

REVISTA



SOLUÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO PAÍS

VOLUME 5 - Nº 55 - Julho / 2010

ISSN - 1809-3957

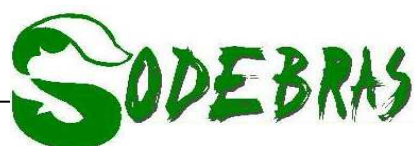
ARTIGOS PUBLICADOS

PUBLICAÇÃO MENSAL

Nesta edição

PROJETO DE UM CONTROLADOR PID PARA CONTROLE DO ÂNGULO DE PASSO DE
UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL COM VELOCIDADE CONSTANTE –
Francisco A Lotufo e Teófilo Miguel de Souza.....2

DISPONIBILIDADE DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL– Fabiana Nunes Ferreira e Teófilo
Miguel de Souza 8



Atendimento:

contato@sodebras.com.br

Acesso:

<http://www.sodebras.com.br>



PROJETO DE UM CONTROLADOR PID PARA CONTROLE DO ÂNGULO DE PASSO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL COM VELOCIDADE CONSTANTE

ISSN 1809-3957

F. A. Lotufo e T. M Souza - FEG/UNESP

Resumo-- Em uma sociedade com constante elevação de preços dos combustíveis fósseis e um aumento da consciência a respeito do aquecimento global, o vento é uma fonte de energia cada vez mais atrativa. Entretanto, uma maneira de se aproveitar o vento de forma eficaz, deve-se compreender inteiramente dentro do contexto da produção de eletricidade. Embora as tendências globais da velocidade e direção do vento sejam relativamente constantes, o comportamento local do vento em uma locação específica pode ser altamente irregular, impedindo assim um procedimento simples de análise e projeto do funcionamento baseado em uma única velocidade do vento para uma turbina. Controle do passo (pitch) é muito utilizado para regulação da geração de potencia em turbinas eólicas. O projeto de um controlador para controle do passo das pás é desenvolvido baseado em técnicas simples de controle clássico utilizando modelos de referência da planta disponíveis na literatura.

Palavras Chaves—Turbina Eólica, Controlador PID, Método de Ziegler & Nichols, Método ITAE.

I. INTRODUÇÃO

Para resolver problemas como a crise energética e o aquecimento global, cada vez mais as empresas trabalham para criar fontes de energia que não utilizem combustíveis fósseis e sejam renováveis, como é o caso das energias térmica e eólica. Complementando o estudo sobre a Indústria Elétrica e Eletrônica em 2020, apresentado na abertura da FIEE 2009 (Feira Internacional da Indústria Elétrica, Energia e Automação), a Siemens traz em seu estande as alternativas propostas pela empresa para gerar energia através de fontes alternativas e reduzir o impacto ambiental. A Siemens possui hoje 6,4 mil turbinas eólicas espalhadas pelo mundo que geram cerca de 5,7 mil megawatts, economizando 8 milhões de toneladas de CO₂ ao ano, sendo que a maior delas possui um diâmetro de rotor de 107 m. O vento é um recurso de energia limpa, inesgotável, natural que pode gerar eletricidade suficiente para alimentar, com energia elétrica, milhões de residências e empresas. A energia do vento é uma das formas de geração de eletricidade que cresce mais rapidamente ao redor do mundo. Os Estados Unidos podem atualmente gerar mais de 25000 megawatts (MW) de eletricidade do vento, que é suficiente para fornecer energia para 7 milhões de residências Americanas médias. Os especialistas da indústria prevêem que, com o desenvolvimento apropriado, a energia do vento poderia fornecer 20% da energia necessária para os Estados Unidos[1].

As turbinas eólicas extraem energia do vento,

transformando-a em energia elétrica. Sendo uma fonte de energia alternativa às fontes de energia não renováveis e poluidoras, como petróleo e usinas nucleares. Na Europa, mais precisamente na Dinamarca e Holanda, em torno de 10% da energia utilizadas nesses países, vêm de turbinas eólicas. Todavia, apesar das vantagens relatadas, muitas questões ainda necessitam ser solucionadas. Uma questão de fundamental importância, é estudar o melhor meio de se regular (ajustar) as turbinas eólicas. Como vantagens da turbina eólica às fontes não renováveis, citadas anteriormente, podemos citar a não poluição do meio ambiente, a possibilidade de gerar energia próximo do local de consumo (barateando assim o custo) e o baixo impacto ambiental, tão importantes e questionados atualmente. A proposta deste artigo é projetar um controlador para controle do passo das pás baseado em técnicas simples de controle clássico utilizando modelos de referência da planta disponíveis na literatura e analisar o seu comportamento dinâmico e a influência do ângulo de passo na resposta, ou seja, no valor de potência gerada.

II. TURBINAS EÓICAS

Uma revisão completa do controle e obtenção de modelos (modelagem) de turbinas eólicas pode ser obtido de Leithead [2]. Existem basicamente, duas configurações de turbinas eólicas em termos de seu funcionamento:

- Turbina eólica de eixo horizontal;
- Turbina eólica de eixo vertical.

A. Turbina eólica de eixo horizontal (horizontal axis wind turbines - HAWT)

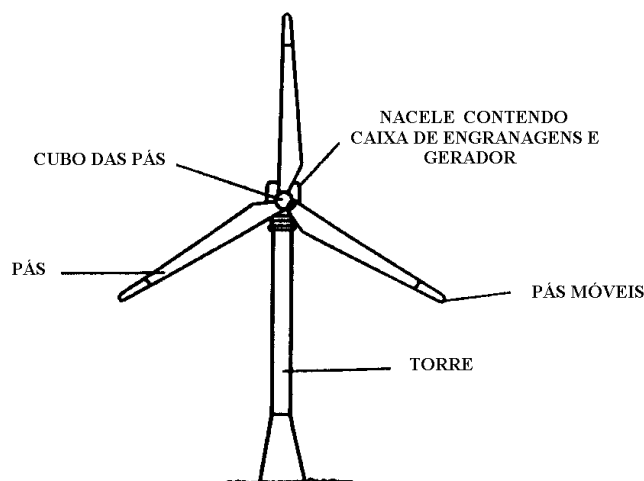


Fig. 1. Turbina eólica de eixo horizontal (Horizontal axis wind turbines – HAWT)

B. Turbina eólica de eixo vertical (vertical axis wind turbines – VAWT)

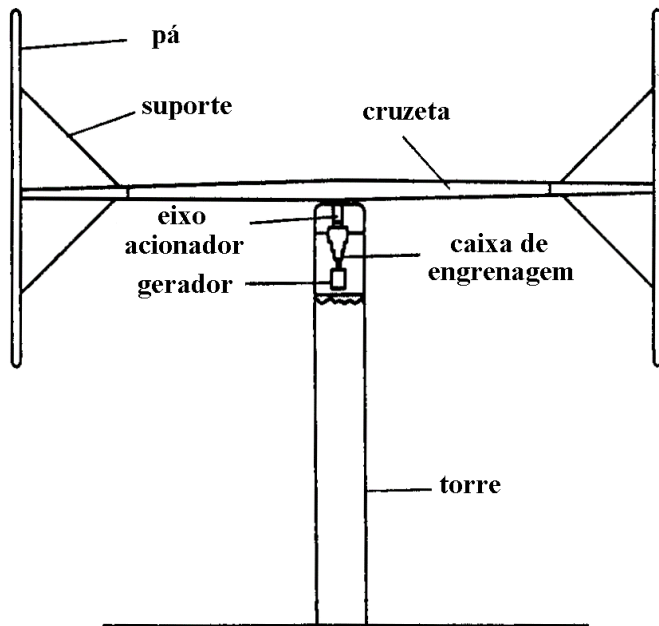


Fig. 2. Turbina eólica de eixo vertical (Vertical axis wind turbines – VAWT)

Contudo, a maioria dos estudos encontrados na literatura se refere a turbinas de eixo horizontal. As diferenças básicas entre estas duas configurações são:

Os componentes do conjunto de força das VAWT's se localizam em Terra, enquanto que nas HAWT's o conjunto de força está acoplado à estrutura;

Nas VAWT's, só há cargas relativas ao torque, o mesmo não ocorre nas HAWT's, onde agem cargas na estrutura da turbina e em seus componentes.

