



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GAT 03  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

#### **GRUPO IV**

#### **GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA-GAT**

#### **ANÁLISE DA ENTRADA EM OPERAÇÃO DE UMA USINA EÓLICA NO NORDESTE, UTILIZANDO MODELO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS NO ATP**

**Angela C S L Guimarães\*      Antônio Roseval F Freire      Janaina M S C Costa  
Rita K D M Medeiros      Sylvia A Barros**

**\*Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF.**

#### **RESUMO**

Com a entrada da geração eólica como alternativa para o Sistema Elétrico Brasileiro, foi necessário o desenvolvimento de modelos computacionais para atender a demanda dos estudos pré-operacionais. Para subsidiar as suas análises de transitórios eletromagnéticos, a Chesf tem utilizado modelos de aerogeradores desenvolvidos no ATP, aonde são representados: o conjunto mecânico das pás, o gerador; e o conversor CA/CC/CA, incluindo as malhas de controle. Esse trabalho vem apresentar o uso do modelo de uma turbina eólica com gerador síncrono, visando reproduzir a tecnologia da ENERCON, nos estudos de transitórios eletromagnéticos de impacto da Central Geradora Eólica Rio do Fogo sobre as instalações da Chesf.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

PROINFA, Geração Eólica, Turbinas Eólicas, Transitórios Eletromagnéticos, modelagem em ATP.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Segundo a Eletrobrás (1), o Programa para diversificação da matriz energética brasileira a partir de fontes renováveis de energia (PROINFA) deverá incorporar ao Sistema Interligado Nacional (SIN), até dezembro de 2008, mais de 1300 MW em projetos de geração de energia elétrica a partir de turbinas eólicas. Para atender a demanda de estudos pré-operacionais dos novos empreendimentos, foi necessário o desenvolvimento de modelos computacionais que contemplassem essa nova tecnologia.

A Central Geradora Eólica (CGE) Rio do Fogo tem capacidade instalada para produzir 49,3 Mega Watts (MW), a partir dos 62 aerogeradores instalados. Operando desde junho de 2006, a Usina está conectada ao sistema de distribuição em 69kV derivado da subestação Natal II da Chesf.

Para a elaboração dos estudos de transitórios eletromagnéticos de impacto sobre a entrada em operação dessa Usina, a Chesf utilizou um modelo de turbina eólica desenvolvido a partir da subrotina TACS do ATP (Alternative Transients Program), baseado nos trabalhos desenvolvidos em (2), (3), (4) e (10). Nos estudos foi utilizado um equivalente, aonde foram modelados: a máquina; o conjunto mecânico das pás; o conversor CA/CC/CA, incluindo a técnica de comando das chaves; a rede elétrica e todas as malhas de controle.

(\*) Rua Dr. Delmiro Gouveia, 333 – sala A-316 – Anexo II – CEP 50761-901 Recife, PE – Brasil  
Tel: (+55 81) 3229-4052 – Fax: (+55 81) 3229-4174 – Email: angelag@chesf.gov.br

Este trabalho vem apresentar o desempenho do modelo utilizado para os estudos de transitórios eletromagnéticos, aonde foram simulados algumas perturbações na rede básica e demais instalações de transmissão, como: energização de transformadores em vazio, curtos-circuitos em alimentadores e na barra da subestação; e abertura de linhas de transmissão nas instalações da Chesf.

## 2.0 - CONSIDERAÇÕES PARA A MODELAGEM DOS AEROGERADORES NO ATP

Para a simulação de turbinas eólicas conectadas à rede elétrica fez-se necessário empregar modelos de vento e da forma como a turbina aproveita a sua energia cinética para a produção de conjugado; do sistema de transmissão mecânica que acopla o eixo turbina-gerador; do gerador propriamente; do conversor estático CA/CC/CA e do seu filtro de saída; do sistema elétrico de coleta do parque eólico, e da conexão à rede elétrica.

A modelagem da dinâmica da usina eólica deteve-se apenas em representar todos os efeitos pertinentes ao período de tempo de interesse, em geral de alguns segundos após a ocorrência de um evento. A modelagem feita é capaz de identificar oscilações mecânicas típicas de sistemas de potência, que se encontram numa faixa entre 0,2 e 2 Hz, como também de demonstrar a habilidade da usina eólica no controle da tensão em seu ponto de conexão com a rede elétrica, durante o período de interesse.

