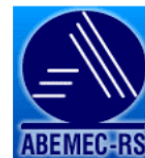




3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013

SEEMI 2013
7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial



DIMENSIONAMENTO DAS PÁS DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL PARA INSTALAÇÃO EM UMA PROPRIEDADE RURAL

Jaime Soares Pinto (FAHOR) jp000876@fahor.com.br

Michael Everton Pasa (FAHOR) mp000966@fahor.com.br

Ademar Michels (FAHOR) michels@fahor.com.br

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo para aerogerador à ser utilizado em uma propriedade rural. A ênfase está nos cálculos que propiciem a determinação da potência e da modelagem geométrica em *software* computacional. Para o projeto foi pré-definido um diâmetro de 30 metros para o rotor, utilização de três pás e perfil *GÖTTINGEN* 428 para as seções das pás. Os parâmetros como potência no eixo, rotação, a corda, as relações entre velocidades e ângulos foram determinados segundo bibliografia específica. Procurou-se buscar sempre o melhor entendimento das características das pás para possibilitar sua modelagem em três dimensões (3D). As pás projetadas que visam fornecer a potência necessária ao consumo médio mensal, obtiveram como resultado uma potência de 1,6 vezes o necessário, podendo este excedente ser utilizado como coeficiente de segurança, e injetado na rede quando não consumido pela propriedade. Ao realizar a modelagem da pá e conseqüentemente do rotor, foi possível visualizar e compreender as dimensões estruturais da turbina eólica resultante dos diversos cálculos elaborados, como exemplo, a torção das pás, resultado este, muito importante para o sistema.

Palavras-chave: Turbina Eólica; Rotor; Pás; Perfil.

1. Introdução

Os recursos eólicos para o suprimento de energia, além de complementar a energia hidrelétrica, propicia outras vantagens, como a possibilidade de descentralização da geração de energia elétrica, abastecimento em locais isolados e complemento nas pontas de rede (VEIGA, 2012).

Como a geração eólica em larga escala já evidenciou seus benefícios com grandes projetos eólicos realizados ou em andamento, de outro lado, percebe-se que a geração de energia em pequena escala, ou geração de energia doméstica, tem um enorme desafio pela frente, principalmente na disseminação do interesse da engenharia por projetos eólicos de menor capacidade de geração, a fim de possibilitar sua viabilidade para uma demanda energética específica, como por exemplo um único consumidor.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo, apresentar os

resultados obtidos no dimensionamento das pás à serem utilizadas em um aerogerador de eixo horizontal, capaz de suprir satisfatoriamente a necessidade de energia elétrica média de 3MWh/mês de uma determinada propriedade rural.

Segundo Jureczko *et al. apud* Pires (2010), o custo de fabricação das pás de uma turbina eólica está na ordem de 15 a 20 % do custo total de produção da turbina. Logo, na medida em que se desenvolvem pesquisas para turbinas eólicas de uso residencial, aumenta a possibilidade destas máquinas se tornarem viáveis financeiramente ao fornecimento de energia elétrica.

O estudo realizado, corresponde à obtenção das dimensões das pás para um dado rotor e um dado perfil aerodinâmico com características pré-definidas, com o objetivo de determinar a potência do mesmo e todas as dimensões necessárias que possibilite projetar as pás em *software* 3D. Na literatura existem diversas obras que abordam projetos eólicos, fazendo-se necessário selecionar o que melhor contribui para o entendimento e colocação na prática.

2. Revisão da Literatura

2.1 Turbinas eólicas – conversão e classificação

De acordo com Pinto (2013), as turbinas eólicas são usadas para converter a energia do vento em energia elétrica. Essa conversão segue duas etapas básicas (FIGURA 1): a turbina remove a porção da energia cinética disponível para conversão em energia mecânica, e após, o gerador recebe a energia mecânica e a converte em energia elétrica.

