



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

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

GRUPO - 4

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

ANÁLISE COMPARATIVA ATP X ANATEM DE SOBRETORQUES TRANSITÓRIOS EM UNIDADES GERADORAS DE PEQUENO PORTE CONECTADAS EM SISTEMAS RADIAIS

**Aniela Maria Peixoto Mendes(*)
ELETROBRAS ELETRONORTE**

**João Ferreira de Lima Filho
POTÊNCIA ENGENHARIA**

RESUMO

O objetivo desse Informe Técnico é analisar e discutir a questão de sobretorques transitórios nos eixos de unidades geradoras de pequeno porte através da análise comparativa de simulações digitais com o programa de transitórios eletromagnéticos ATP (*Alternative Transients Program*) e com o programa de transitórios eletromecânicos ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) do CEPEL, além de propor critérios para análise de suportabilidade frente a tais sobretorques.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios Eletromagnéticos, Transitórios Eletromecânicos, Geração Paralela, Sobretorques, Suportabilidade

1.0 - INTRODUÇÃO

Os Procedimentos de Rede do ONS, ref. [1], indicam que os estudos de torques transitórios devem ser realizados no domínio do tempo considerando a modelagem do eixo turbina-gerador e o seu acoplamento bilateral com o sistema de potência.

Não existem critérios definidos para avaliação de torques transitórios nos eixos de unidades geradoras.

Em regime permanente o torque (T) no eixo da unidade geradora se relaciona com a potência ativa (P) em seu terminal e com a velocidade angular (ω) através da expressão:

$$P = \omega \cdot T$$

Para distúrbios onde a variação da velocidade do eixo nos primeiros ciclos é desprezível, a potência ativa instantânea (P0+), ou seja, imediatamente após o distúrbio, em pu, pode refletir a solicitação de torque no eixo (T0+), em pu, desde que "P0+" seja adequadamente determinado.

Em regime transitório o torque (T) no eixo da unidade geradora se relaciona com o número de pólos (p), enlaces de fluxo (λ) e correntes (i) segundo os eixos; direto (d) e em quadratura (q) através da expressão:

$$T = p/2 \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d)$$

Desta forma, a determinação do torque depende da forma como tensões e correntes são calculadas pelo programa digital utilizado.

(*) Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A – Eletrobras Eletronorte - SCN Quadra 06 Conj. A, Bloco C, sala 1107, Asa Norte - Cep 70.716-901 - Brasília/DF - tel. (61)3429-5157– Email: aniela@eln.gov.br

Como diretriz para estudos eletromecânicos de fechamento de anel, de acordo com o ONS, a avaliação desse tipo de solicitação é feita, no sentido de se evitarem esforços mecânicos excessivos nos eixos de unidades geradoras, com base na variação percentual instantânea da potência ativa (ΔP) gerada pela unidade:

$$\Delta P = P_{\text{ele}}(t=0-) - P_{\text{ele}}(t=0+)$$

Como critério do procedimento de rede, se a variação da potência ativa ΔP da unidade geradora é igual ou inferior a 50% da sua potência nominal aparente, o fechamento de anel é permitido tanto para unidades hidroelétricas quanto para unidades termoeletrônicas.

A questão a ser discutida é qual a melhor forma, via simulação digital, de se determinar a potência ativa no instante $t=0+$.

No caso de sobretorques transitórios, a questão é qual o critério de suportabilidade de torque máximo no eixo da unidade geradora, imediatamente após distúrbios em sistemas radiais, como curto circuito e abertura de circuitos com elevado carregamento de potência ativa em direção à unidade geradora, provocando sobretorque e subfrequência.

O Sistema Interligado Brasil-Venezuela atende radialmente a demanda do Sistema Boa Vista (Brasil), da ordem de 100 MW, através de longas linhas de transmissão em 230 kV (410 km) e 400 kV (298 km), a partir da UHE Macagua (Venezuela). Por questões energéticas, o intercâmbio entre Brasil e Venezuela, da ordem de 110 MW, teve que ser reduzido através da operação em paralelo de unidades térmicas, pertencentes a Produtores Independentes de Energia (PIEs), de pequeno porte (cerca de 2 MVA cada). Tais unidades geradoras em paralelo foram instaladas na SE Distrito Industrial 13,8 kV (16 unidades de 2,05 MVA) e na SE Floresta 13,8 kV (32 unidades de 2,05 MVA), para garantir um fornecimento firme de 60 MW.

Estudos operacionais mostraram que a abertura em Las Claritas 230 kV provocam maiores sobretensões no sistema remanescente, trazendo preocupações quanto à autoexcitação elétrica e sobretorques transitórios sobre a geração emergencial em paralelo.

