



GAT-014

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

#### GRUPO IV ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)

### LIMITAÇÕES OPERATIVAS CAUSADAS POR AUTO-EXCITAÇÃO EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

Alexandre Lima Farias \*

Rui Jovita G.C. da Silva

Furnas Centrais Elétricas

Itaipu Binacional

#### RESUMO

De forma simplificada, pode-se dizer que o fenômeno da auto-excitação de uma máquina síncrona ocorre quando há um aumento da tensão terminal da máquina após uma rejeição de carga. Isto se passa quando, na configuração do sistema após o distúrbio, o gerador fica ligado a uma carga capacitiva, como no caso de linhas longas, sem que a atuação do seu regulador seja suficiente para controlar esta tensão. Este artigo se propõe a discutir uma metodologia de análise do fenômeno em que o enfoque do problema sob o aspecto eletromecânico seja complementado através de simulações em programa de transitórios eletromagnéticos. Esta discussão será exemplificada através de casos reais avaliados para as usinas de Itaipu e Serra da Mesa.

#### PALAVRAS-CHAVE

Auto-excitação – metodologia – critérios – simulações

#### 1.0. INTRODUÇÃO

A auto-excitação é o fenômeno no qual um gerador perde o controle da sua tensão terminal. Esta condição aparece em situações especiais em que a quantidade de potência reativa fornecida pelo sistema é maior do que a máquina pode absorver, normalmente manifestando-se após uma rejeição de carga. Isto se passa quando, na configuração do sistema após o distúrbio, o gerador fica ligado a uma carga capacitiva, como no caso de linhas longas, sem que a atuação do seu regulador seja suficiente para controlar esta tensão.

O fenômeno da auto-excitação envolve aumentos exponenciais de tensões como função do tempo, sendo influenciado também por não-linearidades como a saturação de máquinas, transformadores e reatores, devendo ser analisado através de simulação digital. O sistema de excitação das máquinas pode controlar a tensão terminal por algum tempo, sendo este tempo dependente das características das linhas, máquinas e

reguladores. A ponte de excitação negativa, quando existente nas máquinas, contribui para o aumento deste tempo. A tensão, alcançando níveis muito elevados e por longos períodos de tempo, pode causar diversos problemas graves como a dissipação de energia nos pára-raios acima da sua capacidade nominal, a superação do nível de isolamento dos diversos equipamentos da instalação e até mesmo a queima do gerador.

Os estudos das condições que propiciam a manifestação da auto-excitação das unidades geradoras devem ser realizados de modo a evitar riscos para os equipamentos. Estes estudos, normalmente efetuados através de simulações digitais, definem as condições em que este fenômeno poderia vir a ocorrer e, eventualmente, dão origem a restrições operativas que podem causar uma grande limitação na flexibilidade operativa do sistema.

Com a evolução das ferramentas de análise, como novos programas digitais para a análise de transitórios eletromecânicos que levam em conta a representação dos parâmetros variando com a frequência, é possível efetuar estudos mais acurados e alcançar resultados mais próximos da realidade. Entretanto, as conclusões obtidas ainda podem ser conservativas e as limitações impostas ao sistema excessivamente restritivas. O artigo se propõe a discutir uma metodologia de análise em que o enfoque do problema sob o aspecto eletromecânico seja complementado por simulações em programa de transitórios eletromagnéticos. A simulação em um programa como o ANATEM do CEPEL serviria como indicativo de simulações a serem efetuadas no ATP, que permite uma modelagem precisa da influência da saturação de elementos não-lineares e a atuação dos pára-raios. Será discutida a importância de representar com fidelidade o regulador de tensão e seus limitadores.

Esta discussão será exemplificada através de casos reais avaliados para as usinas de Itaipu 60 Hz e Serra da Mesa. Estas usinas se apresentam como bons exemplos ilustrativos pois estão interligadas ao sistema por radiais longos, no caso de Itaipu, ou por poucas linhas de transmissão, como Serra da Mesa.