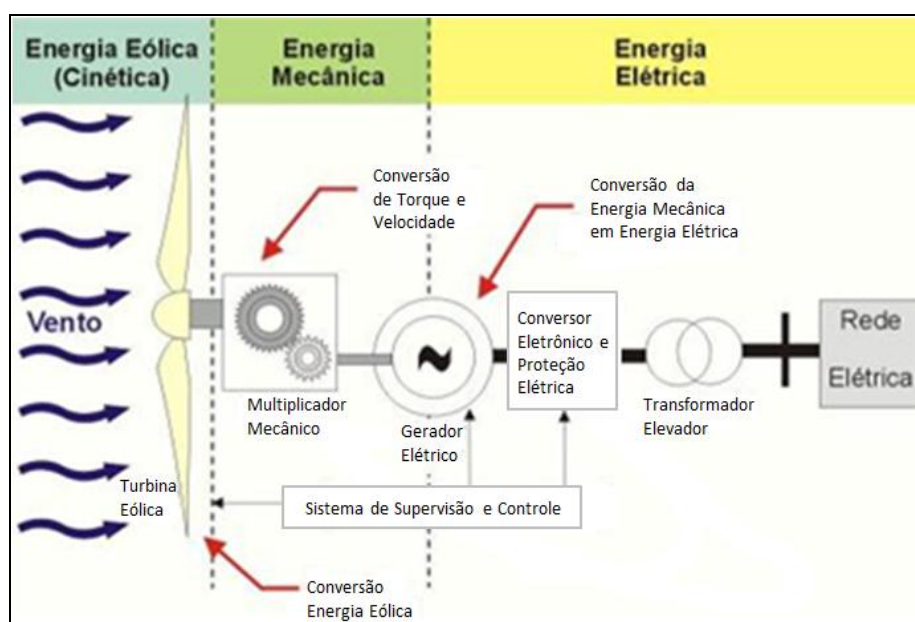


Figura 1 - Esquema do Funcionamento de um Aerogerador. Fonte: Centrais Elétricas (2013)

Para Almeida e Silva (2011), as turbinas eólicas podem ser classificadas em termos do eixo ao redor do qual as pás das turbinas giram (FIGURA 2), sendo turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) ou turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) e quanto a sua potência (FIGURA 3), em pequeno porte (até 50 kW), médio porte (50 a 1000 kW) e grande porte (acima de 1MW).



Figura 2 - Exemplos de turbinas (da esquerda para a direita: TEEV e TEEH). Fonte: Wenzel (2007)



Figura 3 - Exemplos de turbinas eólicas (da esquerda para a direita: pequena, média e grande porte). Fonte: Brasil (2005)

Para Moreira Júnior (2009), um sistema eólico pode ser aplicado em três formas distintas: sistemas isolados (autônomos), sistemas híbridos e sistemas interligados a rede. Seguindo uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, às vezes de armazenamento.

2.2 Pás do rotor TEEH

As pás, denominadas por hélices, é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica. Por este motivo, sua configuração influencia diretamente no rendimento global do sistema, sendo o componente mais característico de um sistema eólico (BENITO, 2012). As pás distinguem-se por um conjunto de características, sendo as mais importantes:

- O comprimento que determina a área varrida pelo rotor;
- O perfil das pás que é semelhante ao perfil das pás aeronáuticas;
- A largura que é determinada pelo comprimento da corda do perfil (afeta a velocidade de arranque);
- A corda (distância entre os pontos extremos do perfil);
- O ângulo que forma a corda do perfil e a direção da corrente de ar.

2.2.1 Perfil alar

Perfil alar é a secção obtida por um corte transversal da pá (RODRIGUES, 2004). Sobre o perfil (FIGURA 4) são geradas forças de sustentação, perpendicular ao vento incidente, e que origina o movimento da pá, e a força de resistência (ou arrasto) com a massa de ar, que trava o movimento. A força produzida advém então da diferença de pressão criada entre o extradorso - região de baixa pressão e o intradorso - região de alta pressão (parte inferior da pá).

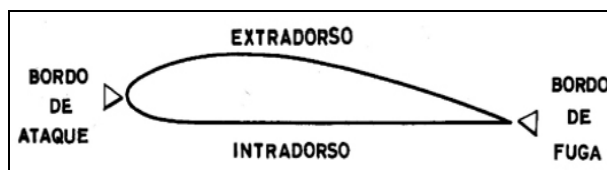


Figura 4 - Representação de um perfil alar. Fonte: Rodrigues (2004)

Segundo Henn (2006), as formas dos perfis alares das pás são normalmente indicadas através de códigos desenhados para a indústria aeronáutica, onde tabelas fornecidas por laboratórios aerodinâmicos auxiliam a tarefa de desenhar. Dentre esses perfis, destacam-se o *NACA*, ensaiados nos Estados Unidos da América e o *GÖTTINGEN*, ensaiados na Alemanha. Estes dois distinguem-se basicamente por suas convenções (FIGURA 5).