2.0 - CONFIGURAÇÕES, SIMULAÇÕES E CRITÉRIOS

De acordo com a configuração do Sistema Interligado Brasil - Venezuela, foram selecionados dois casos pré-manobra para simulações com o ANATEM e com o ATP, como descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Casos Simulados ANATEM E ATP

IDENTIFICAÇÃO	TENSÃO PRÉ LAS CLARITAS 230KV / TENSÃO TERMINAL GERAÇÃO 0,480 KV	FLUXO PRÉ A SER INTERROMPIDO LAS CLARITAS 230 KV PARA STª ELENA	Nº DE GERADORES FLORESTA 0,480 KV / DESPACHO PRÉ	Nº DE GERADORES DISTRITO INDUSTRIAL 0,480 KV / DESPACHO PRÉ
CASO 1	1,030 pu / 1,050 pu	40,4 MW - 32,0 Mvar	-	16 unidades de 2,05 MVA / (0 + j 0)MVA
CASO 2	1,046 pu / 0,954 pu	125,7 MW + 27,3 Mvar	16 unidades de 2,05 MVA / (1,26 – j2,16)MVA	-

Em cada um dos Casos 01 e 02 foram simuladas as seguintes situações:

- Curto trifásico em Las Claritas 230 kV no instante 100 ms, com eliminação em 200 ms através da abertura do terminal Las Claritas 230 kV e simulação até 1,2 segundos.

- Abertura eventual em Las Claritas 230 kV no instante 200 ms e simulação até 1,2 segundos.

- Abertura eventual em Las Claritas 230 kV no instante 200 ms e simulação até 1,2 segundos, com a inércia das unidades geradoras 0,480 kV multiplicada por 1000.

Cada unidade geradora em Floresta ou em Distrito Industrial foi simulada no ATP, sem reguladores de tensão e velocidade, com os parâmetros constantes da Tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros para modelagem de gerador

$V_n = 0,48 \text{ kV}$	$S = 2,05 \text{ MVA}$	$P = 1,64 \text{ MW}$	$N = 4 \text{ polos}$	$H = 0,47175 \text{ s}$	$R_a = 0,01335 \text{ pu}$
$X_d = 2,6942 \text{ pu}$	$X_q = 2,3231 \text{ pu}$	$X'_d = 0,1886 \text{ pu}$	$X'_q = 0,1257 \text{ pu}$	$X''_d = 0,121 \text{ pu}$	$X''_q = 0,1103 \text{ pu}$
$X_l = 0,06 \text{ pu}$	$X_0 = 0,0071 \text{ pu}$	$T'_{d0} = 6,633 \text{ s}$	$T'_{q0} = 4,198 \text{ s}$	$T''_{d0} = 0,0074 \text{ s}$	$T''_{q0} = 0,0057 \text{ s}$
$F = 60 \text{ Hz}$	$I_{f0} \text{ "air gap"} = 16,4 \text{ A}$	$I_{f1 \text{ pu}} = 21,7 \text{ A}$	$I_{f1,2 \text{ pu}} = 44,2 \text{ A}$		

Cada unidade geradora em Floresta ou em Distrito Industrial foi simulada no ANATEM, sem reguladores de tensão e velocidade, com parâmetros semelhantes aos usados no ATP, a menos da dinâmica do eixo turbina-gerador.

Cada transformador elevador (13,8/0,48 kV-2,5 MVA) foi simulado com $X_{ps} = 6 \%$.

Os pára-raios em Las Claritas, com tensão nominal de 192 kV, foram simulados com a mesma curva característica dos pararraios de Boa Vista 230 kV.

Os transformadores no ATP foram representados com suas respectivas curvas de saturação e joelhos explicitados nas SEs Las El Callao (1,32 pu), Las Claritas (1,10 pu), Sta Elena (1,04 pu), Boa Vista (1,24 pu), Floresta (1,25 pu), Centro (1,25 pu) e Distrito Industrial (1,25 pu), enquanto no ANATEM os transformadores são representados sem curvas de saturação.

O critério utilizado para análise dos sobretorques transitórios foi baseado no curto circuito trifásico assimétrico no terminal 13.8 kV do transformador elevador de uma unidade geradora de 2.05 MVA (curto no zero da tensão de uma das fases) correspondente ao sobretorque de 6.836 pu do torque nominal com fator de potência 0.8 (1.64 MW), conforme Figura 1.