O objetivo deste trabalho é apresentar os critérios utilizados para a simulação e análise do fenômeno, suas repercussões na operação do sistema, como restrição de número mínimo de máquinas sincronizadas em relação a rede de transmissão existente, alteração de ajuste de proteção de geradores ou do sistema de transmissão e especificação de proteções ou esquemas de proteções que minimizem as restrições à operação do sistema. O artigo também se propõe a discutir a viabilidade de instalação de proteção específica para evitar o surgimento do problema sobre os geradores.

## 2.0. O FENÔMENO DA AUTO-EXCITAÇÃO

A auto-excitação é uma instabilidade elétrica associada ao aumento espontâneo dos enlaces de fluxo do gerador síncrono, possível de ocorrer quando sistemas de transmissão longos são deixados conectados às usinas elétricas em uma configuração radial, com o terminal receptor em aberto, produzindo um efeito capacitivo apreciável inerente às linhas longas [1].

Representando uma máquina por um modelo de fluxos, correntes e tensões nos eixos direto e em quadratura [2], encontra-se para as tensões equivalentes nestes eixos uma equação composta de três parcelas: uma proporcional a corrente do eixo, outra devido ao enlace de fluxo no próprio eixo e a terceira devido a velocidade de rotação da máquina e ao enlace de fluxo do eixo ortogonal. Desprezando-se as duas primeiras componentes em relação a última e analisando as relações entre os parâmetros envolvidos [3], as condições que determinam a auto-excitação são:

- No eixo direto:
 
$$(w/w_n).X''_d < X_c/(w/w_n) < (w/w_n).X_d \quad (1)$$

$$(w/w_n).X''_d < X_c/(w/w_n) < (w/w_n).X'_d \quad (2)$$
- No eixo em quadratura:
 
$$(w/w_n).X''_q < X_c/(w/w_n) < (w/w_n).X_q \quad (3)$$

onde  $X_c$  é a impedância capacitiva equivalente vista dos terminais da máquina,  $w$  e  $w_n$  são as velocidades angulares real e nominal e as reatâncias restantes têm as definições tradicionais empregadas na modelagem de máquina [4].

A análise destas condições mostra que linhas mais longas e o aumento da velocidade favorecem a auto-excitação. Além disso, observa-se que a condição (1) é de dinâmica mais lenta, sendo por isso altamente influenciada pelo desempenho do regulador de tensão. Ocorrendo nesta condição, a auto-excitação é chamada de síncrona. As condições (2) e (3) possuem dinâmica rápida, com a (2) sendo mais rápida que a (3), e são pouco influenciadas pela regulação de tensão da máquina, que consegue influenciar a condição (3) quando possui ponte negativa. Nestas 2 últimas condições a auto-excitação é chamada de assíncrona. A Figura 1 resume o descrito.

A auto-excitação assíncrona está relacionada a maiores diferenças entre a carga capacitiva e a capacidade do gerador. O efeito eletromecânico da inércia e da condição de operação do gerador sobre a

auto-excitação assíncrona é desprezível, mas altera sensivelmente a região de auto-excitação síncrona.

