



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

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de  
2009  
Recife - PE

#### **GRUPO IV**

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

#### **ANÁLISE DE AUTO-EXCITAÇÃO E CURTO-CIRCUITO CAPACITIVO EM GERADORES SÍNCRONOS CONECTADOS A GRANDES SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CCAT E CAAT**

<b>Paulo Max M. Portugal*</b>	<b>Antônio Carlos Ferreira</b>	<b>Alquindar de S. Pedroso</b>	<b>Nilo J. P. Macedo</b>
<b>ELETROBRÁS-UFRJ/COPPE</b>	<b>UFRJ/COPPE</b>	<b>UFRJ/COPPE</b>	<b>FURNAS</b>

#### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma revisão do enfoque teórico sobre auto-excitação mostrado em [3] e uma análise prática dos fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo nas máquinas síncronas, em especial os geradores hidráulicos, quando sujeitas a configurações de transmissão que possam levar à ocorrência de cargas capacitivas ligadas aos seus terminais. Identificadas essas configurações nos sistemas tomados como referência, discute-se a eficácia de procedimentos operativos e/ou o uso de equipamentos cuja aplicação venha retardar o desenvolvimento das sobretensões associadas ao processo de AEX (Auto-Excitação). Vale ressaltar que esse assunto é analisado mais detalhadamente em [1].

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Auto-Excitação, Curto-Circuito Capacitivo, Rejeição de Carga, Geradores Síncronos e Sistemas de Transmissão.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Os estudos de planejamento para a expansão do sistema elétrico brasileiro têm considerado cada vez mais a construção de usinas hidrelétricas em rios com grandes potenciais energéticos e afastados dos principais centros de carga. As grandes distâncias entre os blocos de geração e os centros de carga, associadas aos montantes de energia a serem transmitidos tornam atraente o uso de sistemas de transmissão em Extra Alta-Tensão para o escoamento dessa potência através de longos sistemas radiais de transmissão CCAT, CAAT ou até mesmo configurações híbridas (CAAT+CCAT). Entre os estudos necessários para definir as características de configurações CA ou de geração alimentando elos CC, devem ser consideradas as análises dinâmicas de auto-excitação ou de curto-circuito capacitivo nos geradores síncronos, considerando todas as configurações possíveis do empreendimento e, principalmente, os estágios iniciais em que pode ocorrer a combinação de poucas máquinas em operação e um elevado número de circuitos paralelos.

A auto-excitação nas máquinas síncronas é um processo dinâmico instável de crescimento do fluxo de campo, que leva ao crescimento geralmente muito rápido dos enlaces de fluxo, sendo caracterizada principalmente pelo aumento da tensão terminal da máquina, decorrente da carga capacitiva ligada aos seus terminais. Essa carga de natureza capacitiva pode ser proveniente de certas configurações particulares dos sistemas de potência, tais como conexões com bancos de filtros capacitivos em ligações CCAT ou severas rejeições de carga em longos troncos de transmissão CAAT. Vale ressaltar que as condições que geralmente proporcionam este fenômeno estão relacionadas às emergências múltiplas, com baixa probabilidade de ocorrência, envolvendo também sobrefrequências elevadas e que não existe o risco de ocorrência da AEX em regime permanente ou em situações de emergências simples. É muito importante citar que a compensação shunt necessária para mitigar ou evitar a

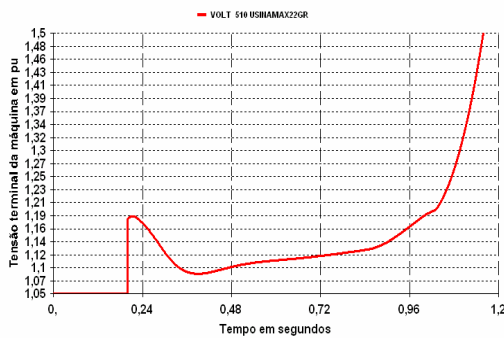
\*Avenida Marechal Floriano, 19 – 3º andar – CEP 20080-003 - Centro – Rio de Janeiro- RJ - BRASIL