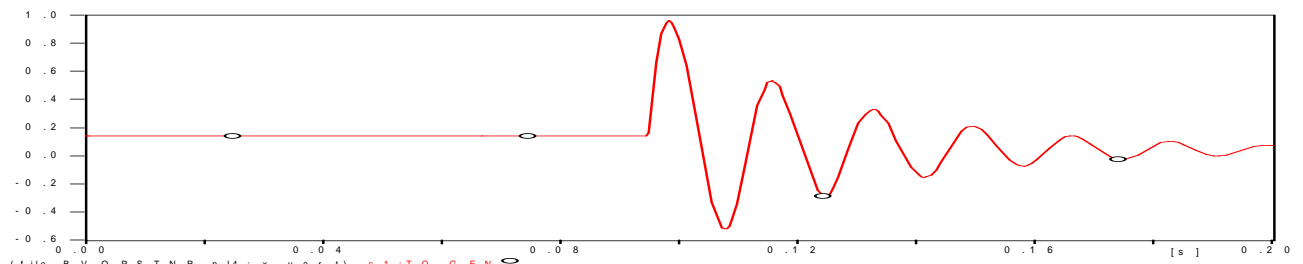


FIGURA 1 – Máximo torque de referência 0.96 milhões de Newton.metro
(6.836 pu do torque nominal de 0,14 milhões de Newton.metro)

Considerando margem de 20 %, o torque de referência considerado foi de 0.768 milhões de Newton.metro (5,469 pu).

Quanto à modelagem da carga, simulações com o ANATEM utilizaram modelo de impedância constante (variação com o quadrado da tensão, independente da variação da frequência) e simulações com o ATP fizeram uso do modelo R L C, sensível à variação da frequência, através das equações diferenciais no tempo envolvendo estes parâmetros.

3.0 - RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 Caso 1 com Interrupção de 40 MW - j 32 Mvar em Las Claritas e 16 Unidades Geradoras de 2,05 MVA em Distrito Industrial 0,48 kV

3.1.1..Caso 1.1 com Curto Trifásico em Las Claritas em 100 ms e Eliminado em 200 ms

A Figura 2 mostra a tensão em Boa Vista 230 kV (ATP) na fase mais crítica e seu valor eficaz, onde se observa valor máximo de pico de 288,7 kVp (1,537 pu) em 221 ms e valor máximo eficaz de 136,4 kVef (1,027 pu) em 236 ms, reduzindo-se este valor eficaz para 80,8 kVef (0,608 pu) em 600 ms e para 66,7 kVef (0,502 pu) em 1,2 segundos.

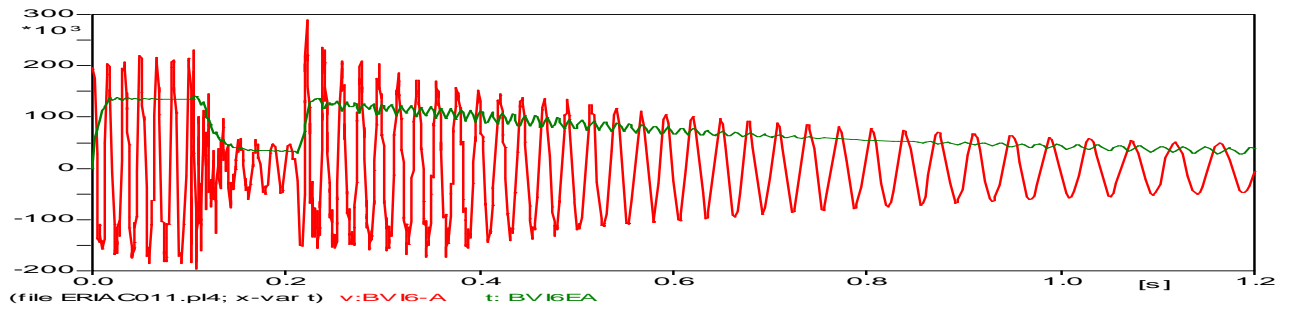


FIGURA 2 – Tensão Boa Vista 230 kV (ATP) com Curto em Las Claritas 230 kV

A Figura 3 mostra a tensão em Boa Vista 230 kV (ANATEM), onde se observa valor máximo de 2,257 pu em 365 ms, reduzindo-se para 1,869 pu em 600 ms e para 1,065 pu em 1,2 segundos.

