



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica

CESAR AUGUSTO MOREIRA AMÊNDOLA

**“Contribuição ao Estudo de Aerogeradores de Velocidade e Passo Variáveis
com Gerador Duplamente Alimentado e Sistema de Controle Difuso”**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga

São Carlos, 2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A511c Amêndola, César Augusto Moreira
Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade
e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e
sistema de controle difuso / César Augusto Moreira
Amêndola ; orientador Diógenes Pereira Gonzaga. -- São
Carlos, 2007.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração Sistemas
Elétricos de Potência) -- Escola Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo, 2007.

1. Fontes alternativas de energia. 2. Energia eólica.
3. Controle de captação de turbinas. 4. Controle vetorial
de velocidade. 5. Geradores de indução duplamente
alimentados. 6. Controle difuso. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CESAR AUGUSTO MOREIRA AMENDOLA**

Tese defendida e julgada em 05/10/2007 perante a Comissão Julgadora:



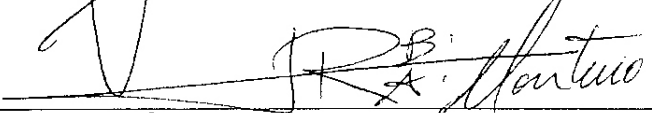
Prof. Associado **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



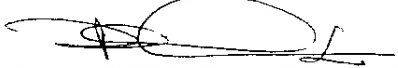
Prof. Dr. **JOSÉ ÂNGELO CAGNON**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP-Campus de Bauru)

APROVADO



Prof. Dr. **JOSÉ ROBERTO BOFFINO DE ALMEIDA MONTEIRO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO




Dr. **PAULO ESTEVÃO CRUVINEL**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

APROVADO



Prof. Titular **YARO BURIAN JUNIOR**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho à Tatiana, minha amada esposa, pela sua atenção constante, dedicação incansável e paciência ilimitada ao longo das intermináveis horas de estudo. E, em especial, pelo amor, carinho e incentivo que me iluminaram ao longo dos períodos mais turbulentos.

Dedico também ao Leonardo, meu filho, por nos ensinar a fazer muito mais em muito menos tempo e pela sua presença alegre e sorridente que nos revigora todos os dias.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças para superar todos os obstáculos.

A minha esposa Tatiana, pelo inestimável amparo em todas as ocasiões e nas mais variadas demandas, todos os dias, durante todos estes anos.

Ao Professor Doutor Diógenes Pereira Gonzaga, pela excelente orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho, pela confiança em mim depositada e pelos inúmeros socorros prestados com o envio de referências bibliográficas, com as traduções e revisões dos artigos, com as inscrições em congressos e com as impressões dos exemplares.

Aos Professores Azauri Albano de Oliveira Junior e José Ângelo Cagnon, pelas valiosas contribuições feitas na ocasião do Exame de Qualificação.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfo e glória, mesmo expondo-se à derrotas, do que formar fila com os pobres de espírito, que nem gozam muito, nem sofrem muito, porque vivem nesta penumbra cinzenta, que não conhecem vitória nem derrota”.

Franklin Roosevelt

RESUMO

AMÊNDOLA, C. A. M. **Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso.** 2007. 216p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