Tel.: (21) 2514-5437 - Fax: (21) 2514-5210 - e-mail: portugal@eletrobras.com

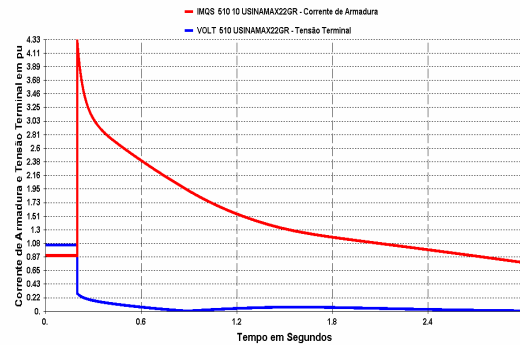
AEX é, de um modo geral, de valor muito elevado, o que leva a adoção de reatores controlados ou rapidamente chaveados.

Outra condição que também pode ocorrer quando uma carga capacitiva está ligada aos terminais de uma máquina é o Curto-Circuito Capacitivo (CCC). Basicamente, este fenômeno tem as características de um curto-circuito nos terminais da máquina, gerado por esta carga capacitiva, caracterizando-se por um grande aumento da corrente de armadura da máquina, juntamente com a queda da tensão terminal para valores muito baixos, chegando próximo a zero.

O comportamento típico da tensão terminal de um gerador síncrono, na condição de auto-excitação ou curto-circuito capacitivo, é apresentado na Figura 1 e na Figura 2. Também na Figura 2 é apresentada a corrente de armadura no processo de Curto-Circuito Capacitivo.



**Figura 1 - Tensão terminal da máquina no processo de Auto-Excitação**



**Figura 2 - Tensão terminal e Corrente de Armadura da máquina no processo de Curto-Circuito Capacitivo**

## 2.0 - ANÁLISE TEÓRICA

O exame dos processos que evoluem no tempo leva à identificação de duas classes de desempenho dinâmico: os comportamentos estáveis e instáveis. Tratando-se de sistemas físicos descritos por modelos matemáticos lineares (sistemas físicos linearizados), os comportamentos classificados como estáveis correspondem aos casos de sistemas que apresentam uma resposta natural amortecida. Os sistemas instáveis, por sua vez, apresentam modos naturais não amortecidos e/ou monotonicamente crescentes. Estes casos correspondem à presença de pólos (zeros da equação característica) no semi-plano direito. Assim, as equações que descrevem o comportamento das tensões de uma máquina podem ser analisadas de modo a se obter os pontos operativos que levem a tais condições de instabilidade.

Na literatura de sistemas de potência existem vários trabalhos que analisam o fenômeno da auto-excitação nas máquinas elétricas [2,3,4,5,6]. A grande maioria não inclui na análise os efeitos subtransitórios de rotor da máquina síncrona, por causa da simplicidade de explicação ou até mesmo entendimento por parte do público alvo. Em [1] são mostradas duas formas analíticas do comportamento da auto-excitação que também consideram a representação da máquina síncrona até os seus efeitos transitórios.

Nesse item será apresentada outra forma de análise desses fenômenos, considerando a máquina até os seus efeitos subtransitórios. Esse tipo de análise, hoje em dia, torna-se muito mais interessante e completa por causa do avanço computacional e facilidade de simulações.

Partindo das equações de Park da máquina síncrona e desprezando as variações de enlace de fluxo no estator e na resistência do enrolamento, são apresentadas as equações de tensão para os eixos d e q.

$$v_d = -\omega\lambda_q \quad (2.1)$$

$$v_q = \omega\lambda_d \quad (2.2)$$

Considerando a velocidade  $\omega$  não como uma função do tempo, mas sim assimilada a um parâmetro do processo e uma carga capacitiva aplicada aos terminais da máquina síncrona, a aplicação da transformação de Park leva a escrever:

$$v_d = -\omega \lambda_q(s) = \frac{1}{\omega C} I_q \quad (2.3)$$

$$v_q = \omega \lambda_d(s) = -\frac{1}{\omega C} I_d \quad (2.4)$$

Após alguns procedimentos matemáticos que podem ser visualizados com mais detalhes em [1], e a aplicação do conceito de indutância operacional, as equações para análise do comportamento da reatância capacitiva do sistema, nos eixos d e q, serão dadas por:

$$1 - \frac{X_d}{X_c} \frac{T_d' T_d''}{T_{do}' T_{do}''} \left( \frac{s + \frac{1}{T_d'}}{s + \frac{1}{T_{do}'}} \frac{s + \frac{1}{T_d''}}{s + \frac{1}{T_{do}''}} \right) = 0 \quad K = \frac{X_d''}{X_c} \quad (2.5)$$

$$1 - \frac{X_q}{X_c} \frac{T_q''}{T_{qo}''} \left( \frac{s + \frac{1}{T_q''}}{s + \frac{1}{T_{qo}''}} \right) = 0 \quad K = \frac{X_q''}{X_c} \quad (2.6)$$

Através da análise das equações (2.5) e (2.6), poderão ser traçados os lugares geométricos descritos pelas raízes dessas equações para  $X_c$  no intervalo  $(0, \infty)$ . Esses diagramas dos lugares geométricos das raízes, considerando a variação do ganho  $K$  nos eixos d e q e conseqüentemente  $X_c$ , poderão ser vistos na Figura 3 e na Figura 4.

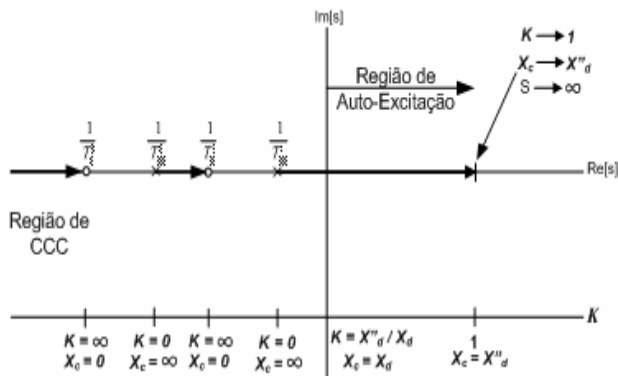


Figura 3- Diagrama do lugar das raízes considerando a variação da reatância capacitiva no eixo d

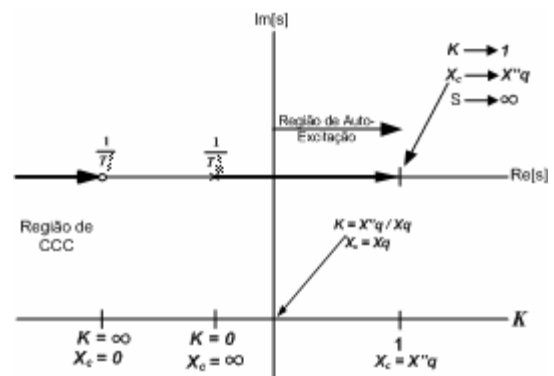


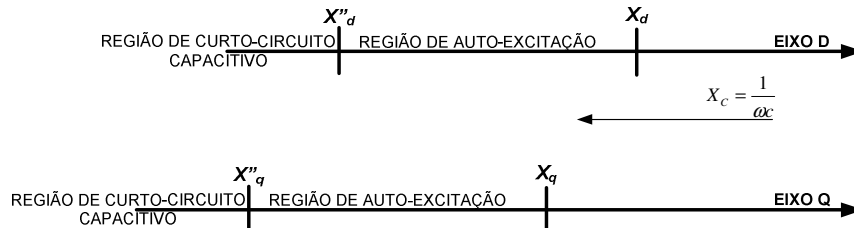
Figura 4- Diagrama do lugar das raízes considerando a variação da reatância capacitiva no eixo q

O exame do lugar geométrico das raízes da equação característica correspondente ao eixo d, ou análise da Figura 3, revela que o processo dinâmico instável ocorre para valores de  $X_c$  contidos no intervalo entre  $X_d'$  e  $X_d''$ . Para valores nessa faixa de reatância, o processo apresenta um modo aperiódico cuja magnitude aumenta com a diminuição de  $X_c$ , em outras palavras, o processo instável apresenta uma velocidade crescente com o aumento da carga capacitiva do sistema. Para os valores de  $X_c$  entre  $X_d'$  e  $X_d''$  temos a região de auto-excitação. Na faixa em que a reatância capacitiva  $X_c$  se torna menor que o valor de  $X_d''$  temos um processo dinâmico estável. Nessa faixa em que  $X_c$  é menor que  $X_d'$  temos a região de Curto-Circuito Capacitivo.