### 2.1 Tecnologia das Turbinas Eólicas

A CGE - Rio do Fogo têm 61 unidades geradoras com capacidade nominal individual de 800 kW e 01 unidade de 500 kW. Os aerogeradores instalados são do modelo E-48 da ENERCON e são compostos de um gerador síncrono desacoplado da rede através de conversores estáticos do tipo retificador-booster-inversor. O rotor do gerador está diretamente conectado ao cubo do rotor. O aerogerador é conectado à rede através de um transformador e um filtro de alta frequência.

O sistema de controle do rotor aerodinâmico permite o controle da potência extraída dos ventos através de duas maneiras: através de um sistema de regulação de potência por "stall" e através da variação do ângulo de passo das pás (pitch).

Segundo o fabricante, a geração de energia elétrica de cada se realiza a uma tensão de 400 V, sendo elevada à tensão de 34,5 kV mediante um transformador de 900 kVA adjacente a cada uma das torres. Os aerogeradores se conectam entre si mediante quatro circuitos, ainda em 34,5 kV, e são conduzidos até um transformador elevador principal de 55MVA, estrela (69kV) e delta (34,5kV), na SE principal do parque.

### 2.2 Modelagem da Turbina Eólica e dos Sistemas de Controle

A fim de atender o máximo de tecnologias a serem implantadas pelo PROINFA, o modelo de turbina eólica desenvolvido na subrotina TACS do ATP (11) foi representado conforme esquema da Figura 1, ou seja, empregando gerador síncrono a ímãs permanentes, caixa de engrenagens, conversor de frequência (AC\_DC\_AC) com controle para rastreamento da curva de máxima extração de potência (Maximum Power Point Tracking - MPPT) e controle do ângulo das pás.

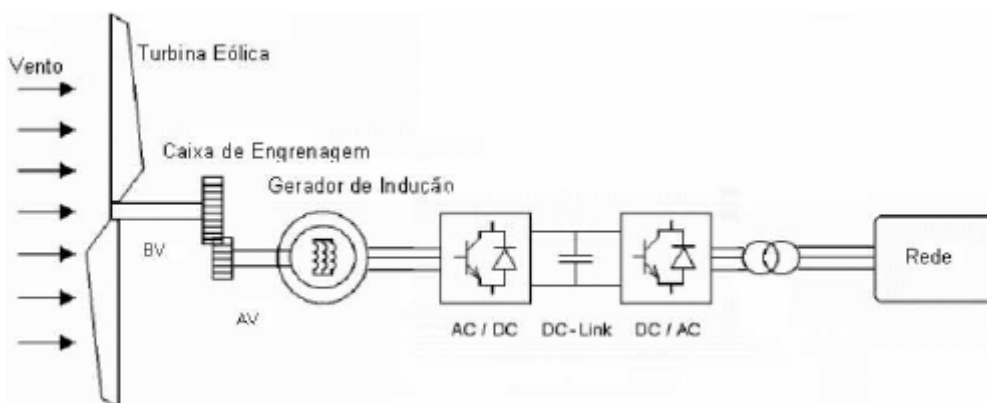


FIGURA 1 – Modelo da Turbina Eólica implantado no ATP

O modelo utilizado representa o efeito espacial do vento local e permite que vários tipos de vento possam ser simulados. Assume-se que o vento atinge todas as turbinas de forma idêntica e ao mesmo tempo, é levado em conta que o vento é o mesmo em todo o rotor e os fenômenos de alisamento devidos à correlação da turbulência são desprezados. As turbinas são consideradas como sincronizadas entre si. Nos estudos de transitórios

eletromagnéticos, assume-se uma velocidade de vento calculada a partir do ponto de operação que a usina se encontra na curva de máximo aproveitamento do vento incidente, baseada na literatura.

O diagrama de blocos da produção de conjugado aerodinâmico da turbina eólica a partir da velocidade do vento  $V_T$  está representado na Figura 2.

