocidade de ponta das pás λ , a velocidade da turbina ω_T é ajustada conforme a velocidade do vento nota-se apenas uma brusca variação quando o perfil de velocidade do vento é levado para

zero, em torno de 110s. Neste instante o valor de C_p é negativo, conforme observado na Figura, devido à inércia da máquina.

A velocidade angular no eixo da turbina é apresentada na Figura 4.2, nota-se que a potência gerada possui proporcional dinâmica.

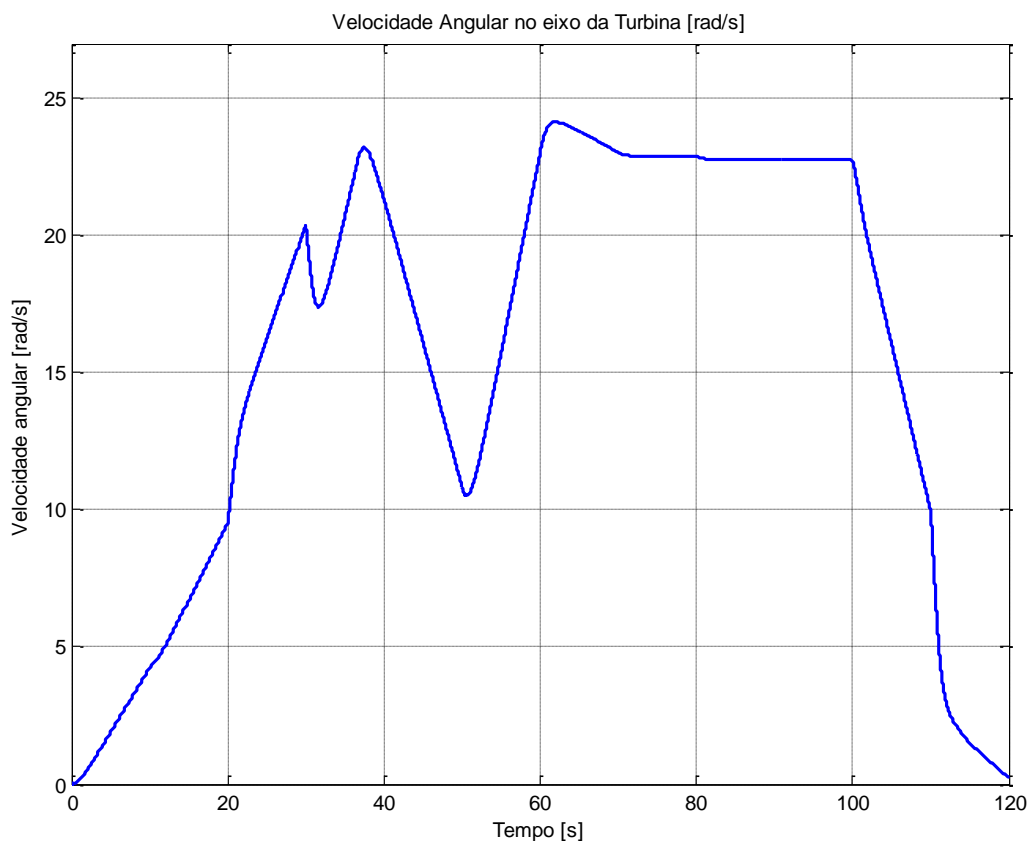


Figura 4.2 – Variação da velocidade ang. Mecânica no eixo da turbina.

A potência mecânica obtida no rotor do aerogerador possui dinâmica dependente do perfil de velocidade do vento. Para Uma velocidade de vento de 10m/s uma potência disponível no eixo da turbina de 5,3 kW, cerca de 45% da energia disponível na massa de ar, conforme é apresentado na Figura 4.3, que resulta em um torque mecânico de valor nominal 230N.m.