A análise do comportamento de  $X_c$  no eixo d (Figura 3) deve ser feita também para o eixo q (Figura 4). O exame do lugar geométrico correspondente ao eixo q revela que o processo dinâmico instável ocorre para valores de  $X_c$  contidos no intervalo entre  $X_q$  e  $X_q''$ . Para valores nesta faixa de reatância, o processo apresenta um modo aperiódico que aumenta com a diminuição de  $X_c$ , em outras palavras, o processo instável apresenta uma velocidade crescente com o aumento da carga capacitiva. Para valores de  $X_c$  entre  $X_q$  e  $X_q''$  temos a região de auto-excitação. Na faixa em que a reatância capacitiva  $X_c$  se torna menor que o valor de  $X_q''$  temos um processo dinâmico estável. Nessa faixa em que  $X_c$  é menor que  $X_q$  temos a região de Curto-Circuito Capacitivo.

O processo de auto-excitação e curto-circuito capacitivo pode ser entendido também considerando a variação da reatância capacitiva do sistema e as reatâncias internas da máquina após a rejeição de carga. À medida que a frequência do sistema aumenta com o desbalanço geração x carga, a reatância capacitiva do sistema tende a

diminuir, dado que  $X_c = \frac{1}{\omega C}$  e as reatâncias internas da máquina tendem a aumentar, pois são dadas  $\omega L$ . As variações de  $X_c$  do sistema e das reatâncias internas da máquina nos eixos d e q podem ser analisadas através da Figura 5.



**Figura 5- Representação simultânea das regiões de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para os eixos d e q**

Pela Figura 5, pode ser visto que a auto-excitação ocorre no eixo d quando  $X_c$  está:

$$X''_d < X_c < X_d \quad (2.7)$$

A partir do ponto  $X_c < X''_d$  é verificado o fenômeno do curto-circuito capacitivo. Pode ser dito que a reatância capacitiva, quando está na região de curto-circuito capacitivo, geralmente apresenta um valor muito pequeno. Assim:

$$X_c < X''_d \quad (2.8)$$

Analogamente, para o eixo q, o processo de auto-excitação ocorre quando:

$$X''_q < X_c < X_q \quad (2.9)$$

No eixo q também é verificado o fenômeno do curto-circuito capacitivo. Nesse caso, esse processo ocorre quando:

$$X_c < X''_q \quad (2.10)$$

Quando essa condição é satisfeita, o valor de  $X_c$  apresenta valores muito pequenos.

### 3.0 - ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

Para o desenvolvimento desse trabalho foram selecionados dois sistemas exemplos para identificar as configurações propícias aos fenômenos de auto-excitação ou curto-circuito capacitivo nas máquinas síncronas. Para as condições em que esses problemas ocorreram, foram propostas e debatidas ações de controle que pudessem retardar ou eliminar o fenômeno. Foram realizadas simulações de rejeição de carga somente à frequência fundamental, usando o programa ANATEM<sup>®</sup> do CEPEL para cada ação de controle considerada, sendo representados o sistema de excitação e o regulador de velocidade das máquinas.

#### 3.1 Sistemas de Transmissão

A Figura 6 considera um sistema CA de 765 kV, com 3 circuitos em paralelo e comprimento total de aproximadamente 650 km. A geração total conectada neste circuito é de 6450 MW, com máquinas tipo Kaplan – bulbo. O arranjo do sistema CA representa um sistema típico para escoamento dessa potência e rejeições totais de carga podem submeter o gerador síncrono ao fenômeno da auto-excitação. Vale ressaltar que a compensação shunt total presente nesse sistema não foi otimizada e o montante de reatores de linha é um valor inicial considerado no estudo do planejamento.

A Figura 7 apresenta um diagrama simplificado do terminal retificador de um sistema de transmissão em corrente contínua para a transmissão de toda potência gerada pela usina. Este sistema serve para ilustrar o fenômeno do curto-circuito capacitivo em uma situação de bloqueio total do sistema CCAT.

