

Modelagem e controle do gerador síncrono usado no Aerogerador de três pás modelo AGW 110/2.1 para conversão de energia com velocidade de 4 m/s

José Adilson Silva de Jesus¹

RESUMO

A modelagem e simulação de aerogeradores e o conhecimento das condições dinâmicas do vento, são fatores primordiais para a implantação de parques e fazendas eólicas. Fato que costumeiramente leva fabricantes a investirem apenas em máquinas de grande potência. Máquinas estas que operam com velocidades superiores a 5 m/s. Neste trabalho foi selecionado um aerogerador de 2.1 MW para modelar o gerador eólico para a produção de potência elétrica para trabalho em uma microrede, instalado em uma localidade do município de Cosmópolis. O controle aplicado e a dinâmica solicitada pela máquina justifica o desenvolvimento de máquinas de pequeno porte para atendimento de demandas localizadas fora da área de atuação dos fornecedores de energia elétrica e a produção de máquinas menores para comercialização e usuários e futuros produtores de energia.

Palavras chaves: Controle, Smart grid, Sistema dinâmicos, Cogeração

ABSTRACT

The modeling and simulation of aerogenerators and knowledge of the dynamic wind conditions are fundamental factors for the implementation of wind farms and farms. A fact that usually leads manufacturers to invest only in high power machines. These machines operate at speeds greater than 5 m / s. In this work, a 2.1 MW wind turbine was selected to model the wind generator for the production of electrical power to work in a micro-grid, installed in a locality of the municipality of Cosmopolis. The applied control and the dynamics requested by the machine justify the development of small machines to meet demands located outside the area of activity of electric power suppliers and the production of smaller machines for commercialization and users and future producers of energy.

Keywords: Control, Smart grid, Dynamic system, Cogeneration

¹ Mestre em Engenharia de Automação – Sistemas de Controle, Pelo Instituto Federal de São Paulo - IFSP.
Email:jj.adilson@bol.com.br; jose.jesus@sp.senai.br

1. INTRODUÇÃO

Tendo em consideração o desenvolvimento tecnológico no âmbito dos sistemas de conversão de energia eólica, este artigo apresenta e descreve os principais componentes do gerador eólico, tendo em atenção à modelagem de um aerogerador e seu sistema topológico. Para tal, é dada especial atenção às configurações e à operação dos sistemas de velocidade variável e estabelecida as condições de funcionamento do mesmo, sendo também referenciados domínios de aplicação e potenciais benefícios técnicos e econômicos quando se aplica a modelagem a tais sistemas antes de sua implantação em parques eólicos.

Os diferentes mecanismos de controle da produção de potência e sua posterior transmissão para a rede elétrica são também abordados ao longo deste artigo. Dentro destes mecanismos de controle iremos nos referir aos métodos de controle das forças aerodinâmicas que afetam o rotor do aerogerador contribuindo assim para a limitação da produção de potência na ocorrência de ventos fortes de modo a evitar danos à máquina. Desta forma foi utilizado como área para possível instalação de um aerogerador, uma região do município de Cosmópolis, no interior do estado de São Paulo.

Atualmente, o Brasil produz cerca de 9,5 gigawatts de energia por ano através da fonte eólica. Esse montante corresponde a cerca de 4% da matriz energética brasileira. São 167 parques eólicos instalados no Brasil (dados relativos a 2014). A região Nordeste é a que mais gera energia eólica no Brasil, sendo o Rio Grande do Norte e a Bahia os maiores estados produtores deste importante tipo de energia renovável.

2. Histórico da energia eólica no mundo

No final do século XIX, o rápido crescimento do consumo de eletricidade motivou a aplicação dos princípios básicos de funcionamento dos moinhos de vento ao aproveitamento da energia eólica para a produção de energia elétrica. O movimento do vento, através de um gerador, produz energia elétrica, mas é necessário agrupar as turbinas em parques eólicos, concentrações de aerogeradores, fundamentais para que a produção de energia se torne rentável. Contudo, no que diz respeito à alimentação de localidades remotas e distantes da rede de transmissão, estes podem também ser usados isoladamente. É possível ainda a utilização de

aerogeradores de baixa tensão quando se trata de requisitos limitados de energia elétrica. Apesar das fontes de energia convencionais cobrirem grande parte das necessidades energéticas dos países desenvolvidos, a produção de energia eólica tem aumentado significativamente. Além disso, este tipo de produção energética, pode ser considerada uma das mais promissoras fontes naturais de energia da atualidade. Isto deve-se ao fato de ser renovável, ou seja, não se esgota, limpa, amplamente distribuída globalmente e é utilizada para substituir fontes de combustíveis fósseis, auxiliando assim na redução do efeito estufa.

Em áreas geográficas isoladas e com poucos recursos energéticos, esta surge como uma possibilidade bastante interessante para substituir parcialmente a produção convencional de energia. Os sistemas de aproveitamento de energia eólica modernos podem ser classificados como sistemas de pequena dimensão, sistemas híbridos de média dimensão ou sistemas de grande dimensão ligados à rede, dependendo sempre das suas dimensões e aplicações. Os modernos aerogeradores são divididos nas seguintes partes, de acordo com a Figura 1.