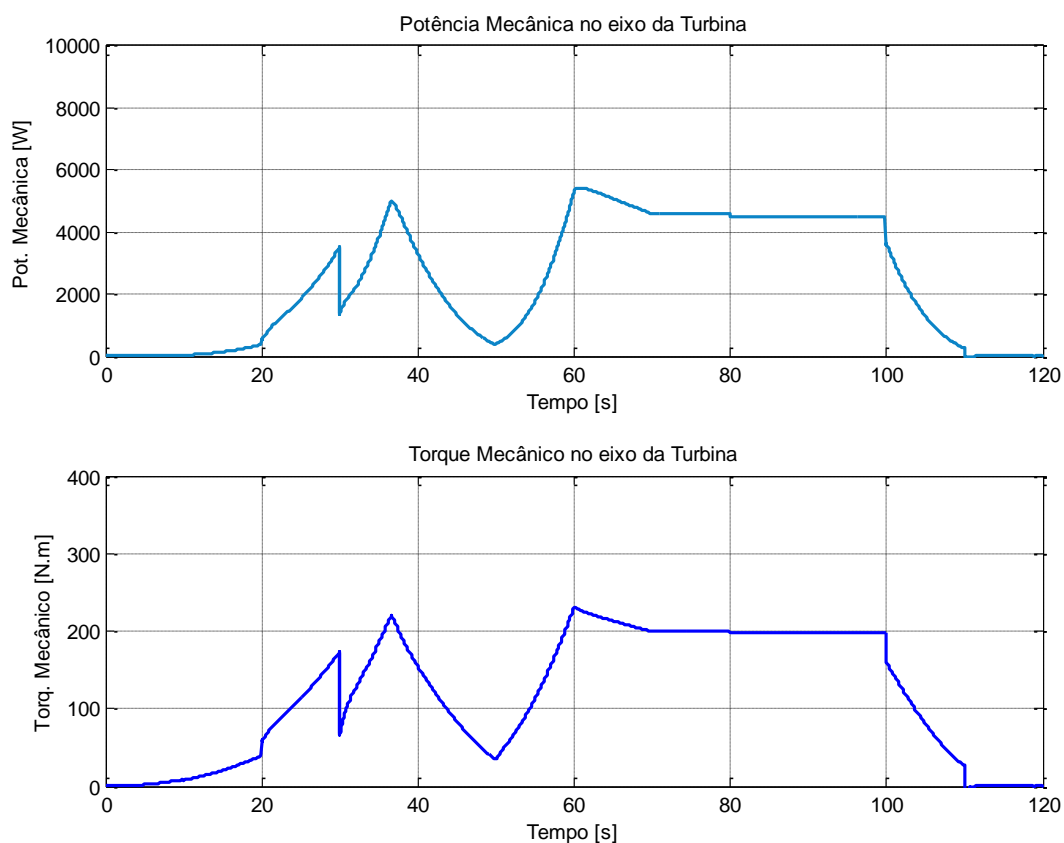


Figura 4.3 - Potência e Torque mecânico simulado.

A partir dessas grandezas mecânicas, obtém-se os valores das grandezas elétricas do sistema. Os valores de corrente e tensão no estator do gerador, são apresentados nos gráficos dados na Figura 4.4 a seguir.