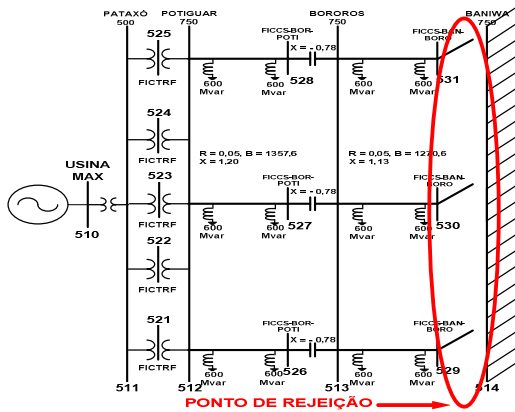


Figura 6- Sistema de transmissão em 765 kV CA e seu ponto de rejeição

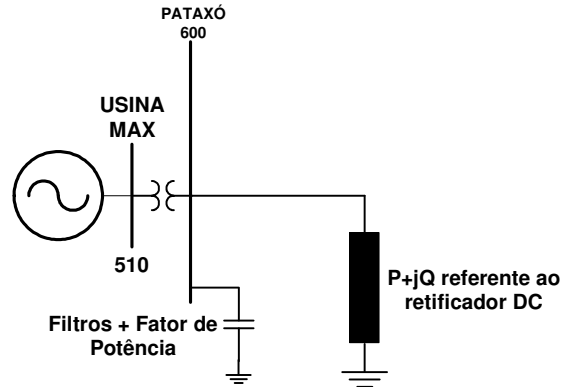


Figura 7- Sistema equivalente ao CCAT de 3 bipólos de 600 kV

### 3.2 Geradores

Para representar os geradores foram usados os modelos das máquinas síncronas de pólos salientes do programa Anatem<sup>®</sup> do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. O diagrama de blocos referente à modelagem dos geradores nos eixos magnéticos d e q, bem como o diagrama de blocos para representação da equação de oscilação eletromecânica, pode ser vista em [1,6]. Os valores considerados para os parâmetros dessas máquinas estão mostrados na tabela abaixo.

Tabela 1- Parâmetros dos geradores síncronos tipo bulbo

$X_d$ (pu)	$X_q$ (pu)	$X'd$ (pu)	$X''d$ (pu)	$X_l$ (pu)	$T'do$ (s)	$T''do$ (s)	$T''qo$ (s)	<b>H (s)</b>	MVA	$R_a$ (pu)
1,10	0,70	0,40	0,32	0,20	5,00	0,05	0,09	1,40	79	0,0052

A principal característica, referente aos parâmetros dessa máquina, diferenciando-a dos outros tipos de máquinas síncronas, é a sua constante de inércia **H**, que neste caso é um valor muito pequeno se comparado com os respectivos valores de **H** das máquinas síncronas convencionais, com valores da ordem de 5 s. Fisicamente, este parâmetro indica que a máquina pode sofrer grandes acelerações e variações de frequência num distúrbio como faltas no seu sistema de transmissão ou em rejeições de carga. As máquinas foram modeladas com os seus respectivos sistemas de controle de tensão e velocidade. Nas simulações foi considerada uma excitação estática do tipo auto-excitada direta simples com limitadores de subexcitação e corrente mínima de campo e reguladores de velocidade típicos de unidades hidráulicas. Os diagramas de blocos, assim como as respectivas filosofias de controle para os reguladores de tensão e velocidade, estão descritos mais detalhadamente em [1];

### 4.0 - SIMULAÇÕES

O comportamento dos sistemas CAAT e CCAT foi analisado considerando algumas situações. Os tipos de ações adotados estão apresentados na Tabela 2. A maioria das análises foi feita considerando, para rejeição total de carga, o sistema de transmissão CA e uma análise de rejeição com bloqueio da transmissão CCAT, mantidos os filtros junto ao terminal do gerador (retificador).