Aonde:  $\lambda$  é uma grandeza adimensional (TIP speed ratio), e é definida por:  $\lambda = \frac{\omega_{GI} R}{V_T}$ . “R” é o raio do rotor

eólico, medido na ponta da pá,  $\omega_{GI}$  é a velocidade angular da turbina e  $\beta$  é o ângulo de passo da pá. Pode-se expressar o coeficiente de potência em função de  $\lambda$  e  $\beta$ , através da equação empírica:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}}, \text{ aonde o fator } \lambda_i \text{ é dado pela equação: } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

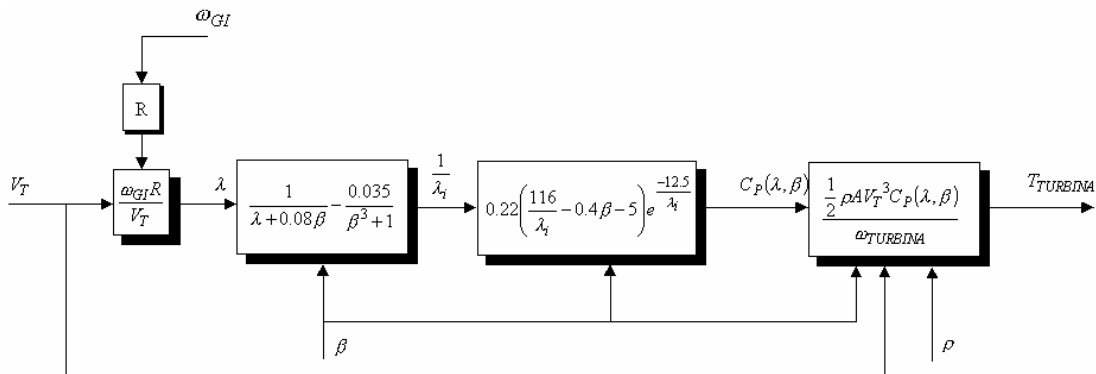


FIGURA 2 - Diagrama de blocos da produção de conjugado aerodinâmico da turbina eólica

Assim como para todos os elementos da turbina, a modelagem do sistema de transmissão visa representar fenômenos dentro da faixa de frequências de interesse (até uns poucos kHz). O modelo é formado por duas massas, isto é, uma grande massa que corresponde à inércia do rotor e uma massa menor que corresponde à inércia do gerador. O sistema de transmissão é modelado por uma rigidez e um coeficiente de amortecimento. Para valores de vento incidentes muito superiores ao valor nominal, o eixo pode ser assumido como rígido.

Um conjunto de equações diferenciais e algébricas compõe o modelo da máquina síncrona, aonde foi utilizada a teoria de vetores espaciais “dq0” (5). Na Figura 3 está representado o diagrama de blocos do gerador síncrono modelado. Nele as tensões, correntes, fluxos e parâmetros de estator ( $V_s$ ,  $I_s$ ,  $F_{is}$  e  $L_s$ , respectivamente) estão associadas, tomando-se o sistema de eixos de referência fixo no rotor, sendo o eixo direto, denominado d, alinhado com o vetor fluxo de rotor (Fluxo\_íma), e o eixo em quadratura adiantado em 90°, denominado q. Será composto um sistema de eixos de referência girando à velocidade do rotor  $\omega_r$ . As equações da máquina foram tomadas com notação de motor.

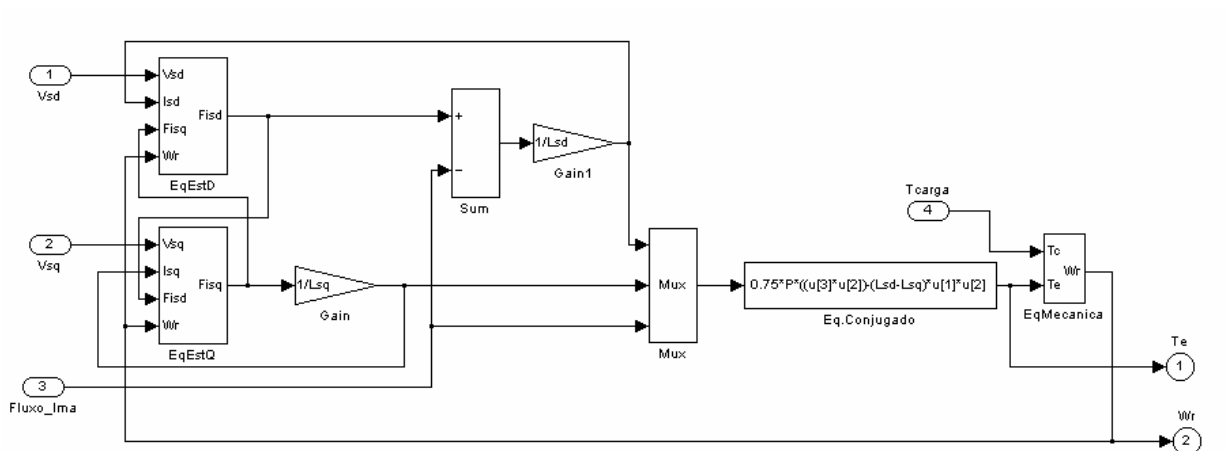


FIGURA 3- Diagrama de blocos da máquina síncrona a ímã permanente.