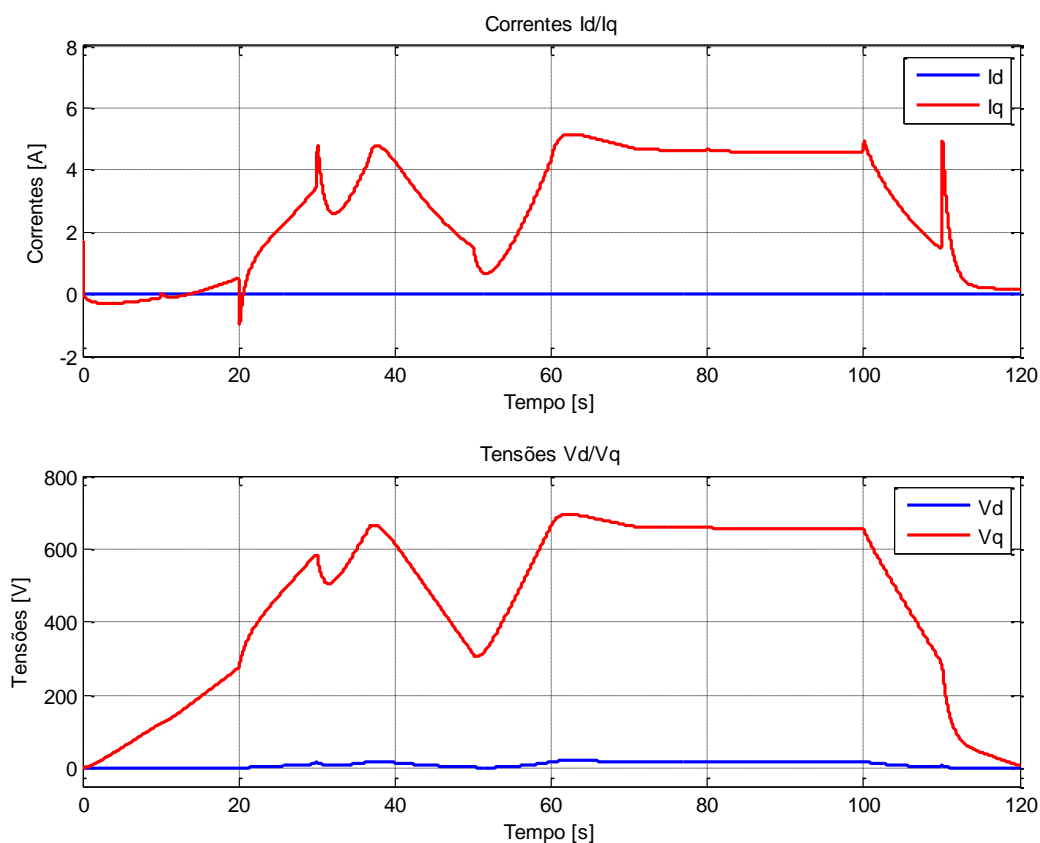


Figura 4.4 - Corrente e tensão simuladas no estator do PMSG.

A corrente elétrica no eixo q para uma velocidade no eixo da turbina de 10 m/s foi de 4,6 A, com uma tensão disponível no eixo q de 653 V, e de 17 V para o eixo d . O que resulta em uma potência elétrica de 5,3 kW. Por meio dos gráficos acima, traça-se para fins de comparação uma superposição das potências elétricas e mecânicas e também para os respectivos torques, dadas na Figura 4.5 a seguir.