Tabela 2- Relação das análises com os respectivos circuitos

Ações de Controle	Análise	
	Sistema CA	Sistema CCAT
Capacidade de corrente negativa	X	-
Saturação do transformador elevador (característica do equipamento)	X	-
Reatores manobráveis	X	-
Transferência de disparo	X	-
Rejeição com capacitores	-	X

Vale ressaltar que, apesar de ser um item da tabela de ações de controle, a saturação do transformador elevador é uma característica deste equipamento e não pode ser considerada como meio de mitigação da auto-excitação. Geralmente a saturação do transformador elevador não é considerada nas análises de rejeição de carga a frequência fundamental e a sua representação no ANATEM teve o objetivo de verificar a sua influência para atenuar o crescimento da tensão terminal do gerador durante o processo de auto-excitação. A curva característica da saturação e o controle usado para representação dessa curva também podem ser vistos em [1].

O objetivo dessas simulações é mostrar a influência de cada ação de controle, conforme mostrado na Tabela 2, no fenômeno da auto-excitação de uma máquina síncrona. Em todas as simulações foram considerados os seguintes critérios e premissas:

- ✓ Foi considerada, em todas as simulações, a correção dos parâmetros da rede (Xl e Xc) com a variação da frequência da ilha elétrica. Para tal, nos arquivos referentes ao ANATEM®, foi colocada a opção FREQ nos dados de simulação;
- ✓ Para a condição inicial de regime permanente do sistema, no programa ANAREDE®, foram considerados os limites de 1,046 pu para a tensão base de 765 kV e 1,100 pu para a base de 500 kV. Para a tensão terminal da máquina foi considerado o limite de 1,050 pu.