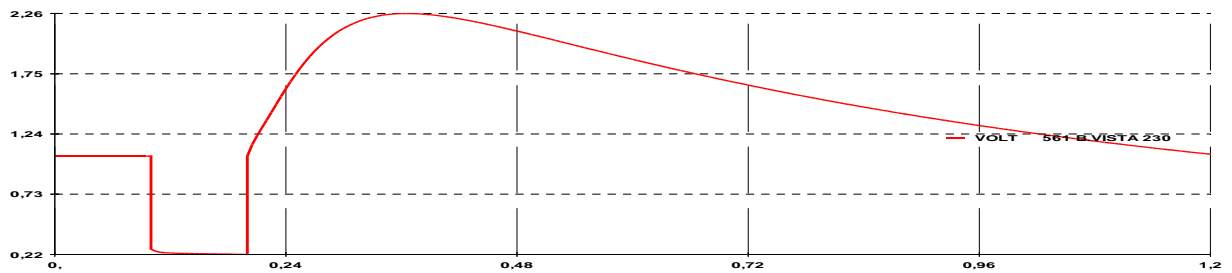


FIGURA 3 – Tensão Boa Vista 230 kV (ANATEM) com Curto em Las Claritas 230 kV

A Figura 4 mostra a tensão em Distrito Industrial 0,480 kV (ATP) na fase mais crítica e seu valor eficaz, onde se observa valor máximo de pico de 0,4233 kVp (1,080 pu) em 221 ms e valor máximo eficaz de 0,2623 kVef (0,946 pu) em 253 ms, reduzindo-se este valor eficaz para 0,1789 kVef (0,646 pu) em 600 ms e para 0,0960 kVef (0,346 pu) em 1,2 segundos.

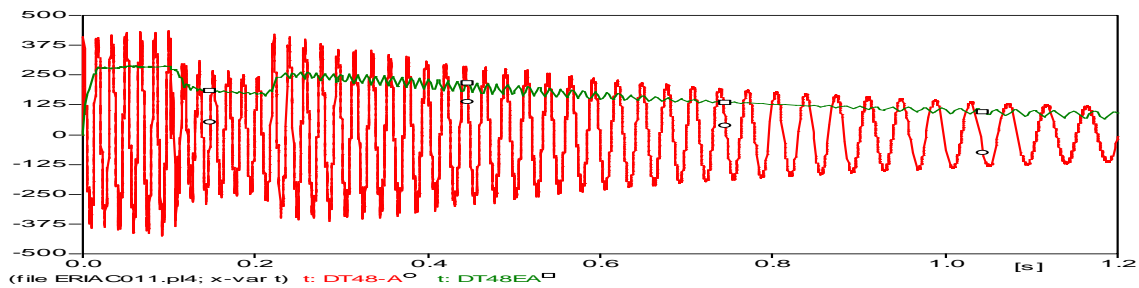


FIGURA 4 – Tensão Distrito Industrial 0,480 kV (ATP) com Curto Las Claritas 230 kV

A Figura 5 mostra a tensão em Distrito Industrial 0,480 kV (ANATEM), onde se observa valor máximo de 1,912 pu em 365 ms, reduzindo-se para 1,583 pu em 600 ms e para 0,903 pu em 1,2 segundos.

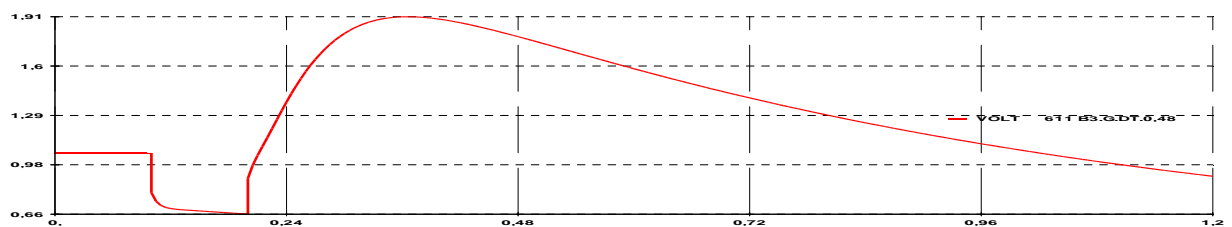


FIGURA 5 – Tensão Distrito Industrial 0,480 kV (ANATEM) com Curto Las Claritas 230 kV

A Figura 6 mostra a corrente em Distrito Industrial 0,480 kV (ATP) referente às 16 unidades geradoras na fase mais crítica e seu valor eficaz, onde se observa, após a eliminação da falta, valor máximo de pico de 66,86 kAp (1,198 pu da corrente nominal de 55,794 kAp) em 248 ms e valor máximo eficaz, após a eliminação da falta, de 58,4 kAef (1,480 pu da corrente nominal de 39,452 kAef) em 260 ms, reduzindo-se este valor eficaz para 38,7 kAef (0,981 pu) em 600 ms e para 27,7 Aef (0,702 pu) em 1,2 segundos.