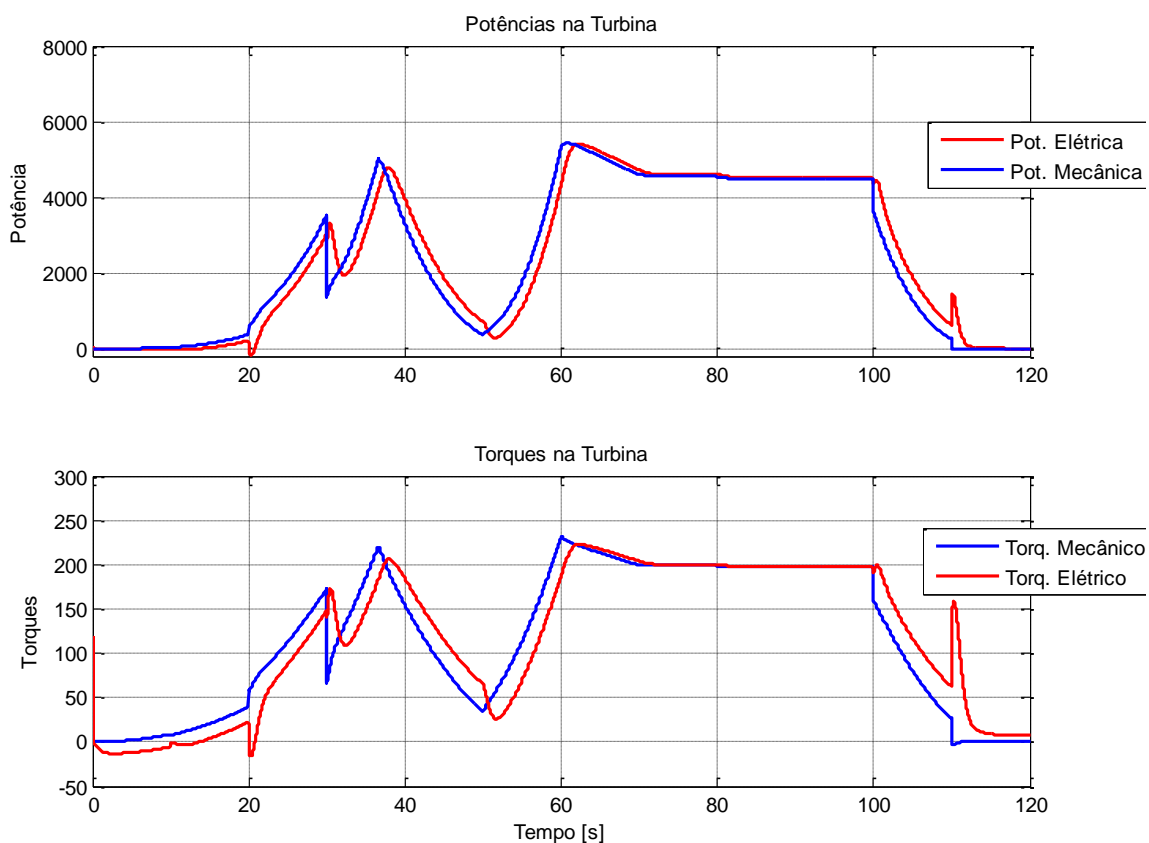


Figura 4.5 - Superposição das correntes e torques do modelo simulado.

De acordo com os gráficos obtidos, fica visível a dinâmica existente entre os modelos mecânicos e elétricos, resultante da inércia do mesmo, devido aos instantes de variação do perfil de vento, em períodos transitórios de aceleração e desaceleração das máquinas. Também como forma de estudo, é feito um diagrama para projeto de emulação de uma turbina eólica em bancada, a fim de se pensar em futuros trabalhos.

4.1 Proposta de uma bancada de emulação para uma turbina eólica

A partir de um sistema de emulação é possível analisar fisicamente o comportamento dos sistemas mecânico e elétrico envolvidos. Para emulação do sistema de conversão eólico-elétrico discutido até o momento, faz-se necessário o uso de sistemas de acionamento que utilizam semicondutores de potência, como retificadores e inversores. Estes são também responsáveis pelo controle e conexão com a rede ou uma carga isolada. O esquema elétrico para uma topologia que emprega retificador e inversor PWM é apresentado na Figura 5.6 a seguir. Neste diagrama um sistema em bancada é utilizado para emular o comportamento da turbina. O sistema é composto de uma máquina de indução trifásica, controlada em tempo real para realizar o acionamento mecânico e simular a dinâmica do vento de uma turbina eólica. O seu acionamento é efetuado através de um conversor de frequência trifásico modelo CFW-11 (do fabricante WEG S/A), que pode ser comandado por sinais analógicos provenientes de um computador, de acordo com o perfil de vento emulado.

Uma máquina síncrona a imã permanente atua como gerador. Seu eixo será diretamente acoplado ao eixo da primeira máquina, que simula a turbina. Sua conexão com uma carga isolada é feita através de um retificador e inversor PWM interligados por um barramento CC. A implementação dos controles desses conversores não está no escopo deste trabalho.