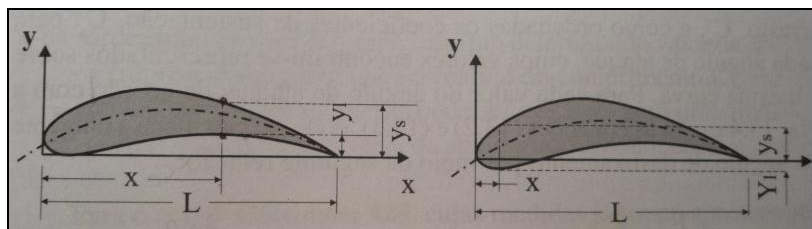


Figura 5 - Convenção *GÖTTINGEM* (esquerda) e *NACA* (direita). Fonte: Henn (2006)

2.3 Forças aerodinâmicas

Segundo Rocha (2008), as turbinas de arraste são caracterizadas devido a ação de o vento empurrar as pás forçando o rotor a girar. Possuem utilidades em áreas rurais, para bombeamento de água com ventos de baixa velocidade.

Ainda Rocha (2008), nas turbinas de sustentação (FIGURA 6), o vento ao passar com maior velocidade sobre o lado mais longo formado pela forma da superfície da pá gera uma área de baixa pressão e, o diferencial de pressão entre as duas superfícies resulta em uma força de sustentação. No caso da asa de avião, isto ocasiona uma força de elevação, mas, no caso das pás da

turbina, que são fixadas pelo cubo para se mover em um plano, a força de sustentação irá ocasionar sua rotação.

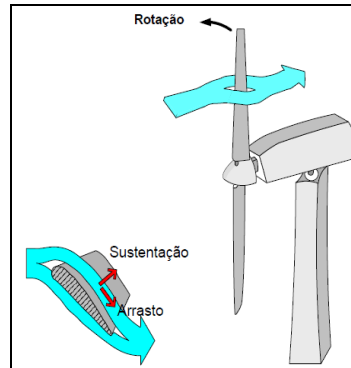


Figura 6 – Turbina de sustentação. Fonte: Rocha (2008)

A figura 7 representa a vista frontal de uma turbina eólica em operação, onde é destacado o sentido do vento (barlavento) e o sentido de rotação para a observação do corte de seção transversal (FIGURA 8) de uma pá do rotor.

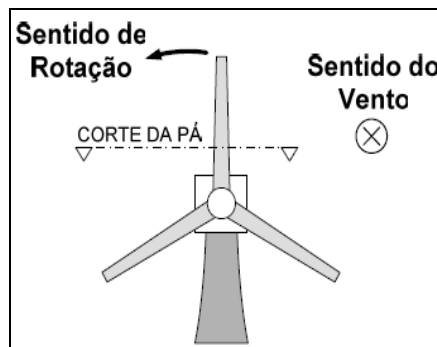


Figura 7 - Vista frontal de um aerogerador em movimento para observação do corte. Fonte: Rocha (2008)

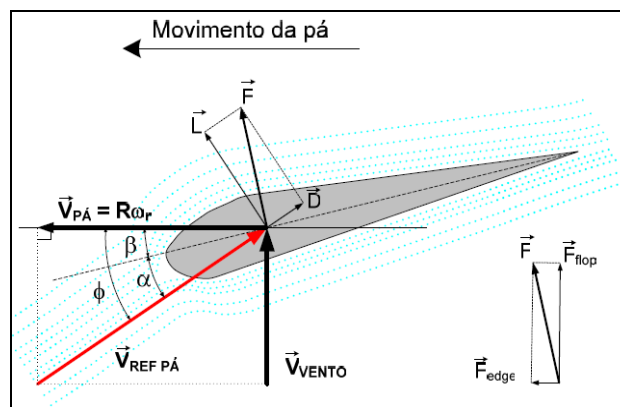


Figura 8 - Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina. Fonte: Rocha (2008)

3. Métodos e Técnicas

A metodologia utilizada para atingir os objetivos deste trabalho é apresentada da seguinte forma:

- a) Realização de pesquisa exploratória, levantamento bibliográfico para o conhecimento sobre turbinas eólicas;
- b) Identificação da necessidade energética de uma propriedade rural;
- c) Determinação da velocidade do vento através do mapa eólico do Estado do Rio Grande do Sul;
- d) Definição de um diâmetro para o rotor eólico e seu número de pás;
- e) Definição de um perfil aerodinâmico para as pás;
- f) Realização de cálculos de potência, dimensionais e aerodinâmicos, seguindo um roteiro para rotor axial sugerido por Henn (2006);
- g) Realização de modelagem geométrica utilizando *software* computacional em três dimensões (3D) *SolidWorks*.