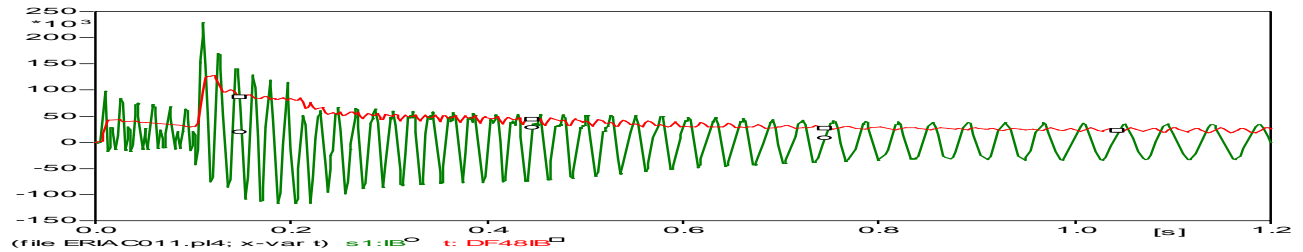


FIGURA 6 – Corrente Distrito Industrial 0,480 kV (ATP) com Curto Las Claritas 230 kV

A Figura 7 mostra a corrente em Distrito Industrial 0,480 kV referente às 16 unidades geradoras (ANATEM), onde se observa valor máximo, após a eliminação da falta, de 3,087 pu em 365 ms, reduzindo-se para 2,555 pu em 600 ms e para 1,456 pu em 1,2 segundos.

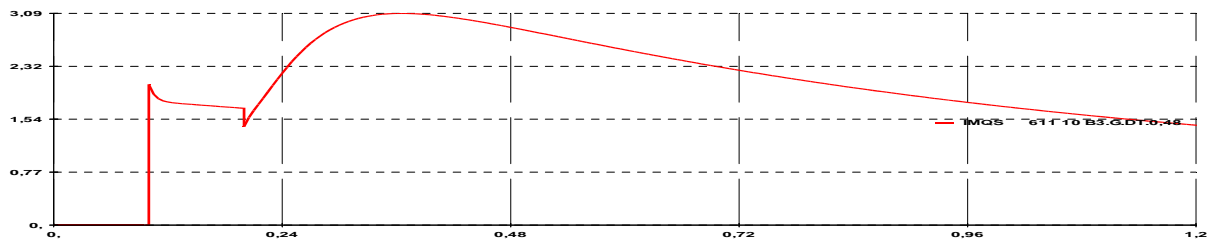


FIGURA 7 – Corrente Distrito Industrial 0,480 kV (ANATEM) Curto em Las Claritas 230 kV

A Figura 8 mostra a velocidade do rotor (ATP) das 16 unidades geradoras, onde se observa, após a eliminação da falta, valor de $-37,7$ rd/s (correspondente à frequência de 54 Hz) em 360 ms, reduzindo-se para 48,3 Hz em 600 ms.

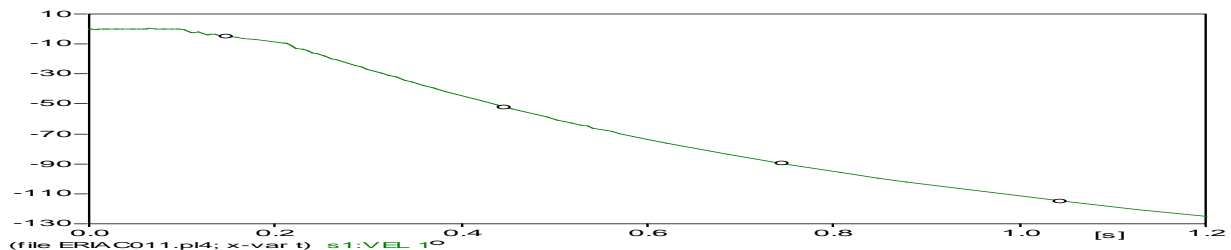


FIGURA 8 – Velocidade do rotor das 16 unidades geradoras em Distrito Industrial 0,480 kV (ATP) com Curto em Las Claritas 230 kV

A Figura 9 mostra a frequência (ANATEM) das 16 unidades geradoras, onde se observa, após a eliminação da falta, valor de 54 Hz em 235 ms, reduzindo-se para 0 Hz em 400 ms.