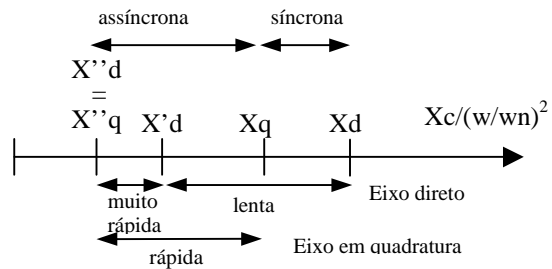


FIGURA 1

### 2.1. Análise do Comportamento da Tensão

Um comportamento típico da tensão em casos de rejeição de carga é mostrado na Figura 2. Nesta figura podem ser estabelecidas três regiões distintas. A região 1 caracteriza-se pelo transitório inicial subsequente a abertura dos disjuntores, que tem a forma de um surto de manobra e duração típica de um a dois ciclos. É estudada com o ATP, não sendo identificada pelo ANATEM. A região 2 caracteriza-se pela sobretensão sustentada que ocorre nos instantes iniciais após a rejeição. Esta sobretensão é imediata e depende das tensões internas das máquinas, crescendo enquanto os reguladores ainda estão atuando, daí a importância de representar bem o regulador de tensão e os limitadores da excitação associados. Pode ser estudada tanto com o ATP quanto com o ANATEM, mas dependendo dos níveis de tensão apresentados, o uso do ATP é fundamental para analisar o efeito das não-linearidades e a sensibilização de proteções de sobretensão. A região 3 caracteriza-se pelo retorno da tensão da máquina a seu valor nominal.

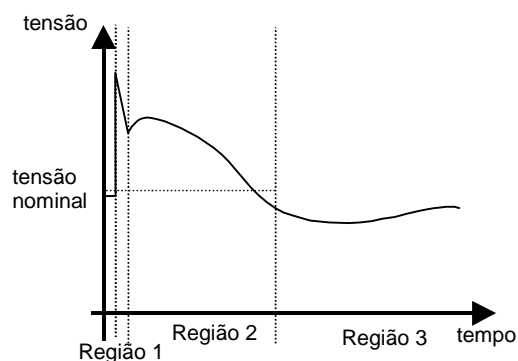


FIGURA 2

A auto-excitação pode ocorrer em qualquer uma das três regiões, sendo crítica quando ocorre na região 1 e possível de ser evitada através de medidas automáticas quando ocorre na região 3. As situações limites para definição das configurações proibitivas são aquelas nas quais a auto-excitação manifesta-se na região 2. Assim, através da análise detalhada do

comportamento da tensão é possível identificar a auto-excitação.

## 2.2. Análise do Comportamento da Frequência

Seguindo-se à rejeição total de carga a frequência aumenta rapidamente, de forma praticamente linear, e alcança valores tais que podem levar a atuação das proteções de sobrefrequência das linhas de transmissão. Ao considerar-se um determinado despacho por unidade geradora da usina, o comportamento da frequência não é influenciado pela presença de mais linhas ou reatores, dependendo unicamente da geração por máquina antes do distúrbio. A representação dos reguladores de velocidade, portanto, também é importante para que o fenômeno seja estudado.

## 3.0. CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO

Em função da gravidade das conseqüências que a ocorrência de auto-excitação poderia provocar aos equipamentos do sistema, os critérios propostos são bastante conservativos e não são usualmente utilizados em outros estudos a nível de planejamento da operação.

Como ponto importante a se destacar, deve ser avaliada a possibilidade de ocorrer o desligamento forçado de máquinas por atuação de alguma de suas proteções. Do mesmo modo, as simulações devem investigar a possibilidade de linha de transmissão ser desligada por suas proteções de sobretensão e/ou sobrefrequência, assim como a conseqüência de ocorrer falha na abertura de disjuntores.

Para a simulação de transitórios eletromecânicos deve-se utilizar um programa que considere a variação dos parâmetros com a frequência, tal como o ANATEM do CEPEL. O ANATEM apresenta restrições quanto a representação de pára-raios e saturação de reatores e transformadores, sendo assim, a análise mais detalhada do comportamento da tensão é prejudicada nessas simulações. Como forma de suprir esta deficiência, realizam-se simulações também utilizando o programa de transitórios eletromagnéticos ATP, o que permite analisar o fenômeno com a maior fidelidade. Com o uso desta ferramenta se pode acompanhar a evolução da tensão ao longo do sistema, que é fortemente influenciada pela saturação dos elementos não-lineares como transformadores e reatores, além da presença dos pára-raios.

