



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

**ANÁLISE DO PROCESSO DE COLAPSO DE TENSÃO  
NO SISTEMA INTERLIGADO 50 Hz ITAIPU-ANDE-FURNAS**

Rui Jovita G.C. da Silva\*    Fernando Vega Daher    Gabriel Gimenez Coronel    Paulo Almeida    Antônio L. Bérnago do Bonfim  
Itaipu Binacional    Itaipu Binacional    Itaipu Binacional    Eletrobrás    Eletrobrás

Laure Antonio Galeano    Francisco Escudero Scavone    Alexandre Lima Farias    Antônio de Pádua Guarini    Manuel M. Lizarraga  
ANDE    ANDE    FURNAS    ONS    Consultor

**RESUMO**

O Sistema Interligado 50 Hz ITAIPU-ANDE-FURNAS caracteriza-se pela marcante presença do Elo de Corrente Contínua (Elo CC) que interliga Foz do Iguaçu a Ibiúna, com a mesma potência nominal da usina de Itaipu 50 Hz (6.300 MW). A interligação com o sistema ANDE é feita através de uma transformação com capacidade em torno de 25 % da potência nominal da usina (Figura 1). Com base nos estudos de projeto e planejamento do Elo CC, a geração de Itaipu foi utilizada, sem restrições e durante muito tempo, atingindo valores de até 6.800 MW. Este trabalho apresenta a análise da possibilidade de ocorrência de colapso de tensão causada por emergências neste sistema.

**PALAVRAS-CHAVE**

Colapso de Tensão – Elo de Corrente Contínua – Limitador de Máxima Corrente de Excitação.

**1.0. INTRODUÇÃO**

A operação de Itaipu 50 Hz com geração elevada e acima da potência nominal da usina foi utilizada de forma rotineira no passado baseado nos estudos da fase de planejamento do Elo CC. O projeto da compensação reativa (filtros) do sistema 50 Hz em Foz do Iguaçu [1, 2, 3, 4, 5] considerou como premissas que: (a) os fatores de potência do Elo CC e do intercâmbio Itaipu-ANDE seriam semelhantes e (b) o sistema operaria com 9 unidades de Itaipu gerando no máximo 700 MW por máquina, com até um filtro indisponível, ou 8 unidades gerando até 727 MW por máquina, com todos os equipamentos presentes. Este trabalho tem por finalidade analisar a operação em condições de geração elevada em Itaipu, com até 760 MW por máquina [6], quando aumenta a possibilidade da atuação em regime permanente dos seus limitadores de máxima corrente de excitação. Verifica-se ante a ocorrência de contingências, a interação desses limitadores com os controladores do Elo CC. São analisadas através de simulações no domínio do tempo, várias medidas operativas,

proteções especiais ou alterações estruturais na configuração do sistema, que possam atenuar ou eliminar os problemas relacionados com o fenômeno do colapso de tensão.

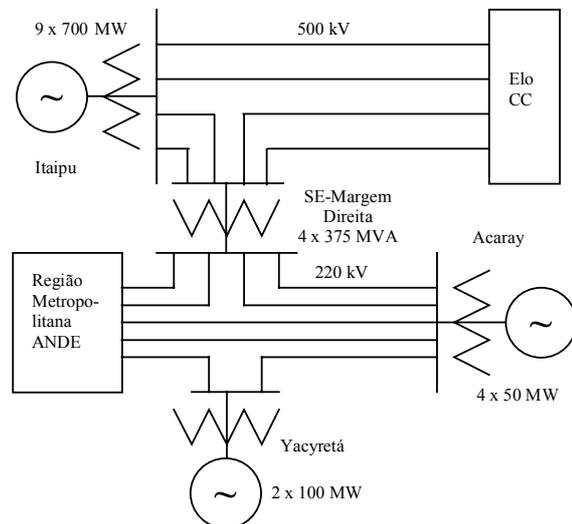


Figura 1 – Diagrama do Sistema 50 Hz.