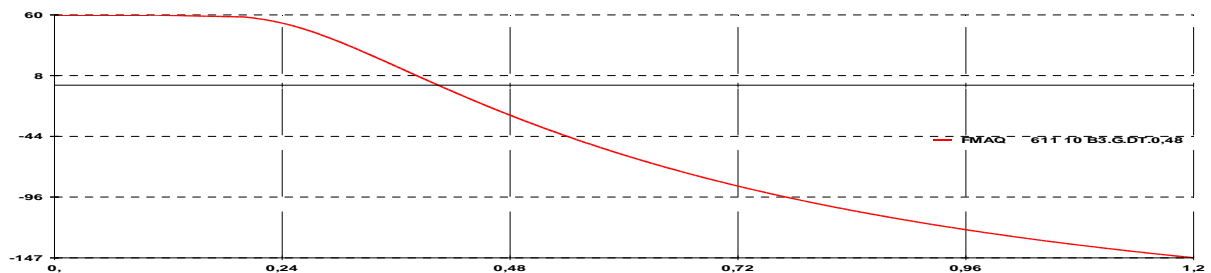


FIGURA 9 – Frequência das 16 unidades geradoras em Distrito Industrial 0,480 kV (ANATEM) com Curto em Las Claritas 230 kV

A Figura 10 mostra o torque no rotor (ATP) das 16 unidades geradoras, onde se observa, após a eliminação da falta, valor máximo de 0,37 milhões de N.m (2,640 pu do torque nominal de 0,14 milhões de N.m) em 216 ms, reduzindo-se para 0,124 milhões de N.m (0,880 pu) em 600 ms e para 0,055 milhões de N.m (0,393 pu) em 1,2 segundos.

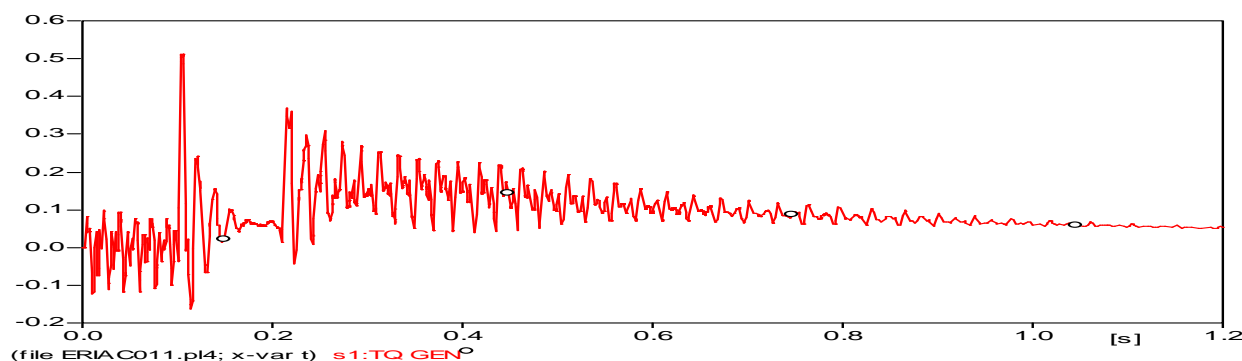


FIGURA 10 – Torque no rotor das 16 unidades geradoras em Distrito Industrial 0,480 kV (ATP) com Curto em Las Claritas 230 kV

A Figura 11 mostra a potência ativa (ANATEM) das 16 unidades geradoras, onde se observa, após a eliminação da falta, valor máximo de 187,3 MW (5,70 pu da potência nominal de 32,8 MVA) em 365 ms, reduzindo-se para 128,85 MW (3,93 pu) em 600 ms e para 41,86 MW (1,276 pu) em 1,2 segundos.

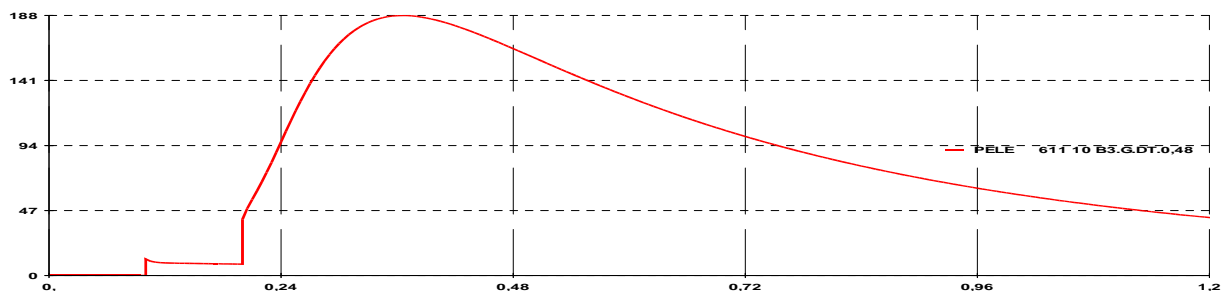


FIGURA 11 – Potência ativa em MW das 16 unidades geradoras em Distrito Industrial 0,48kV (ANATEM) com Curto em Las Claritas 230 kV