## 5.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

### 5.1 Influência de uma ponte de corrente negativa no sistema de excitação estático

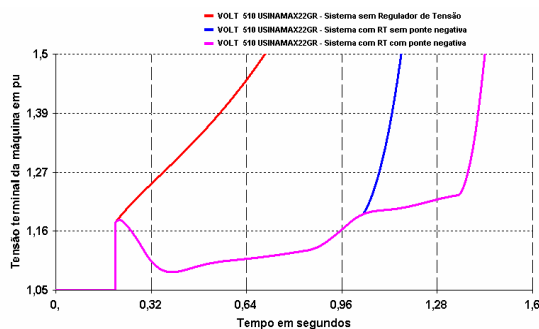


Figura 8 - Tensão terminal da máquina

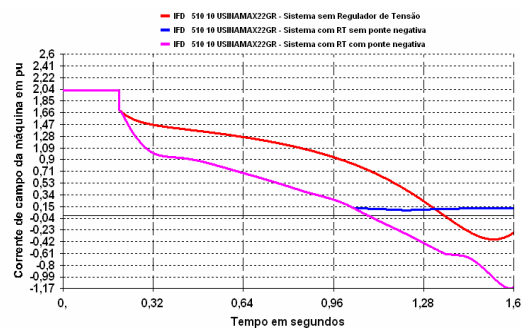


Figura 9 – Corrente de campo da máquina

5.2 Influência da representação da saturação do transformador elevador

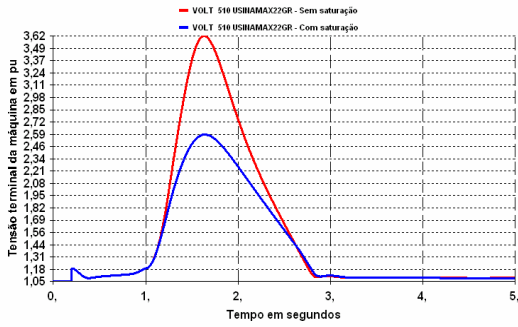


Figura 10 - Tensão terminal da máquina

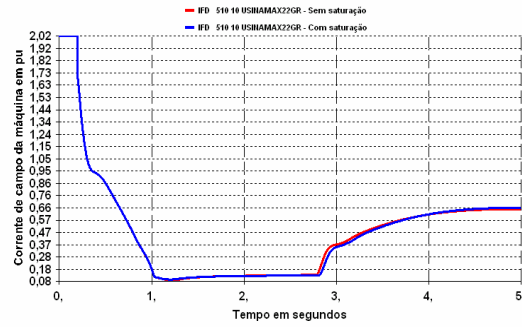


Figura 11 – Corrente de campo da máquina

5.3 Influência da inserção dinâmica de reatores manobráveis

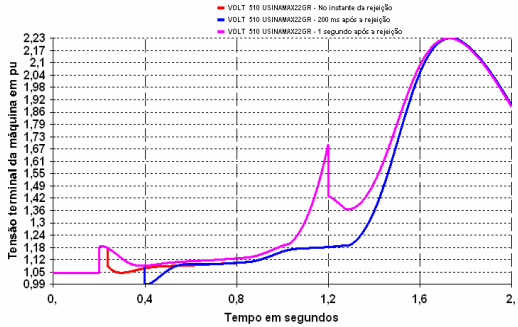


Figura 12 - Tensão terminal da máquina

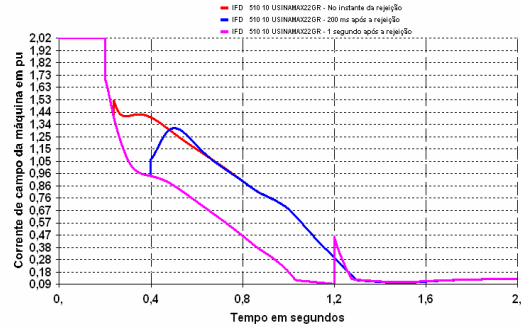


Figura 13 – Corrente de campo da máquina

5.4 Influência da transferência de abertura de outros circuitos

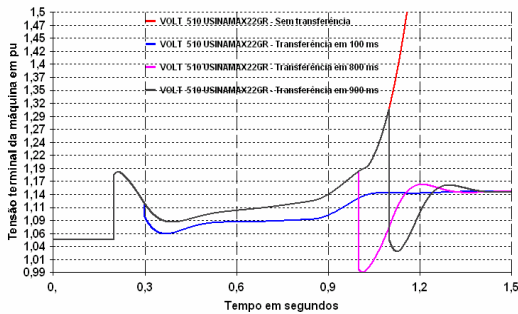


Figura 14 - Tensão terminal da máquina

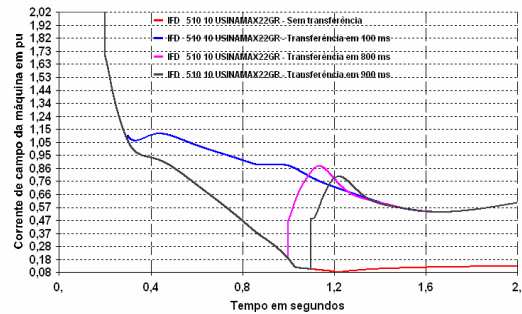


Figura 15 – Corrente de campo da máquina

5.5 Excursão de Auto-Excitação para Curto-Circuito Capacitivo em função do número de geradores

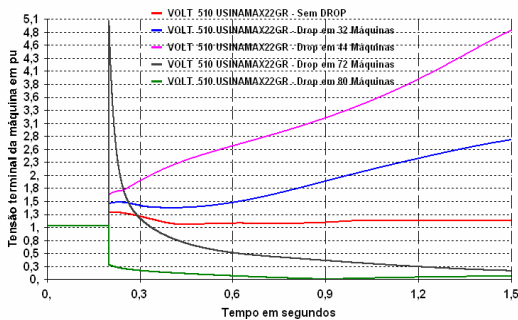


Figura 16 - Tensão terminal da máquina

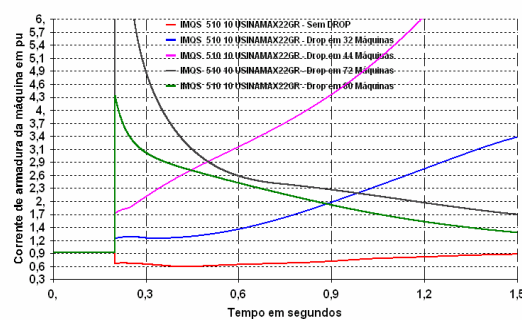


Figura 17 – Corrente de armadura da máquina

## 6.0 - CONCLUSÕES

De um modo geral, as ações consideradas serviram como base para avaliar os respectivos impactos gerados nos estudos de auto-excitação ou curto-circuito capacitivo.

Através da análise dos resultados é importante observar que a medida de corte de geração, em condições de risco de auto-excitação, deve ser evitada pelo fato de que o sistema pode caminhar para situações mais drásticas em termos de sobretensões e risco de danos nos geradores remanescentes.