**2.0. DESCRIÇÃO BÁSICA DOS CONTROLADORES DE TENSÃO DO SISTEMA INTERLIGADO 50 Hz**

**2.1. Limitador de Corrente de Excitação das Máquinas de Itaipu 50 Hz**

O limitador de corrente de excitação realiza a sua função quando alcançados patamares proibitivos de corrente de excitação, fornecidos em dois níveis: o limite térmico, que é 5 % acima da corrente nominal, e o limite máximo, de 50 % acima da corrente nominal. Se apenas o limite térmico é ultrapassado, o limitador permite operar nesta condição por um certo tempo, sendo este tempo maior quanto menor for a ultrapassagem da corrente em relação a esse limite. Se o limite máximo é ultrapassado a atuação se dá em um tempo muito curto, reduzindo a corrente até o limite térmico. O limitador atua quando assume o lugar do regulador de tensão no controle da máquina, a qual passa a operar com corrente de excitação constante.

\* Av. Tancredo Neves, 6731 – Foz do Iguaçu – PR – CEP: 85866-900  
Fone: (45) 5202565 / fax: (21) 5202706 e-mail: ruijgcs@itaipu.gov.br

## 2.2. Controladores do Elo CC

**VDCOL:** atua na ordem de corrente em função do valor da tensão contínua Vdc. Na ocorrência de uma queda brusca e transitória da tensão Vdc, abaixo de 0,93 pu, o VDCOL limita a ordem máxima de corrente permitida em função do nível de tensão.

**Limitador de mínimo na tensão Ud:** atua na medição da tensão Vdc utilizada no cálculo da ordem de corrente de cada pólo, e a sua função é evitar que quedas lentas de tensão, resultem em um aumento da corrente CC para manter a potência constante. O Limitador de Ud fixa a ordem de corrente para quedas da tensão Vdc superiores a 2,5 %, medidas em Foz. Nestes casos, o Elo CC passa a operar no modo de controle de corrente enquanto persistir o baixo valor de tensão.

**Comutador de "tap" dos transformadores conversores:** A comutação é realizada em nível de pólo. No retificador o objetivo é manter o ângulo de disparo dentro da faixa de 12,5° a 17,5°. Quando o ângulo está fora da faixa é efetuada a troca de "tap" com a finalidade de retorná-lo para dentro desta faixa. No inversor o objetivo é manter a tensão Vdc dentro da faixa de 98,75 % a 101,25 %, havendo troca de "tap" para adequar a tensão a esta faixa. As comutações ocorrem a cada 5,0 s, quando há necessidade.

**STAB50:** atua em nível de bipolo e tem por função aumentar o amortecimento nas oscilações de frequência em regime permanente e limitar as subfrequências no lado retificador, reduzindo a potência do Elo CC no caso de perda de geração. Para eventos no Elo CC ou no sistema inversor este controlador aumenta a potência do Elo CC para reduzir as sobrefrequências no sistema de 50 Hz.

**STOL:** controla a sobrecarga causada por perdas de conversor ou de pólo, limitando a referência de corrente dos elementos remanescentes. Desta forma, as sobrefrequências no sistema de 50 Hz e subfrequências no sistema de 60 Hz são controladas.

## 2.3. Compensador Estático de Reativos na ANDE

O compensador estático de reativos de San Lorenzo 66 kV é constituído de dois bancos de reatores controlados a tiristor, de 20 Mvar cada, e 5 bancos de capacitores de 25 Mvar cada, que possuem lógica de conexão/desconexão em função da tensão.

## 3.0. CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO

Objetivando tornar as conclusões mais abrangentes foram considerados os seguintes critérios no ajuste do fluxo de potência:

- A carga do sistema ANDE e o intercâmbio Itaipu-ANDE representados para os períodos de carga máxima, pesada, média e leve, ajustando-se o patamar da potência transmitida pelo Elo CC que produz o caso limite;
- Os conversores do Elo CC podem operar com até 873 MW, o que é permitido com temperatura ambiente de até 24°. Para temperaturas até 30° este

limite é 801 MW e para temperaturas superiores a 30° o limite é 783 MW.

- Ângulo de disparo dos conversores ajustado entre 12,5° e 17,5°, determinando-se o valor que torna a simulação mais conservadora.

Para as simulações dinâmicas foram utilizadas as seguintes premissas:

- Representação da carga da ANDE: potência ativa com 70 % de I constante e 30 % de Z constante, e a potência reativa com 100 % de Z constante.
- Comutação de "tap" dos transformadores conversores de Foz do Iguaçu e Ibiúna com passo de 0,0125 pu e intervalo de tempo de 5,0 s entre comutações, mantidas as condições a seguir: no lado retificador quando o ângulo de disparo for inferior a 12,5° ou superior a 17,5°, e no lado inversor quando a tensão contínua Vdc for inferior a 0,9875 pu ou superior a 1,0125 pu,
- Nos casos de bloqueio de pólo considerou-se que o pólo adjacente assume 40 % de sobrecarga instantaneamente e o outro bipolo assume o restante da perda 100 ms depois do bloqueio. A sobrecarga é eliminada pela ação do STOL.

## 4.0. CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Para análise dos resultados das simulações utilizou-se os seguintes critérios:

- O limitador de máxima corrente de excitação não pode ficar no controle por mais de 10,0 segundos, e neste intervalo a tensão de saída do regulador de tensão não pode atingir seu limite;
- A corrente de excitação das máquinas de Itaipu deve ser inferior a 1,98 pu no regime permanente após a perturbação;
- A tensão mínima admissível no sistema de 220 kV da ANDE, no regime permanente após a perturbação, é de 0,85 pu, podendo atingir transitoriamente o mínimo de 0,75 pu;
- A sobrecarga nos transformadores da Margem Direita 500/220 kV não deve ser superior a 20 % da corrente nominal do transformador.

## 5.0. O PROCESSO DE COLAPSO DE TENSÃO

Com base nas simulações efetuadas, pode-se resumir aqui como evolui o processo de colapso de tensão no sistema 50 Hz. Qualquer contingência que provoque queda de tensão no sistema interligado vai exigir mais potência reativa das máquinas de Itaipu e pode levar a duas conseqüências: (a) aumento da corrente de excitação acima dos limites da máquina; e (b) operação dos conversores com ângulo de disparo fora da faixa permitida, tornando necessária a comutação de "tap". Para valores elevados de geração em Itaipu 50 Hz contingências deste tipo podem levar o sistema a iniciar um processo de instabilidade de tensão devido a interação entre o controle do Elo CC e das máquinas de Itaipu. Especificamente entre a comutação dos "taps" dos transformadores conversores e os limitadores de máxima corrente de excitação. Antes da atuação desses controladores, em alguns distúrbios as tensões no sistema de 500 kV estão muito próximas

dos seus valores pré-distúrbio, não havendo portanto nenhum outro prejuízo ao sistema a não ser uma excessiva solitação de potência reativa às máquinas de Itaipu (se o processo é iniciado com a atuação dos limitadores) ou um valor de ângulo de disparo dos conversores fora da faixa normal de operação (se o processo é iniciado com a comutação de “tap”). Dependendo da contingência e da configuração do sistema, podem ocorrer tensões baixas no sistema de 220 kV da ANDE.

Em função do ângulo de disparo dos conversores antes da perturbação, o processo de colapso de tensão pode iniciar pela atuação dos limitadores das máquinas ou pela comutação de “tap” dos transformadores, como mostrado nas Figura 2 a 7 para o caso da perda de um filtro de 349 Mvar de Foz do Iguaçu. Com ângulos na parte superior da faixa permitida, o processo é iniciado pelos limitadores. A sua atuação reflete-se em redução da tensão terminal das máquinas, levando à redução de tensão em todo o sistema (Figura 2 e 3). Esta redução provoca uma resposta dos controladores do Elo CC que reduzem o ângulo de disparo dos conversores objetivando manter a potência constante, que é a modalidade de operação do Elo CC em condições normais. Nestes casos o ângulo fica abaixo do mínimo de  $12,5^\circ$  (Figura 4), o que vai resultar em comutação de “tap”, implicando em nova redução na tensão do sistema e exigindo mais reativo das máquinas de Itaipu. Isto caracteriza uma instabilidade de tensão que pode levar a perda de todo o sistema ou parte dele. Com ângulos na parte inferior da faixa permitida o processo é iniciado pela comutação de “tap” (Figura 5), que provoca redução na tensão do sistema (Figura 6) e exige mais reativo das máquinas de Itaipu, com a conseqüente atuação dos limitadores das máquinas (Figura 7), repetindo-se o processo descrito anteriormente.

Este quadro demonstra que a operação com geração elevada em Itaipu 50 Hz não oferece segurança ao sistema, a qual pode ser obtida de 3 formas: (a) operar com uma determinada margem de segurança, ou seja, impor limites de geração e/ou transmissão ao sistema; (b) relaxar os limites dos equipamentos, submetendo-os a maiores desgastes; ou (c) implantar Esquemas de Controle de Emergência (ECEs) que efetuem a redução de geração e/ou transmissão ao sistema. Essas as alternativas serão analisadas na seqüência do trabalho.

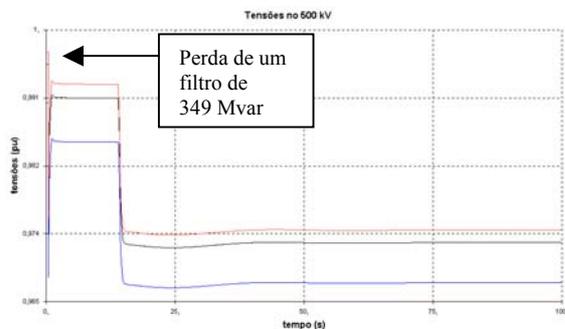


FIGURA 2 – Tensões no 500 kV.

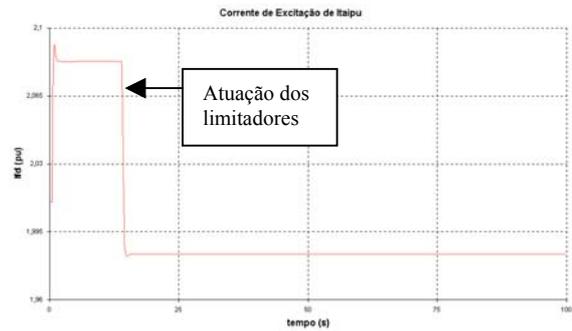


FIGURA 3 – Corrente de Excitação (pu)

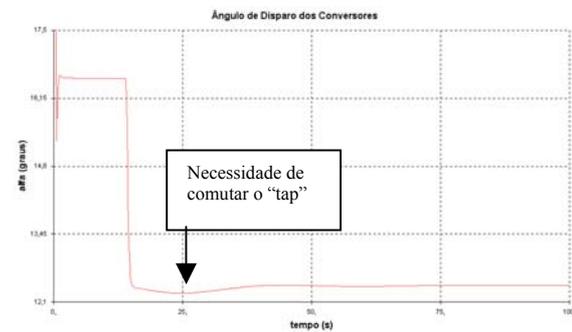


FIGURA 4 - Ângulo de disparo (graus).

## 6.0. ANÁLISE DAS SOLUÇÕES

A contingência crítica para o sistema foi determinada pelo intervalo de tempo transcorrido até a atuação dos limitadores considerando o sistema completo, carga máxima na ANDE e o ângulo de disparo operando em  $17,5^\circ$ . Entre perdas de linhas de 500 kV e 220 kV, transformadores, filtros, interligação com Yacyretá e distúrbios no Elo CC, a que provoca a atuação mais rápida do limitador (14 s) é a perda de um filtro de 349 Mvar em Foz do Iguaçu.

A perda do filtro de 349 Mvar faz com que o processo de colapso de tensão seja iniciado pela atuação dos limitadores de Itaipu para ângulos de disparo maiores que  $13,7^\circ$ . Se o ângulo for menor que este valor o processo é iniciado pela comutação de “tap”. Portanto, deve-se considerar para a determinação dos limites de geração em Itaipu 50 Hz para operação segura: (a) para ângulos inferiores a  $13,7^\circ$ , a comutação de uma posição de “tap”, provocada pela perda do filtro, não pode fazer o limitador atuar; ou (b) para ângulos superiores a  $13,7^\circ$ , a perda de filtro não pode fazer o limitador atuar.

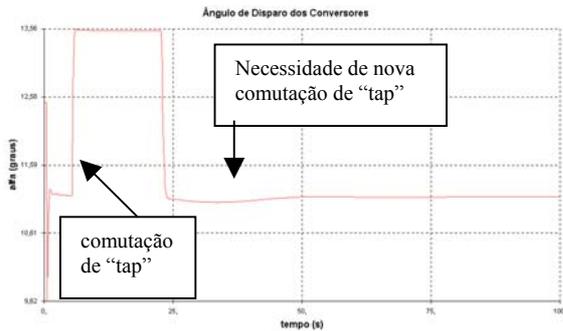


FIGURA 5 – Ângulo de disparo (graus).

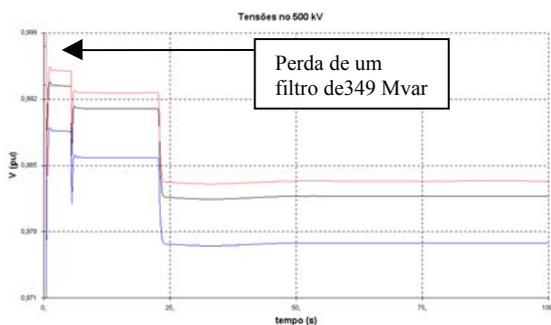


FIGURA 6 – Tensões no 500 kV (pu).

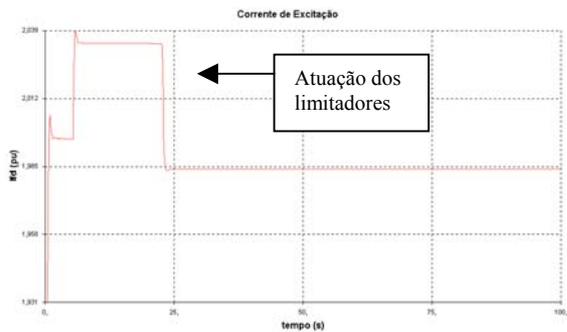


FIGURA 7 - Corrente de Excitação (pu).

A Tabela 1 mostra os valores limites obtidos em função do ângulo de disparo dos conversores para a condição de carga máxima. Ressalte-se que a limitação da geração de Itaipu pode não ser uma medida efetiva, pois as máquinas fornecem a potência que o sistema solicita. Desta forma um aumento de carga no sistema ANDE ou aumento na ordem de potência do Elo CC pode levar a ultrapassagem desses limites por um certo tempo.

Os resultados da Tabela 1 indicam que a geração de Itaipu 50 Hz deve ser limitada a 6.500 MW para que não haja risco de que a perda de um filtro de 349 Mvar não leve ao início do processo de colapso de tensão, já que o ângulo de disparo não é um valor que possa ser controlado pelos operadores no tempo real. Em [6] são apresentados limites para outras configurações e condições de carga, onde observa-se um desempenho semelhante ao apresentado. A seguir são descritas

algumas alternativas para se evitar a limitação da geração de Itaipu em valor inferior a 6.800 MW.

TABELA 1 – LIMITES DE GERAÇÃO.

Ângulo de Disparo	Limite de Geração
12,5°	6.700 MW
13,7°	6.600 MW
14,5°	6.700 MW
16,0°	6.600 MW
17,5°	6.500 MW

#### 6.1. Sobrecarga Temporária na Corrente de Excitação

A liberação de uma sobrecarga temporária na corrente de excitação pode diminuir a possibilidade de atuação dos limitadores. Esta sobrecarga consiste em mudar por um determinado tempo o valor do limite térmico na referência do limitador. A liberação de uma sobrecarga adicional de 5 % da corrente de excitação nominal já evitaria a atuação dos limitadores. Durante o período de tempo que a máquina opera nesta condição deve-se efetuar reprogramações no sistema com objetivo de reduzir aproximadamente 200 MW na geração de Itaipu, que só é obtida de forma indireta, isto é, reduzindo-se a carga na ANDE ou a ordem de potência do Elo CC. A adoção dessa sobrecarga limitaria a geração de Itaipu a 6.800 MW, que é a máxima obtida até hoje.

#### 6.2. Desligamento de 1 ou 2 máquinas em Itaipu

O desligamento de 1 ou 2 unidades de Itaipu 50 Hz visa obter liberação de potência reativa no sistema através da redução de geração na usina. Foram avaliadas duas formas de comandar o desligamento: através da perda do filtro ou através da atuação do limitador. Os resultados mostram que o corte de máquina não evita que o Elo CC continue exigindo potência ativa de Itaipu, o que só acontece quando a atuação do STAB50, sensibilizado pela queda de frequência, reduz sua ordem de potência. Como o STAB50 tende a controlar a frequência em 49,8 Hz, a partir da estabilização do sistema após o corte de máquina, a frequência vai subindo lentamente, acompanhada por um aumento na potência do Elo CC, de tal forma que as máquinas remanescentes tendem a atingir novamente o limite de corrente de excitação.

Comandando o corte de máquina após a perda do filtro não se evita a atuação do limitador. O corte de máquina provoca elevação na tensão Vdc e a conseqüente comutação de "tap" nos transformadores de Ibiúna, no sentido de elevar a corrente de excitação das máquinas. Com isso o ângulo de disparo vai situar-se acima de 17,5° provocando a comutação de "tap" nos transformadores de Foz, só que no sentido de reduzir a corrente de excitação das máquinas. Entretanto tal redução não é suficiente para evitar a atuação dos limitadores. Quando o corte é comandado pela atuação do limitador o desempenho é muito próximo do descrito anteriormente, com uma diferença importante: o corte de máquina não faz os limitadores saírem do controle imediatamente, só após o Elo CC reduzir sua ordem de potência por ação do STAB50 é que o regulador de tensão volta a assumir o controle das máquinas. Durante este tempo as condições do

sistema ficam mais críticas e os limitadores voltam a atuar posteriormente.

No caso do desligamento de duas unidades geradoras, verifica-se que os limitadores não voltam a atuar. Entretanto durante o período que os limitadores ficam no controle da máquina a tensão do regulador de tensão atinge o seu limite, o que não atende aos critérios estabelecido para estudo.

### 6.3. Mudança de “tap” dos transformadores elevadores de Itaipu

Uma medida que pode minimizar a possibilidade de colapso de tensão é operar com posição de “tap” maior nos transformadores elevadores das unidades de Itaipu 50 Hz, ou seja, passar de 511,875 kV para 525 kV. Entretanto esta elevação no “tap” somente vai exigir menos reativo de Itaipu se a operação do sistema de 500 kV for realizada com nível de tensão mais elevado que o atual, o que não é permitido hoje. Adotando-se 3 % a mais na tensão do 500 kV permite-se que Itaipu 50 Hz opere com 6.600 MW. Portanto, o aumento de uma posição de “tap” nos transformadores elevadores de Itaipu pode amenizar o problema do colapso de tensão, apresentando vantagem ainda maior se adotado em conjunto com outras medidas, como a sobrecarga temporária de corrente de excitação nas máquinas de Itaipu 50 Hz. Portanto esta medida é boa, necessitando estudos adicionais para a liberação da tensão no 500 kV

### 6.4. Bloqueio da comutação de “tap” dos transformadores conversores

O bloqueio da comutação de “tap” dos transformadores conversores evita o início do processo de colapso de tensão apenas naquelas situações em que o ângulo de disparo está na região em que o processo é iniciado pela comutação de “tap”. O esquema estudado prevê o bloqueio do comutador toda vez que houver perda de filtro em Foz do Iguaçu e a geração de Itaipu 50 Hz estiver superior a 6.400 MW. Não há alteração no limite, entretanto, o bloqueio de “tap” realizado em tempo real pode evitar, em algumas situações, o início do processo de colapso de tensão. Uma dificuldade adicional para implantar esta medida é a determinação do sinal que comandará o bloqueio. A utilização do sinal de perda de filtro é facilitada por estar na mesma subestação que o Elo CC. Entretanto, para outras contingências no sistema não se vislumbra como implementar tal medida.

### 6.5. Alteração da faixa operativa do ângulo de disparo dos conversores

Esta medida pode não produzir o resultado esperado, porque, qualquer que seja a faixa de operação dos “taps”, sempre existirá a possibilidade de que a mesma seja ultrapassada quando de contingências no sistema. Apesar disso, a diminuição do limite máximo de ângulo permitiria elevar o limite de geração de Itaipu. Quanto menor o limite mínimo do ângulo, mais efetiva é a adoção do bloqueio de “tap” e menor será o consumo de reativo do Elo CC. Desta forma, a conjugação desta medida com o bloqueio de “tap” poderia apresentar resultados positivos para a solução do problema. Entretanto, a diminuição do limite máximo da faixa

permitida de excursão do ângulo de disparo teria como consequência imediata o maior número de operações dos comutadores de “tap” dos transformadores conversores, uma vez que o projeto do Elo CC definiu que a operação seja feita com o ângulo de disparo próximo de 15°. Ocorreria então um aumento no desgaste dos comutadores, exigindo mais desgastes para manutenção e aumentando os custos operacionais. Não haveria este desgaste adicional se o ângulo de disparo passasse a operar no centro da nova faixa permitida, para o que seria necessário efetuar um novo projeto do Sistema de Corrente Contínua de Furnas. A análise da viabilidade de se alterar esta faixa operativa implicaria em um longo e custoso estudo para verificar o impacto desta modificação na correta operação do sistema de corrente contínua.

### 6.6. Reajuste dos controladores do Elo CC

O reajuste dos controladores do Elo CC é uma solução que pode ser aplicada para os casos em que o corte de máquina é efetuado, através do reajuste dos parâmetros do STAB50. Teria por objetivo evitar que o Elo CC continuasse exigindo potência de Itaipu 50 Hz, e desta forma tornaria o corte de máquina uma medida eficiente. O ajuste atual do STAB50 é aquele que apresentou os melhores resultados para garantir uma boa resposta para o Sistema Interligado 50 Hz [2]. Um eventual reajuste, especificamente para a contingência mais severa, iria trazer prejuízo ao atendimento ao sistema paraguaio. Portanto este reajuste não é uma boa alternativa para solução do problema do colapso de tensão.

### 6.7. Redução da ordem de potência do Elo CC

A avaliação da redução da ordem de potência do Elo CC através de degrau ou rampa foi analisada porque é equivalente a cortar carga no sistema, que é a única maneira para reduzir a geração de Itaipu. A redução por rampa na ordem de potência do Elo CC já existe implementada de forma automática para os casos de operação na configuração duplo-monopolar, e é realizada com taxa de 10 MW/s. Foram avaliadas duas formas de comando: através da perda do filtro ou através da atuação do limitador.

Os resultados obtidos indicam que a redução da ordem de potência do Elo CC, para que se tenha segurança que a perda de um filtro de 349 Mvar não leve ao início do processo de colapso de tensão, deveria ser:

- de 10 % através de degrau ou rampa de 50 MW/s, se fosse comandada pela atuação dos limitadores das máquinas de Itaipu, o que implicaria em redução de aproximadamente 600 MW; ou
- De um degrau de 5 % (300 MW) ou rampa de 20 MW/s totalizando 500 MW, se fosse comandada pelo sinal de perda de filtro.

Para outras contingências no sistema não se vislumbra como implementar tal medida. A implantação dessa redução limitaria a geração de Itaipu a 6.800 MW, que é o máximo obtido até hoje. Entretanto, a análise feita por Furnas considerou inviável a implementação destas propostas em razão de diversas dificuldades de ordem técnica.

### 6.8. Corte de carga na ANDE

A redução da ordem de potência do Elo CC promove uma ação equivalente ao corte de carga em FURNAS, sendo assim, foi analisada também a influência de se efetuar uma ação de corte de carga no sistema ANDE. As cargas selecionadas proporcionam um corte de 188 MW (cerca de 20 % do Intercâmbio ITAIPU-ANDE). Esta medida é de difícil de implementação prática por que é uma ação em vários locais. Assim como as outras ações, esta investigação foi efetuada a partir da perda do filtro e da atuação do limitador. Os resultados mostraram que para ser efetivo, o corte de carga na ANDE deveria ser em montante superior a 50 % do intercâmbio ITAIPU-ANDE, portanto não é uma medida que resolva o problema do colapso de tensão

### 6.9. Ilhamento de máquina(s) para a ANDE

Assim como as outras ações, esta investigação foi efetuada a partir da perda do filtro e da atuação do limitador. Após a atuação do ilhamento a Usina de Itaipu fica dividida em duas partes: sete unidades alimentado de forma exclusiva ao Elo CC e duas unidades interligada a ANDE e Yacyretá. Para a parte ligada ao Elo CC as simulações mostram uma repetição do que ocorre com o corte de duas unidade, ou seja, o limitador volta a atuar em um tempo mais longo devido a atuação do STAB50. Para a parte do ligada ao sistema ANDE há a manifestação de oscilações crescentes, indicando a necessidade de colocar em operação os PSS's das máquinas de Itaipu. Sendo assim, o ilhamento não é, também, uma medida que resolva o problema do colapso de tensão.

### 6.10. Compensação Reativa Adicional.

Face as dificuldades técnicas para garantir a segurança do sistema com geração de Itaipu acima de 6.500 MW, surge como opção o reforço da compensação reativa. A instalação de compensação de 349 Mvar adicionais em Foz do Iguaçu ou na Margem Direita, operando em regime permanente, evitaria o risco de colapso de tensão, pois supriria a perda de um filtro. As simulações de perda de filtro mostram que para o ângulo de 17,5° não ocorre a atuação do limitador e para o ângulo de 13,7° ocorre uma comutação nos "taps" dos transformadores de Foz do Iguaçu, e mesmo assim os limitadores não atuam. Portanto, o reforço da compensação reativa em 349 Mvar resolve o problema do colapso de tensão até 6.800 MW.

## 7.0. CONCLUSÕES

A ocorrência de contingências simples no Sistema Interligado 50 Hz pode levar o mesmo a operar com

risco de colapso de tensão que pode se refletir para o Sistema Interligado Brasileiro. O valor máximo de geração de Itaipu 50 Hz para uma operação segura, calculado para a contingência mais severa (perda de um filtro de 349 Mvar de Foz do Iguaçu), é dependente das condições de carga e da configuração do sistema. Os seguintes esquemas de emergência analisados não solucionam o problema: (a) corte de máquina(s) em Itaipu; (b) ilhamento de máquina(s) de Itaipu para a ANDE; e (c) corte de carga na ANDE.

As seguintes soluções, realizando modificações no Elo CC, se mostraram inviáveis quanto a sua implementação prática: (a) redução da ordem de potência, por degrau ou rampa; (b) alteração na faixa operativa do ângulo de disparo dos conversores; e (c) reajuste dos seus controladores.

A mudança na posição do "tap" dos transformadores elevadores de Itaipu 50 Hz pode diminuir a possibilidade de colapso. Outras alternativas também diminuem esta possibilidade. Entretanto, implicam em maior desgaste dos equipamentos por levá-los a operar em condições fora das características de projeto. São elas: (a) utilização de sobrecarga temporária de corrente de excitação das máquinas de Itaipu 50 Hz; e (b) bloqueio da comutação automática de "tap" dos transformadores conversores.

Como essas soluções não se mostraram totalmente satisfatórias para eliminar o risco de colapso de tensão, resta apenas a alternativa de uma solução de caráter estrutural, que é a implantação de uma compensação reativa "shunt" na malha de 500 kV do sistema. Foi mostrado que uma compensação reativa adicional de 349 Mvar permite que o Sistema Interligado 50 Hz possa operar de forma segura com a máxima potência em Itaipu 50 Hz utilizada até hoje, que foi de 6800 MW.

## 8.0. REFERÊNCIAS

- [1] ASEA/Promon, "AP22 - Reactive Power Compensation - Reactive Power Balance at Foz do Iguaçu"
- [2] ASEA/Promon, "AP01 - General Technical Conditions"
- [3] ASEA/Promon, "AP02 - Main Circuit Parameters and Steady State Operating Conditions"
- [4] ASEA/Promon, "AP30 - 50 Hz System Reactive Capability at Foz do Iguaçu"
- [5] "Reactive Power Balance and AC Filter Switching Schemes of the Itaipu HVDC Converter Stations - International Symposium on HVDC Technology", Rio de Janeiro 1983.
- [6] CMO/GE-02, "Análise do Processo de Colapso de Tensão no Sistema Interligado 50 Hz Itaipu-ANDE-Furnas - Relatório CMO/GE-02/161", 2002.