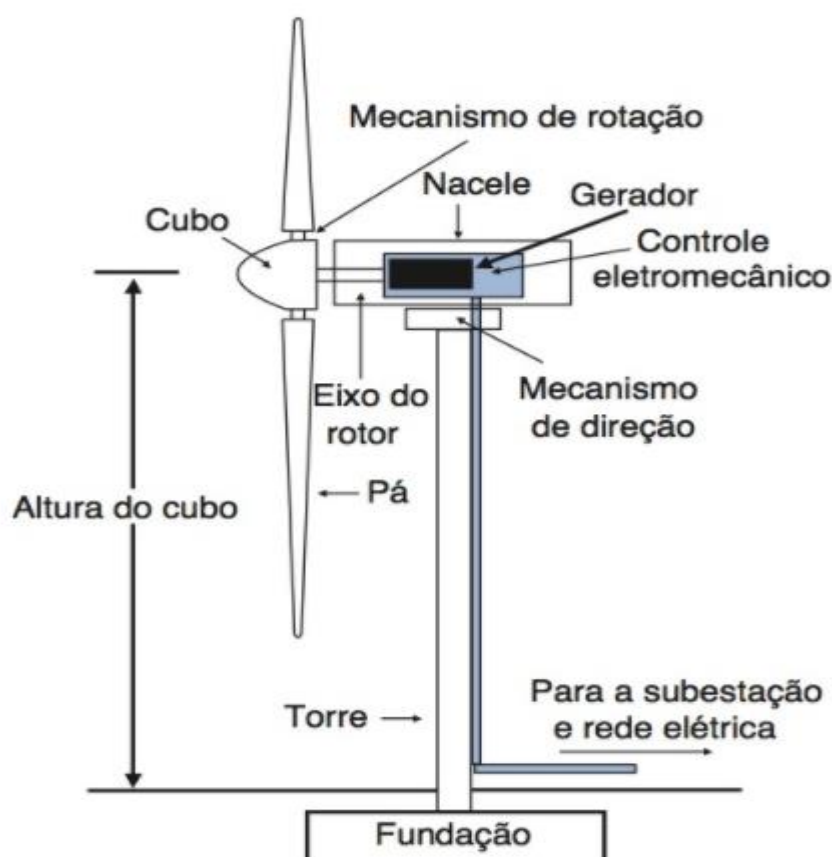


Figura 1: Partes do aerogerador

3. Vento e circulação atmosférica

A análise dos ventos foi feita na cidade de Cosmópolis, no sítio localizado nas coordenadas: Latitude: -22.6462, Longitude: -47.1967, 22° 38' 46" Sul, 47° 11' 48" Oeste. O gráfico gerado, através da leitura de um anemômetro localiza a uma altura de 40 metros é observado na Figura 2.

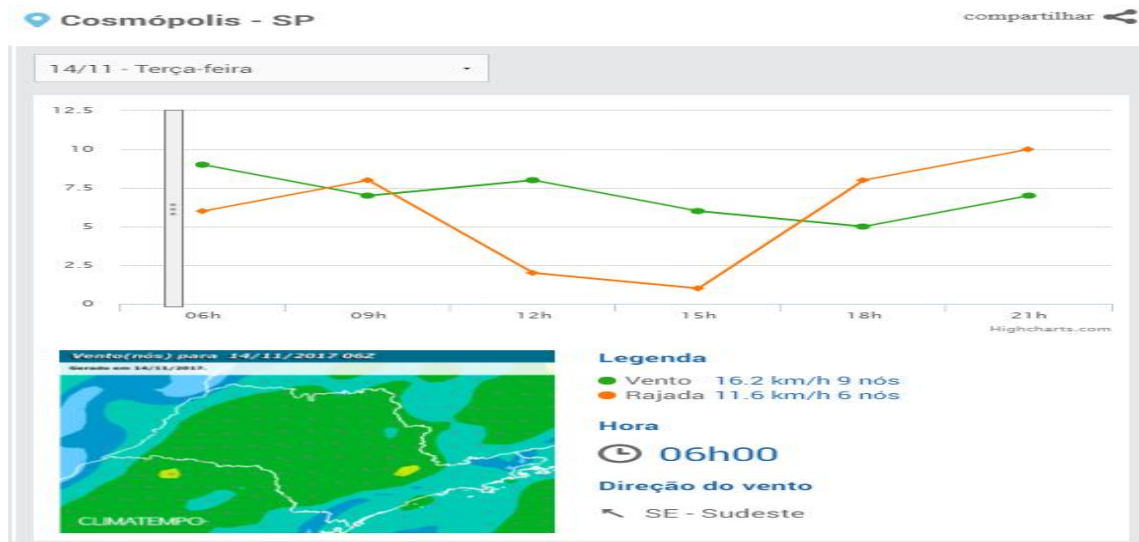


Figura 2: Velocidade do vento

Para verificar a uniformidade do vento na região, foi solicitado a Meteoblue um gráfico das leituras da velocidade do vento entre os meses de janeiro a setembro de 2017 e com isso ter a media da densidade de potência gerada no sítio para um aerogerador do tipo AGW 110/2.1. O gráfico para o período é vista na Figura 3.

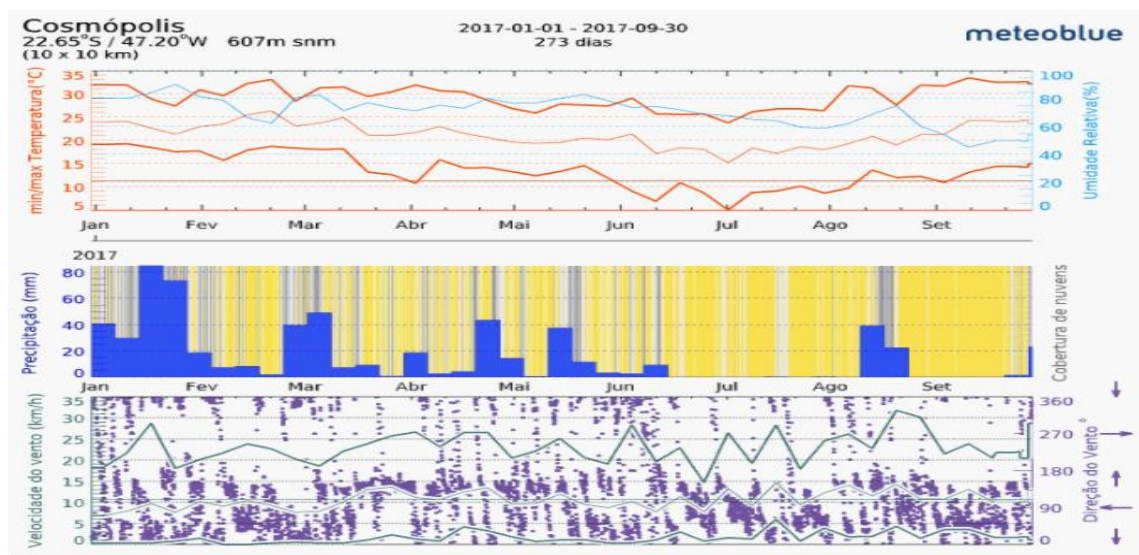


Figura 3: Média das Velocidades

4. Potência eólica disponível e utilizável

Os aerogeradores AGW possuem controle ativo do ângulo de passo das pás e rotação variável do rotor, com um gerador síncrono de ímãs permanentes e acoplamento direto com o rotor, sem multiplicador de velocidades. A aerogerador é vista na Figura 4.