Dentro da configuração HAWT, tem-se as turbinas com velocidade constante e variável. Na turbina eólica com velocidade constante, o rotor transmite diretamente a rede, a energia captada do vento pelas pás. Devendo assim, a turbina rotacionar com velocidades angulares compatíveis com a frequência da rede. É importante notar que neste tipo de configuração, há a possibilidade de se ter, o controle ativo ou o controle passivo.

Regulagem passiva- As pás do rotor são projetadas para se ter o efeito de stall (perda de velocidade) próximo do valor nominal da velocidade do vento (previamente estabelecido). Onde, a potência gerada pela turbina não aumenta com o aumento da velocidade do vento.

Regulagem ativa- O torque induzido no rotor pelo vento, depende do ângulo de passo das pás. Onde, o torque pode ser modificado pela disposição das pás. Durante a ação de ajuste, para se obter velocidades diferentes do valor nominal de velocidade do vento, o ângulo de passo das pás é continuamente ajustado, para que se tenha a potência nominal de saída desejada. O ajuste do ângulo de passo das pás é usualmente feito em resposta ao sinal de potência de saída.

Na turbina com velocidade variável, o rotor e o gerador estão desacoplados da rede para circuitos elétricos de

potência. Assim o rotor pode girar com qualquer velocidade angular, fazendo dessa configuração mais confiável no sentido da qualidade de energia gerada e sendo um sistema mais flexível com relação ao espectro de vento (conjunto das várias frequências de vento).

O controle é necessário para as HAWT's com velocidade variável e geralmente consideram-se como objetivos importantes no controle:

- Geração da máxima potência sob a restrição da qualidade da máquina;
- Conservação da qualidade satisfatória da energia elétrica;
- Minimizar as cargas transitórias no rotor, no conjunto de transmissão e na estrutura e maximizar a vida útil da turbina.

III. MODELO DA TURBINA EÓLICA

O diagrama de blocos representando a dinâmica do sistema de controle do ângulo de passo da turbina eólica é mostrado na Fig. 3. O diagrama apresenta as interligações dos componentes da turbina, que são formadas pelas estruturas dinâmicas e aerodinâmicas do sistema.

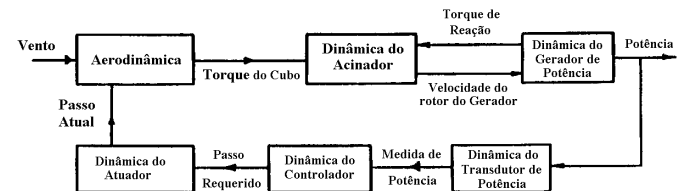


Fig. 3. Diagrama de blocos reduzido da dinâmica turbina eólica

A. Aerodinâmica da Turbina Eólica

A variação estocástica na velocidade do vento em ambos, tempo e espaço, produz um torque nas pás da turbina. Onde, a turbina não experimenta uma velocidade única, mas sim um espectro de velocidades do vento. Quando há uma mudança no ângulo de passo das pás (aumento/diminuição) o torque aerodinâmico age da mesma maneira na interação com as pás. Resultando em mudança na resposta. Considerando uma turbina que experimenta um campo de vento uniforme, o torque aerodinâmico em estado estacionário, T_f , está relacionado à velocidade do vento por

$$T_f = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 U^2 C_T \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade do ar, U é a velocidade do vento e C_T é o coeficiente de torque aerodinâmico. O coeficiente $C_T(\phi, \lambda)$ é uma função fortemente não linear do ângulo de passo, ϕ , e da velocidade da extremidade da pá, λ , onde

$$\lambda = R \Omega_R / U \quad (2)$$

e Ω_R é a velocidade instantânea do rotor.

B. O Conjunto de Transmissão

Os principais componentes de uma turbina eólica são a torre, o rotor (as pás e cubo) e o conjunto de potência (o

conjunto de acionamento e a unidade de geração de potência). O conjunto de acionamento consiste do eixo de baixa rotação, a caixa de engrenagens e acoplamento, se existir, e o eixo de alta rotação como mostrado na Fig. 4.

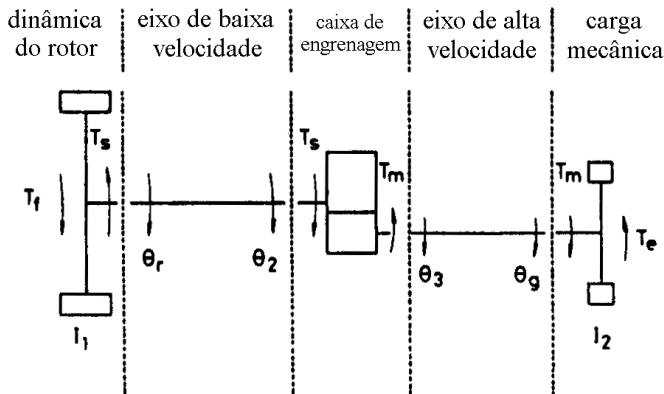


Fig. 4. Forma esquemática do modelo físico para o conjunto de acionamento

O rotor da turbina

Onde há a interação com o vento que através das pás, que estão fixados nele, extraem a energia do vento e transmite-a ao eixo acoplado a ele.

Eixo de baixa rotação

A velocidade angular, produzida pelo torque aerodinâmico nas pás, é relativamente baixa no eixo primário necessitando, portanto, aumentar a velocidade angular.

Caixa de engrenagens

A velocidade angular, recebida do eixo primário é multiplicada nesse conjunto de engrenagens. E posteriormente transmitida ao eixo secundário ou de alta rotação.

Gerador elétrico

Produz através do torque aerodinâmico e da velocidade angular, a potência elétrica, enviada à rede. Sendo assim, há um torque de reação do gerador no eixo secundário, tendendo a diminuir a velocidade angular.

Atuador

O atuador modifica a disposição das pás no rotor, obtendo um sinal de comando que é proveniente da realimentação do sinal de potência elétrica de saída. A sua atuação na mudança do ângulo das pás é limitada pelos limites de operação das mesmas, ou seja, estas trabalham dentro de limites onde podem operar, esta dependência é devida aos coeficientes de arrasto e sustentação, obtidos a partir do perfil escolhido da pá.

Transdutor

A medida normalmente feita em uma turbina eólica é a potência. Todavia, como a velocidade de rotação da turbina varia por muito menos que 1%, pode ser interpretada como uma medida do torque de reação do gerador. Sendo assim, é indispensável à utilização de um transdutor para medir este sinal.

IV. MODELO DO CONTROLE DA TURBINA EÓLICA

O diagrama de blocos do modelo de controle é apresentado na Fig. 5, que é a representação matemática do sistema de controle da turbina eólica de eixo horizontal linearizada. Ele foi obtido através de uma combinação de estudos analíticos e simulações [3],[4] e [5].

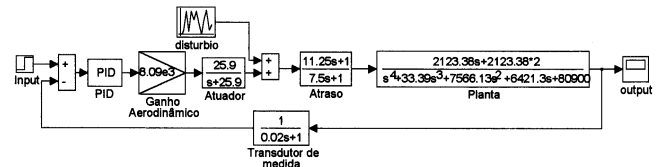


Fig. 5. Diagrama de blocos do sistema de controle

O Controlador, C

O controlador e o seu projeto são discutidos na próxima seção.