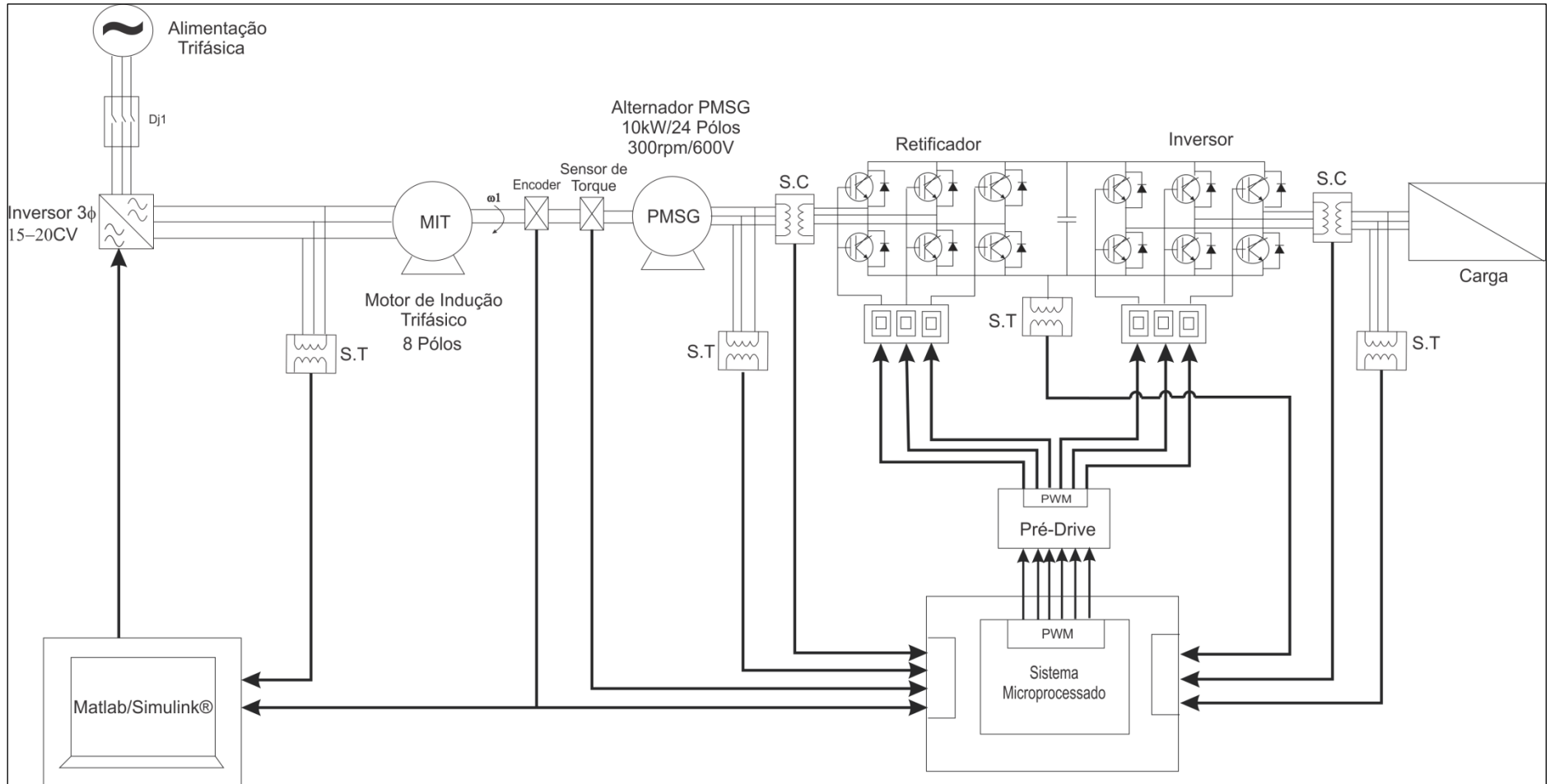


Figura 4.6 – Diagrama de sistema em bancada para emulação de sistema eólico.