Figura 4: Aerogerador AGW 110/2.1

Através da turbina eólica, a energia cinética contida no vento é convertida em energia mecânica pelo giro das pás do rotor e transformada em energia elétrica pelo gerador. A turbina eólica se encontra inserida numa camada da atmosfera, acima dos pontos de rugosidade do terreno, onde esta característica física tenha a mínima interferência sobre a ação do vento sobre as pás do aerogerador. A potência P contida no vento fluindo perpendicularmente com velocidade v através de uma área A que pode representar a área de interceptação das hélices de uma turbina eólica, ρ é a densidade do ar é dada por:

$$P = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * v^3 \quad (1)$$

A densidade do ar é função da pressão atmosférica e da temperatura do ar que estão diretamente associados com a altitude local, pode ser estimada a partir de:

$$\rho = \frac{p_o}{R*T} * e^{\frac{g*z}{R*T}} \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade do ar (em kg/m^3) em função da altitude z , p_o é a pressão atmosférica ao nível do mar (em kg/m^2), T é a temperatura do ar (em K), g é a aceleração da gravidade (em m/s^2) e R é a constante específica do ar (em $J/K mol$).

5. Modelagem do vento para o sitio e geração de energia eólica

A modelagem atmosférica e a previsão do vento aplicados ao gerador eólico possuem dois enfoques principais: a estimativa dos ventos médios levando em conta dados climatológicos da região do sitio; e a previsão de vento para instantes futuros em curto e médio prazos. O primeiro enfoque teve como finalidade a seleção do local que apresentou melhores condições de suportar a geração eólica e prover os dados necessários para avaliar a viabilidade econômica e estabelecer os parâmetros a serem adotados no desenvolvimento de projeto de uma unidade geradora para instalação como fonte alternativa e viável de energia renovável para a circunvizinhança. As previsões de curto e médio prazo visam facilitar o planejamento da operação do aerogerador. As estimativas de curto prazo são particularmente úteis na identificação de períodos de maior ocorrência de vento, bem como a ocorrência de ventos nocivos ao sistema. A previsão de vento em médio prazo também é útil no gerenciamento dos recursos de energia elétrica, visando suprir as deficiências na oferta de geração eólica por energia elétrica proveniente de outras fontes. A confiabilidade destas bases de dados está sujeita a procedimentos de validação, através de leituras diárias e registros periódicos da velocidade do vento e comparados com as estimativas fornecidas pelos modelos e medidas locais de dados coletados em uma rede de estações de meteorológicas, descrito na Figura 5.

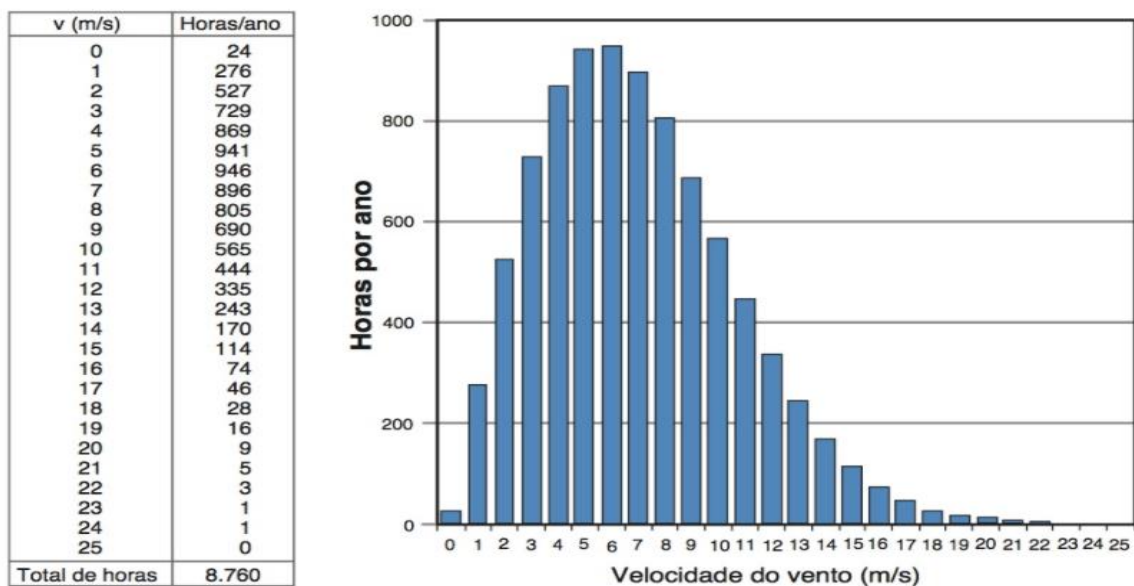


Figura 5: Velocidade media do vento Aerogerador AGW 110/2.1

A previsão de vento foi realizada com o uso de dados disponibilizados por um modelo numérico regional e descrito no Atlas Eólica do estado de São Paulo. O modelo de numérico de mesoescala simula o escoamento atmosférico em vários níveis verticais: 50m, 75m e 100m, representando razoavelmente bem a circulação geral da atmosfera e fenômenos de escala sinótica em condições meteorológicas em áreas limitadas.

6. Tipo do Aerogerador

Os dados referentes ao aerogerador tipo AGW 110/2.1, é visto na Figura 6.