De maneira a se ter segurança sobre as conclusões do estudo devem ser investigadas diversas condições de operação, procurando situações que provoquem a manifestação da auto-excitação com tensões no sistema ainda abaixo dos níveis de atuação das proteções. Portanto, além da condição das máquinas no seu limite máximo de excitação também devem ser consideradas as mesmas no seu limite mínimo de excitação.

Para proceder um estudo de auto-excitação sugere-se então a adoção dos seguintes critérios e procedimentos de simulação:

Nas simulações de rejeição no ANATEM deve ser considerado:

- Como o fenômeno deverá se manifestar após

rejeição total da carga sobre a usina pode-se usar uma rede simplificada, com a carga ligada radialmente apenas à usina;

- Representação das máquinas com seus reguladores de velocidade e tensão de acordo com o banco de dados oficial, implementando adicionalmente a atuação de limitadores existentes e que influenciem na resposta do fenômeno;

- O sistema de transmissão deve ser representado detalhadamente, considerando os seus capacitores série e reatores e avaliando o efeito destes equipamentos estarem fora de operação;

- Condição de operação das máquinas nos limites superior e inferior da curva de capacidade, para tensão máxima e mínima;

- Avaliação da influência da tensão no sistema de transmissão, explorando desde o máximo até o mínimo permitido;

- Tempo total de simulação de até 3 segundos após a rejeição de carga total, pois normalmente é um intervalo mais que suficiente para a abertura do sistema de transmissão por sobrefrequência e/ou sobretensão.

Nas simulações de rejeição no ATP devem ser considerados:

- Rejeição total na extremidade da linha de transmissão oposta as unidades geradoras;

- Rejeição total em linhas de transmissão não conectadas diretamente as unidades geradoras, mas que implique no desligamento de toda a carga suprida pelos geradores, seguida da seqüência de desligamentos por sobretensão e sobrefrequência que possam ocorrer;

- Avaliação da possibilidade de abertura de unidades geradoras durante a seqüência de desligamentos;

- Avaliação da possibilidade de linhas de transmissão permanecerem conectadas por mais tempo, devido a falha na abertura de disjuntores;

- Os geradores devem ser representados pelo modelo completo de máquina do ATP (59), considerando a ação do seu regulador de tensão e limitadores que atuam para este tipo de distúrbio, avaliando, quando for o caso, a influência da ponte de excitação negativa;

- O tempo máximo de simulação pode ser da ordem de 2 segundos, ou menor, se identificado a ocorrência de auto-excitação ou o desligamento de todas as linhas por proteção;

- Devem ser pesquisados diversos pontos de operação de modo a ter uma sensibilidade sobre a influência da tensão e carregamento do sistema.

## 4.0. CRITÉRIOS DE ANÁLISE

- Devem ser consideradas no critério de análise todas as situações em que pode ocorrer rejeição total, mesmo aquelas com possibilidade de ocorrência remota;

- O critério deve garantir que as máquinas sincronizadas são capazes de suportar as linhas conectadas às mesmas até a atuação das proteções de sobrefrequência e/ou sobretensão;

- Outro ponto importante no critério de análise é o instante em que devem ser tomadas as medidas para evitar as configurações proibitivas onde a auto-excitação pode se manifestar. Pode ser considerada

ou não a possibilidade de que sejam tomadas medidas corretivas após o início do fenômeno, desde que as condições de sobretensão nos equipamentos estejam dentro da suportabilidade dos mesmos. Neste caso deve ser analisada a consequência de uma falha da proteção após iniciado o fenômeno;

- A identificação do início do fenômeno pode ser caracterizada tanto pelo comportamento da tensão terminal quanto pela tensão de excitação das máquinas.