Os principais resultados das simulações com 40 MW em Las Claritas e 16 unidades geradoras de 2,05 MVA em Distrito Industrial (Caso 1) são resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Interrupção de 40 MW com 16 Unidades Geradoras em Distrito Industrial

SIMULAÇÃO	CASO 1	TENSÃO B. VISTA 230 KV MAX ef/ 600ms	TENSÃO D. IND. 0,48 KV MAX ef/ 600ms	CORRENTE UN GER D. IND. MAX ef/ 600ms	FREQ UN GER D. IND. (Hz)	TORQUE UN GER D IND MAX/ 600ms	POT ATIVA D IND MAX/ 600ms
ATP Caso1.1	C/CURTO	1,027 pu (236 ms) 0,608 pu	0,946 pu (253 ms) 0,646 pu	1,480 pu (260 ms) 0,981 pu	54,0 Hz (360 ms) 48,3 Hz (600 ms)	2,640 pu (216 ms) 0,880 pu	-
ANATEM Caso 1.1	C/CURTO	2,257 pu (365 ms) 1,869 pu	1,912 pu (365 ms) 1,583 pu	3,087 pu (365 ms) 2,555 pu	54,0 Hz (235 ms) 0 Hz (400ms)	-	5,70 pu (365 ms) 3,93 pu
ATP Caso 1.2	S/CURTO	1,091 pu (226 ms) 0,597 pu	1,089 pu (227 ms) 0,673 pu	1,775 pu (223 ms) 0,881 pu	54,0 Hz (377 ms) 48,3 Hz (600 ms)	2,656 pu (215 ms) 0,992 pu	-
ANATEM Caso 1.2	S/CURTO	2,392 pu (365ms) 1,975 pu	2,392 pu (365ms) 1,975 pu	3,272 pu (365ms) 2,700 pu	54,0 Hz (240 ms) 0 Hz	-	6,437 pu (365ms) 4,384 pu

					(390ms)		
ATP Caso 1.3	INERCIA x 1000	1,115 pu (248 ms) 1,067 pu	1,084 pu (1,2 seg.) 1,036 pu	1,835 pu (223 ms) 1,345 pu	59,99 Hz (360 ms) 59,98 Hz (600 ms)	2,752pu (215 ms) 1,984 pu	-
ANATEM Caso 1.3	INERCIA x 1000	2,392 pu (365ms) 1,975 pu	2,392 pu (365ms) 1,975 pu	3,272 pu (365ms) 2,700 pu	59,99 Hz (255 ms) 59,86 Hz (600ms)	-	6,437 pu (365ms) 4,384 pu

3.2 Caso 2 com Interrupção de 126 MW + j 27 Mvar em Las Claritas e 16 Unidades Geradoras de 2,05 MVA em Floresta 0,48 kV Caso 1 com Interrupção de 40 MW - j 32 Mvar em Las Claritas e 16 Unidades Geradoras de 2,05 MVA em Distrito Industrial 0,48 kV

Os principais resultados das simulações com 126 MW em Las Claritas e 16 unidades geradoras de 2,05 MVA em Floresta (Caso 2) são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Interrupção de 126 MW com 16 Unidades Geradoras em Floresta