Aerogerador com Acoplamento Direto e Ímãs Permanentes

Dados Operacionais

Modelo	AGW 110 / 2.1
Potência nominal	2.100 kW
Classe de vento (IEC)	S ($V_{ref} = 9,0$ m/s / $I_{ref} = 0,14$ / $V_{ref} = 52,5$ m/s)

Rotor

Diâmetro	110 m
Controle de potência	Regulagem de passo independente por pá

Gerador

Tipo	Síncrono de ímãs permanentes
Acoplamento mecânico	Direto (<i>gearless</i>)
Conexão à rede	Conversor de potência plena
Resfriamento	Fluido térmico
Impregnação do estator	VPI (<i>Vacuum Pressure Impregnation</i>)

Conversor

Tipo	Back-to-back IGBT
Tensão/Frequência	690 V / 60 Hz
Fator de potência	$\pm 0,95$
Resfriamento	Fluido térmico

Nacelle

Sistema de posicionamento	Ativo, acionado por motores redutores elétricos
Freio principal	Aerodinâmico
Freio secundário	Eletromecânico
Freio auxiliar	Pino trava eletromecânico
Ventilação	Aberta (padrão), para atmosfera comum Fechada (opcional), para atmosfera marítima

Transformador

Tensão de entrada/saída	690 V / 34,5 kV
Resfriamento	Ar

Torre

Altura do cubo	80 m ou 120 m
Construção	Aço (80 m) ou concreto (120 m)
Acesso à nacelle	Elevador e escada de serviço

Informações Adicionais

Vida útil de projeto	20 anos
Temperatura de operação	De -10 °C a 40 °C
Sistema de controle	PLC programável mais UPP
Proteção contra descargas atmosféricas	Integrada nas pás, no cubo e na torre
Requisitos de conexão	Atende aos Procedimentos de Rede, submódulo 3.6, do ONS
Guincho de serviço	750 kg, interno à nacelle

Curva de Potência

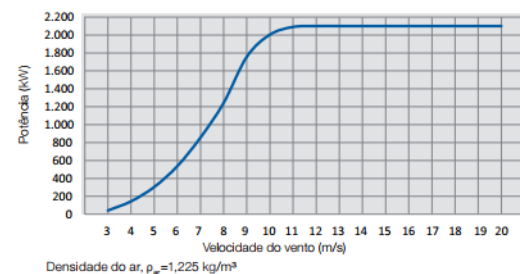


Figura 6: Dados Técnicos do aerogerador WEG

A ligação do aerogerador à rede elétrica, para distribuição da potência elétrica gerada para os moradores circunvizinhos e a representação dos elementos de conversão AC/CC/AC. O barramento de distribuição e os componentes elétricos

necessários para a interligação ao sistema de energia da companhia e venda do excesso gerado e não consumido pelos moradores da região é visto na Figura 7.

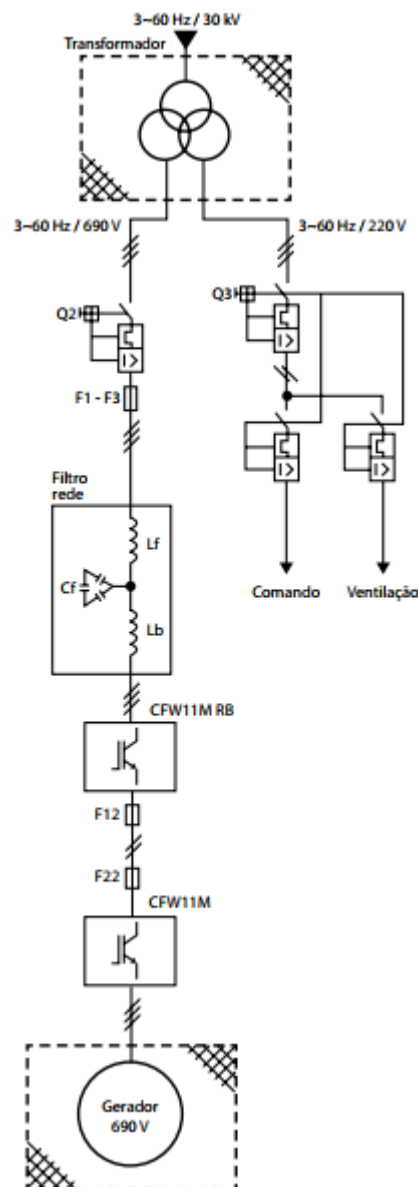


Figura 7: Diagrama de integração com a rede elétrica

A ligação do sistema do aerogerador à rede elétrica acontece por inversores e conversores AC/ CC/ AC. Esta configuração garante que em situações de falha do tipo curto circuito, o sistema permaneça ligado por um determinado tempo, antes de sair de operação e que sua reintegração aconteça o mais rápido possível logo a situação de falha da rede seja restabelecida às condições normais de operação.

7. Modelagem do Aerogerador

Como o sistema por hipótese é linear, podemos aplicar o princípio de superposição ao conjunto do aerogerador. Sendo assim podemos considerar separadamente os vários conjuntos: Controle de pás, controle Yaw, Controle de velocidade, Controle do Gerador.

E então adicionar todos os resultados para obter a potencia total gerada pelo aerogerador. Como temos a entrada do sistema que é a velocidade do vento, o modelo para sua geração do perfil é visto na Figura 8.