## 5.0. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

### 5.1. Usina de Itaipu 60 Hz

A usina de Itaipu 60 Hz (9 geradores de 700 MW) é interligada ao Sistema S/SE/CO através de 3 circuitos de 750 kV entre Foz do Iguaçu, Ivaiporã, Itaberá e Tijuco Preto, sendo que em Ivaiporã há uma derivação para o sistema Sul. Este sistema dispõe de um Esquema de Controle de Emergência que provoca o desligamento de geradores para emergências na transmissão [5]. Desta forma um evento grave do ponto de vista de auto-excitação é a rejeição total em Ivaiporã com um número reduzido de geradores.

Os resultados obtidos com o ANATEM para rejeições totais em Ivaiporã com 3 unidades em Itaipu 60 Hz são mostrados na Tabela 1, onde é variada a configuração de reatores e o despacho na usina, com 3 circuitos entre Foz e Ivaiporã. Para a máquina no limite máximo de geração a frequência de 62,5 Hz é atingida em torno de 0,575 s e a frequência de 65,5 Hz é atingida em torno de 1,080 s. Já para a máquina no limite mínimo de operação a frequência de 62,5 Hz é atingida em torno de 0,85 s e a frequência de 65,5 Hz é atingida em torno de 2,12 s. Estes tempos foram considerados na análise das configurações operativas críticas pois originalmente o valor de 65,5Hz era o ajuste da proteção de sobrefrequência dos 3 circuitos e o valor de 62,5Hz é o ajuste superior de uma proteção de taxa de frequência que desliga a usina. Observa-se então que os casos com ausência de reatores no trecho Foz do Iguaçu – Ivaiporã, para as máquinas no limite máximo de geração, apresentavam o início da auto-excitação antes da atuação da proteção de sobrefrequência.

TABELA 1 – Resultados com o ANATEM para Itaipu

Reatores		Geração por maq	Início da Auto-excitação	
Foz (330)	Ivaiporã (150)		t (s)	f (Hz)
3	3	750	0,905	64,461
3	2	750	0,630	62,831
2	3	750	0,485	61,992
3	3	420	1,435	63,954
3	2	420	0,890	62,386
2	3	420	0,448	61,102

Os resultados obtidos com o ATP para as mesmas simulações anteriores são mostrados na Tabela 2.

Observa-se que as proteções de sobretensão das linhas (ajuste original de 130%) desligam as mesmas antes que a auto-excitação tenha início apenas para os casos com a máquina carregada no seu limite máximo. Com a máquina no limite mínimo a auto-excitação se manifesta sem atuação das proteções de linha e com valores muito baixos de tensão, como no caso com todos os reatores das linhas Foz do Iguaçu – Ivaiporã presentes em que se inicia com valor de tensão nos geradores inferior a 95% do nominal. Já para a situação com reatores desligados, a proteção de sobretensão seria sensibilizada após o início da auto-excitação.

TABELA 2 – Resultados com o ATP para Itaipu

Reatores FI IV		MW por maq.	Proteção de linhas t(s)	Início Auto-excitação	
330	150			t (s)	f (Hz)
3	3	750	0,18	0,72	63,44
3	2	750	0,18	0,48	62,25
2	3	750	0,18	0,42	61,95
3	3	420	Não	> 1,0	-
3	2	420	Não	0,69	61,82
2	3	420	0,78	0,36	60,90

Observa-se então que as simulações com o ATP eliminam algumas restrições antes apresentadas ao realizar-se as simulações apenas com o ANATEM, entretanto, pode-se observar também que a auto-excitação manifesta-se em tempo e frequência inferiores àqueles obtidos com o ANATEM, ressaltando ainda mais a importância destas simulações para o estudo. Além dos modelos para os componentes do sistema elétrico e métodos de solução utilizados em cada programa, um dos motivos que justificam essas diferenças é a representação do regulador de velocidade das máquinas, que só foi utilizada no ANATEM e cuja influência já começa a se manifestar a partir de 0,4 s.

Em função dos resultados obtidos e da importância de impedir a ocorrência da auto-excitação foram implementadas diversas ações de proteção :

- Redução do ajuste da proteção de um dos circuitos Foz do Iguaçu – Ivaiporã ( sobretensão : 125% e sobrefrequência : 62,5Hz );
- Instalação de uma segunda proteção na usina acionada por taxa de frequência que a separa do sistema ao detectar valor que só é esperado após rejeição total de carga. A proteção original existente, de menor ajuste, eventualmente fica inibida como consequência de condições sistêmicas;
- Restrição na filosofia de atuação do Esquema de Controle de Emergências do sistema de 750kV, limitando o número máximo de geradores que são cortados de modo a evitar configurações proibitivas. Além disto, a perda da transformação bloqueia automaticamente a atuação da lógica que comanda o desligamento de muitas máquinas;
- Implantação de um esquema de disparo que comanda a abertura de qualquer circuito Foz do

Iguaçu – Ivaiporã se os seus disjuntores forem abertos em Ivaiporã, seja por proteção ou comando manual;  
 - Restrições operativas em tempo real que definem o mínimo de geradores que devem estar ligados, em função do número de linhas e reatores.

As máquinas de Itaipu possuem ponte de excitação negativa, entretanto as mesmas encontram-se desligadas por terem apresentado falhas durante a operação. Como a Itaipu vem trabalhando no sentido de retornar com as mesmas à operação, foi avaliada a sua influência. Na Figura 5 é apresentada esta influência para uma rejeição total em Ivaiporã sobre 3 geradores, mostrando que as pontes negativas podem diminuir as restrições operativas para diversas situações.

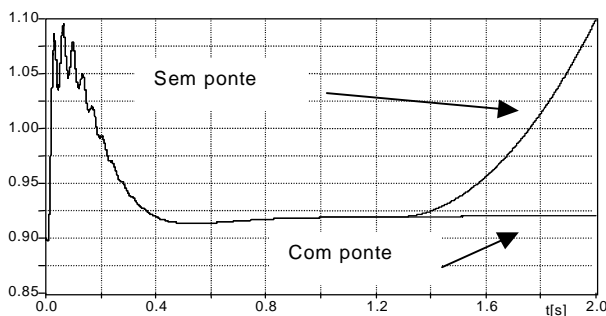


FIGURA 5 – Tensão terminal em Itaipu (pu)

## 5.2. Usina de Serra da Mesa

A usina de Serra da Mesa (3 geradores de 425MW), se situa no encontro da Interligação Norte-Sul, 1000km de linhas de 500kV com compensação série e paralela, e dos 2 circuitos de 500kV – 250km para o sistema Centro-Oeste, em Samambaia. Possui também uma ligação mais fraca através de um transformador 500/230kV.

A Figura 6 mostra a tensão terminal dos geradores, obtida no ANATEM, no evento de rejeição tripla simultânea das linhas em Imperatriz e Samambaia, com a transformação de Serra da Mesa 500/230kV previamente desligada. Este distúrbio supõe a abertura dos 2 circuitos Serra da Mesa – Samambaia por sobretensão decorrente da rejeição da Norte-Sul, antes da atuação de alguma proteção na usina.

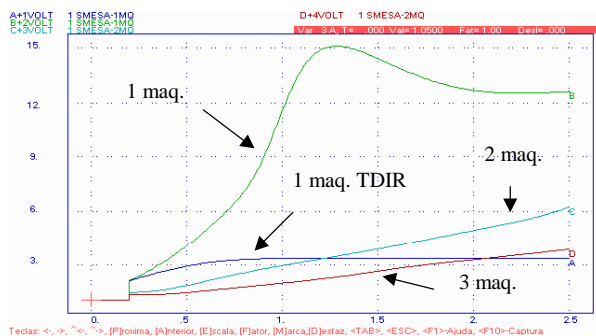


FIGURA 6 – Tensão em S.Mesa 15kV (pu)

Nota-se a ocorrência de auto-excitação instantânea para qualquer número de geradores, sendo mais acentuada com um menor número de máquinas presentes. Também está apresentada a resposta sem considerar a variação dos parâmetros com a frequência (TDIR), que mascara a ocorrência da auto-excitação. A rejeição em Imperatriz sobre a usina isolada do sistema Sul/Sudeste ou a rejeição das 2 linhas em Samambaia com a Interligação Norte-Sul desligada também provocam a auto-excitação das máquinas, mas de forma mais lenta.

Estes resultados serviram de ponto de partida para indicar a necessidade de uma avaliação mais detalhada com o programa ATP

As Figuras 7 e 8 e a Tabela 3 mostram um resumo dos resultados encontrados para as simulações detalhadas a seguir, em que a transformação de Serra da Mesa 500/230kV estava sempre desligada :

- Caso 1 : Rejeição tripla simultânea das linhas em Imperatriz e Samambaia.
- Caso 2 : Rejeição em Imperatriz, sem as linhas para Samambaia.
- Caso 3 : Rejeição dupla em Samambaia, sem as linhas para Imperatriz.

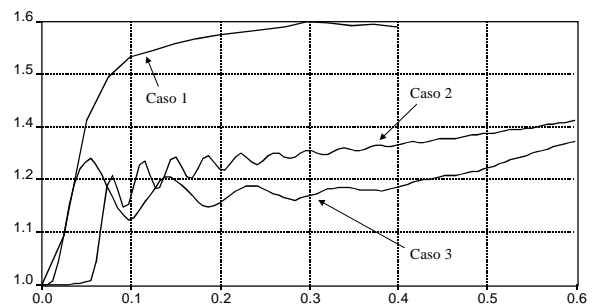


FIGURA 7 – Tensão terminal (pu) - 1 gerador

Nota-se que somente o Caso 1, com apenas uma máquina em Serra da Mesa, é crítico. A energia dissipada nos pára-raios atinge o seu valor nominal 140ms após a rejeição. Este intervalo de tempo é muito curto para garantir que as linhas já foram desligadas, seja por transferência de disparo ou por atuação da proteção. Entretanto, a probabilidade de ocorrerem estes desligamentos simultâneos é extremamente baixa.

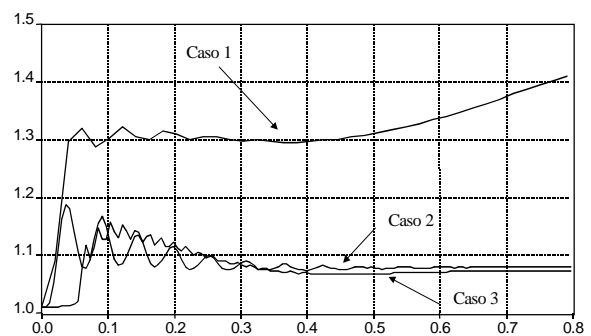


FIGURA 8 – Tensão terminal (pu) - 2 geradores

Com mais geradores sincronizados, ou na rejeição de apenas parte das linhas sobre um gerador de Serra da Mesa, observou-se que o crescimento da tensão terminal é mais lento. A energia nos pára-raios apresenta grandes margens de segurança mesmo para intervalos de tempo mais longos. O efeito das saturações dos elementos não-lineares e a presença dos pára-raios retardam a ocorrência da auto-excitação, evitando qualquer risco às máquinas.

TABELA 3 – Energia nos Pára-raios de Linha

Caso	1 Gerador		2 Geradores	
	Energia (MJ)	Tempo (ms)	Energia (MJ)	Tempo (ms)
Caso 1	5,0	150	2,0	800
Caso 2	5,0	800	0,25	800
Caso 3	0,1	800	0,09	800

De modo a diminuir os riscos, foi implantado um esquema utilizando Controladores Lógicos Programáveis que, na abertura de qualquer trecho da Interligação Norte-Sul, comandam o desligamento do trecho mais próximo da usina, de um banco de capacitores em Samambaia e de um dos circuitos S. Mesa – Samambaia. Esta ação, além de evitar o risco de auto-excitação, também impede o aparecimento de sobretensões sustentadas naquela região.

A figura 9 mostra a importância da modelagem do regulador de tensão no programa de transientes eletromagnéticos. As curvas mostradas se referem ao caso 1 da Figura 8, sendo observado que na ausência do regulador a auto-excitação é instantânea.

## 6.0. CONCLUSÕES

A manifestação da auto-excitação é um fenômeno que pode ocasionar graves consequências e que deve ser evitado a todo custo. É recomendável que a probabilidade da sua ocorrência seja avaliada desde a etapa de projeto, no planejamento da sua integração à rede, até a sua fase de operação normal, considerando as eventuais indisponibilidades e outras variáveis operacionais.

A avaliação inicial do risco pode ser feita de modo simplificado pela análise da relação entre as reatâncias envolvidas após a rejeição, mas deve ser complementada por simulações digitais de modo a identificar se este risco é real.

Simulações digitais em programas de análise dinâmica e eletromagnética, considerando a variação dos parâmetros com a frequência e a resposta do sistema de regulação dos geradores, são essenciais para a análise detalhada do problema e a tomada de decisão

sobre a segurança da operação. A utilização das duas ferramentas apresenta resultados complementares, tornando a análise da auto-excitação mais realista.

Critérios rigorosos de simulação e avaliação sem dúvida determinam restrições operativas mas que podem ser atenuadas através da implantação de esquemas de proteção redundantes, que impeçam que os geradores sejam expostos a riscos. Cada esquema deverá ser desenvolvido conforme as características da topologia da rede e a rapidez da manifestação do problema.

A metodologia de simulação e os esquemas de proteção empregados nos exemplos que foram apresentados se mostraram eficientes para a operação sem risco daquelas usinas. Basicamente, os esquemas funcionam através da associação de proteções locais, acionadas por frequência, junto com o desligamento de linhas de transmissão, por proteção própria ou transferência de disparo. Esquemas mais elaborados podem ser implementados utilizando Controladores Lógicos Programáveis, otimizando a sua atuação e diminuindo restrições operativas.

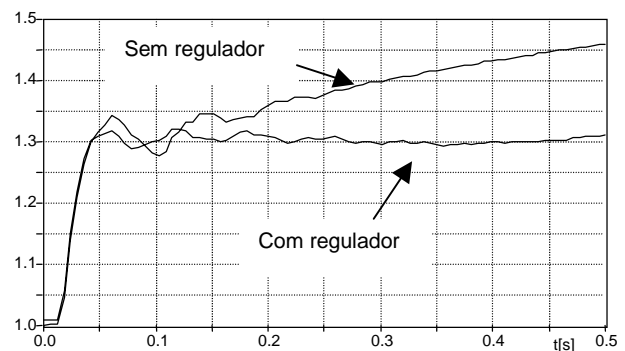


FIGURA 9 – Tensão terminal em S. Mesa (pu)

## 7.0. REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira, Sebastião H. "Máquinas Síncronas" : Notas de Aula - UFRJ, 1987.
- [2] De Mello, F. P. "Dinâmica das Máquinas Elétricas II – 2ª Edição": Edições UFSM, Santa Maria-RS, 1983.
- [3] Chiganer, L. "Alguns Problemas Relacionados com a Auto-excitação das Máquinas Síncronas": V SNPTEE, 1979, Recife-PE.
- [4] DeMello, F. P. et al "Analog Computer Studies of System Overvoltages Following Load Rejections": AIEE Fall General Meeting, Chicago, Outubro/1962.
- [5] Farias, A L; Silva, R J G C "Esquema de Controle de Emergências na Configuração Final do Sistema de Transmissão de 750kV" XVI SNPTEE, 2001, Campinas - SP