O Atuador, A

O atuador é representado de forma simplificada por um sistema linear de primeira ordem com a função de transferência

$$A = \frac{25,9}{(s + 25,9)} \quad (3)$$

Ganho aerodinâmico K_ϕ

K_ϕ é a taxa de variação do torque aerodinâmico em relação ao passo (pitch) no ponto de operação em torno do qual o sistema é linearizado

$$K_\phi = 8,09 \times 10^3 \text{ Nm/graus} \quad (4)$$

O Atraso, I

A função de transferência do atraso, devido à inércia do sistema da turbina eólica é

$$I = \frac{(1 + 11,25s)}{(1 + 7,5s)} \quad (5)$$

Conjunto de potência, D

A função de transferência do conjunto de potência, é

$$D = \frac{2123,38}{(s^4 + 33,39s^3 + 7566,13s^2 + 6421,3s + 80900)} \quad (6)$$

Deve-se mencionar que o modelo matemático do conjunto de potência, prevê a influência de cargas transitórias nos mecanismos e no gerador, sendo levemente amortecido para determinados modos de vibração. Sendo assim um sistema de quarta ordem.

Transdutor de medida, T

A função de transferência do transdutor é

$$T = \frac{1}{(1 + 0,02s)} \quad (7)$$

V. PROJETO DO CONTROLADOR

A função de transferência completa da turbina eólica para controle do ângulo de passo das pás foi descrito na Fig. 5.

Para se projetar o controlador PID para esse sistema utilizamos dois procedimentos, o primeiro usando a regra de ajuste empírico de Ziegler & Nichols e o segundo fazendo inicialmente uma redução de modelo da planta e após calculando os ganhos do controlador usando o método ITAE (Integral do produto do tempo pelo valor absoluto do erro).

A. Projeto do PID usando a regra de Ziegler-Nichols [7]

Inicialmente determinamos o ganho crítico K_{cr} para obter uma oscilação não amortecida através do arranjo

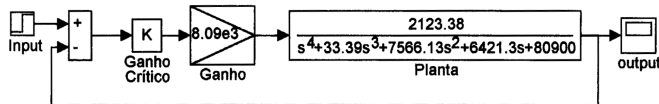


Fig. 6. Diagrama de blocos do sistema de controle para ajuste usando Ziegler-Nichols

Usando o digrama de Routh-Hurwitz foi obtido $K_{cr} = 0,07784$. Substituindo esse valor na equação característica foi obtido o período $P_{cr} = 0,453s$. Assim, os parâmetros do controlador PID são mostrados na Tabela I

TABELA I
PARÂMETROS DO CONTROLADOR PID USANDO O CRITÉRIO DE ZIEGLER-NICHOLS

	K_p	T_i	T_d
PID	0,0467	0,2265	0,0566

Portanto a função de transferência do controlador é dado por

$$G_c = 2,64 \times 10^{-3} \frac{(s + 8,83)^2}{s} \quad (8)$$

Na Fig. 7 é apresentada a resposta ao degrau do sistema, onde é possível observar um sobressinal de aproximadamente 60%, como esperado usando este método, em Ogata [7] é sugerido fazer um ajuste fino, ou seja, modificar a posição dos zeros do controlador com o intuito de reduzir o sobressinal. Isso foi feito e obtido zeros em -2. Esta modificação é observada na Fig. 8.

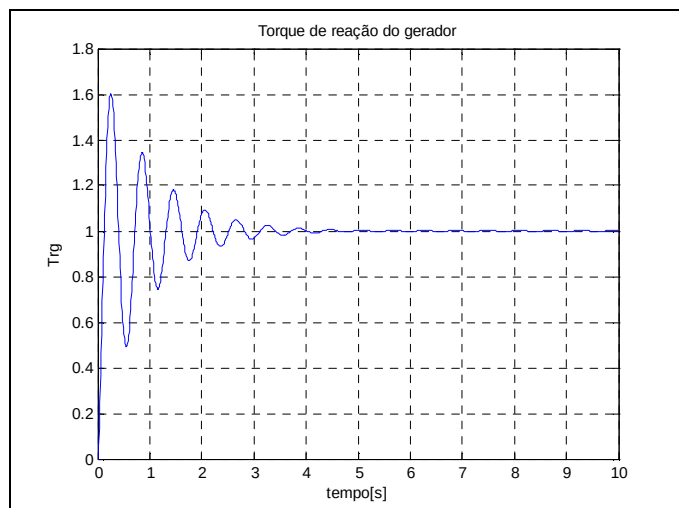


Fig. 7. Resposta ao degrau do sistema com sobressinal de 60%

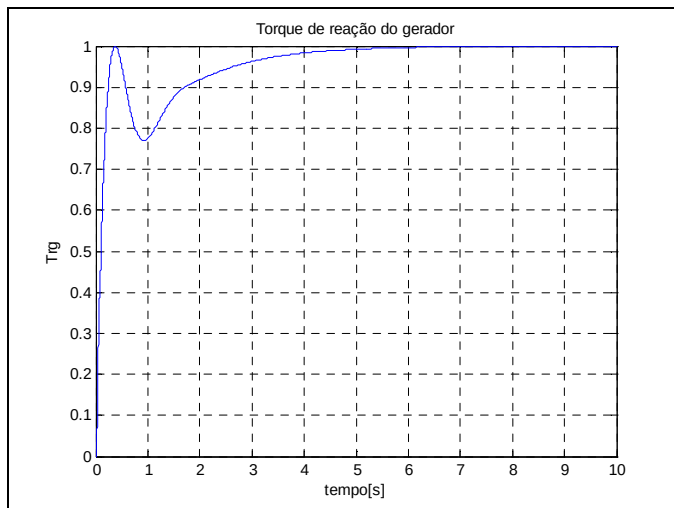


Fig. 8. Resposta ao degrau do sistema com controlador modificado

B. Projeto do PID usando o critério ITAE [6], [7]

Este método foi inicialmente proposto no trabalho de Lopez et al., 1967 [6] para perturbação de carga (problema regulatório). Este método sugere utilizar como critério de desempenho a integral de uma função do erro dentro de uma janela de tempo, suficiente para eliminar o erro em regime permanente. A vantagem deste critério é considerar toda a curva de resposta do sistema, ao invés de apenas dois pontos, como em outros métodos.

Para poder utilizar o critério ITAE, é feito inicialmente uma redução na ordem da planta, ou seja, para a planta dada

$$G(s) = \frac{1}{38,0996} \cdot \frac{80900}{(s^4 + 33,39s^3 + 7566,13s^2 + 6421,3s + 80900)} \quad (9)$$

Foi obtido através do método de redução de modelo apresentado em Dorf [6]

$$L(s) = \frac{10,7181}{(s^2 + 0,8201s + 10,7181)} \quad (10)$$

A Fig. 9 apresenta a resposta ao degrau, em malha aberta, para as duas plantas, ou seja, a original e a reduzida e como pode ser observado não apresenta quase nenhuma diferença, uma curva está praticamente sobreposta à outra

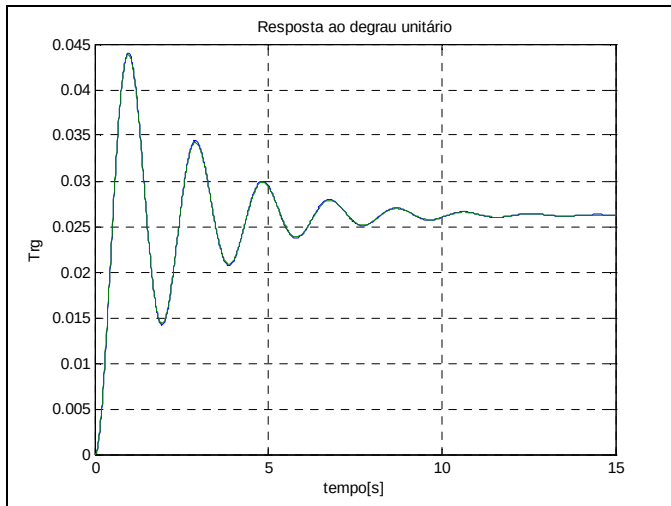


Fig. 9. Resposta ao degrau para as duas plantas a original (azul) e a planta reduzida (verde)