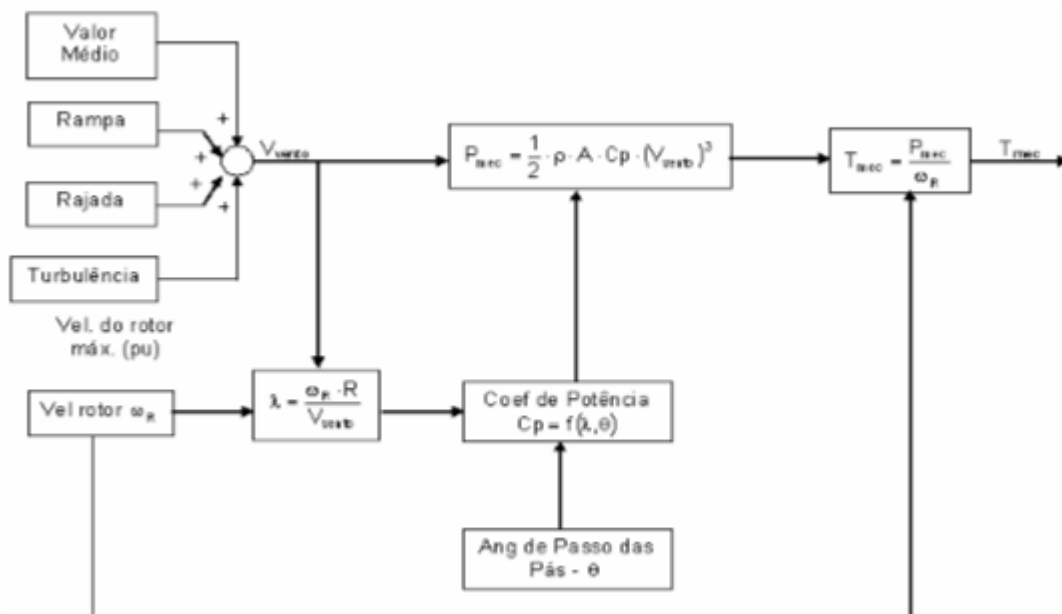


Figura 8: Diagrama de tipos de vento que atingem um aerogerador

Com o objetivo de evitar o efeito de estol nas posições radiais das pás simultaneamente, o que provocaria uma considerável redução da potência do rotor, as pás são dotadas de uma rotação longitudinal discreta que diminui este efeito. Neste caso, o perfil aerodinâmico das pás possibilita que, quando a velocidade do vento supera a velocidade na qual o vento produz a potência nominal, o rendimento começa a decair até voltar ao nível seguro.

O sistema de regulação por alteração no ângulo de passo da pá β , aciona o giro das pás ao longo do eixo longitudinal para controlar a potência conforme as condições do vento, maximizando a eficiência aerodinâmica do rotor. Existem diversos mecanismos de atuação para regular o ângulo de passo em turbinas e podem ser divididos em duas categorias. Na primeira, cada pá conta com um atuador individual

e na segunda um único atuador é comum para todas as pás. O controle deste tipo de sistemas transmite a ação de controle, a qual é transformada em rotação por meio de um mecanismo que pode ser eletromecânico ou hidráulico. Os atuadores individuais podem usar controle individual em cada uma das pás ou controle coletivo. Para este artigo será utilizado um controle individual para cada pá. Para alinha a Nacele à direção do vento, foi modelado o seguinte sistema para alinhamento e aproveitamento máximo da energia cinética do vento. O sistema é visto na Figura 9.

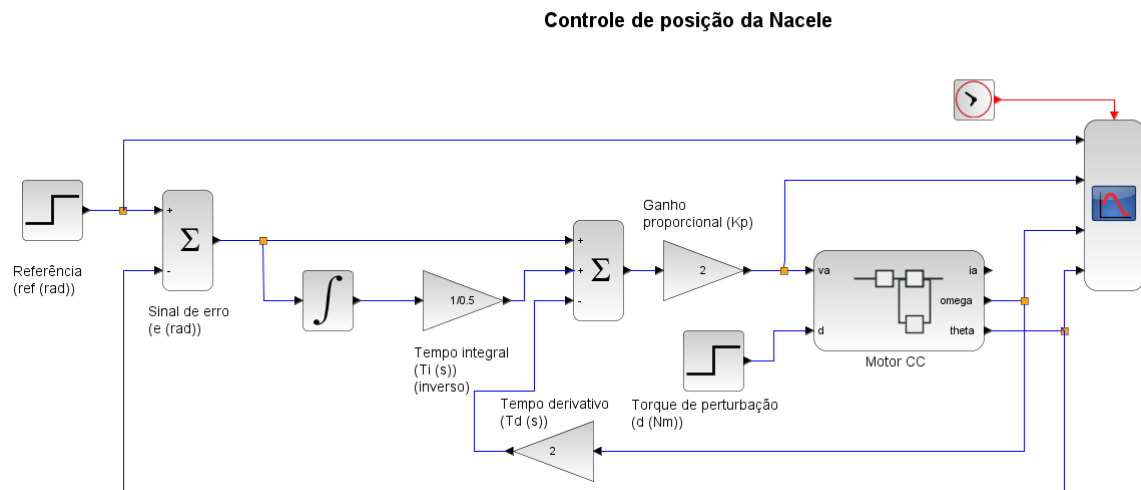


Figura 9: Diagrama de controle da Nacele

O alinhamento da Nacele, quanto submetida a uma mudança na direção do vento representado por uma entrada em degrau. A Figura 10 apresenta a resposta do sistema de posicionamento da Nacele.

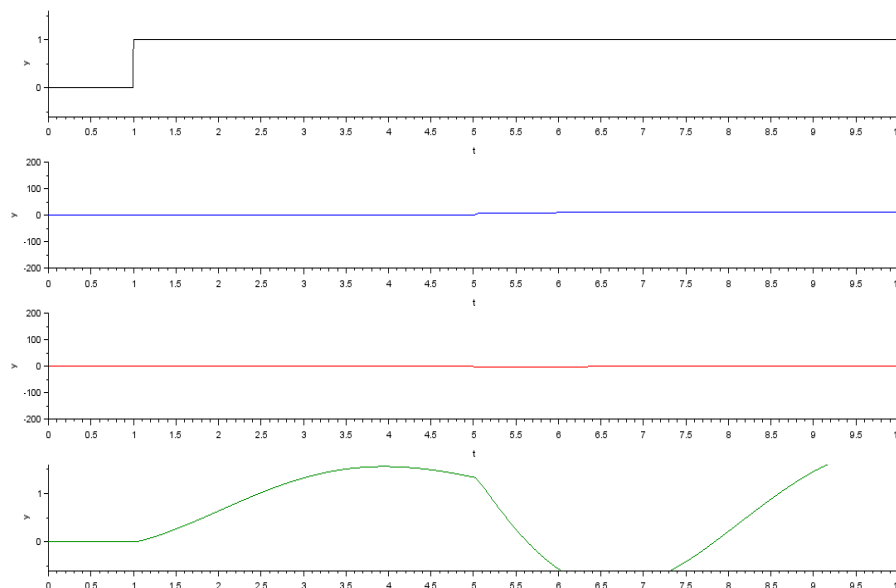


Figura 10: Gráfico de resposta à mudança de direção do vento

7.1 Controle do Ângulo de Pá

O sistema de controle para aproveitamento máximo da energia cinética em baixas velocidades, precisa de controle no ângulo de ataque do vento em relação à geometria das pás. O sistema modelado para o controle de β , é apresentada na Figura 11.