4. Resultados e Discussões

4.1 Parâmetros do Projeto

Com a pesquisa exploratória realizada, primeiramente definiu-se alguns parâmetros de trabalho da turbina eólica (TABELA 1), e, a partir delas utilizou-se de cálculos sugerido por Henn (2006) para o desenho de pás.

Tabela 1
Parâmetros para a turbina eólica

Descrição	Símbolo	Valor
Velocidade do vento	V_{∞}	7 m/s
Massa específica do ar	ρ	1,225 kg/m ³
Diâmetro do rotor	D_e	30 m
Número de pás	-	3

Fonte: Autores do trabalho (2013)

De acordo com o número de pás definido, para Sadhu *apud* Henn (2006), o fator de celeridade (λ) e o fator de redução da velocidade do vento (a) que melhor aproveitam a potência do vento são 4,5 e 0,12 respectivamente.

Conforme Henn (2006), o diâmetro do cubo (D_i) costuma ficar na faixa de 15% a 20% do diâmetro do rotor (D_e). Para este projeto foi utilizado 15%.

O perfil escolhido para este projeto foi o *GÖTTINGEN* 428 para todo o comprimento da pá (FIGURA 9).

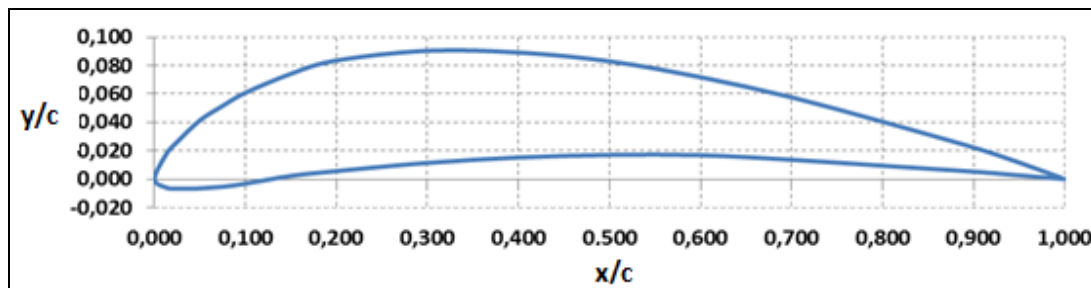


Figura 9 - Perfil aerodinâmico selecionado. Fonte: Rodrigues (2004)

4.2 Potência da turbina

De acordo com o diâmetro da turbina e a velocidade do vento, tem-se um salto energético disponível da turbina e como resultante uma potência disponível da turbina eólica (TABELA 2).

Levou-se em conta as estimativas de rendimentos para obter a potência aproximada no eixo do rotor, onde para este trabalho, os valores do rendimento total (η_t), do rendimento hidráulico (η_h) e do rendimento mecânico (η_m) adotados são, respectivamente, 55%, 70% e 95% sugeridos por Henn (2006) e que resultaram num coeficiente de potência máximo ($C_{p\text{máx.}}$) de 36,6%.

Tabela 2
Determinação da potência e rotação da turbina

Descrição	Símbolo	Valor
Potência disponível do vento	P	55,2 kW
$C_{p\text{máx.}}$	%	36,6
Potência disponível no eixo	P_e	20,2 kW
Rotação da turbina	n	20 rpm

Fonte: Autores do trabalho (2013)

4.3 Determinação dos elementos da pá

Determinou-se entre o D_e e D_i , diversos diâmetros das superfícies cilíndricas a serem consideradas para o cálculo dos perfis do rotor. A pá projetada para esta pesquisa foi seccionada em 11 elementos de pá, que, após cada um ser calculado, seguem resumidos na Tabela 3 com suas características locais de velocidade, ângulo de fluxo, ângulo de passo, corda e $y_{\text{máx.}}$ do perfil.