SIMU LAÇÃO	CASO 2	TENSÃO B. VISTA 230 KV MAX ef/ 600ms	TENSÃO FT 0,48 KV MAX ef/ 600ms	CORRENTE UN GER FLORESTA MAX ef/ 600ms	FREQ UN GER FT (Hz)	TORQUE UN GER FT MAX/ 600ms	POT ATIVA FT MAX/ 600ms
ATP Caso 2.1	C/CURTO	0,642 pu (232 ms) 0,249 pu	0,649 pu (240 ms) 0,313 pu	2,726 pu (226 ms) 1,240 pu	54,0 Hz (271 ms) 42,8 Hz (600ms)	2,736 pu (220 ms) 0,928 pu	-
ANATEM Caso2.1	C/CURTO	0,787 pu (240ms) 0,492 pu	0,749 pu (240ms) 0,468 pu	3,178 pu (240ms) 1,986 pu	54,0 Hz (215 ms) 13,68 Hz (600ms)	-	2,506 pu (240ms) 0,978 pu
ATP Caso 2.2	S/CURTO	0,731 pu (243 ms) 0,268 pu	0,896 pu (216 ms) 0,335 pu	3,155 pu (237 ms) 1,289 pu	54,0 Hz (296 ms) 42,1 Hz (600ms)	3,104 pu (223 ms) 1,008 pu	-
ANATEM Caso 2.2	S/CURTO	0,855 pu (240 ms) 0,531 pu	0,813 pu (240 ms) 0,505 pu	3,450 pu (240 ms) 2,144 pu	54,0 Hz (235 ms) 9,75 Hz (600 ms)	-	2,951 pu (240 ms) 1,140 pu
ATP Caso 2.3	INERCIA x 1000	0,761 pu (240 ms) 0,576 pu	0,715 pu (246 ms) 0,546 pu	3,287 pu (232 ms) 2,441 pu	59,99 Hz (271 ms) 59,98 Hz (600ms)	3,152 pu (223 ms) 1,744 pu	-
ANATEM Caso 2.3	INERCIA x 1000	0,855 pu (240 ms) 0,531 pu	0,813 pu (240 ms) 0,505 pu	3,450 pu (240 ms) 2,144 pu	59,99 Hz (255 ms) 59,95 Hz (600 ms)	-	2,951 pu (240 ms) 1,140 pu

4.0 - CONCLUSÃO

A seguir, são apresentadas conclusões que se aplicam a unidades geradoras de pequeno porte operando em paralelo com sistemas radiais que atendem cargas de valores bem maiores que a potência nominal destas unidades geradoras.

- O torque transitório no eixo da unidade geradora é maior quanto maiores forem as tensões e correntes instantâneas, após perturbação no sistema.
- O torque transitório no eixo da unidade geradora é maior quanto menor for a velocidade do rotor (frequência) nos primeiros ciclos, após perturbação no sistema.

- O ATP se apresenta como ferramenta adequada para determinação de sobretorques transitórios, com transformadores representados com suas respectivas curvas de saturação e unidades geradoras representadas com modelos que retratem os efeitos subtransitórios e saturação.

- O ANATEM, por ser programa de transitórios eletromecânicos, pode ser usado para avaliação inicial do torque transitório, indiretamente através da determinação da potência ativa em “ $t = 0+$ ”, desde que a solicitação de tensão no sistema não exceda valores da ordem de 1,3 pu e a velocidade do rotor não provoque frequência inferior a cerca de 57 Hz (desvio de 5 % da frequência nominal de 60 Hz), em virtude do ANATEM não considerar a variação da carga com a frequência.

- O ATP e o ANATEM apresentam resultados de sobretorque transitório, em pu, da mesma ordem de grandeza, se os valores eficazes das tensões no ATP, em pu, se equivalem às tensões no ANATEM, em pu, com variação de frequência não significativa.

- No caso do sistema interligado Brasil-Venezuela analisado, para interrupção de 40 MW em Las Claritas, os torques transitórios calculados pelo ANATEM (máximo de 6,437 pu) se apresentaram bem maiores que os calculados pelo ATP (máximo de 2,752 pu), devido, principalmente, às discrepâncias nas tensões obtidas com estas ferramentas (máxima de 1.115 pu com o ATP e máxima de 2,392 pu com o ANATEM), com a mesma condição sistêmica.

- No caso do sistema interligado Brasil-Venezuela analisado, para interrupção de 126 MW em Las Claritas, os torques transitórios calculados pelo ANATEM (máximo de 2,951 pu) se apresentaram consistentes com os calculados pelo ATP (máximo de 3,152 pu), devido, principalmente, à semelhança nas tensões obtidas com estas ferramentas (máxima de 0,761 pu com o ATP e máxima de 0,855 pu com o ANATEM), com a mesma condição sistêmica.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS - Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3 Diretrizes para Estudos Elétricos
- (2) Programa Anatem – Análise de Transitório Eletromecânico – Manual do Usuário
- (3) ATP – *Alternative Transient Program* – Manual do Usuário

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Aniela Maria Peixoto Mendes



Nascida em Brasília, DF em 28 de Agosto de 1981. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2006). Atualmente é engenheira de operação da Eletrobras Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil.

João Ferreira de Lima Filho

Nascido em Condado, Pernambuco, em 06 de janeiro de 1950. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade Católica de Pernambuco (1973), pós-graduação pela COPPE - UFRJ (1979). Engenheiro da Eletrobras de 1976 a 1979, da Eletronorte de 1980 a 2000. Atualmente é engenheiro da Potência Engenharia.