A corrente elétrica produzida pelo gerador eólico é conduzida diretamente a um retificador PWM, constituído por seis IGBTs, e nele é empregado um sistema de controle responsável por ajustar a corrente do estator do gerador e realizar o seguidor de máxima potência (MPPT). O retificador é conectado, através de um barramento CC, a um inversor PWM, também composto por seis IGBTs. O inversor é responsável por efetuar a conversão CC-CA.

Por meio da ferramenta do Matlab/Simulink® pode-se gerar o perfil de vento desejado, também como turbulências ou efeitos mecânicos a qual uma turbina eólica está submetida. Ainda, com o uso do Matlab/Simulink® e um sistema de aquisição de dados pode ser implementado o modelo do conjunto completo do sistema proposto, incluindo a leitura dos dados, determinação de constantes e parâmetros, implementação do modelo da turbina, do modelo dinâmico do conjunto, controle da máquina conforme a turbina simulada.

5. CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

A modelagem desenvolvida aqui se mostrou uma ferramenta interessante de acordo com os resultados obtidos, para diferentes perfis de velocidade de vento simulados. Uma vez que, em diversos referenciais não se apresenta o modelo completo para um sistema eólico nesta aplicação de potência, assim, este apresenta a versatilidade de se projetar controladores específicos nesta faixa de potência, aplicados a pequenos consumidores. O modelo possui a versatilidade de ter suas variáveis de entrada modificadas de acordo com as especificações de aerogerador que se deseja simular, desde potência nominal a características mecânicas.

Para verificação dos conceitos, determinação dos modelos do sistema proposto e validação dos resultados obtidos, utilizou-se publicações em periódicos e anais de eventos científicos como forma de análise. Como ferramenta de desenvolvimento e simulação, utilizou-se o *software Matlab/Simulink*, uma vez que a Universidade possui licenças acadêmicas e de pesquisa do mesmo. Este software é utilizado, pois apresenta maior facilidade na manipulação de modelos matriciais quando comparado aos demais existentes e, além disso, a ferramenta *Simulink* possui a possibilidade da visualização gráfica dos modelos, facilitando a interpretação do modelo.

A ferramenta desenvolvida pode ainda ser empregada em um sistema de emulação de um aerogerador em tempo real, em uma bancada experimental. Nesta bancada, paralelamente a essas simulações, pode ser feito também o acionamento controlado de uma máquina elétrica com a finalidade de produzir no eixo do gerador um movimento similar ao que seria produzido por uma turbina real. Assim, a análise preliminar por meio da ferramenta de simulação computacional torna possível a pesquisa em bancada minimizando as adversidades, riscos e custos adicionais de projeto. Ainda, uma bancada com tais características pode ser realizado o estudo e projeto de controladores para sistemas eólicos com PMSGs a serem empregados em uma turbina real.

Em trabalhos futuros, pretende-se desenvolver uma bancada de emulação de turbina em tempo real, que emule um aerogerador de potência nominal de até 10KW. Nesta bancada, técnicas de controladores para conversores

comerciais, poderão ser analisadas em tempo real, com o uso de algoritmos implementados no ambiente Simulink, executados em um microcomputador.

6. REFERÊNCIAS

A. F. BONELLI. **Uma Proposta para Modelagem Laboratorial de Turbinas Eólicas por Motores de Corrente Contínua**. [S.l.]. 2011.

ADEGAS, Fabiano D. **Análise, Simulação e Implementação de um Conversor de Baixa Potência com MPPT e PFC para Aerogeradores em Sistemas Isolados**. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre, p. 175. 2006.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 199. 2002.

ANEEL. Portal Brasil. Portal Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/>>. Acesso em: 26 Julho 2012.

AS Energias Renováveis. As Energias Renováveis, 2012. Disponível em: <<http://www.dforcesolar.com/pt/>>. Acesso em: 03 Agosto 2012.

