



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - GPT

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

MODELAGEM DE AEROGERADOR – TURBINA EÓLICA COM CONTROLE ELETRÔNICO DE RESISTÊNCIA DE ROTOR PARA TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS COM O ANATEM

**Álvaro J. P. Ramos (*)
ANDESA**

**Carmem L. Tavares
ANDESA**

**Dêibson J. G. de Sena
ANDESA**

**Ricardo Diniz Rangel
CEPEL**

RESUMO

O aerogerador assíncrono do tipo que é controlado via resistência do rotor não faz parte dos três tipos de modelo disponibilizados no ANATEM. O presente trabalho apresenta como este tipo de aerogerador e seus controles foram implementados no ANATEM, fazendo uso da estrutura disponível para um aerogerador tipo DFIG (“Doubly fed Induction Generator”). Esta modelagem se refere ao aerogerador S88_2.1MW de fabricação SUZLON que já se encontra em operação em várias Centrais de Geração Eólica – CGE no Brasil. A modelagem foi baseada em informações reais do equipamento fornecidas pelo fabricante, que validou os resultados obtidos em casos testes.

PALAVRAS-CHAVE

Aerogerador DFIG; Central de Geração Eólica – CGE;

1.0 - INTRODUÇÃO

Os estudos para inserção de Centrais de Geração Eólica – CGE ao sistema elétrico requerem o desenvolvimento de modelos apropriados a serem elaborados com base em informações reais e específicas fornecidas pelo fabricante. Entretanto, é comum o caso em que o fabricante dos aerogeradores fornece o modelo já desenvolvido para outro programa, tal como o “PSS/E” ou “DigSilent”, o que torna o trabalho de modelagem uma forma de “tradução” da modelagem para o formato do ANATEM. Com isto, incorporam-se no ANATEM todas as premissas e simplificações assumidas no modelo do programa original para o qual o modelo foi elaborado, não cabendo mais avaliações do nível de detalhes do que deve ou não ser considerado no modelo. Em alguns modelos já desenvolvidos para o ANATEM [1], por exemplo, não é representado o controle de ângulo das pás (“pitch control”) sob a premissa de que a potência mecânica pode ser considerada constante durante os tempos típicos de simulação de estudos de estabilidade. Esta premissa simplificadora tem sido admitida para os aerogeradores do tipo síncrono “Full Converter”.

O ANATEM oferece a possibilidade de modelagem, via CDU, dos controles de aerogeradores/turbinas de três tipos:

- a) Gerador assíncrono diretamente conectado;
- b) Gerador assíncrono duplamente alimentado - DFIG;
- c) Gerador síncrono conectado via conversor (“Full Converter”).

Outra possibilidade que tem sido muito utilizada é a representação do aerogerador/controles como uma carga dinâmica controlada ou como uma fonte de corrente controlada, recurso este implementado no ANATEM mais recentemente. A fonte de corrente representa uma opção mais robusta para representar os aerogeradores do que o modelo de carga dinâmica em simulações com afundamentos elevados de tensão (curtos circuitos), o que motivou a conversão de antigos modelos elaborados como carga dinâmica para a modelagem como fonte de corrente.

O presente trabalho trata do aerogerador tipo S88_2.1 de fabricação SUZLON [2], largamente utilizado em várias CGE em operação no Brasil, cujo controle de potência se realiza através do controle eletrônico de resistência externa inserida no circuito do rotor. Na verdade, o efeito de resistência variável é obtido através do disparo controlado de IGBT em série com resistores fixos. Este tipo de modelo de aerogerador não é disponível no programa ANATEM, não sendo também possível o acesso do usuário ao modelo específico da máquina assíncrona. Como se sabe, os modelos de máquina assíncrona ou síncrona no ANATEM são implementados internamente ao programa, o que se costuma referir-se como modelo tipo “built-in”. Dadas as dificuldades mencionadas, foi idealizada uma adaptação das máquinas tipo duplamente alimentada (“DFIG – Doubly fed Induction Generator”), através de adequações nos controladores dos conversores C1 e C2 daquele tipo de máquina, cujo modelo é disponível no ANATEM.

2.0 - MODELAGEM DA S88_2.1MW

2.1 Estrutura do Modelo da S88_2.1MW

A Figura 1 apresenta a estrutura do aerogerador/controles da S88 como modelado no ANATEM, compreendendo os seguintes elementos:

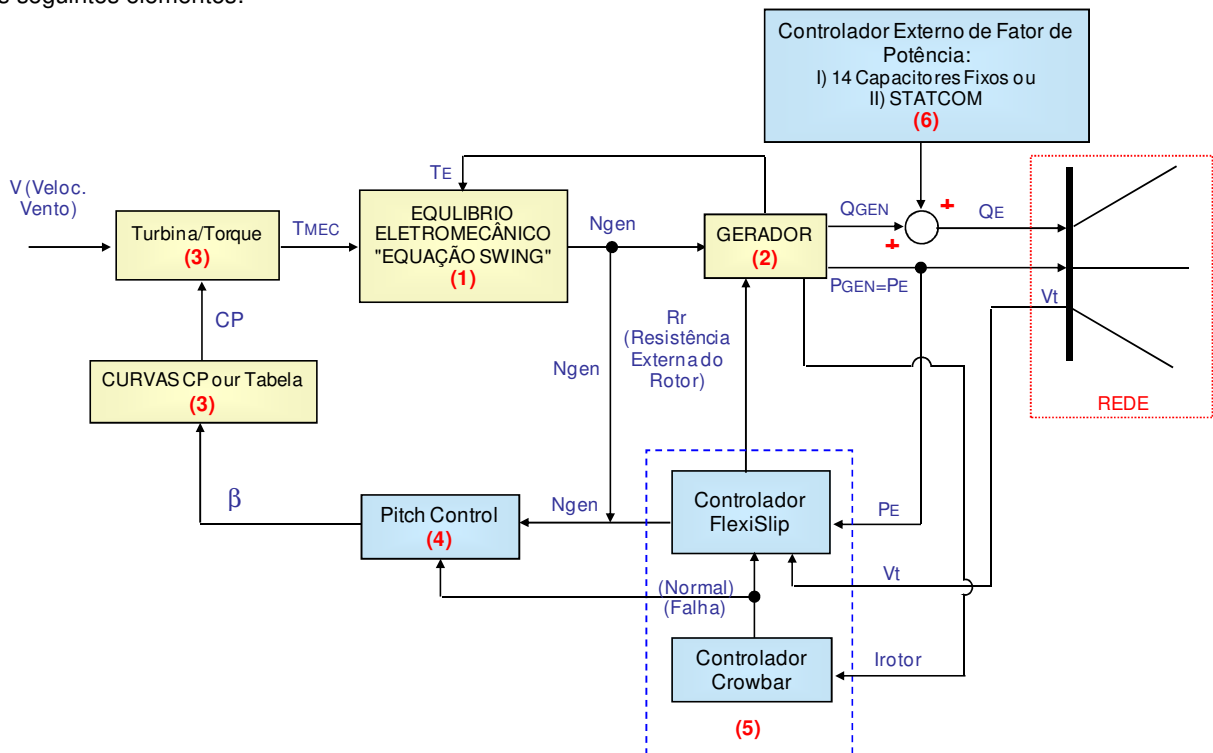


FIGURA 1 – Estrutura Geral da S88_2.1, SUZLON.

- EQUAÇÃO DE BALANÇO ELETROMECÂNICO (1) e GERADOR (2): como já citado anteriormente, o modelo do gerador assíncrono é disponível internamente no ANATEM como modelo “built-in” para máquinas tipo duplamente alimentada “Doubly fed Induction Generator - DFIG”. A equação do balanço eletromecânico, a denominada “equação de swing”, considera apenas uma única massa sendo também interna ao programa, não sendo acessível ao usuário. Nos casos em que o fabricante fornece os dados do modelo de duas ou três massas, é possível representar o modelo torsional no “CDU” representativo da turbina (3) e “exportar” o torque mecânico sobre o rotor do gerador. Neste caso, o dado de inércia do modelo da máquina se refere apenas à inércia do gerador e não da parte girante total do aerogerador e turbina.
- TURBINA (3), CURVA C_p (3) e CONTROLADOR DE ÂNGULO DAS PÁS (4): estes elementos são modelados através de um “Controlador Definido pelo Usuário” conhecido como “CDU”. O nome do CDU para representar a turbina e o controle de ângulo de pás foi denominado de “TURBSUZ.CDU”;
- CONTROLADOR DE RESISTÊNCIA DE ROTOR E “CROWBAR” (5) – Este controlador, denominado pelo fabricante como “Flexislip Controller and Crowbar” foi modelado como um CDU denominado CONTSUZL.CDU;
- CONTROLADOR EXTERNO DE FATOR DE POTÊNCIA (6): Este é um controle lento e necessita ser representado apenas no estudo de regime permanente nos casos de fluxo de carga da condição inicial. Em certos projetos deste aerogerador pode ser usada a versão STATCOM, que é um controle rápido e precisa ser incorporado ao controlador CONTSUZL.CDU. Esta versão não é utilizada nos aerogeradores do Brasil.

2.2 Configuração do Modelo DFIG do ANATEM

A Figura 2 mostra a estrutura da DFIG indicando as variáveis envolvidas utilizando-se os nomes empregados pelo ANATEM para facilidade de identificação pelo usuário das saídas do programa. As duas primeiras letras identificam o tipo de sinal, isto é, PS (Potência no eStator), PC (Potência no COnversor) e PR (Potência no Rotor), enquanto as duas finais DF indicam o tipo da máquina (“Doubly fed”). Observe-se que o sentido das potências ativa e reativa do estator segue a convenção de motor, razão pela qual as saídas do ANATEM apresentam estes valores como negativos para o gerador eólico.

Nesta estrutura se identifica: a) o gerador de indução; b) a turbina eólica; c) os conversores C1 e C2. A turbina eólica é conectada ao eixo do gerador através de uma caixa de engrenagens (CE). O barramento 1 é o barramento terminal do aerogerador enquanto o barramento 2 representa hipoteticamente um barramento de alta tensão onde X_s constitui a reatância do transformador elevador. X_t é a reatância do transformador que alimenta o conversor C1. Em algumas configurações pode não existir este transformador sendo o conversor C1 conectado diretamente ao barramento 1.

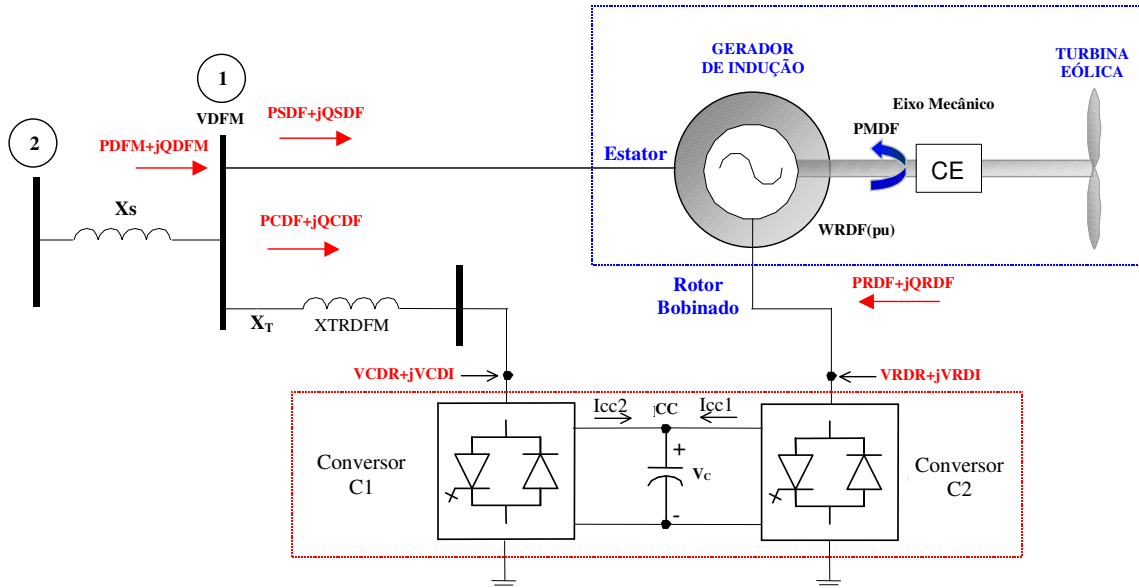


FIGURA 2 – Estrutura Geral dos aerogeradores DFIG no ANATEM

No modelo do ANATEM o conversor C1 é conectado ao barramento terminal da máquina através de uma reatância X_t (que não pode ser nula), sendo capaz de definir o módulo e ângulo (ou componentes real e imaginária) da tensão aplicada ao sistema CA. Esta tensão ($V_{CDR} + jV_{CDI}$) é definida pelo controle em conformidade com a estratégia adotada, que no presente modelo é controlar:

- a) a tensão do capacitor CC (V_c), garantindo que em regime permanente a potência ativa fornecida/retirada do rotor pelo conversor C2 seja a mesma retirada/fornecida ao sistema CA pelo conversor C1 (com exceção das perdas);
- b) a potência reativa $QCDF$ drenada do barramento 1 no valor de 0 Mvar, compensando a reatância X_t do trafo do conversor C1.

O conversor C2 é conectado ao enrolamento do rotor da máquina sendo capaz de definir o módulo e o ângulo (ou componentes real e imaginária) da tensão CA no lado do conversor C2. Esta tensão ($V_{RDR} + jV_{RDI}$) é definida pelo controle em conformidade com a estratégia adotada, que no presente modelo é:

- a) controle de velocidade/escorregamento da máquina através do controle da potência ativa injetada no rotor (PRDF);
- b) controle da potência reativa (QRDF), segundo as opções de controlar potência reativa terminal constante, tensão terminal constante ou fator de potência constante.

2.3 Adequações do Modelo DFIG/ANATEM para o Aerogerador/Controles S88 2.1MW

O modelo da máquina S88 foi considerado como uma DFIG no ANATEM procedendo-se às seguintes adequações:

- 1) Conversor C1 do lado do Estator: a tensão aplicada por este conversor foi feita igual (em magnitude e fase) à tensão nos terminais da máquina (barramento 1). A reatância do transformador do conversor existente no modelo DFIG foi feita extremamente elevada (1000%). Com isto o Conversor 1 se tornou inativo.

- 2) Conversor C2 conectado no lado do rotor: a tensão CA deste conversor, que é aplicada no circuito do rotor, foi feita igual a:

$$V_{\text{rotor}} = I_{\text{rotor}} \times R_{\text{ext}} ;$$

onde R_{ext} é a resistência do resistor externo que é definido pelo controlador "FLEXISLIP".

Assim, os dois CDUs que compõem o modelo da S88 são:

- CONTSUZL.CDU** – neste CDU são representados os conversores C1 e C2, bem como o controlador Flexislip/Crowbar, bloco 5 da Figura 1;
- TURBSUZL.CDU** – neste CDU são representados os blocos 3, 4 e 5 da Figura 1, ou seja, todos os componentes aerodinâmicos e de controle da potência mecânica da turbina. O bloco 5, que compreende o "Crowbar", é representado repetitivamente nos dois CDUs para evitar a necessidade de transferência de sinal entre os CDUs e conseqüentemente a utilização de comando "DLOC" pelo usuário [1].

2.4 Controle da Turbina e Curvas C_p

O parâmetro " C_p " representa um dos elementos que definem a potência mecânica da turbina, dada pela expressão:

$$P_{MEC} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot v^3 ;$$

onde $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ é a densidade do ar e $A = \pi \cdot R^2$ representa a área definida pela rotação das pás, cujo raio é R . A potência mecânica para uma dada turbina é aproximadamente proporcional ao cubo da velocidade do vento, dado que o fator C_p não é constante. C_p é função da própria velocidade do vento através de λ , denominado "tip ratio" e do ângulo β de rotação das pás em torno do seu eixo ("pitch"). O valor de λ é dado por $\lambda = (\omega \cdot R)/v$, onde ω é a velocidade angular mecânica da turbina e v a velocidade do vento em m/s. C_p é normalmente representado por várias curvas para valores selecionados de β .

A representação adequada das curvas C_p apresenta uma das dificuldades na modelagem das turbinas eólicas. Alguns especialistas utilizam a representação via polinômios de ordem diversa em função de λ e β , podendo ter necessidade de se ajustar até 25 coeficientes, sendo este processo de ajuste ("fitting") bastante complexo. Outros autores utilizam equações matemáticas [3] tipo exponencial. Alguns modelos implementados em programa PSS/E fazem uso simplesmente de tabelas tridimensionais de pontos, o que no ANATEM torna-se praticamente inviável.

Neste trabalho foi adotada uma abordagem mista envolvendo polinômios de ordem 7 em λ e tabela de pontos para os oito coeficientes do polinômio variando com o ângulo das pás (β), uma vez que não se consegue um único conjunto de coeficientes capaz de reproduzir adequadamente as curvas C_p para toda faixa de ângulo β . As Figuras 3 e 4 mostram as curvas C_p obtidas dos polinômios ajustados com o uso do programa MATLAB e as curvas plotadas dos pontos fornecidos pela SUZLON, respectivamente, para uma variação de β de -2 a 11 graus.

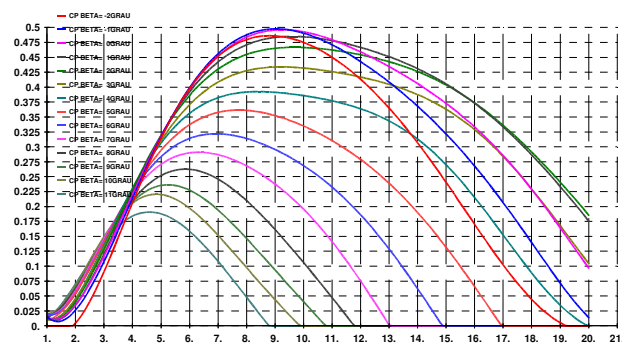


FIGURA 3 – Curvas C_p geradas por polinômio de 7ª ordem com coeficiente variáveis obtido por ajuste a partir da tabela de pontos fornecida pelo fabricante

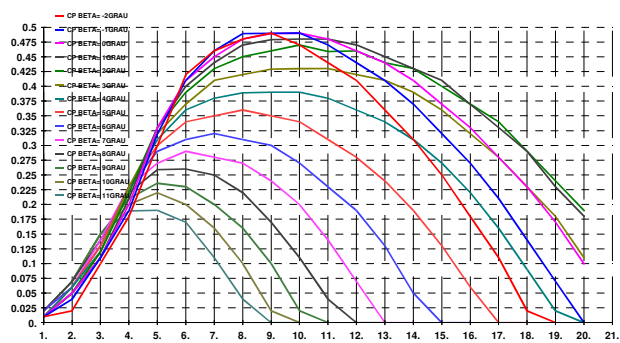


FIGURA 4 – Curvas C_p "plotadas" da tabela de pontos fornecida pelo fabricante.

2.5 Controle do ângulo das pás ("Pitch Control")

Este controlador (Figura 5) consiste de um regulador convencional do tipo "PI", comandando o servomotor de acionamento das pás, naturalmente submetido aos limitadores dinâmicos de ângulo máximo (37°) e mínimo (-2°) e de velocidade angular máxima em ambos sentidos de rotação ($\pm 10\%$ seg).

Uma característica específica deste controlador é a mudança de parâmetros em condições de curto circuito no sistema que resultam em afundamentos de tensão significativos e elevação na corrente de rotor. Quando a

corrente de rotor atinge 1,36pu da corrente nominal referida à base do estator, ocorre a atuação do denominado "crowbar" como descrito no parágrafo seguinte. A atuação do "crowbar" promove mudanças nos ganhos proporcional e integral do PI e no valor de referência de velocidade.

2.6 Controlador FLEXISLIP e "Crowbar"

O FLEXISLIP é um controlador de resistência externa inserida no circuito do rotor com o objetivo de controlar a potência do aerogerador dentro de certas faixas. A Figura 6 mostra a configuração deste controlador, também do tipo PI, onde o valor de referência de potência (Pref) é definida pelo valor de velocidade medida (Ngen) através da curva indicada no bloco "Control Curve". Como se sabe, esta característica estabelece as condições adequadas de operação dos aerogeradores de velocidade variável. O valor de Pref também é influenciado pela tensão terminal V_t e sofre redução para determinado grau de afundamento de tensão.

Após a atuação do "crowbar", quando a corrente de rotor atinge 1,36pu do valor nominal, o mesmo é desativado ("reset") com uma temporização igual a 0,15s após a corrente de rotor se restabelecer abaixo do patamar de 1,22pu. Quando o "crowbar" atua, a resistência externa do rotor é fixada em $R_r(\text{crowbar})$. Quando ocorre o "reset" do "crowbar" a resistência externa é reinicializada no valor $R_r(\text{crowbar})$ de forma a não se introduzir qualquer descontinuidade na ação do controlador.

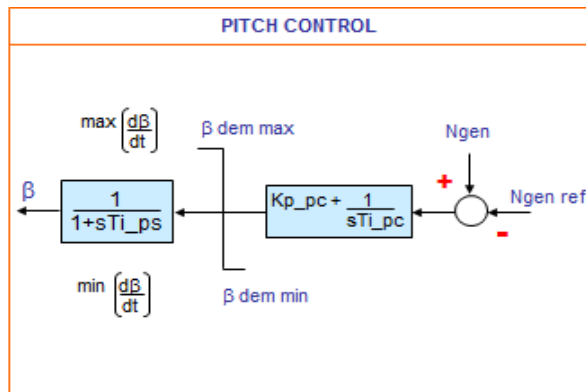


FIGURA 5 – Modelo do controle de ângulo das pás ("pitch Control").

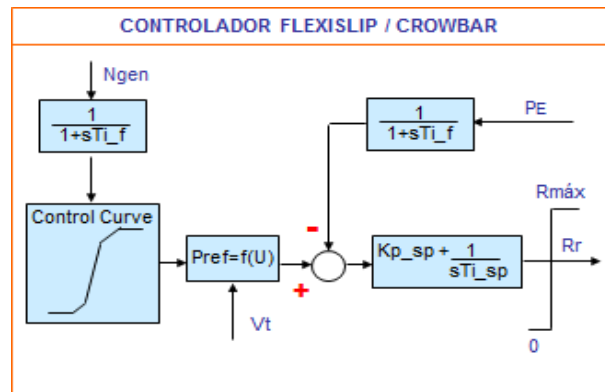


FIGURA 6 – Modelo do controlador FLEXISLIP.

2.7 Controlador Externo de Fator de Potência

Sendo uma máquina de indução, o aerogerador S88 opera sempre na faixa indutiva, como mostrado pela curva inferior da Figura 7. Por esta razão existem instalados internamente módulos de capacitores, que são chaveados pelo denominado "Controlador Externo de Fator de Potência" (bloco 6 indicado no diagrama da Figura 1) de forma que a curva superior da Figura 7 pode ser obtida quando todos os módulos de capacitores estiverem conectados. O controlador de fator de potência externo permite o ajuste operacional de um "setpoint" de fator de potência. Este controlador tem atuação lenta, com 20 segundos para conectar módulos de capacitores e 30 segundos para desconectar. Por esta razão ele não está incluído no modelo (no CDU), mas deve ser considerado na definição das condições iniciais do modelo a partir do valor definido de fator de potência no caso base de fluxo de carga.

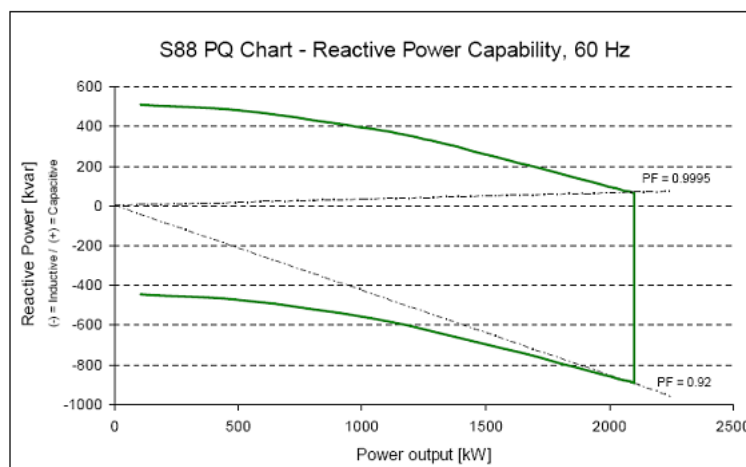


FIGURA 7 – Curva de Capacidade. Curva inferior sem módulos de capacitores; curva superior com todos os módulos inseridos pelo Controlador Externo de fator de Potência.

3.0 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO

3.1- Casos Teste

Para avaliar o desempenho do modelo e sua validação com os resultados do PSS/E, foram simulados casos de rampa de vento e casos de defeitos em um sistema simples de 5 barras. A condição inicial para ambos os casos foi:

- PE = 0,58pu (1 x 1,2MW); Slip = -0.40%;
- V = 9m/s (velocidade do vento);
- LAMBDA = 7,80; Cp = 0.476;
- REXT = 0.00039 (resistência externa definida pelo controle FLEXISLIP);
- BETA = -2°.

CASO 1

Variação tipo rampa na velocidade do vento de 9m/s a 14m/s em 20s (taxa de 0,25m/s/s) – este evento permite avaliar a resposta dos sistemas de controle de ângulo das pás e do controle FLEXISLIP, evoluindo de um ponto de operação inicial PE=0.58pu para PE=1.0pu. Como mostrado na Figura 8, verifica-se a atuação do FLEXISLIP elevando a resistência externa para um novo patamar e a atuação do controle de ângulo das pás, passando o ângulo de -2° para 10°. Observa-se que a velocidade do vento v=14m/s já demanda a ação do controle de ângulo das pás, limitando a potência da máquina, dado que para v=13m/s já se obtém PE=1.0pu.

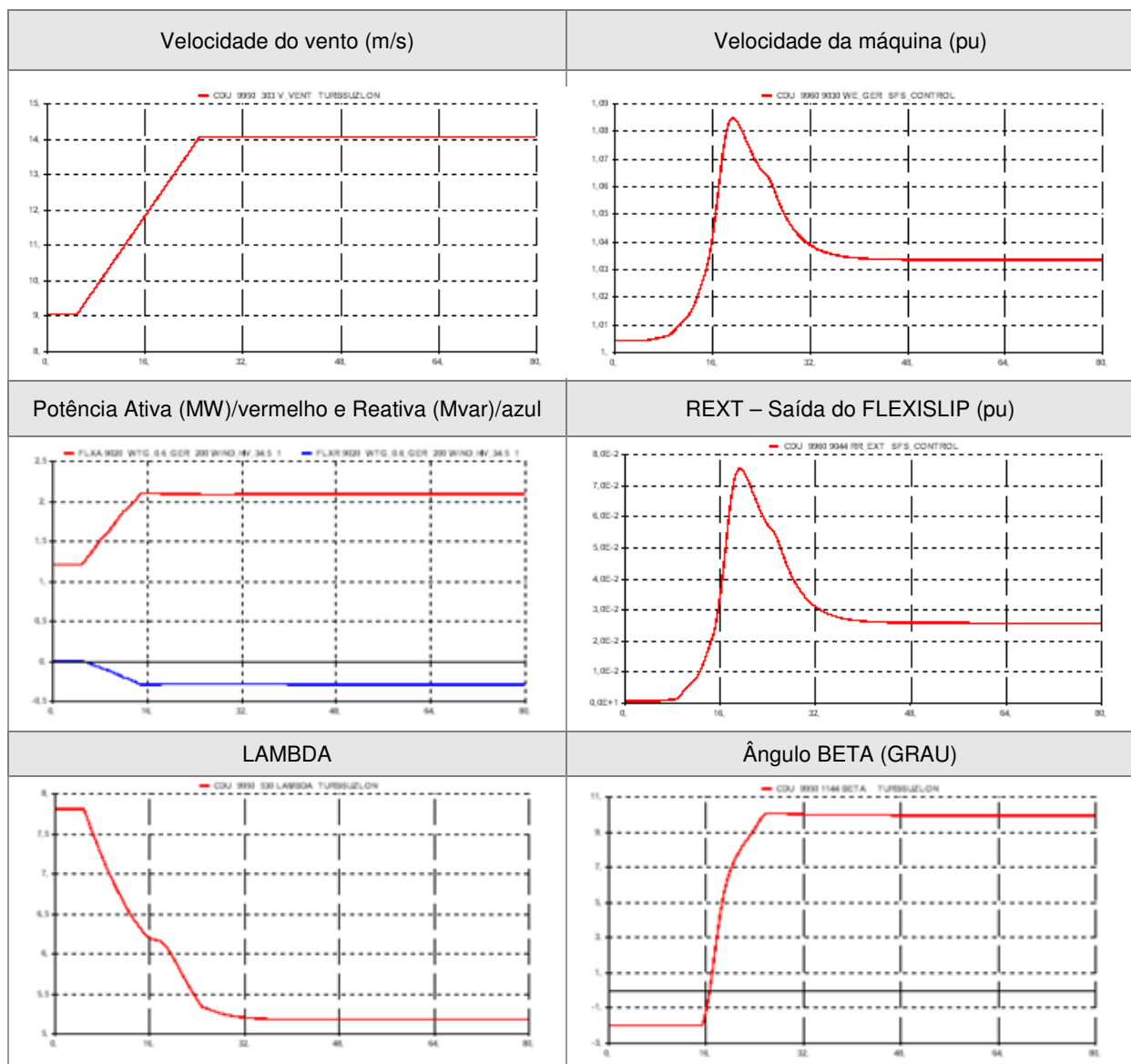


FIGURA 8 – Caso 1 – Variação tipo rampa na velocidade do vento de 9m/s a 14m/s em 20s (taxa de 0,25m/s/s).

CASO 2

Aplicação de curto circuito com atuação do "crowbar" – neste evento, cujo desempenho é mostrado na Figura 9, a atuação dos controladores é transitória, retornando para o ponto inicial de operação algum tempo decorrido após eliminação do defeito. Com o afundamento da tensão e conseqüente redução da potência elétrica da máquina, verifica-se uma tendência para a aceleração do rotor, o que provoca a atuação transitória do controle de ângulo das pás, limitando a sobrevelocidade transitória. Com a eliminação do defeito e normalização do sistema, a velocidade volta ao seu valor normal bem como o ângulo BETA.

Neste evento destaca-se também a ação do controlador FLEXISLIP notadamente o "crowbar" impondo um valor fixo e apropriado para REXT quando a corrente de rotor atinge 1,36pu. Neste caso o "crowbar" atuou duas vezes nos picos de corrente de rotor, como mostrado na Figura 9. Convém ressaltar que durante a atuação do "crowbar" a máquina DFIG se comporta como uma máquina de indução convencional, no sentido que o controle eletrônico de velocidade encontra-se desabilitado e o controle de ângulo de "pitch" é o único a limitar a velocidade da máquina.

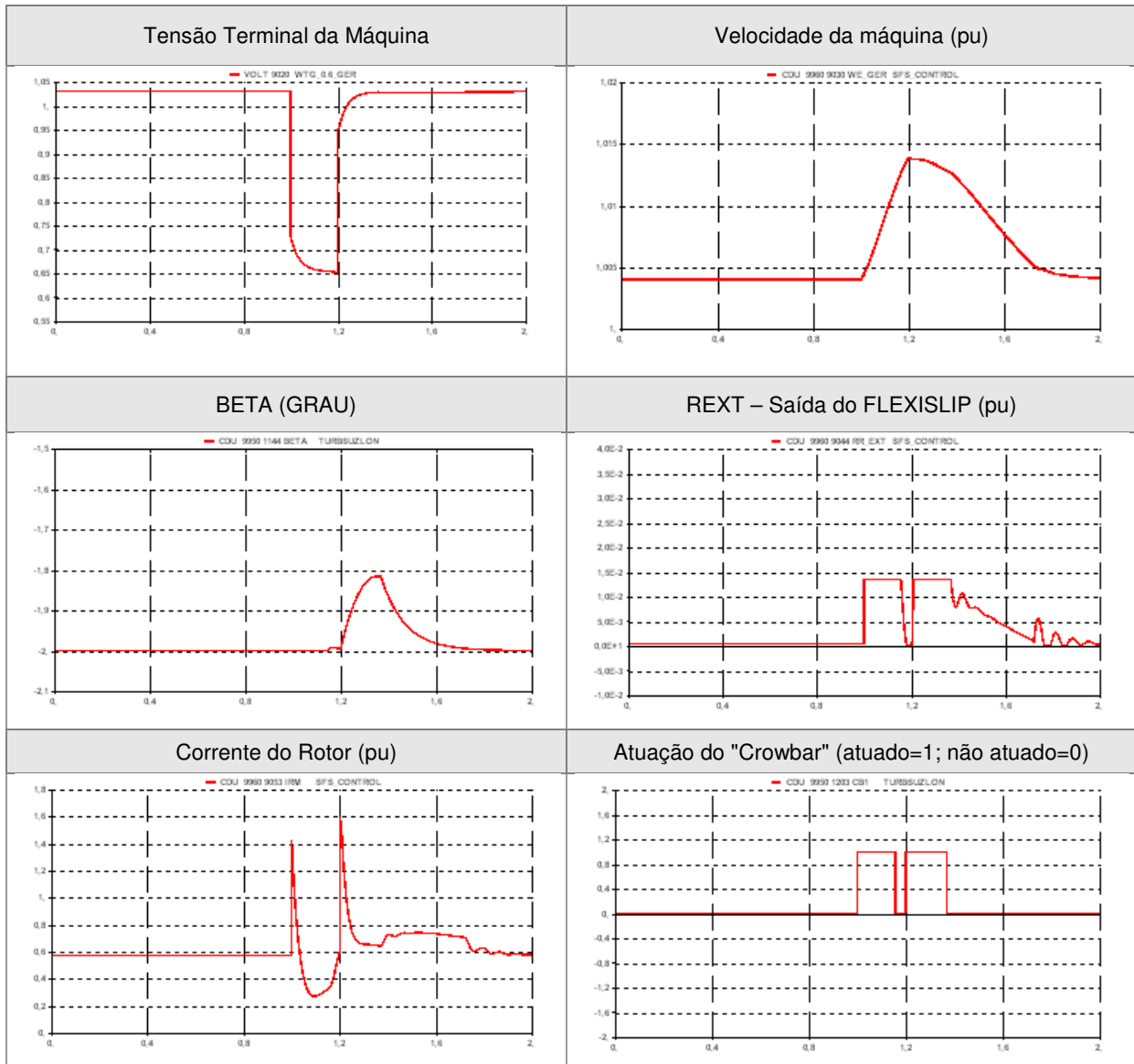


FIGURA 9 – Caso 2 – Curto circuito no sistema com atuação do "Crowbar".

3.2- Comentários Gerais

Deve ser enfatizado que o modelo da S88_2.1MW proposto pelo fabricante e implementado no ANATEM reflete com razoável fidelidade a realidade física do aerogerador tipo assíncrono, dado que o mesmo é representado por modelo de máquina igualmente assíncrona do ANATEM, assegurando-se uma correspondência física entre equipamento e modelo, onde se utilizam parâmetros físicos reais. A aerodinâmica da turbina também é considerada tal qual a sua realidade física. Estima-se que a fidelidade do modelo com a realidade física do

aerogerador garanta não apenas resultados adequadamente próximos da realidade, bem como maior robustez no desempenho do modelo frente a grandes perturbações, sem os problemas verificados quando se adota abordagens abstratas de representar os aerogeradores e seus controles, por exemplo, por fonte de corrente ou como carga dinâmica.

4.0 - CONCLUSÃO

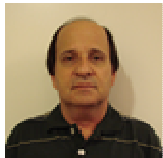
Embora o tipo de aerogerador S88_2.1MW, com controle de resistência externa de rotor, não esteja incluído entre os tipos disponíveis no ANATEM, foi possível representar este aerogerador e seus controles através de uma bem sucedida adequação do modelo de máquina assíncrona duplamente alimentada (DFIG), como indicado neste trabalho. A utilização de um modelo com correspondência física, isto é, cada elemento representado de acordo com a sua natureza física, é possivelmente a razão de se obter um modelo robusto e capaz de reproduzir com a necessária fidelidade o comportamento real do aerogerador.

A representação das curvas C_p no ANATEM através das abordagens tradicionalmente encontradas na literatura não se mostrou adequada. Por esta razão foi testado com sucesso uma nova abordagem que utiliza polinômios de ordem ajustável a cada caso (aqui foi adotado ordem 7) e funções de ponto (tabelas) para os coeficientes do polinômio. Destaca-se que nesta abordagem mista, proposta neste trabalho, os valores dos coeficientes dos polinômios para valores intermediários de ângulo das pás, situados entre os valores encontrados na tabela, são interpolados automaticamente pelo ANATEM.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CEPEL CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA “Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos Manual do Usuário” V10.04.03; Abril 2010.
- (2) SUZLON ENERGY GmbH “Electrical data & Settings S88 - 2.1MW 60Hz Grid Standard”, Issued 05 04.06.
- (3) GRUPO DE TRABALHO CEPEL - ELETROBRAS – CHESF - FURNAS – ELETROSUL - ONS, “Modelos para Análise Eletromecânica de Geradores Eólicos - Procedimentos para Preparação de Casos de Simulação com Máquina de Indução Duplamente Alimentada nos Programas ANAREDE e ANATEM”. Setembro 2004

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Álvaro J. P. Ramos, nascido em 15/02/1951 em Recife, Graduado pela Escola de Engenharia da UFPE em 1973 e Mestrado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1975. Foi chefe da Divisão de Estudos Elétricos Especiais da Operação da CHESF (1988-1998) e atualmente é diretor da ANDESA empresa de consultoria fundada em 1998.



Carmem Lúcia Tavares, nascida em 02/03/1984 em Toritama-PE, Graduada pela Escola de Engenharia da UPE em 2006. Atualmente exerce o cargo de Engenheira Analista de Sistema de Potência na ANDESA desde 2007.



Dêibson J. G. de Sena, nascido em 24/03/1981 na cidade do Cabo de Santo Agostinho, Graduado pela Escola de Engenharia da UPE em 2007. Atualmente exerce o cargo de Engenheiro Analista de Sistema de Potência na ANDESA desde 2008.



Ricardo D. Rangel, nascido em 24/07/1960, em Niterói, RJ, Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ em 1983, com Mestrado e Doutorado também em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ, respectivamente em 1987 e 2004. Desde 1985 exerce a função de pesquisador no CEPEL e participa desde 1986 do desenvolvimento do programa ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos), sendo responsável pelo projeto a partir de 1996.