A captação eficaz da energia eólica ocorre por meio de turbinas de três pás com ângulo de passo e velocidade de rotação ajustáveis, sendo o ajuste do ângulo de passo utilizado para limitar a captação de energia na ocorrência de ventos muito fortes e o ajuste da velocidade de rotação utilizado para maximizar a captação da energia cinética dos ventos fracos. Neste regime de operação, o gerador deve converter a energia mecânica de entrada, caracterizada por velocidade de rotação e conjugado variáveis, em energia elétrica de saída nos padrões da rede elétrica a que estão conectados, caracterizada por tensão de valor eficaz e frequência constantes. No presente trabalho, a conversão eletromecânica de energia é realizada por um gerador de indução duplamente alimentado, excitado pelos enrolamentos rotóricos por meio de um conversor eletrônico. O comportamento estocástico dos ventos e as não linearidades significativas da turbina eólica e do gerador motivaram a utilização de controladores difusos, elaborados de acordo com a seguinte metodologia: A base de regras foi estabelecida a partir dos princípios físicos e da dinâmica desejada para o sistema em malha fechada; as funções de pertinência de entrada foram distribuídas de maneira a garantir uma maior sensibilidade nas regiões próximas ao valor de referência; a distribuição das funções de pertinência de saída proporciona um aumento significativo da intensidade da ação de controle conforme a saída do sistema se afaste do valor de referência; e, a sintonia fina foi feita pelo dimensionamento dos universos de discurso de maneira a garantir a estabilidade do sistema em malha fechada e a dinâmica desejada para a variável controlada. Os resultados das simulações computacionais de variações em degrau nos valores de referência, tanto da velocidade de rotação quanto da potência reativa, demonstram dinâmica estável, sem *overshoot* ou erro de regime permanente. Destaca-se que, em relação ao estado-da-arte, o controlador difuso da velocidade de rotação proporciona uma dinâmica semelhante, mas com uma ação de controle desprovida de transitórios e picos 65% menores e o controlador difuso de potência reativa impõe uma resposta 64% mais rápida. Os resultados de simulações computacionais de regimes reais de ventos ilustram as atuações do sistema de controle, no ângulo de passo e na velocidade de rotação da turbina, para proporcionar ao aerogerador uma operação suave e estável sob diversos regimes de vento, desde os mais fracos até os mais intensos e turbulentos.

Palavras-Chave: Fonte alternativa, energia eólica, controle de captação de turbinas, controle vetorial de velocidade e de reativos de geradores de indução duplamente alimentados, Controle difuso.

ABSTRACT

AMÊNDOLA, C. A. M. **Contribution to the study of fuzzy control applied to variable-speed variable-pitch wind generators with double-fed induction generator.** 2007. 216p. Thesis (Doctoral) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2007.

The efficient capture of aeolic-energy occurs by means of three blades turbines with adjustable pitch-angle and angular-speed. The pitch-angle adjustment is utilized to limit the aeolic-energy capture when occur very strong winds and, the angular speed adjustment is utilized to maximize the capture of kinetic energy of weak winds. In this mode of operation the generator must convert the input mechanical energy, which is characterized by variable angular speed and variable torque, in the output electrical energy that must obey the standards of the electrical network with constant RMS-voltage and frequency, where the aeolic-generator is connected. In this work the electromechanical energy conversion is done by one double-fed induction generator excited by means of an electronic converter applied to the rotor winding. The air masses complex dynamics, the wind regime stochastic nature, and the turbine and generator non-linear behavior motivated the use of the fuzzy controllers, elaborated in agreement with the following methodology: The rule base was established from the system's physical principles and from the desired closed loop dynamics; the input membership functions was distributed so that ensure a bigger sensibility in the regions near the reference value; the output membership functions distribution provide a control action significant increase as the systems output move away from the reference value; and, the fine tuning was made via scaling universes of discourse. The computer simulation's results of the, rotational speed and reactive power, reference values step, demonstrated stable dynamics, without overshoot or steady state error. It is emphasize that, in relation to state-of-art, the fuzzy speed controller provide similar dynamic, but with a control action without transients and peaks 65% smaller and the fuzzy reactive power controller impose a 64% faster response. Some computer simulations of the wind real regime show the pitch-angle and turbine angular speed reactions so that to supply the wind generator with a soft and stable operation, from the weak winds up to the most strong and turbulent winds.