Tabela 3
Características de cada elemento da pá

Elemento de pá	Diâmetro (m)	Velocidades tangenciais (m/s)	Ângulo de fluxo β_{∞}	Ângulo de passo ou de inclinação β	Corda do perfil (m)	$y_{\text{máx.}}$ do perfil (m)
1	4,50	4,72	55,98	58,56	2,55	0,433
2	7,05	7,40	43,40	46,61	2,37	0,403
3	9,60	10,08	34,78	38,51	2,19	0,373
4	12,15	12,76	28,75	32,86	2,01	0,342
5	14,70	15,44	24,39	28,73	1,83	0,312
6	17,25	18,11	21,13	25,57	1,65	0,282
7	19,80	20,79	18,61	23,03	1,48	0,251
8	22,35	23,47	16,61	20,90	1,3	0,221
9	24,90	26,15	14,99	19,01	1,12	0,190
10	27,45	28,82	13,65	17,20	0,94	0,160
11	30,00	31,50	12,53	15,30	0,76	0,130

Fonte: Autores do trabalho (2013)

4.2 Modelagem geométrica

Na modelagem 3D foram utilizados os dados obtidos nas fases anteriores, como o perfil aerodinâmico e dados apresentados na Tabela 3. De posse desses dados, foi possível iniciar o modelamento dos perfis calculados e seus ângulos (FIGURA 10).

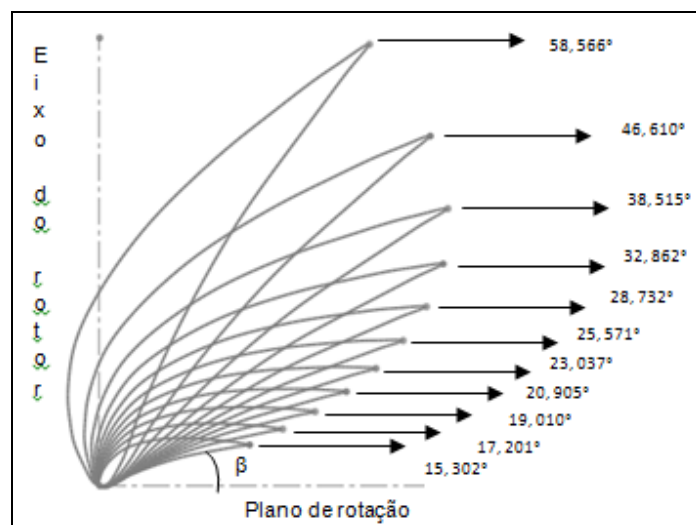


Figura 10 - Representação da inclinação das seções da pá. Fonte: Autores do trabalho (2013)

Posteriormente, os 11 elementos de pá foram distanciados em intervalos de 1,28m. Com os recursos do *Solidworks* pode-se modelar e editar as curvas e superfícies da pá (FIGURA 11).

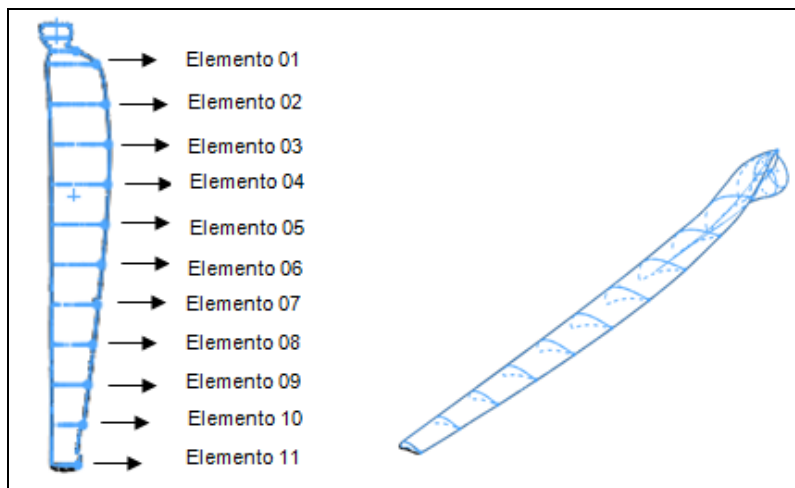


Figura 11 - Representação distâncias dos elementos. Fonte: Autores do trabalho (2013)

Em seguida, a pá totalmente modelada foi espelhada ao redor de um eixo, obtendo assim o desenho do rotor eólico (FIGURA 12).