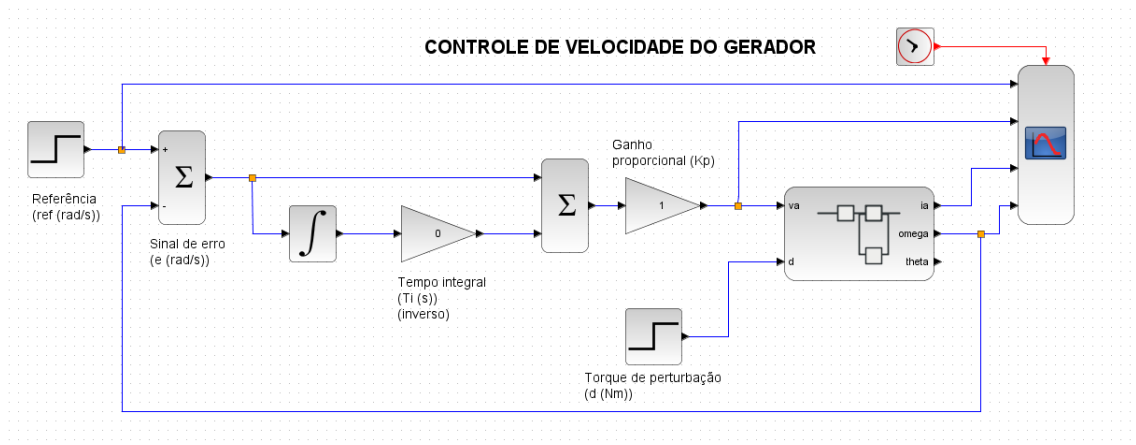


Figura 11: Diagrama de controle do ângulo de pá

A resposta do Aerogerador no controle da velocidade para a manutenção da potência de saída frente a uma mudança de velocidade do vento é visto na Figura 12.

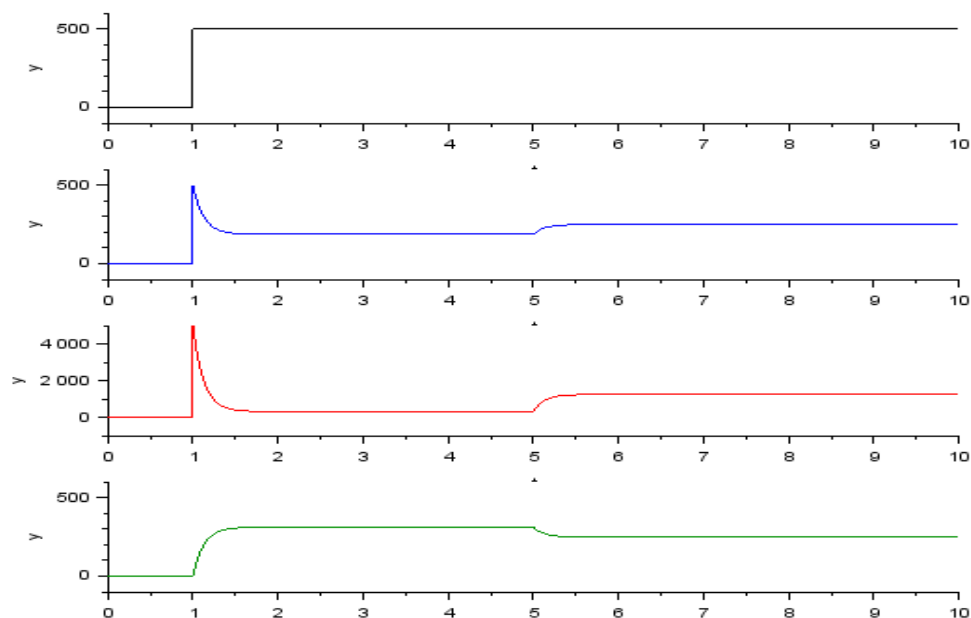


Figura 2: Resposta à mudança de velocidade do vento

7.2 Controle de Partida

Para partida auxiliar do sistema, será usado um motor para movimentar a inercia do aerogerador, quando a velocidade for mínima e suficiente para gerar energia. O sistema é visto na Figura 13.

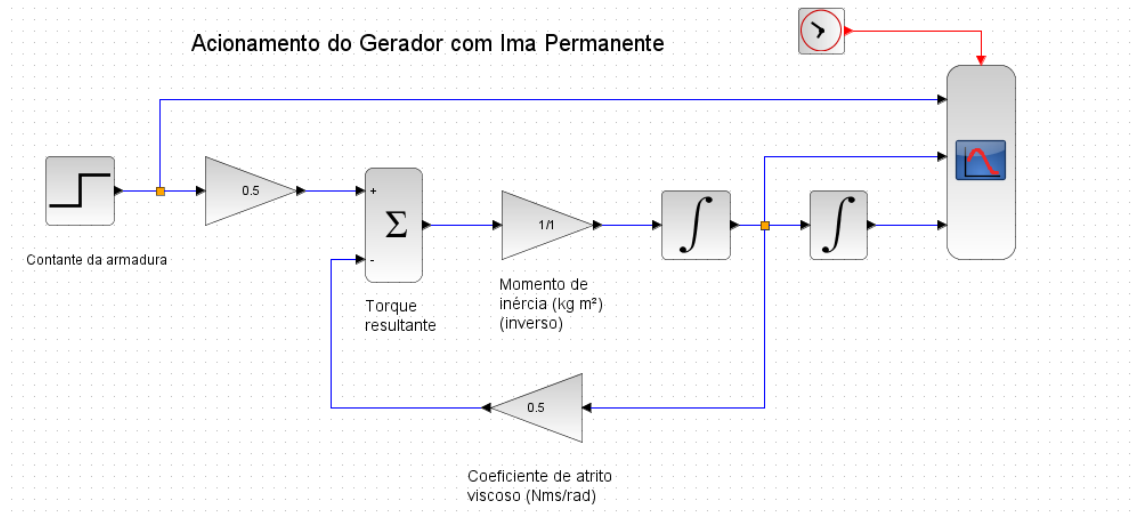


Figura 3: Controle auxiliar de partida do aerogerador

A resposta do sistema é visto na Figura 14. À medida que o vento aumenta e permanece constante o sistema adquire condições de se manter ao longo do período e funcional gerando energia elétrica.