Os cálculos do controlador PID pelo método ITAE resultaram nas seguintes funções de transferência do controlador equação (11) e do pré-filtro equação (12) respectivamente

$$G_c(s) = \frac{0,007329s^2 + 0,0898s + 0,4394}{s} \quad (11)$$

$$G_{pf}(s) = \frac{0,43941}{0,007329s^2 + 0,0898s + 0,4394} \quad (12)$$

A Fig. 10 apresenta a resposta ao degrau do sistema com o controlador e o pré-filtro que foi necessário utilizar devido aos zeros do controlador

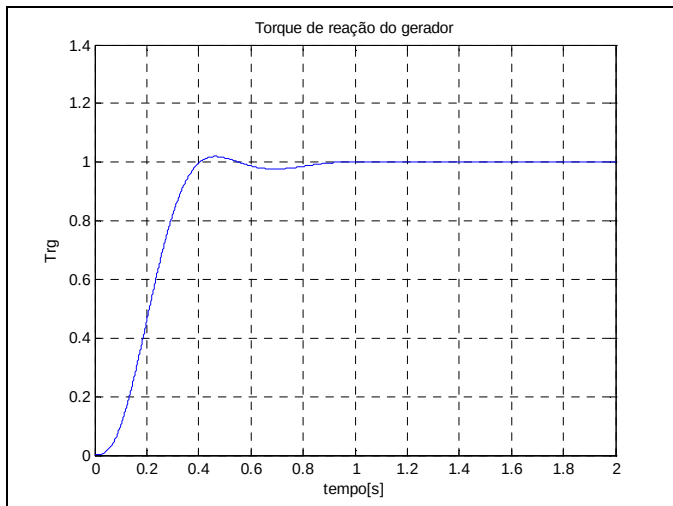


Fig. 10. Resposta ao degrau do sistema com controlador e pré-filtro método ITAE

A Fig. 11 apresenta o gráfico contendo o erro em regime permanente que é uma comparação entre o valor desejado e o valor real do torque do gerador. É possível observar que o erro tende a zero o que representa uma boa atuação do controlador ITAE.

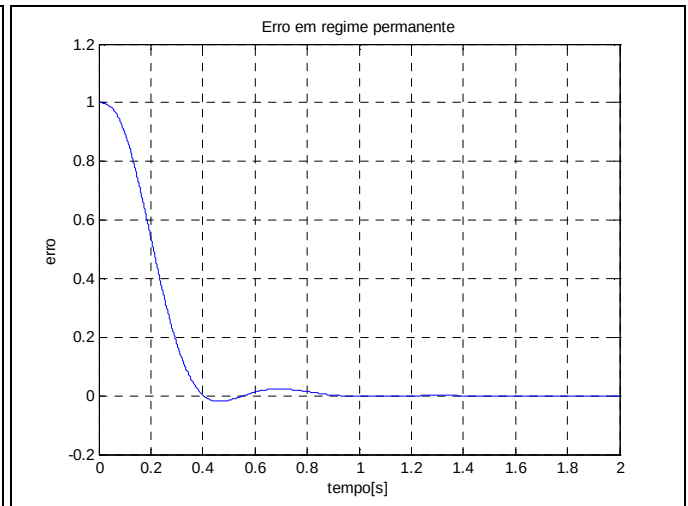


Fig. 11. Erro em regime permanente do sistema com controlador e pré-filtro método ITAE

VI. CONCLUSÃO

Os resultados foram bastante bons levando em consideração a utilização de dois métodos simples, da teoria de controle clássico, para o projeto do controlador e levando em consideração que a simulação mostrada em um dos artigos [3] ele simula e testa o desempenho de um controlador do tipo PI (Proporcional Integral).

É possível se utilizar outras abordagens para o projeto do controlador e analisar também como seria o desempenho dos controladores projetados, acrescentando os efeitos de distúrbios externos, o que poderiam ser feitos em trabalhos futuros.

Neste trabalho foram utilizados os modelos matemáticos das turbinas eólicas obtidos na literatura científica já testados e aprovados, considerados como modelos de referência. Também, uma extensão possível do trabalho seria testar estes modelos a outras turbinas eólicas de tamanhos diferentes, ou mesmo de outras configurações.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] National Renewable Energy Laboratory (NREL), US Department of Energy for renewable energy and energy efficiency research, development and deployment. Disponível: <http://www.nrel.gov>.
- [2] W. E. Leithead, S. A. de La Salle, D. Reardon, and M. J. Grimble, "Wind turbine control systems modeling an design." Industrial Control Unit, University of Strathclyde, Report prepared for UK Department of Energy, 1988.
- [3] W. E. Leithead, S. A. de La Salle, D. Reardon, "Classical control of active pitch regulation of constant speed horizontal axis wind turbines", Int. Journal of Control, vol. 55, n. 4, pp. 845-76, 1992.
- [4] W. E. Leithead, S. A. de La Salle, D. Reardon, "Role and objectives of control for wind turbines, IEE Proceedings-C, vol. 138, n. 2, pp.135-48, 1991.
- [5] W. E. Leithead, S. A. de La Salle, D. Reardon, "Application of classical control to a wind turbine", Industrial Control Unit, University of Strathclyde, Report prepared for UK Department of Energy, 1990.
- [6] R. C. Dorf, R. H. Bishop, Sistemas de Controle Modernos, LTC, Rio de Janeiro, 2001.
- [7] K. Ogata, Engenharia de Controle Moderno, Person Education do Brasil, São Paulo, 2003.

VIII. BIOGRAFIA



Francisco A. Lotufo nasceu em Taubaté/SP Brasil, em 9 Outubro, 1963. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade de Taubaté (UNITAU); Mestre em Engenharia na área de Automação e Eletrônica Industrial pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI/Itajubá; Doutorando em Engenharia Mecânica na Área de Projetos em Dinâmica e Vibrações de Sistemas Mecânicos na Universidade Estadual Paulista UNESP/ Guaratinguetá.

Professor Assistente do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP - Campus de Guaratinguetá.



F.N.Ferreira e T. M. Souza – FEG/UNESP

RESUMO—Este trabalho apresenta uma breve história sobre o desenvolvimento da energia eólica no Brasil e no mundo, a importância em investir nesta fonte de energia do ponto de vista econômico, social e ambiental. Trata da disponibilidade desta utilizando o Atlas do Potencial eólico brasileiro, programas do governo para apoiar a utilização, a situação atual e a meta de potência instalada para os próximos anos. Por fim, como exemplo da viabilidade desta fonte de energia no país, apresenta dados reais da implementação de um projeto denominado COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS, desenvolvido pela empresa brasileira ENERGYPRO.

Index Terms— energia eólica, Brasil, disponibilidade, investimento, meio-ambiente e desenvolvimento.

I. Nomenclatura

CTA - Centro Técnico Aeroespacial;

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.;

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica;

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica;

PCH's - Pequenas Centrais Hidrelétricas.

II. INTRODUÇÃO

Atualmente com a constante preocupação em todo o mundo sobre questões ambientais, vários países vêm buscando alternativas para a geração de energia mais limpa. Como resultado desta procura a energia eólica mostra-se como uma importante alternativa para o problema, visto que estudos realizados provam que os impactos ambientais das fazendas eólicas são mínimos, o combustível para esta fonte de energia é inesgotável e seu custo nulo.

Com o desenvolvimento da agricultura o homem precisava cada vez mais de força braçal para o beneficiamento dos produtos agrícolas, no início eram utilizados rodas d'água no sentido do curso dos rios para a moagem de grãos, substituindo o trabalho humano e animal, porém como rios não estão disponíveis em todos os lugares o homem começou a observar a utilização dos ventos para tal tarefa. Devido a fácil instalação e manutenção este tipo de moinho passou a ser difundido e aperfeiçoado.

O primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos é proveniente da Pérsia, por volta de 200 A.C.. Esse tipo de moinho de eixo vertical veio a se espalhar pelo mundo islâmico sendo utilizado por vários séculos. Acredita-se que antes da invenção dos cata-ventos

na Pérsia, a China (por volta de 2000 A.C.) e o Império Babilônico (por volta 1700 A.C) também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação [1].

A primeira adaptação dos cataventos de bombeamento de água e moagem para geração de energia elétrica foi feita por Charles F.Bruch em 1888, na cidade de Cleveland, Ohio, Estados Unidos. O experimento de Bruch foi um importante marco para a utilização da energia eólica na geração de energia elétrica. Já a Rússia foi o primeiro país a interligar um aerogerador a rede elétrica de uma termelétrica e obter sucesso no projeto. A Fig. 1 mostra a trajetória dos estudos em energia eólica no mundo ao longo da história.



Fig.1. Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX.

Com a descoberta de grandes reservas naturais de combustíveis fósseis e a geração de energia elétrica de forma centralizada, utilizando por exemplo energia hidráulica, causaram um declínio no interesse pela energia eólica.

Durante a Segunda Guerra Mundial países investiram na utilização de energia eólica, com o objetivo de economizar combustíveis fósseis ou devido ao isolamento da rede elétrica em alguns lugares. Após a Segunda Guerra Mundial os investimentos em aerogeradores sofreram outro declínio, pois os mesmos não podiam concorrer com os preços da energia gerada por combustíveis fósseis e grandes centrais hidrelétricas. Todos os projetos instalados antes da década de setenta foram desativados por não poderem competir com os preços das tecnologias fósseis e das centrais hidrelétricas. Além destas tecnologias havia uma grande perspectiva a respeito da usina nuclear, acreditava-se que seria uma fonte segura e barata de energia.

Na década de 1970 os preços do petróleo abalou todo o mercado mundial, o que alavancou novamente as pesquisas

e investimentos em outras fontes de energia, entre elas a eólica. Com o passar dos anos houve um progresso significativo no tamanho e na potência dos aerogeradores utilizados comercialmente, a Fig. 2 ilustra esta evolução:

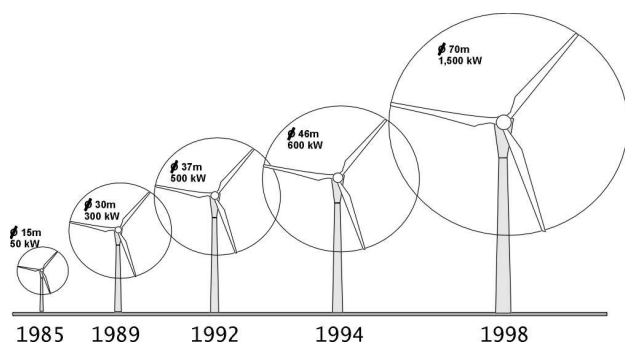


Fig. 2. Evolução do tamanho dos aerogeradores comerciais.

No Brasil a energia eólica tem sido utilizada a um longo período, assim como no restante do mundo para a moagem de grãos e bombeamento de água em regiões mais isoladas. A princípio a utilização para geração de energia elétrica também vem sendo utilizada cada vez mais em regiões rurais, para levar um pouco de conforto as pessoas que vivem em locais afastados da rede elétrica. No Brasil o uso dos aerogeradores para este fim é justificável em face a dimensão do país, levar energia elétrica a estas famílias da forma tradicional sairia muito caro. Os estudos no país para fabricação de aerogeradores com material nacional foram iniciados pelo CTA na década de 70 e até os dias atuais o Brasil vem investindo em pesquisas sobre a utilização desta energia, acompanhando a tendência mundial na busca por fontes de energia mais limpa.

III. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal mostrar dados que provam que o Brasil possui um potencial muito grande para a instalação de fazendas eólicas e que esta fonte é uma alternativa para as questões ambientais na geração de energia.

A. Disponibilidade de ventos

Para a análise de viabilidade econômica de um projeto eólico é fundamental conhecer o comportamento do vento da região em questão. Na geração de energia os dados sobre o vento precisam ser muito precisos e isto exige uma medição de vários anos, esta avaliação é o ponto central para a análise de viabilidade. Além de fornecer os dados sobre a disponibilidade de vento servem para serem feitos aprimoramentos nos aerogeradores para uma determinada região. Estes dados da velocidade do vento não são fáceis de se obter, visto que a velocidade dos ventos variam de acordo com a altura, estação do ano, acidentes geográficos, vegetação e outros diversos fatores.

No Brasil a medição de dados específicos para a geração de energia elétrica iniciou-se na década de oitenta com a iniciativa da ELETROBRAS, com o objetivo de criar o primeiro Atlas do potencial eólico nacional. Na segunda metade da década de noventa foi iniciada a atualização deste atlas em uma parceria feita entre a ELETROBRAS e o CEPEL, que é a versão de 2001. Este atlas contém uma tabela com o cálculo do potencial brasileiro, como pode ser

visto na Tabela I e mapas identificando as regiões como maiores potenciais [2], na Fig. 3 pode ser visto um mapa geral do Brasil.

Tabela I
Cálculo do potencial eólico brasileiro.

REGIÃO	INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADES					INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
	VENTO [m/s]	ÁREA [km²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]	VENTO [m/s]	ÁREA (CUMULATIVA) [km²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
NORTE	6 - 6,5	11460	22,92	0,13	25,58	>6	24206	48,41	70,49
	6,5 - 7	6326	12,65	0,17	18,46	>6,5	12746	25,49	44,91
	7 - 7,5	3300	6,60	0,20	11,33	> 7 m/s	6420	12,84	26,45
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15	>7,5	3120	6,24	15,11
	8 - 8,5	903	1,81	0,30	4,65	>8	1454	2,91	7,96
	>8,5	551	1,10	0,35	3,31	>8,5	551	1,10	3,31
NORDESTE	6 - 6,5	146589	293,18	0,13	327,19	>6	245105	490,21	649,50
	6,5 - 7	60990	121,98	0,17	178,02	>6,5	98516	197,03	322,31
	7 - 7,5	24383	48,77	0,20	83,73	> 7 m/s	37526	75,05	144,29
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43	>7,5	13143	26,29	60,56
	8 - 8,5	3088	6,18	0,30	15,91	>8	3958	7,92	21,13
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23	>8,5	870	1,74	5,23
CENTRO-OESTE	6 - 6,5	41110	82,22	0,13	91,76	>6	50752	101,50	120,83
	6,5 - 7	8101	16,20	0,17	23,65	>6,5	9642	19,28	29,07
	7 - 7,5	1395	2,79	0,20	4,79	> 7 m/s	1541	3,08	5,42
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,60	>7,5	146	0,29	0,63
	8 - 8,5	6	0,01	0,30	0,03	>8	6	0,01	0,03
	>8,5	0	0,00	0,35	0,00	>8,5	0	0,00	0,00
SUDESTE	6 - 6,5	114688	229,38	0,13	255,99	>6	175859	351,72	446,07
	6,5 - 7	46302	92,60	0,17	135,15	>6,5	61171	122,34	190,08
	7 - 7,5	11545	23,09	0,20	39,64	> 7 m/s	14869	29,74	54,93
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44	>7,5	3324	6,65	15,29
	8 - 8,5	594	1,19	0,30	3,06	>8	891	1,78	4,84
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78	>8,5	297	0,59	1,78
SUL	6 - 6,5	121798	243,60	0,13	271,86	>6	171469	342,94	424,74
	6,5 - 7	38292	76,58	0,17	111,77	>6,5	49671	99,34	152,88
	7 - 7,5	9436	18,87	0,20	32,40	> 7 m/s	11379	22,76	41,11
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75	>7,5	1943	3,89	8,71
	8 - 8,5	313	0,63	0,30	1,61	>8	370	0,74	1,95
	>8,5	57	0,11	0,35	0,34	>8,5	57	0,11	0,34
TOTAL BRASIL ESTIMADO						>6	667391	1334,78	1711,62
						>6,5	231746	463,49	739,24
						> 7 m/s	71735	143,47	272,20
						>7,5	21676	43,35	100,30
						>8	6679	13,36	35,93
						>8,5	1775	3,55	10,67