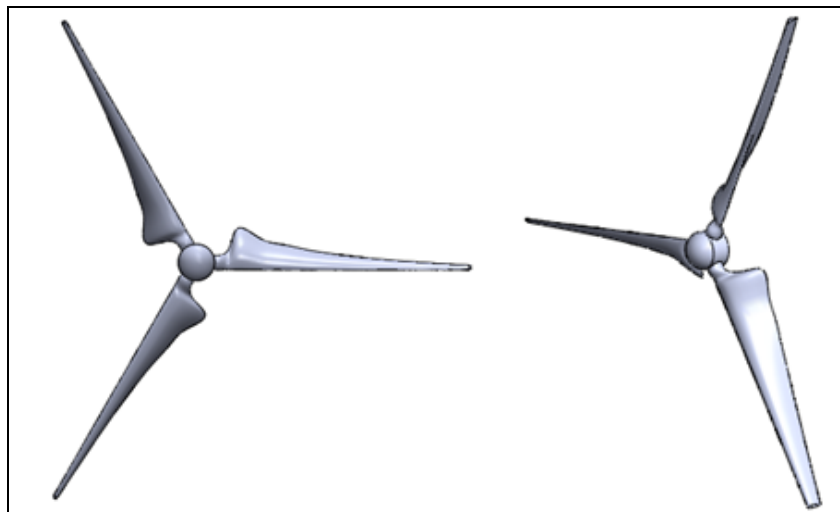


Figura 12 - Vista frontal e 3D das pás projetadas. Fonte: Autores do trabalho (2013)

5. Conclusões

O artigo apresentou, a importância do projeto eólico, com suas principais determinações, como a potência e as dimensões geométricas, resultando na modelagem computacional do rotor eólico.

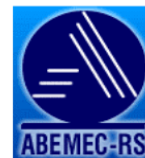
Estimando-se em 1/3 mensal de horas de produção da turbina eólica, temos que, o resultado da potência de 20,2kW que a turbina fornecerá, resulta



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013

SEEMI 2013
7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial



em aproximadamente 4,8MWh/mês. Deste modo, é possível utilizar este excedente como coeficiente de segurança, e injetar na rede quando não consumido pela propriedade, ou, deve-se reduzir o diâmetro do rotor para adequá-lo ao valor desejado de 3MWh/mês.

Os resultados da modelagem das pás e do rotor, permitem visualizar e compreender as dimensões estruturais da turbina eólica resultante dos diversos cálculos elaborados, além de mostrar os aspectos aerodinâmicos, como exemplo, a torção das pás, que realizam um muito importante para potencializar a conversão de energia cinética do vento em energia elétrica.

Referências

- ALMEIDA, Antenor Timo Pinheiro de.; SILVA, Micael Martins da. **Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas**. 2001. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2001. Disponível em: <http://bdm.bce.unb.br/bitstream/10483/2903/1/2011_MicaelSilva_AntenorDeAlmeida.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2013.
- BENITO, Tomás Perales. **Práticas de Energia Eólica**. Porto: Publindustria edições técnicas, 2012.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Energia eólica. 2005. Disponível em: < [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) >. Acesso em: 09 set. 2013.
- CENTRAIS Eléctricas Funcionamento. **Energia Eólica**. Disponível em: <<http://centraiselectricas.wordpress.com/energia-eolica/>>. Acesso em: 24 mar. 2013.
- HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de Fluido**. 2. ed. Santa Maria : Ed. da UFSM, 2006.
- MOREIRA JÚNIOR, Fernando Delgado. **Viabilidade técnica/econômica para produção de energia eólica, em grande escala, no Nordeste Brasileiro**. 2009. Monografia (Especialista em energia eólica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009. Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br/files/tccfernandodelgado.pdf> >. Acesso em: 10 mar. 2013.
- PINTO, Milton. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013
- PIRES, Julio C. Pinheiro. **Estudo de Rotor para Turbina Eólica de Eixo Horizontal de Pequeno Porte com Aplicação de Modelagem e Simulação Virtual**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/29058>>. Acesso em: 2 mar. 2013.
- ROCHA, Rafael Vieira. **Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental**. 2008. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2008042802.pdf>>. Acesso em: 3 mar. 2013.
- RODRIGUES, José Carlos. **Aeromodelismo – Teórico e Prático**. Edição digital, 2004. Disponível em: <<http://www.fpam.pt/Informacoes/LivroAeromodelismo/capitulol.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2013
- VEIGA, José Eli da (Org.). **Energia Eólica**. São Paulo: Senac, 2012.
- WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/3490/2738>>. Acesso em: 11 mar. 2013.