ASSOCIATION EUROPEAN WIND ENERGY. **The Economics of Wind Energy**. [S.l.]. 2009.

BAZZO, Thiago D. P. M. **Implementação de controle vetorial em geradores assíncronos**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 90. 2007.

BERNARDES, Thiago A. **Análise e Controle de gerador Síncrono a Imã Permanente Aplicado a Sistema de Conversão de Energia Eólica**. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, RS. Santa Maria. 2009.

CCEE, Câmara D. C. D. E. E.-. CCEE. [S.l.]. 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA EÓLICO, Salvo Brito. CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. [S.l.], p. 15. 2011.

CIMPOERU, Andreea. **Encoderless Vector Control of PMSG for Wind Turbine Applications**. Institute of Energy Technology. Aalborg. 2010.

COUNCIL, Global W. E. **Global Wind 2008 Report**. [S.l.], p. 60. 2009.

COUNCIL, Global W. E. **Global Wind Report - Annual Market update 2010**. [S.I.]. 2010.

DANTAS, Guilherme; LEITE, André. **Os custos da Energia Eólica Brasileira**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro. 2009.

ENBLIN, C; HAHN, B. Wind Energy Report Germany. [S.I.]. 2003.

ENERSUD- Energia Limpa. **Enersud**. A dez anos pensando e construindo soluções em energia limpa ao seu alcance., 2011. Disponível em: <<http://enersud.com.br/>>. Acesso em: 4 Novembro 2011.

EQUIPE DE P&D CEEE. **Análise das Principais Tecnologias Utilizadas em Geração Eólica**. UFSM. Santa Maria, p. 66. 2006.

ERSE, Entidade R. D. S. E.-. Informação sobre Produção em Regime Especial. ERSE. [S.I.]. 2011.

EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION, Greenpeace. Wind Force 12. [S.I.]. 2003.

FERNANDO ANTÔNIO, Fernando M. **Geração Distribuída versus Centralizada**. Instituto Politécnico de Viseu. [S.I.], p. 15. 2008.

FONTES Renováveis Eólica-CERPCH. CERPCH, 2011. Acesso em: 16 Setembro 2011.

GWEC, Global W. E. C.-. **Global Wind Statistic 2011**. [S.I.]. 2011.

JUNIOR, Cirilo. Folha de São Paulo. Folha de São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br>>. Acesso em: 06 Agosto 2012.

LAYTON, Julia. Sistema FIEC: **Como Funciona a Energia Eólica**. Portal da FIEC, 2011. Disponível em: <http://www.fiec.org.br/artigos/energia/energia_eolica.htm>. Acesso em: 4 Novembro 2011.

MARQUES, Jeferson. Turbina eólicas: **Modelo, Análise, e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 158. 2004.

MARTINS, M., A. R. Z. . P. H. **Wind Turbine Emulator for Energy Quality Studies.** 9 Congresso de Eletrônica de Potência. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 319-324.

NUNES, Seixas, P. F. . C. P. C. . S. S. R. **Wind Turbine Simulator Using a DC Machine and a Power Reversible Converter.** Proc. Internacional Conference Electrical, v. 3, p. 536-540, Março 1993.

PAVINATTO, Eduardo F. **Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica.** 2005. [s.n.], Rio de Janeiro, 2005.

RASILA, Mika. **Torque and Speed Control of a Pitch Regulated Wind Turbine.** Charlmes University of Tecnology. Gotemburgo. 2003.

ROCHA, Rafael V. **Simulação de um Aerogrador em uma Bancada Experimental.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 80. 2008.

ROSSI, Pedro H. J.; OLIVEIRA, Cássia P. D. **Centro de Energia Eólica.** CEE, 2012. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=26>>. Acesso em: 06 Agosto 2012.

WEIHAO HU, Yue W. E. Z. W. **Development of Wind Turbine Simulator for Wind.**

YIN, Ming et al. **Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration.** IEEE, 2007.