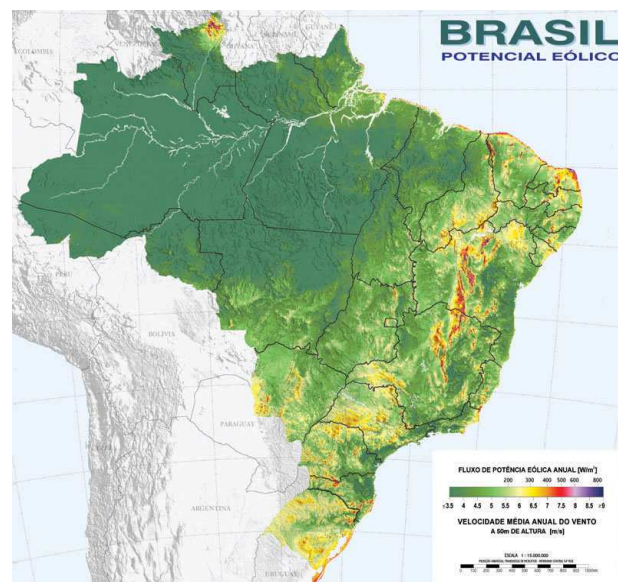


Fig.3. Mapa temático da Velocidade Média Anual do Vento a 50 metros de Altura em m/s.

Como pode ser visto na Tabela 1, o potencial eólico brasileiro é de 143.000 MW, sendo que 7.694,05 MW já foram autorizados e apenas 443MW estão instalados, conforme informado pelo PROINFA. A energia disponível

no mundo é estimada em 500.000 TWh/ano, o que significa mais de 30 vezes o atual consumo mundial de eletricidade. Desse potencial, no mínimo 10% é tecnicamente aproveitável, o que corresponde a cerca de quatro vezes o consumo mundial de eletricidade [3].

Como pode ser observado no mapa, as regiões mais favoráveis para investimentos, são as regiões nordeste, sudeste e sul. Porém como citado anteriormente as velocidades dos ventos dependem de diversos fatores, sendo assim este atlas serve somente como uma orientação da disponibilidade das regiões. Para ser implementado de fato um projeto é necessário um estudo detalhado da região e fazer medições no local onde pretende-se investir na geração de energia elétrica.

B. Incentivos políticos

Assim como o restante do mundo, o Brasil vem buscando alternativas para diversificar sua matriz energética, para diminuir a dependência das fontes fósseis, devido ao seu custo financeiro e ambiental. Para que se possa alavancar a utilização das fontes alternativas de energia, o governo brasileiro criou um Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA. Este programa foi concebido com o objetivo de incentivar projetos como energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas. Coube ao Ministério de Minas e Energia – MME, definir as diretrizes, elaborar o planejamento do Programa e definir o valor econômico de cada fonte e à Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás), o papel de agente executora, com a celebração de contratos de compra e venda de energia (CCVE).

Para tanto, foi estabelecido que o valor pago pela energia elétrica adquirida, além dos custos administrativos, financeiros e encargos tributários incorridos pela Eletrobrás na contratação desses empreendimentos, fossem rateados entre todas as classes de consumidores finais atendidas pelo SIN, com exceção dos consumidores classificados na Subclasse Residencial Baixa Renda (consumo igual ou inferior a 80 kWh/mês) [3].

O Programa prevê a implantação de 144 usinas, totalizando 3.299,40 MW de capacidade instalada, sendo 1.191,24 MW provenientes de 63 PCHs, 1.422,92 MW de 54 usinas eólicas, e 685,24 MW de 27 usinas a base de biomassa. Toda essa energia tem garantia de contratação por 20 anos pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) [3].

O PROINFA beneficiará as 3 fontes de energia citadas, porém a mais favorecida será a eólica. Atualmente o Brasil possui 443MW instalados em energia eólica, este número foi alcançado em 3 anos, saltando de 22MW para o atual, um aumento de mais de 2000%.

O PROINFA não visa somente o aumento da demanda de energia e a diversificação da matriz energética, mas também trazer benefícios a população através destes projetos. A seguir pode-se ver os benefícios esperados:

- **Social:** Geração de 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos durante a construção e a operação, sem considerar os de efeito-renda;
- **Tecnológico:** Investimentos de R\$ 4 bilhões na indústria nacional de equipamentos e materiais;

- **Estratégico:** Complementaridade energética sazonal entre os regimes hidrológico/eólico (NE) e hidrológico/biomassa (SE e S). A cada 100 MW médios produzidos por parques eólicos, economizam-se 40m³/s de água na cascata do rio São Francisco;
- **Meio Ambiente:** A emissão evitada de 2,5 milhões de tCO₂/ano criará um ambiente potencial de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto;
- **Econômico:** Investimento privado da ordem de R\$ 8,6 bilhões.

O PROINFA é um grande passo para o crescimento dos parques eólicos e das demais fontes alternativas de energia, visto que países como a Alemanha obtiveram grande desenvolvimento nesta área devido ao apoio do governo. O Estado precisa garantir a compra desta energia e criar legislações específicas para a mesma. No Brasil já existem leis que tratam diretamente destas fontes de energia, o que mostra que estamos caminhando para a mesma direção de países como Alemanha, Estados Unidos, Dinamarca, que são alguns dos que possuem maior participação de energia eólica em suas matrizes energéticas.

C. Meio ambiente

Uma questão importante para a viabilidade de qualquer projeto nos dias atuais é a ambiental. A energia eólica tem como principal vantagem não emitir dióxido de carbono, que é o principal gás na causa do efeito estufa. A moderna tecnologia eólica apresenta um balanço energético extremamente favorável e as emissões de CO₂ relacionadas com a fabricação, instalação e serviços durante todo ciclo de vida do aerogerador são “recuperados” depois dos três a seis meses de fabricação [4].

A área dos parques eólicos podem ser utilizadas como pastagens e para atividades agrícolas, na Fig. 4 pode-se ver um exemplo desta atividade.



Fig.4. Práticas de atividades agropecuárias em parques eólicos.

Uma das maiores desvantagens das turbinas eólicas são as mortes de pássaros, porém com um estudo prévio sobre a

localização, pode ser reduzido significativamente este problema. Acidentes com pássaros variam de acordo com as regiões das fazendas, não podem ser instaladas em rotas de migração e além disto as mortes variam de acordo com a espécie. O maior incidente de aerogeradores e pássaros aconteceu em Tarifa, na Espanha, em 1993 o qual foi chamado de um “grande mal entendido” pelo diretor da Agência Espanhola de Energia Renovável –IDAE, que fez uma das mais extraordinárias admissões de culpa:

“O que me ocorreu sobre o fato é que foi um inoportuno lapso de memória. Ninguém pensou nas migrações dos pássaros”.

Em pesquisa realizada mostra que as mortes de pássaros por turbinas eólicas ainda é muito menor que as causadas por outros fatores, o resultado da pesquisa pode ser vista na Fig. 5.