Keywords: Alternative source; aeolic-energy; turbine capture control; vectorial control of speed and reactive power of double-fed induction generators, fuzzy control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	– Fotos de cata-ventos multipás	27
Figura 1.2	– (a) Aerogerador de grande porte. (b) Usina eólica <i>offshore</i> (mar adentro)	29
Figura 1.3	– Distribuição mundial dos 53000[TWh/ano] de energia eólica	30
Figura 1.4	– Evolução do custo da geração eólica desde 1980 até 2005.....	30
Figura 1.5	– Comparativo do custo de geração de outras fontes alternativas em relação à eólica.....	31
Figura 1.6	– Comparativo do custo de geração de fontes convencionais em relação à eólica.....	31
Figura 1.7	– Custos ambientais associados à geração de energia elétrica por diversas fontes.....	32
Figura 1.8	– Custo do kilowatt-hora gerado por usinas eólicas de diferentes capacidades instaladas para três valores diferentes de velocidade média anual do vento	33
Figura 1.9	– Emissões de gases poluentes causadas por combustíveis fósseis ...	34
Figura 1.10	– Distribuição do número de fatalidades ocorridas com aves em regiões antrópicas tomadas sobre um total de 10.000, onde menos de 0,01% são atribuídas a aerogeradores.....	35
Figura 1.11	– Nível de ruído sonoro emitido por aerogeradores e outras fontes ..	36
Figura 1.12	– Consumo de água das principais usinas convencionais, solar e eólica	37
Figura 1.13	– Exemplos de aproveitamento da área ocupada pela usina eólica com atividades rurais: (a) Ovinocultura. (b) Bovinocultura e (c) Agricultura	37
Figura 1.14	– Evolução da capacidade eólio-elétrica instalada ao final de 2006..	40
Figura 1.15	– Distribuição geográfica da capacidade eólio-elétrica instalada ao final de 2006.....	41
Figura 1.16	– Estimativa da demanda mundial por energia elétrica e de sua taxa de crescimento.....	42

Figura 1.17	– Estimativa da produção mundial das fontes eólicas, de sua taxa de crescimento e de sua participação na demanda mundial de energia elétrica.....	43
Figura 1.18	– Estimativa da evolução da capacidade instalada.....	44
Figura 1.19	– Estimativa do investimento necessário em fontes eólicas.....	44
Figura 1.20	– Estimativa do custo de geração das fontes eólicas.....	45
Figura 1.21	– Estimativa da criação de empregos no setor da geração eólica.....	46
Figura 1.22	– Estimativa da redução da emissão de dióxido de carbono (CO ₂) devido às fontes eólicas.....	47
Figura 2.1	– Temperatura da superfície das águas dos oceanos, registradas pelo satélite MODIS da NASA, onde as áreas mais quentes são representadas em vermelho, laranja e amarelo.....	50
Figura 2.2	– Temperatura da superfície das águas dos oceanos, registradas pelo satélite MODIS da NASA, onde as áreas mais quentes são representadas em vermelho, laranja e amarelo.....	50
Figura 2.3	– Movimentação do fluxo de ar na atmosfera terrestre, registrados pelo satélite MODIS da NASA.....	51
Figura 2.4	– Ilustração da circulação das massas de ar na atmosfera terrestre....	52
Figura 2.5	– Brisas marítimas e terrestres: (a) Mecanismo de formação; (b) Exemplo de aproveitamento.....	54
Figura 2.6	– Brisas montanha-vale: (a) Mecanismo de formação; (b) Exemplo de aproveitamento.....	55
Figura 2.7	– Extrapolação do perfil de velocidades do vento para diversas altitudes e rugosidades com base na seguinte referência: $Z_{0(REF)} = 0,1[m]$, $V_{(REF)} = 5[m/s]$ e $H_{(REF)} = 10[m]$	57
Figura 2.8	– Turbulências criadas por obstáculos: (a) Mecanismo de formação; (b) Exemplos de casos.....	59
Figura 2.9	– Efeito da turbulência criada por um obstáculo de 40[m] de altura, 80[m] de largura e 0% de porosidade sobre a velocidade do vento.....	60
Figura 2.10	– Perfis de velocidades do vento, com e sem obstáculo, sob diversos tipos de superfície.....	62

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