A implantação de capacidade de corrente negativa no sistema de excitação mostrou-se eficiente quanto ao retardo do crescimento da tensão da máquina. Nas respostas apresentadas no item 5.1, o retardo no crescimento da tensão foi de aproximadamente 350ms, quando comparado com um caso sem esta capacidade. Um fator muito importante, e que deve ser levado em conta na hora de especificar esta capacidade, é o modo como é feito o chaveamento da corrente da ponte positiva para a negativa. Este processo pode ocasionar queima de tiristores do sistema de excitação quando a transição é feita muito rapidamente, sem a garantia da extinção da corrente positiva antes da comutação.

Os reatores de inserção também se apresentam como alternativa bastante viável para o tratamento da auto-excitação. Neste caso, o tamanho dos reatores, assim como o canal de comunicação e o tempo para chaveamento, deve ser bem especificado, de modo a obter sucesso na sua atuação. Os sinais para o comando de inserção dos reatores, na prática, podem ser obtidos através da abertura de disjuntores ou até mesmo pelo valor da tensão terminal da barra à qual estão conectados.

A saturação do transformador elevador é uma característica intrínseca ao equipamento e não pode ser usada como meio de mitigação do processo de auto-excitação. Sua influência também é limitada, pois o ponto em que a curva começa a saturar possui valores típicos em torno de 1,2 pu da tensão nominal. Geralmente, a saturação dos transformadores não é representada nos estudos de rejeição de carga à frequência fundamental, o que não afeta substancialmente os resultados sob o aspecto da dinâmica inicial do processo.

A transferência do comando para abertura de circuitos a montante é uma medida muito eficaz para redução da auto-excitação. Esta medida, basicamente, reduz a capacitância total vista pela máquina. A atuação efetiva desta alternativa depende basicamente do número de disjuntores afetados, do sucesso de abertura destes disjuntores e do tempo de comunicação entre esses elementos. Devem ser conduzidos estudos elétricos que visam a coordenação desta ação de controle e suas conseqüências no sistema.

As Figura 16 e 19 mostram as respostas dos geradores ao passarem da condição de auto-excitação para a de curto-circuito capacitivo. Essas simulações mostram, dentro de uma faixa de erro, o comportamento teórico, mostrado através dos diagramas do lugar das raízes das Figura 3 e 4. Também foram reproduzidas praticamente as respostas mostradas nas Figura 1 e 2.

A representação dos limitadores de subexcitação e corrente mínima de campo são fundamentais para uma avaliação correta do processo de auto-excitação em geradores, e devem retratar as características dos equipamentos que serão utilizados na usina. Cabe ressaltar que cada fabricante oferece filosofias distintas para a atuação desses limitadores, com desempenho dinâmico bastante diferenciado. Portanto, é fundamental que na fase de estudos planejamento da usina e da transmissão associada seja realizada uma análise para verificar qual filosofia de controle é a mais indicada para o empreendimento.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Portugal, P. M. M. – “Análise de Auto-excitação e curto-circuito capacitivo em geradores síncronos conectados a grandes sistemas de transmissão CCAT e CAAT” – Tese de M. Sc. – Coppe/UFRJ – Junho de 2007.
- (2) P. KUNDUR, Power System Stability and Control. New York, EUA, McGraw-Hill, 1994.
- (3) MARQUES, N.L., PEDROSO, A.S., SILVA, J.B.S., FERREIRA, S.T., “Grandes Cargas Capacitivas Aplicadas às Máquinas Síncronas”, VII Seminário Nacional de Transmissão e Produção de Energia Elétrica, Grupo IV, Brasília, Maio 1984.
- (4) DE MELLO, F.P., LEUZINGER, L.M., MILLS, R.J., “Load Rejection Overvoltages As Affected By Excitation System Control”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Paper T 74 337-2, Summer Meeting, 1974.
- (5) PEDROSO, A.S., “Notas de Aula dos Cursos de Modelagem Matemática de Máquinas Elétricas e Dinâmica de Curto-Prazo”. Aulas ministradas na COPPE – UFRJ pelo referido professor.
- (6) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, *Manual do Usuário do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM*, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.