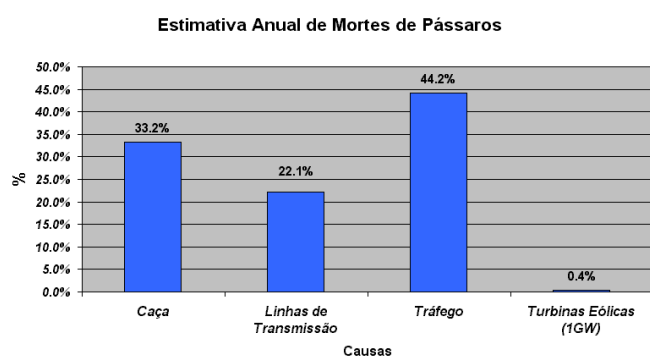


Fig.5. Estimativa de mortes anuais de pássaros nos Países Baixos

O ruído produzido pelas turbinas já foi na década de 80 e início da década de 90 um dos principais problemas para a implantação das fazendas eólicas, porém com o desenvolvimento e domínio da tecnologia este problema tem sido reduzido cada vez mais ao passar dos anos. O fator ruído impede de serem instaladas turbinas próximos a centros urbanos.

O impacto visual é outra questão ambiental cerca aos parques eólicos, porém é uma questão muito subjetiva, a única maneira de diminuir este impacto é através da conscientização da população local sobre energias mais limpas. Há pessoas que enxergam nos aerogeradores algo bom, uma energia sustentável e boa para o futuro, outras olham negativamente para a nova paisagem.

IV- COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS [6]

A.Objetivo

O objetivo principal do empreendimento denominado COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS é produzir e comercializar energia elétrica a partir do recurso eólico abundante na área de PALMAS – Paraná. O projeto consiste na implantação de um complexo gerador eólico com capacidade instalada de 150 MW, envolvendo a montagem de turbinas eólicas, construção de infra-estrutura e instalações elétricas incluindo subestações.

O COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS situa-se no Km 29 da Rodovia BR 280 na região conhecida como “Campos de Palmas” a 320 Km de Curitiba e 30 Km da sede do município de Palmas, a uma latitude 26°31'00,7" Sul e a uma longitude 51°43'33" Oeste,

com altitudes variando entre 1250 a 1290 metros acima do nível do mar, no sul do estado do Paraná, perto da divisa com Santa Catarina. A Fig. 6 traz um mapa da localização do parque eólico.



Fig.6. Localização no mapa

A área do empreendimento localiza-se próxima à rodovia asfaltada BR280, o que facilita o acesso e conseqüentemente a manutenção dos aerogeradores, a região é plana a suavemente ondulada e não apresenta nenhum aspecto ambiental negativo que desaconselhe à implantação do referido Complexo Gerador Eólico.

A área arrendada de 1.150 hectares para o complexo gerador eólico está inserida na região de maior potencial eólico do estado do Paraná. A avaliação do potencial eólico do local foi feita a partir de um registro histórico de parâmetros eólicos por três (3) anos consecutivos coletados de uma torre anemométrica instalada em 2006, Fig.7 e Fig.8, perto da área do empreendimento. A distribuição estatística de Weibull estimada é definida pelos parâmetros $k = 2,83$ e $c = 7,95\text{m/s}$. A densidade energética média é de 405 W/m^2 .



Fig.7. Torre anemométrica de 60 metros de altura instalada e comissionada para o projeto

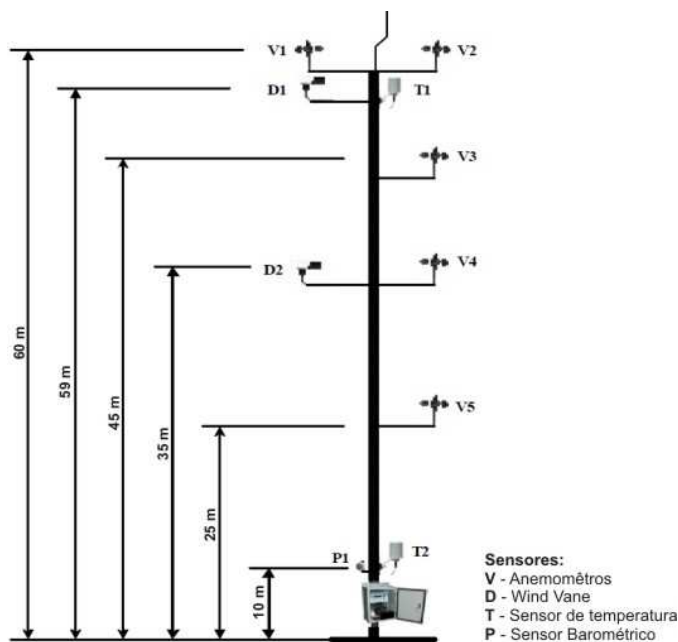


Fig.8. Configuração da Torre Anemométrica

B.CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O Estado do Paraná, em sua maior parte, forma-se de um vasto planalto suavemente inclinado em direção noroeste, oeste e sudoeste. Compreende os terrenos arenítico-basálticos do Planalto Meridional Brasileiro.

A área do projeto está na região do Planalto de Palmas. Este planalto compreende as terras que ficam na parte norte do divisor de águas entre os rios Iguaçu e Uruguai. Suas altitudes chegam a 1310 metros, diminuindo até 300 metros à medida que se aproximam do vale do Rio Iguaçu. A rugosidade média na área do projeto é bem baixa, apresentando valor médio de 0,15 conforme estudos locais e MODELO (Fig.9).

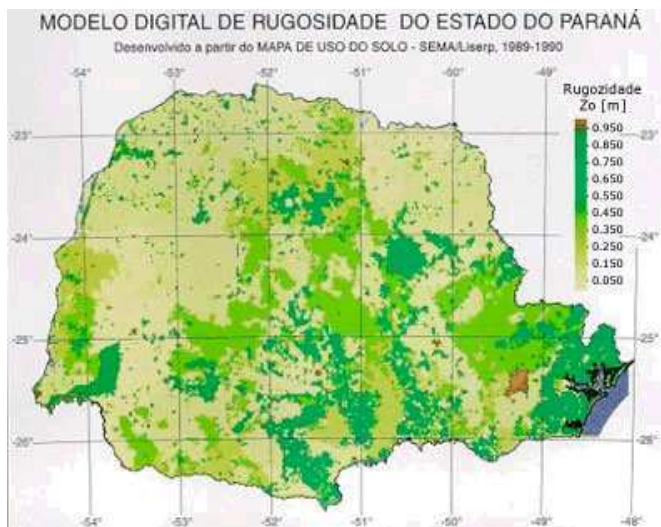


Fig.9. Mapa de Rugosidade do estado do Paraná.

A Fig.10 exemplifica o tipo de terreno característico da área do empreendimento.



Fig.10. Imagem da área do empreendimento.

C.CONCEPÇÃO TÉCNICA

O COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS terá capacidade instalada total de 120 MW. O estudo final do micrositing foi constituído por 75 turbinas eólicas modelo V90, com potência nominal de 2 MW cada.

Este arranjo leva em consideração as direções predominantes do local para minimizar a interferência entre os rotores eólicos. A disposição das máquinas também otimiza as instalações elétricas internas. Uma subestação de saída fará a conexão da central eólica com o sistema elétrico nacional.

D.CARACTERÍSTICAS DOS AEROGERADORES UTILIZADOS NO ESTUDO DE MICROSITING

A turbina eólica com melhor eficácia para o projeto é a V90-2MW do fabricante dinamarquês VESTAS. Esta máquina tem potência nominal de 2 MW, um rotor de 3 pás com 90m de diâmetro e gerador de indução duplamente alimentado. Apresenta controle de potência por ângulo de passo que limita a potência elétrica máxima produzida pelo gerador a velocidades de vento acima da nominal. Um resumo das informações técnicas da turbina eólica, encontra-se na Tabela II.

Tabela II

Principais informações técnicas da turbina eólica a V90-2MW.

Potência Nominal	2 MW
Diâmetro	90m
Área do rotor	6.362m ²
Rotação do rotor	Variável de 9 a 14.9 rpm
Peso do rotor	38T
Peso do cubo	68T
Gerador	Assíncrono duplamente alimentado
Tensão nominal	690V AC
Rotação do gerador	Variável de 1100 a 1.900rpm
Fator de potência	0,95 CAP a 0,95 IND (carga parcial) 1 (potência nominal)
Tipo de torre	Tubular de aço
Altura da torre	90m
Peso da torre	150T

E.LAYOUT DO COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS

O COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS (Fig.11) é composto por cinco Centrais Geradoras de 30 MW cada. As 75 turbinas eólicas serão dispostas em fileiras, nas quais o distanciamento lateral entre máquinas será de aproximadamente 200 m, e o distanciamento entre fileiras 450 m.