Os algoritmos de simulação desenvolvidos também consideraram a existência de um filtro LCL entre o conversor e a rede, conforme indicado na Figura 4. Foram utilizados valores típicos para os parâmetros não fornecidos pelo fabricante, conforme as referências bibliográficas (7),(8), (9), (12) e (13).

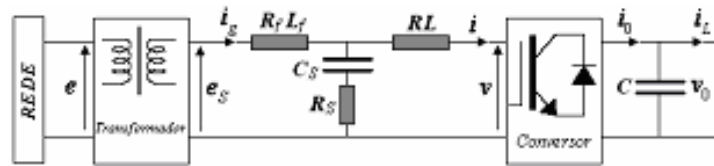


FIGURA 4 -Filtro LCL entre o conversor e a rede.

O conversor de frequência é o elemento responsável pela transferência de potência e controle de velocidade do gerador. No conversor considerou-se o uso de IGBT com diodo em antiparalelo para realizar os chaveamentos totalmente controlados. Para a topologia proposta, dois sistemas de controle foram utilizados (Figura 5): um do lado da rede, para o controle da tensão do barramento CC, otimizando o fornecimento de energia; e outro do lado da máquina, para o controle de velocidade, priorizando a máxima extração de potência mecânica dos ventos (6) a (9).

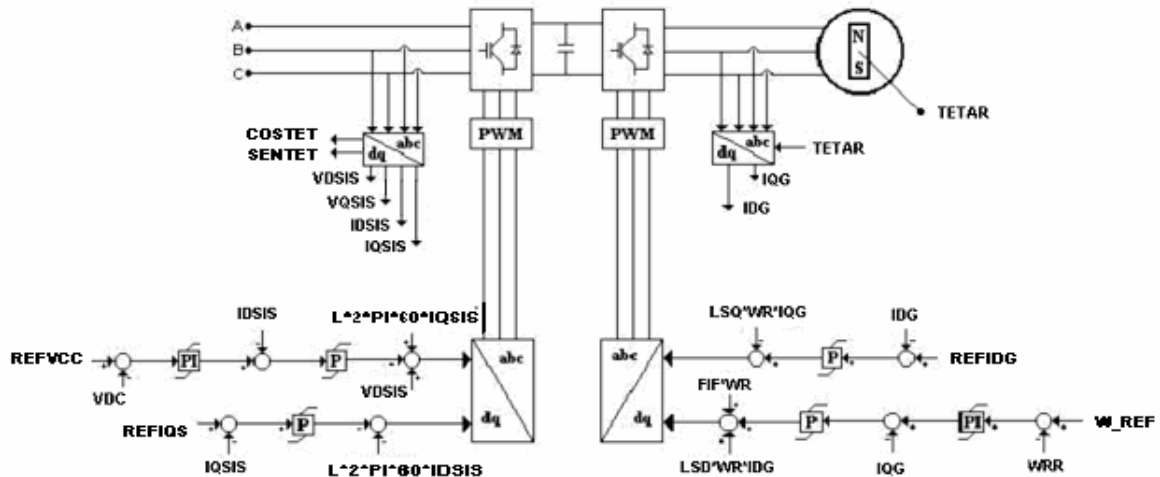


FIGURA 5 – Diagrama da topologia de controle utilizada nas Turbinas Eólicas da CGE- Rio do Fogo.

### 3.0 - ESTUDOS REALIZADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em virtude da entrada em operação da Central Geradora Eólica Rio do Fogo, foram realizados estudos de transitórios eletromagnéticos de impacto sobre as instalações CHESF. Esse trabalho vem apresentar o desempenho do modelo desenvolvido para as turbinas eólicas durante manobras de transformadores, curtos-circuitos e perda de cargas, com o sistema em condição normal de operação.

A subestação de Natal II (NTD) e o sistema de 69kV, aonde a CGE – Rio do Fogo está conectada, foram representados conforme esquema da Figura 6. Os circuitos coletores internos da Usina foram representados por um capacitor shunt de 2,7Mvar na barra de 34,5kV da subestação de Rio do Fogo (RFG).

Para fins de simulação, foram somados aos tempos de atuação dos relés, os tempos de aberturas dos disjuntores e os tempos das viagens dos sinais de transferência de disparo. Para tornar os resultados encontrados mais conservativos, após o instante de curto-circuito numa LT, foi considerado que o primeiro terminal será aberto em 100 ms e o segundo só em 120 ms após o defeito. No caso do curto-circuito na barra, após o defeito, os disjuntores de 69 kV da subestação estarão totalmente abertos em 2,1 segundos.

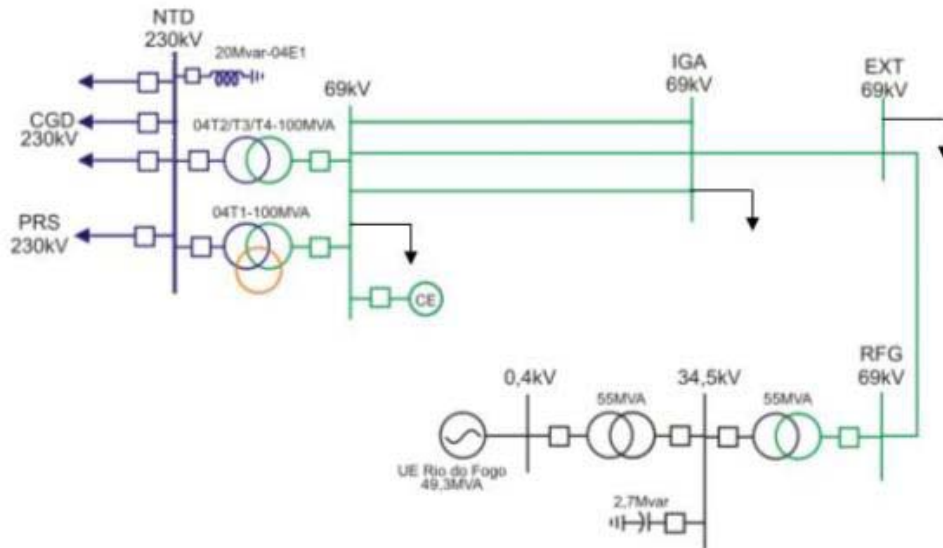


FIGURA 6 – Diagrama unifilar de interligação da CGE- Rio do Fogo ao SIN

### 3.1 Energização de transformadores na SE Natal II

Para os estudos de energização dos transformadores, foram simulados casos estatísticos, nos quais o equipamento em questão foi submetido a 100 manobras. Destas energizações, foram extraídos os tempos de fechamento do disjuntor que geraram as sobretensões e sobrecorrentes de fase e de neutro mais elevadas. Através de um tratamento determinístico foram plotadas as formas de onda e analisado o comportamento das grandezas mais relevantes.

A energização do transformador 230/69kV-100MVA na SE NTD com a presença da Usina Eólica Rio do Fogo (UERF) provocou um incremento na sobretensão encontrada na barra de 230kV desta subestação. Os gráficos das Figuras 7 e 8 mostram o comportamento das correntes no lado de 230kV desse transformador durante a sua energização, antes e depois da entrada do Parque Eólico.

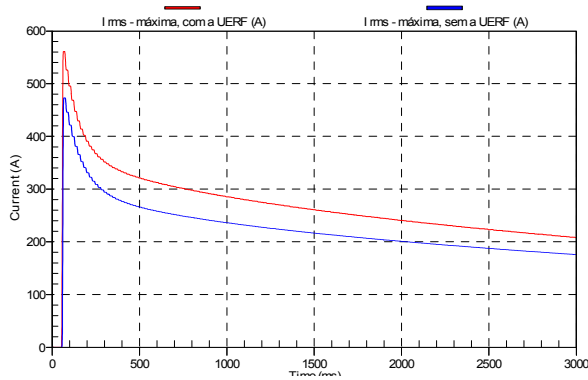


Figura 7- Valores rms das correntes de fase encontradas no lado de 230kV do TR 230/69kV-100MVA, durante a sua energização na SE NTD, estando com ou sem a Usina Rio do Fogo (A).

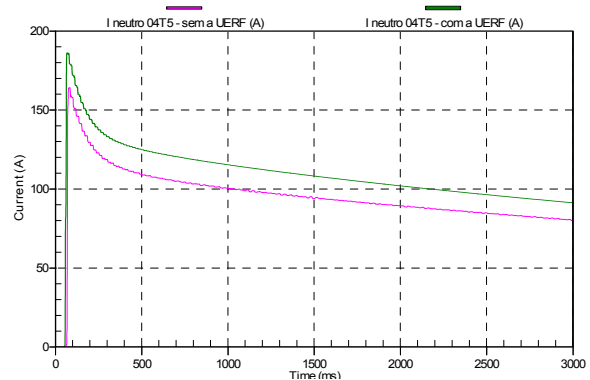


Figura 8- Valores rms das correntes de neutro encontradas no lado de 230kV do TR 230/69kV - 100MVA, durante a sua energização na SE NTD, estando com ou sem a Usina Rio do Fogo (A).

As Figuras 9 e 10 apresentam a performance das estratégias de controle do conversor do lado da rede e do conversor do lado da máquina, respectivamente, durante a energização de um transformador na SE Natal II. Pode-se observar que mesmo durante a perturbação, o barramento CC e a velocidade da máquina conseguem ser controladas.

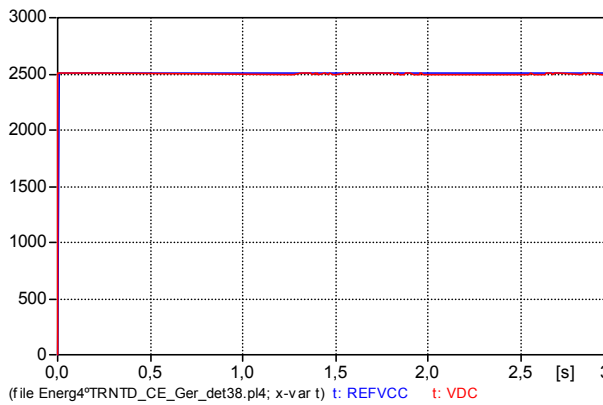


FIGURA 9 – Tensão no barramento CC do conversor da turbina eólica(vermelho) e a referência(azul) durante a energização do TR 230/69kV – 100MVA da SE NTD (V)

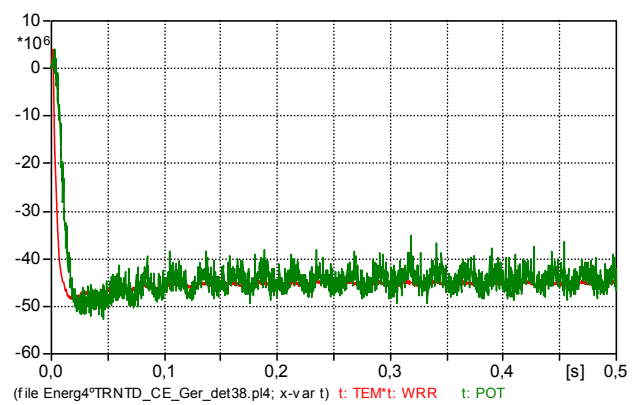


FIGURA 10 – Comportamento da potência injetada no sistema pela CGE – Rio do Fogo (Vermelho) e a referência (verde), durante a energização do TR 230/69kV – 100MVA da SE NTD (MW)

### 3.2 Análise de Curto-Circuito no 69kV

Nos casos de curtos-circuitos, foram aplicadas faltas monofásicas na barra de 69 kV e em um alimentador de 69kV Natal II – Igapó (NTD-IGA), com tempos de eliminação de defeito e abertura de disjuntores conforme ajustes dos relés de proteção da subestação de Natal II.

As Figuras 11 e 12 apresentam o comportamento do sistema (tensão) e da turbina eólica (potência injetada) durante o curto na barra de 69kV da SE NTD. Observa-se que como não existe proteção na turbina, ela acelerará conectada ao sistema durante todo o defeito.

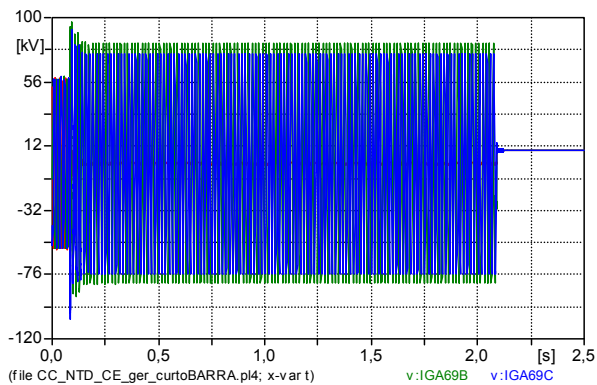


FIGURA 11- Valor da tensão encontrada na barra de 69kV da SE IGA, durante um curto-circuito monofásico na barra de 69kV da SE NTD (kV – fn pico).

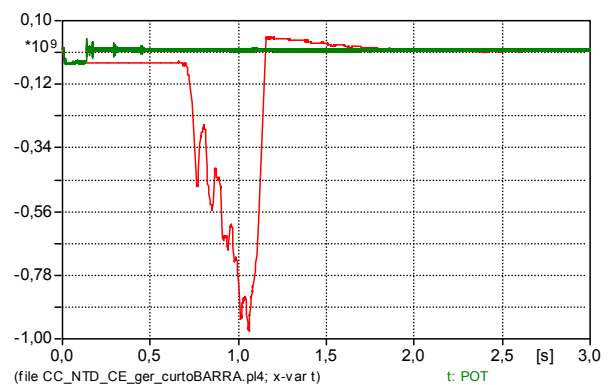


FIGURA 12- Valor da potência injetada pela turbina eólica (vermelho) em relação à referência (verde), durante um curto monofásico na barra de 69kV da SE NTD (MW).

### 3.3 Estudo de abertura de linhas de transmissão

Nas simulações de abertura de linhas, foram consideradas aberturas de uma das linhas de transmissão em 230kV entre as subestações de Campina Grande II (CGD) e Natal II, representando a atuação das proteções locais e remotas, estando essas subestações com máxima tensão operativa.

Na Figura 15 está apresentado o comportamento da tensão na barra de 69 kV da SE Extremoz (EXT) durante esse defeito com a presença da CGE - Rio do Fogo. Na Figura 16, verifica-se que mesmo com a queda de tensão no ponto de conexão da usina, o controle da turbina mantém a velocidade da máquina.

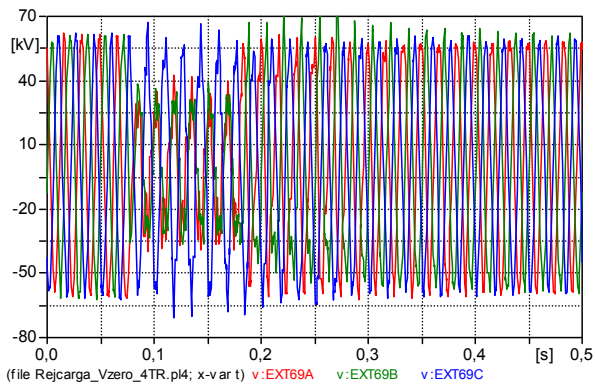


FIGURA 15- Valores das tensões encontradas na barra de 69 kV da SE EXT, durante um curto monofásico na LT 230 kV CGD-NTD, estando com a Usina Rio do Fogo em operação (kV – fn pico)

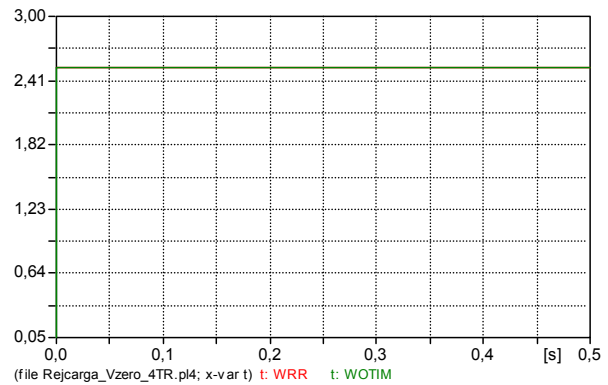


FIGURA 16- Valores de referência (verde) e calculado (vermelha) da velocidade do rotor da turbina durante um curto monofásico na LT 230 kV CGD-NTD (rad/s)

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A modelagem em ATP das turbinas eólicas permitiu a realização dos estudos de Transitórios Eletromagnéticos sobre o impacto da entrada em operação da CGE- Rio do Fogo sobre as instalações da Chesf.

Com os resultados encontrados, foi possível indicar a necessidade de uma reavaliação das instruções de operação da instalação e dos ajustes das proteções de sobrecorrentes dos transformadores para evitar atuações indesejadas durante manobras de energização de transformadores na subestação de Natal II.

As análises feitas indicam a importância para as transmissoras da realização dos estudos pré-operacionais de impacto devido a entrada de novos acessantes, estejam eles na rede básica ou não, a fim de resguardar seus equipamentos como também indicar a necessidade de adequação de ajustes proteções e de reavaliação das instruções de operação.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Eletrobrás, Site do PROINFA – [www.proinfa.com.br](http://www.proinfa.com.br)

(2) PINHEIRO, E. L. R. - Análise do Comportamento Dinâmico de Usinas Eólicas a Velocidade Variável Utilizando ATPDraw - Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Junho/2004, Belo Horizonte.

(3) NETO, A. S. – Análise e Controle de Centrais Eólicas a Velocidade Variável Utilizando ATPDraw – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

(4) GUIMARÃES, A. C. S. L. – Estratégias de Controle de Sistemas de Geração Eólica com Máquinas de Indução - Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Pernambuco, 2003, Recife -PE.

(5) LIPO, T.; NOVOTNY, D. – Vector Control and Dynamics of AC Drives – Clarendon Press, Oxford, 1996.

(6) GUIMARÃES, A.C.S.L.; NEVES, F.A.S.; CARVALHO JR, M.A.; CAVALCANTI, M.C.; LINS, Z.D. – Doubly Fed Induction Generators Active and Reactive Power Control – EPE – PEMC – Riga, 2004.

(7) NETO, A.S.; NEVES, F.A.S.; PINHEIRO, E.L.R.; SILVA, S.R.S.; ROSAS, P.A.C. – Variable Speed Wind Turbine Modeling Using ATPDraw – VI Induscon, Joinville, 2004.

(8) NEVES, F. A. S.; NETO, A. S.; CAVALCANTI, M. C.; PINHEIRO, E. L. R.; SILVA, S. R. - Controle da Energia Reativa de Usina Eólica para melhorar a Qualidade da Energia Elétrica – X SEPOPE, Florianópolis, 2006

(9) NEVES, F. A. S.; NETO, A. S.; CAVALCANTI - Comparação dos Impactos da Inserção de Turbinas Eólicas a Velocidade Variável e a Velocidade Constante em um Sistema Elétrico Real – X SEPOPE, Florianópolis, 2006

(10) BARBOSA, A.L. B - Sistemas de conversão de energia a velocidade variável -.Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal de Minas Gerais, 1996

(11) ATP – Alternative Transients Program – RULE BOOK, 1987

(12) HEIER, S. –JOHN WILEY & SONS - Grid integration of wind energy conversion systems, 1998

(13) SLOOTWEG, J. G., POLINDER, H. AND KLING, W. L. –Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations - IEEE Transactions on Energy Conversion, december 2003

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

### **Angela Cristina de Souza Leitão Guimarães**

Nascida no Recife, PE em 26 de dezembro de 1973.

Mestrado (2003) e Graduação (1995) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco

Empresa: CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco desde 2003

Engenheira da Divisão de Estudos da Operação Elétrica

### **Antonio Roseval F. Freire,**

Nascido em Recife-PE em 1964

Mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ em 1991.

Pós-graduado em Engenharia da Qualidade pela UFPE em 1995

Graduado em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1985

Trabalha na CHESF desde 1985, com experiências nas áreas de especificação, ensaios e análise de desempenho de equipamentos de subestações e compensadores estáticos, e nas áreas de planejamento da operação e estudos elétricos de sistemas de potência.

É membro individual do CIGRE.

### **Janaina Mirses de Sousa Cruz Costa**

Nascida em Catende, PE em 16 de dezembro de 1972.

Graduação (2002) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco

Empresa: CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco desde 2002

Engenheira da Divisão de Estudos da Operação Elétrica

### **Rita K D M Medeiros**

Nascida em Olinda, PE em 27 de janeiro de 1974.

Graduação (1997) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco

Empresa: CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco desde 2002

Engenheira da Divisão de Estudos da Operação Elétrica

### **Sylvia de Almeida Barros**

Nascida no Rio de Janeiro – RJ em 1957

Pós-graduada em Engenharia Elétrica pela UFPB em 1985

Graduada em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1980

Trabalha na CHESF, desde 1981, na área de estudos da operação elétrica do sistema.