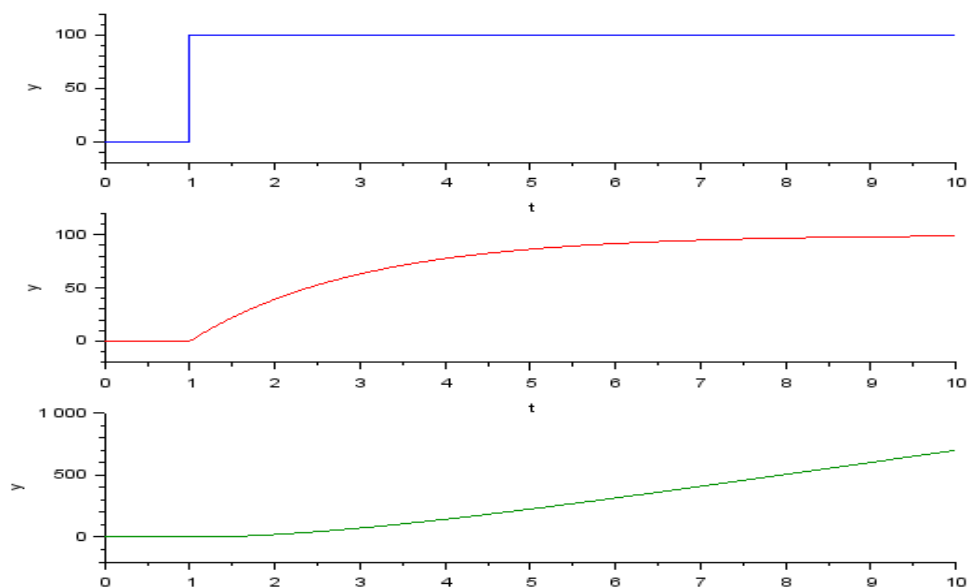


Figura 4: Resposta do sistema para baixas velocidades

7.3 Gerador

Os critérios de desempenho para o sistema dinâmico analisado, nos domínios do tempo e de frequência foi a velocidade de 4,5 m/s. A velocidade obtida como media da velocidade na região onde o futuro aerogerador será instalado para proporcionar a eletrificação da área usando velocidades inferiores e constantes. Velocidades não usais para os grandes geradores de potência. A representação do ponto ótimo de funcionamento para a velocidade media da turbina é vista na Figura 15, identificado por V_{12} .

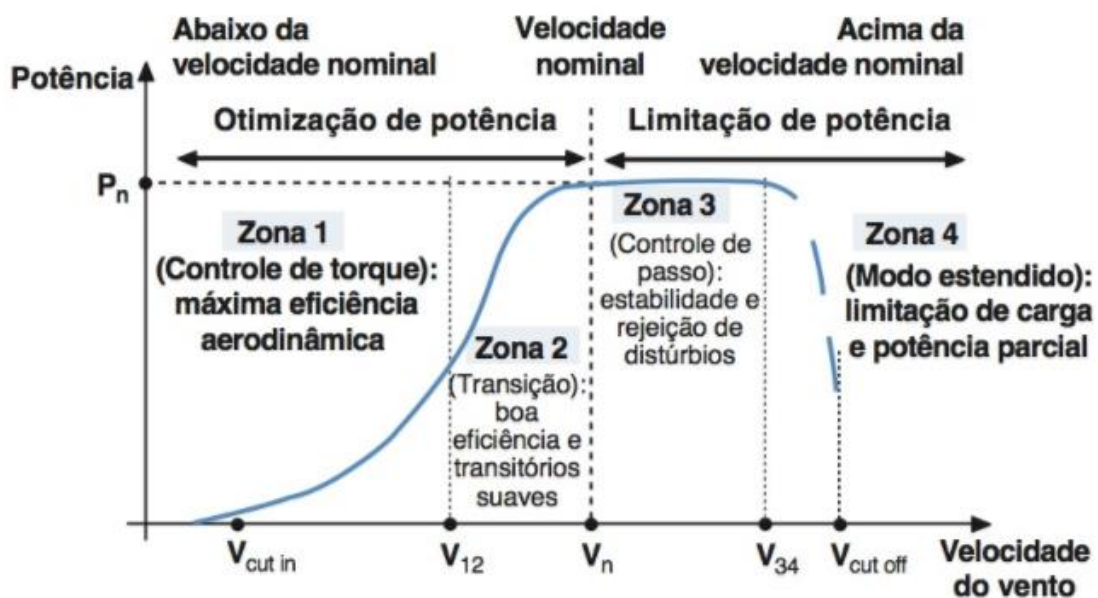


Figura 15: Ponto ótimo para trabalho da turbina eólica

No ponto ótimo de trabalho o aerogerador manterá as características funcionais para a geração de energia elétrica suficiente para manter a micro rede em funcionamento contínuo, sem oscilações e maiores esforços para o equipamento, garantindo a maior longevidade e reduzindo os custos de manutenção com o sistema.

Pela variação da velocidade do vento, o torque mecânico fornecido diretamente ao gerador, deve ser otimizado ao máximo com a posição das pás em um ângulo que aproveite toda a energia cinética proporcionada pelo vento e mantendo constante a saída de potencia útil para alimentação da rede elétrica.

O diagrama de blocos generalizado que é apresentado na Figura 16, representa o gerador implementado nos testes e que apresentou ao comportamento do Gerado modelo AGW 110/2.1.

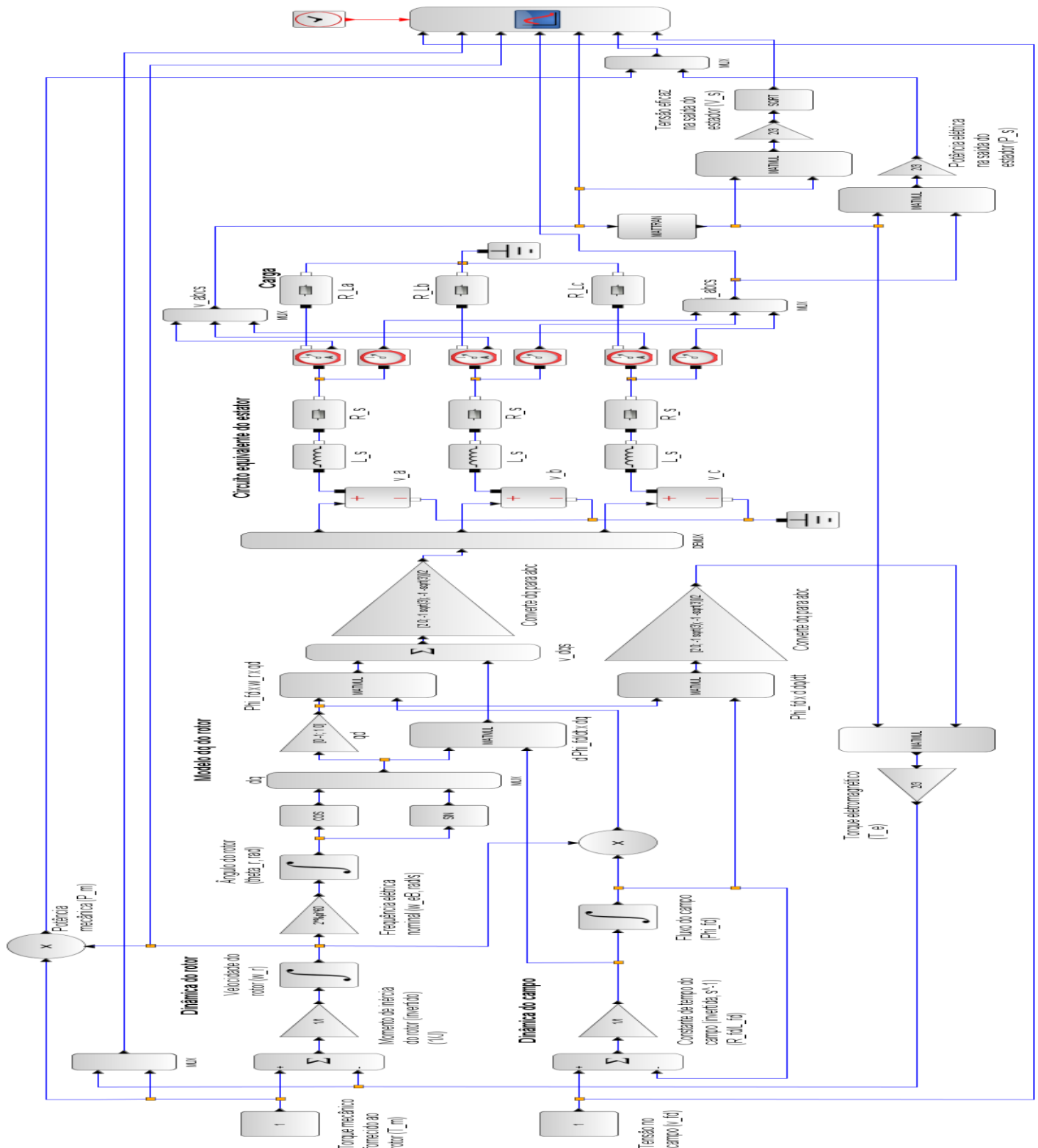


Figura 5: Diagrama completo do aerogerador

8. Conclusões

Foram apresentadas as razões que devem ser tidas em conta na hora de escolher um sistema de geração de energia elétrica, cujas técnicas de controle sejam eficientes e que apesar das características das máquinas e do comportamento variável do vento, garantam a máxima extração da potência mecânica e elétrica disponível para atendimento das necessidades de desenvolvimento e com o menor impacto possível ao meio ambiente.

Em regiões onde a complementaridade entre fontes renováveis de geração de energia elétrica, deve ser tema de pesquisa e investimentos. Estas pesquisas devem ser orientadas aos recursos eólico e solar, onde as tecnologias e amadurecimento revelam bons resultados, permitindo melhorar a estabilidade do sistema, reduzindo perdas e garantindo a integração nacional com a inclusão de todos ao recurso que a energia nos traz.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

SHUHUI, L., HASKEW, T. A., SWATLOSKI, R. P., et al., 2012, **“Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines”**. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 5, pp. 2325 – 2337.

GAGNON R., 1997-2009, **“Wind Farm – DFIG Detailed Model”**. Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc. SimPowerSystems Demo.

PORTELLA, J. R., 2007, **“Viabilidade de Captação da Energia Eólica nos Oceanos (Captação Offshore)”**. Monografia de Esp., Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

ZHAN, P., LIN, W., WEN, J., 2012, **“Design of LCL Filters for the Back to back Converter in a Doubly Fed Induction Generator”**. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), pp. 1 – 6.

REZNIK, A., GODOY, M., AL-DURRA, A., et al., 2012, **“LCL Filter Design and Performance Analysis for Small Wind Turbine Systems”**, In: Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), IEEE, pp. 1 – 7.

HARSHA, S., SHILPA, G. N., RAMESH, E., et al., 2012, **“Voltage Source Converter Based HVDC Transmission”**. In: International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), Vol. 1, Issue 1.

WEG BRASIL. **“Development of 5MW Direct-driven PM Synchronous Generator for Offshore Gearless Wind Turbines”**. National Key Laboratory of Wind Power Technology, 2017.