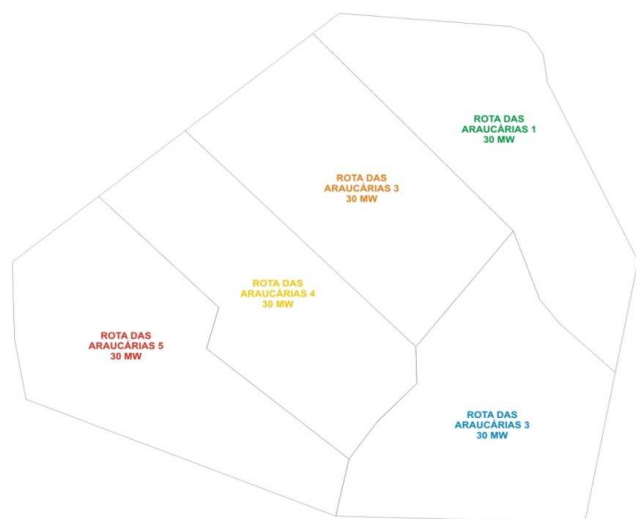


Fig.11. Layout do Complexo Gerador Eólico

F.RENDIMENTOS PREVISTOS

A simulação de energia gerada pelo COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS indica uma produção anual de aproximadamente 420 GWh, com um fator de capacidade de 35,84%. Esta estimativa de energia anual leva em consideração o déficit de energia por efeitos de esteira da central eólica apenas.

Outros rendimentos envolvidos no processo de conversão de energia e operação/manutenção da central eólica foram considerados, e deduzidos da energia gerada, resultando na

energia líquida da central. A Tabela III mostra os rendimentos previstos e seus respectivos valores, bem como a energia líquida.

Tabela III
Rendimentos anuais previstos e energia líquida resultante.

Energia Bruta	420,00	GWh /ano
Eficiência Elétrica	97%	
Disponibilidade	97%	
Degradação das pás	99,50%	
Manutenção da subestação	99,80%	
Consumo próprio da central	3,85 MWh	
Energia Líquida	392,56	GWh / ano

G.DADOS ANEMOMÉTRICOS

Um resumo da estatística dos dados de vento do empreendimento é apresentado na Tabela IV. A distribuição estatística de Weibull estimada é definida pelos parâmetros $k = 2,83$ e $c = 7,95$ m/s. A densidade energética média é de 405 W/m² para a massa específica do ar média de 1,08 kg/m³.

Tabela IV
Resumo da estatística dos dados de vento.

Informações da Coleta de Dados					
Início:	01/11/2006	Sensor	Canal	Altura	Dados Válidos
Fim:	30/10/2007	#40C	1	60 m	92,58%
# de pontos:	48653	#40	2	35 m	92,58%
Interv. de integração:	10 min	#200P	7	60 m	92,58%
Parâmetros Principais (60 m)					
Velocidade média do vento:				7,23m/s	
Intensidade de turbulência média:				11,04%	
Velocidade extrema do vento (rajada):				17.47 m/s	
Densidade de potência:				405 W/m²	
Distribuição de Weibull (60 m)					
Fator de forma (k):		2,83			
Fator de escala (c):		7,95 m/s			
Parâmetros Principais (35 m)					
Velocidade média do vento:				6,31 m/s	
Intensidade de turbulência média:				112,83%	
Velocidade extrema do vento (rajada):				16,10 m/s	
Densidade de potência:				303 W/m²	
Distribuição de Weibull (35 m)					
Fator de forma (k):		2,49			
Fator de escala (c):		7.12m/s			

A análise do potencial eólico para a área do empreendimento foi realizada através de simulação computacional utilizando o programa WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Este programa simula o escoamento do vento ao longo do terreno, através de um modelo computacional de micro escala da atmosfera desenvolvido especificamente para análise de potencial eólico. Como dados de entrada utilizou-se informações de topografia e rugosidade da área, imagens de satélite georeferenciadas em alta resolução, e os parâmetros eólicos

estatísticos. Com os resultados de simulação do escoamento do vento determinou-se o regime de vento para cada ponto do terreno, na altura de interesse. Na Tabela V estão os dados encontrados através do programa.

Tabela V
Principais parâmetros eólicos médios mensais.

Mês	Parâmetros eólicos			Parâmetros climáticos	
	v [m/s]	k [-]	c [m/s]	T [°C]	p [kg / m ³]
Janeiro	8,54	2,80	9,25	20,30	1,08
Fevereiro	6,92	2,95	7,73	18,50	1,08
Março	6,17	3,04	6,87	16,80	1,08
Abril	4,85	2,71	5,50	15,40	1,08
Mai	5,32	2,84	5,97	12,30	1,08
Junho	5,90	2,80	6,53	11,60	1,08
Julho	6,61	2,99	7,29	11,90	1,08
Agosto	7,57	3,01	8,31	13,70	1,08
Setembro	8,59	2,67	9,38	14,30	1,08
Outubro	9,02	2,64	9,78	15,20	1,08
Novembro	8,79	2,56	9,53	17,70	1,08
Dezembro	8,53	2,96	9,31	19,40	1,08
Valores médios	7,23	2,83	7,95	15,59	1,08

<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>. Arquivo consultado em novembro de 2009;

[4] Terciote, R., A Energia Eólica e o Meio Ambiente, UNICAMP, 2001;

[5] R.M.Dutra, “Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro”, dissertação de mestrado, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

[6] Dados do projeto “O COMPLEXO GERADOR EÓLICO ROTA DAS ARAUCÁRIAS” Foi cedido gentilmente pela empresa ENERGYPRO.

V.Conclusões

A energia eólica é uma das formas mais limpas e competitivas de produção de eletricidade da atualidade. Os projetos eólicos implantados no Brasil confirmam os prognósticos de viabilidade e atestam o grande potencial eólico, disponível em maior parte do território nacional, como um exemplo desta viabilidade foi demonstrado os dados de um projeto real, Complexo Gerador Rota das Araucárias.

Além destes dados de projeto, outro fator que atesta a viabilidade da utilização da energia eólica no Brasil foi o crescimento nos últimos 3 anos de 2000% na potência instalada com o programa de apoio do governo, o PROINFA. Ainda há barreiras para a implementação de parques eólicos, mas com domínio maior da tecnologia estes obstáculos estão diminuindo. Como observado também, uma das causas de impedimento do crescimento desta fonte é a desinformação da população e falta de conscientização da necessidade da complementação da matriz energética mundial com fontes menos prejudiciais ao meio ambiente. A energia eólica ainda traz problemas para o meio ambiente, porém com estudos prévios da localização das fazendas é possível diminuir consideravelmente estes impactos, além disto não há uma fonte 100% inofensiva a natureza e sim fontes menos agressivas. Todavia, a energia eólica possui vantagens sociais, como a geração de empregos e levar eletricidade a lugares mais isolados, contribuindo desta maneira para a fixação do homem no campo. Com leis, incentivos do Estado e a conscientização da população os ventos que movem as pás das turbinas, assim como outras fontes renováveis de energia, irão ajudar a levar o Brasil rumo ao crescimento e desenvolvimento econômico e social.

VI.Referências

[1] História da Energia Eólica e suas utilizações.[Online].Disponível: <http://www.cresesb.cepel.br/>. Arquivo consultado em outubro de 2009;

[2] ELETROBRÁS, CEPEL. Atlas do potencial eólico brasileiro.CEPEL, Rio de Janeiro, 2001;

[3] PROINFA.[Online].

Disponível:

