

CRITÉRIOS COMPARATIVOS PARA CLASSIFICAR MODELOS DE GERADORES EÓLICOS QUANTO A SUA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

DANUSIA DE OLIVEIRA DE LIMA

Rio Grande Energia – RGE
Departamento de Engenharia e Construções
Rua São Luiz nº77, CEP 90620-170 – Porto Alegre – RS
danusia@rge-rs.com.br

VICENTE MARIANO CANALLI

Pontifícia Universidade Católica – PUC-RS
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Ipiranga, nº6681, CEP 90619-900 – Porto Alegre – RS
vicente@ee.pucrs.br

***Resumo:** O principal propósito deste artigo é estabelecer critérios de classificação de diagramas de centrais eólicas, quanto a sua aplicação em sistemas de potência. Visa-se com este estudo, contribuir com o Programa Luz para Todos, determinado pelo Decreto n.º 4.873, de 11 de Novembro de 2003, que fixa em seu artigo 6º que os sistemas individuais de geração serão uma opção de atendimento à população do meio rural brasileiro. Os principais tipos de centrais eólicas serão estudados e comparados com base em critérios propostos neste artigo e a partir da literatura de forma a facilitar o processo decisório na utilização das centrais.*

***Palavras-chave:** Geração Eólica, Modelo de Geradores Eólicos, Conexão de Geradores Eólicos a Sistemas de Potência.*

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão estabelecidos critérios para escolha de geradores e centrais eólicas aplicados a sistemas de potência cujos responsáveis, optem por fontes secundárias de energia. Os critérios serão definidos a partir das características peculiares a cada tipo de central e gerador, incluindo as prestações dos inversores e conversores estáticos. Com base nos critérios estabelecidos, os principais tipos de centrais serão estudados e comparados, de forma a facilitar o processo decisório. Os principais modelos de centrais eólicas ESTANQUEIRO (2003), são classificados neste trabalho quanto ao tipo de gerador empregado, que pode ser síncrono e assíncrono.

2. CENTRAIS EÓLICAS COM GERADORES SÍNCRONOS

Os geradores síncronos podem ser de ímã permanente, com enrolamento de excitação, de pólos lisos ou salientes. Os geradores síncronos de ímã permanente constituem a tecnologia emergente e vêm sendo aperfeiçoados com o advento de novas técnicas metalúrgicas e materiais. De acordo com a um gerador síncrono elementar é composto de um enrolamento trifásico de armadura no qual será induzida uma tensão alternada através do movimento do rotor.

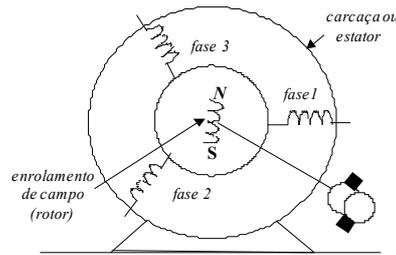


Figura 1: Gerador Síncrono Elementar

O rotor tem um enrolamento alimentado com corrente contínua que cria o campo magnético da máquina. Segundo FITZGERALD (1978), os geradores síncronos são máquinas elétricas rotativas destinadas a converter energia mecânica em elétrica, fornecendo corrente alternada de frequência constante, sob tensão também constante a uma dada velocidade e corrente de campo de acordo com a equação (1), (2) e (3).

$$f_s = \frac{P}{120} \cdot \omega_m \quad (1)$$

f_s = frequência da tensão gerada no estator (Hz)

ω_m = Velocidade mecânica (rpm)

P = Número de pólos

De acordo com a Lei de Faraday, equação (2), uma tensão alternada é induzida em condutores, cujo conjunto forma o enrolamento de armadura, REZENDE (1963).

$$e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

O fluxo magnético ϕ é obtido pela circulação de corrente contínua nos enrolamentos de campo, a não ser em máquinas de menor potência, nas quais podem ser usados ímãs permanentes. A variação de fluxo é obtida através do movimento do rotor.

De acordo com a equação (3), oriunda da equação (2), a tensão induzida E_o em uma fase do enrolamento de armadura, depende do fluxo ϕ produzido pelo enrolamento de campo e da velocidade ω_m .

$$E_o = k \cdot f_s \cdot N \cdot \phi \quad (3)$$

Nos geradores síncronos, são usados dois tipos de rotores:

- ★ Rotor de Pólos Lisos;
- ★ Rotor de Pólos Salientes

2.1 Rotor de Pólos Lisos

O núcleo deste rotor é formado por um cilindro maciço de aço no qual existem ranhuras destinadas aos condutores de campo. A relação entre o torque no eixo τ , tensão induzida E_o , tensão nos terminais do gerador V e a velocidade angular ω_s são dadas pela equação (4).

$$\tau = \frac{V \cdot E_o \cdot \sin \delta}{X_s \cdot \omega_s} \quad (4)$$

O parâmetro X_s é a reatância síncrona e o ângulo delta é o ângulo formado entre E_o e V obtido de um diagrama vetorial.

O rotor de pólos lisos, conforme FITZGERALD (1978) é empregado com dois ou quatro pólos, sendo mais robustos e, portanto aptos a trabalhar em altas rotações.

As centrais eólicas contendo geradores síncronos de pólos lisos são caracterizadas pela pelo emprego de uma caixa de engrenagens (**GB**) que amplia a rotação da turbina. Esses tipos de centrais serão apresentados a seguir:

Gerador síncrono ligado diretamente à rede elétrica

Este sistema, ilustrado na Figura 2 não é considerado flexível, em função das características do conjunto mecânico deste tipo de máquina. É utilizado, em sua maioria, em conexões de pequena potência em sistemas isolados.

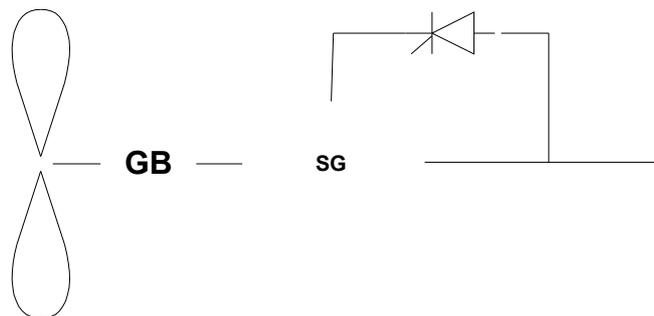


Figura 2: Central com Gerador Síncrono ligado diretamente a Rede Elétrica

Gerador síncrono conectado por conversores indiretos de frequência

Neste tipo de conexão considera-se o gerador síncrono de rotor bobinado e pólos lisos, ligados, à rede elétrica, através de conversor indireto de frequência, tendo assim um sistema de controle de tensão a velocidade variável. Este sistema pode controlar a injeção de potência reativa via barramento CC. Ilustrado na Figura 3.

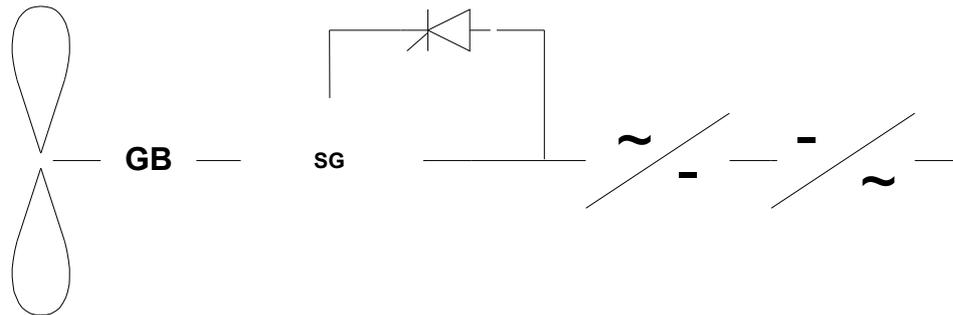


Figura 3: Central com Gerador Síncrono e conversor indireto de freqüência

2.2 Rotor de Pólos Salientes

Os geradores síncronos de pólos salientes são geralmente empregados com número de pólos igual ou superior a quatro. A relação entre o torque no eixo τ , tensão induzida E_o , tensão nos terminais do gerador V e a velocidade angular ω_s são dadas pela equação (5).

$$\tau = \frac{V \cdot E_o \cdot (\text{Re} \cdot \cos \delta + X_q \cdot \sin \delta) + \frac{V^2 \cdot (X_d - X_q) \cdot \sin 2\delta}{2} - V^2 \cdot \text{Re}}{(\text{Re}^2 + X_q \cdot X_d)} \cdot \omega_s \quad (5)$$

Os parâmetros X_d e X_q são as reatâncias direta e em quadratura e o ângulo delta é o ângulo formado entre E_o e V obtido do diagrama vetorial, Re é a resistência efetiva do estator. As centrais eólicas contendo geradores síncronos de pólos salientes são caracterizadas por dispensar a caixa de engrenagens (**GB**), uma vez que com muitos pólos a velocidade do rotor pode ser menor. Esses tipos de centrais serão apresentados a seguir:

Gerador síncrono com conversor indireto de freqüência, sem caixa de engrenagens

Neste tipo de central considera-se o gerador síncrono de pólos salientes, ligados à rede elétrica, através de conversor indireto de freqüência. Este sistema permite o controle de tensão a velocidade variável. A injeção de potência reativa pode ser controlada via barramento CC. Ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Central com Gerador Síncrono e conversor indireto e sem caixa de engrenagens

Gerador síncrono com ímã permanente através de conversor indireto de freqüência

Este tipo de central dispensa caixa de engrenagem. O gerador síncrono de rotor com ímã permanente e pólos salientes, é interligado à rede elétrica, através de conversor indireto de freqüência e possui excitação permanente. Este modelo ainda encontra problemas de viabilidade para máquinas de potência elevada devido ao custo e escassez de matéria prima, conjugado a limitações tecnológicas. Ilustrado na Figura 5.

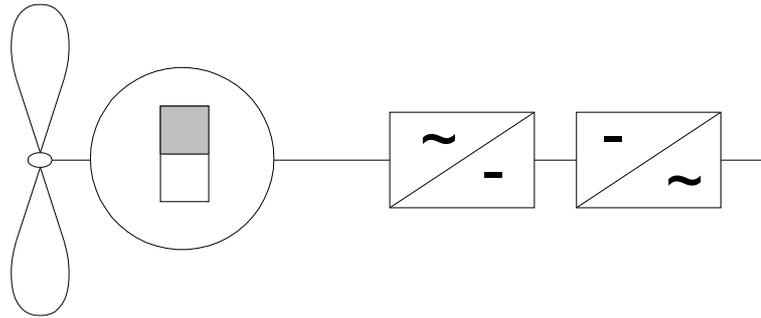


Figura 5: Central com Gerador Síncrono de Imã Permanente

Gerador síncrono com imã permanente através de cicloconversor

Este tipo de central alia as vantagens dos geradores de ímã permanente a um conversor direto de frequências. Esta configuração elimina as etapas retificadoras e inversoras tradicionais nos conversores indiretos. Ilustrado na Figura 6.

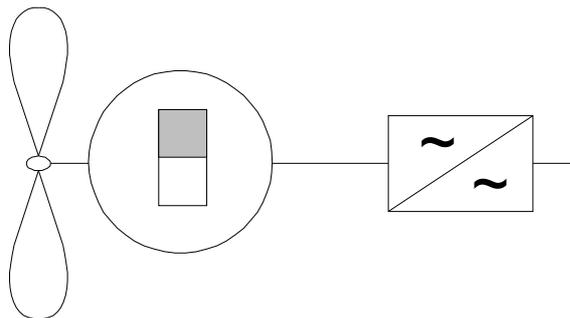


Figura 6: Central com Gerador Síncrono de Imã Permanente com Cicloconversor

3. CENTRAIS EÓLICAS COM GERADORES ASSÍNCRONOS

Os geradores Assíncronos, segundo ESTANQUEIRO (2003), podem ser de rotor em gaiola, ou rotor bobinado. Não raramente, as centrais eólicas incorporam conversores estáticos que permitem processar a energia entregue ao consumidor ou destinada a funções de controle e excitação.

Numa máquina de indução o fluxo tem uma distribuição espacial aproximadamente senoidal sendo criado pelo enrolamento do estator. Sobre o enrolamento do rotor surge um fluxo alternado que produz tensões induzidas, as quais por sua vez produzirão correntes induzidas sempre que o enrolamento do rotor se encontrar curto-circuitado. O campo magnético criado pelas correntes do rotor gera um outro campo também senoidalmente distribuído que é atraído pelo campo do estator.

O gerador assíncrono trabalha numa rotação mecânica diferente da rotação síncrona, esta diferença de velocidade em relação à velocidade síncrona é chamada de escorregamento, equação (6).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

(6)

Considerando $\omega_r > \omega_s$;

s = escorregamento
 ω_r = velocidade do rotor (rpm)
 ω_s = velocidade síncrona (rpm)

Com o rotor parado, $s=1$ a frequência das correntes do rotor e do estator são iguais, de acordo com a equação (7).

$$f_r = s \cdot f_s$$

(7)

A velocidade angular que gira o campo magnético do estator e determina f_s se relaciona com a rotação mecânica ω_m pela equação (8)

$$f_s = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot (1 - s)} \cdot \omega_m$$

(8)

A relação entre o torque no eixo τ , tensão induzida E_o , tensão nos terminais do gerador V e a velocidade angular ω_s são dadas pela equação (4).

$$\tau = \frac{q}{\omega_s} \cdot \frac{k \cdot V_e^2 \cdot R_r}{\left(R_e + \frac{R_r}{s} \right)^2 \cdot (X_e + X_r)^2}$$

(9)

q = número de fases
 ω_s = velocidade síncrona
 k = constante construtiva
 V_e = tensão de fase do estator
 R_r, R_e = resistência rotórica e estatórica
 X_e, X_r = reatância rotórica e estatórica

O rotor das máquinas assíncronas pode ser de dois tipos:

- ★ Rotor em Gaiola
- ★ Rotor Bobinado

3.1 Rotor Gaiola de Esquilo

O rotor em gaiola tem um enrolamento que consiste de barras condutoras encaixadas no ferro do rotor e curto-circuitadas em cada extremidade por anéis condutores.

Gerador assíncrono conectado diretamente a rede elétrica

Neste tipo de central considera-se o gerador assíncrono de rotor em gaiola ligado diretamente à rede elétrica. Um banco capacitivo deve ser conectado ao estator para fornecer os reativos necessários a auto-excitação do gerador. Este sistema não é considerado flexível. Pode ser utilizado, em sua maioria, em conexões de pequena potência em sistemas isolados. Ilustrado na .

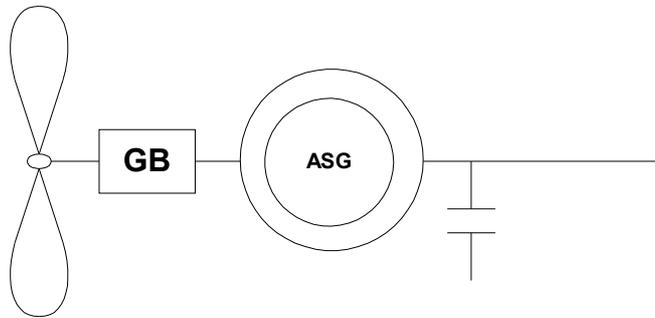


Figura 7: Central com Gerador Assíncrono ligado diretamente a Rede Elétrica

Gerador assíncrono através de conversores de frequência em barramento CC

Neste tipo de conexão considera-se o gerador assíncrono de rotor gaiola ligado, à rede elétrica, através de conversor indireto de frequência. Este sistema permite o controle de tensão a velocidade variável. Este sistema pode controlar a injeção de potência reativa, pois o conversor é conectado ao barramento CC. Ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Central com Gerador Assíncrono e conversor indireto de frequência

Gerador assíncrono através de ciclo conversores

Neste tipo de central eólica a tensão alternada é processada diretamente, por meio de um cicloconversor. O controle de tensão e frequência pode ser efetivado via modulação de tensão geradas de maior frequência que os de saída. Ilustrado na .

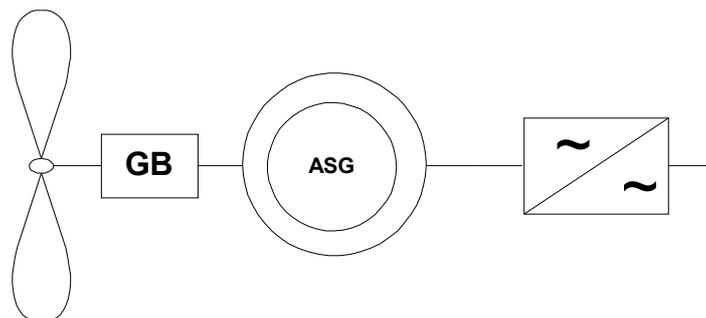


Figura 9: Central com Gerador Assíncrono e Cicloconversor

3.2 Rotor bobinado

O gerador assíncrono de rotor bobinado que tem um enrolamento polifásico de rotor semelhante ao do estator, e enrolado com o mesmo número de pólos. Os terminais do enrolamento do rotor são ligados a anéis coletores isolados e montados sobre o eixo. Este tipo de enrolamento é usado quando se deseja um controle das características de tensão e frequência.

Gerador assíncrono com controle dinâmico do escorregamento

Neste tipo de central considera-se o gerador assíncrono de rotor bobinado com um circuito de controle dinâmico de escorregamento efetuado pela variação da resistência rotórica por meio de conversor estático a tiristor. Ilustrado na Figura 10.

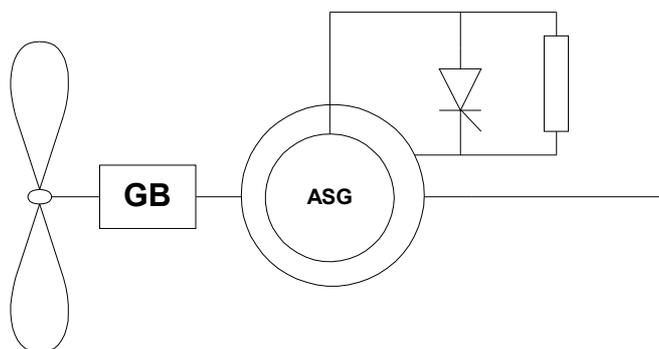


Figura 10: Central com Gerador Assíncrono com Controle Dinâmico do Escorregamento

Gerador assíncrono através de Dupla Alimentação

Neste tipo de central considera-se o gerador assíncrono de rotor bobinado com a conexão de um circuito de intercâmbio de potência pelo rotor ligado à rede elétrica.

O primeiro conversor pode ser um retificador e o segundo um inversor não autônomo. As correntes rotóricas são retificadas. A corrente contínua resultante passa pelo inversor, desse modo a potência pode ser intercambiada com a rede. Ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Central com Gerador Assíncrono através de Dupla Alimentação

4. ESTUDO COMPARATIVO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE CENTRAIS EÓLICAS

Assim foram estudados diversos tipos de centrais eólicas com base em seus geradores. Equações são apresentadas de forma a relacionar as grandezas que influenciam especialmente na tensão e frequência geradas. A seguir serão estabelecidos critérios para a classificação de centrais eólicas quanto a sua aplicação em sistemas de potência. Os critérios serão definidos a partir das características peculiares de cada tipo de central e gerador considerando prestações dos conversores estáticos, de forma a facilitar o processo decisório. Ver tabelas 1 e 2.

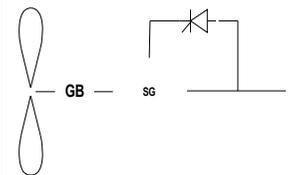
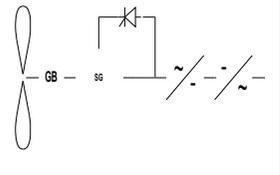
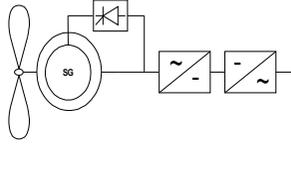
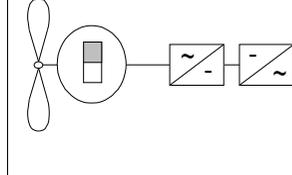
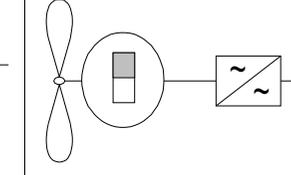
CENTRAIS COM GERADORES SÍNCRONOS					
Crítérios Admitidos					
Controle de Freqüência	Mecânico	Eletrônico	Eletrônico	Eletrônico	Eletrônico
Controle de Tensão	Regular	Bom	Bom	Bom	Regular
Rotação das Pás	Rotação Lenta	Rotação Lenta	Depende do N° Pólos	Depende do N° Pólos	Rotação Lenta
Confiabilidade	Baixa	Boa	Boa	Alta	Boa
Flexibilidade	Regular	Alta	Alta	Alta	Regular
Controle de Reativos	Possível	Possível	Possível	Possível	Possível
Caixa de Engrenagens	Necessária	Necessária	Dispensada	Dispensada	Dispensada
Barramento CC	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Fundamentação Teórica	Tradicional	Regular	Regular	Regular	Regular
Simplicidade	Regular	Não	Não	Não	Não
Tipo de Rotor	Bobinado	Bobinado	Bobinado	Ímã Permanente	Ímã Permanente
Geradores com Escovas	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Utilização Capacitores	Não	Barramento CC	Barramento CC	Barramento CC	Não
Número de Anéis	2	2	2	0	0
Potência Instalada	Alta	Alta	Alta	Regular	Alta
Manutenção	Baixa	Regular	Regular	Regular	Regular
Custo	Regular	Alto	Alto	Alto	Alto

Tabela 1 : Centrais com Geradores Síncronos

CENTRAIS COM GERADORES ASSÍNCRONOS

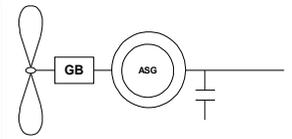
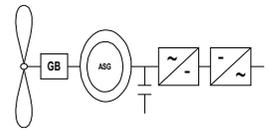
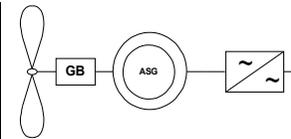
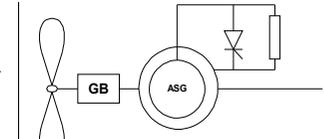
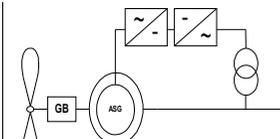
Crítérios Admitidos					
Controle de Frequência	Mecânico	Eletrônico	Eletrônico	Mecânico	Eletrônico
Controle de Tensão	Regular	Bom	Regular	Regular	Bom
Rotação das Pás	Rotação Lenta	Rotação Lenta	Rotação Lenta	Rotação Lenta	Rotação Lenta
Confiabilidade	Baixa	Regular	Regular	Baixa	Boa
Flexibilidade	Regular	Alta	Regular	Regular	Alta
Controle de Reativos	Difícil	Possível	Difícil	Difícil	Possível
Caixa de Engrenagens	Necessária	Necessária	Necessária	Necessária	Necessária
Barramento CC	Não	Sim	Não	Não	Sim
Fundamentação Teórica	Tradicional	Regular	Regular	Regular	Farta
Simplicidade	Sim	Não	Regular	Regular	Não
Tipo de Rotor	Gaiola	Gaiola	Gaiola	Bobinado	Bobinado
Geradores com Escovas	Não	Não	Não	Sim	Sim
Utilização Capacitores	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Número de Anéis	0	0	0	3	3
Potência Instalada	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular-Alta
Manutenção	Baixa	Regular	Regular	Regular	Regular
Custo	Baixo	Médio	Médio	Alto	Médio

Tabela 2 : Centrais com Geradores Assíncronos

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foram sumarizados tópicos acerca dos principais tipos de centrais eólicas. Equações Matemáticas tradicionais foram empregadas para avaliar quantitativamente os geradores. Os principais tipos de centrais eólicas foram estudados com base em critérios propostos descritos na forma de uma tabela. O principal objetivo deste artigo foi de familiarizar o leitor com os principais tipos de centrais elétricas, facilitando o processo decisório com base nos critérios simples estabelecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Filho, X. V., **Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração**. Editora Campos, 1984.

Fitzgerald, A. E., Kingley, Jr. C., Kusko, A., **Máquinas Elétricas**. Editora Mc Graw-Hill, 1978.

Golding, Edward William, **The Generation of Electricity by Wind Power**, John Wiley & Sons, Inc., New York 1976.

Mello F. P., **Dinâmica e Controle da Geração**, Convênio Eletrobrás/UFSM.

Rezende, E. M., **Máquinas Síncronas de Pólos Girantes**, Escola Nacional de Engenharia, RJ 1963.

Rosas, P.A.C, Estanqueiro, A. I, **Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas**, E. A. Feitosa, A.L. Pereira, 2003.

COMPARATIVE CRITERIA TO WIND FARM MODEL CLASSIFICATION WITH RESPECT OF ITS APPLICATION IN POWER SYSTEMS

Abstract: *The main proposal of this paper is to establish some criteria for to classify diagrams of wind farms, with respect to this application in power systems. This study want to contribute with the Light for Every Program, defined by Decree number 4873 of November, 11 of 2003, that fix in his article 6th that individual generation systems, will be on option of Brazilian rural population attendance.*

The main types of wind farms will be studied and compared with base in proposed criteria of this article, and with base in the literature, making easy the decision process in the use of the wind farm.

Keywords: *Wind generation, model of wind generation, wind generation connection to the power systems.*