



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

BR/GAT/07
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – IV

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

**O IMPACTO NO SIN-BR DO DESLIGAMENTO DE UNIDADES
GERADORAS NA UHE-ITAIPU 60Hz e 50Hz**

André Pagani Tochetto(*)
Itaipu Binacional

Rui Jovita G. C. da Silva
Itaipu Binacional

José Benedito Mota Júnior
Itaipu Binacional

RESUMO

Em 18 de agosto de 2012 ocorreu o desligamento acidental de cinco unidades geradoras da UHE-Itaipu, três no 50Hz e duas no 60Hz, devido a uma falha à terra no circuito de controle dessas unidades. Este trabalho apresenta a análise dessa perturbação com foco nas consequências dos desligamentos para o SIN-BR, mostrando que o desligamento de unidades geradoras dos setores de 60Hz e de 50Hz tem efeito semelhante. O impacto para o SIN-BR resultante da perda de geração em Itaipu provoca um aumento nos fluxos das interligações para o Sudeste, que pode se tornar um problema de estabilidade em função da condição inicial. Soluções para o problema são de difícil implementação.

PALAVRAS-CHAVE

UHE-Itaipu; desligamento de unidades geradoras; Sistemas Especiais de Proteção (SEP), Interligação Norte-Sudeste; estabilidade.

1 - INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu possui 20 unidades geradoras com potência nominal totalizando 14.000MW, divididas em dois setores, sendo 10 unidades em 60Hz e 10 unidades em 50Hz. No ano de 2012 a UHE-Itaipu gerou 98,29TWh, recorde histórico de geração de energia elétrica no mundo, e é atualmente responsável pelo atendimento de aproximadamente 17% da energia elétrica consumida no Brasil e 73% da energia consumida no Paraguai.

Itaipu 60Hz está conectada ao Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN-BR) através do sistema de transmissão de 765kV e da linha de transmissão de 525kV entre as subestações de Foz do Iguaçu e Cascavel Oeste. O setor de 50Hz está conectado ao SIN-BR através do Elo de Corrente Contínua de ± 600 kV e conectado ao Sistema Interligado Nacional do Paraguai (SIN-PY) através de quatro linhas de 220kV. A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar simplificado da UHE-Itaipu e dos sistemas de transmissão associados.

Devido ao seu tamanho e complexidade, o SIN-BR está sujeito a uma série de perturbações de grande porte que podem levar o sistema a uma condição crítica. Em alguns desses casos, são implantados esquemas que visam reduzir as consequências dessas perturbações e manter a integridade do SIN-BR.

Os desligamentos de unidades geradoras de Itaipu 60Hz ou de Itaipu 50Hz são algumas dessas perturbações que causam impacto no SIN-BR, reduzindo o fornecimento de potência aos sistemas Sul e Sudeste. No caso de desligamento em Itaipu 50Hz, o déficit de geração no SIN-BR é causado pela atuação do controle do Elo CC (STAB50), que reduz a potência transmitida para controlar a frequência no setor de 50Hz.

(*) Av. Presidente Tancredo Neves, n° 6731 – CEP 85866-900 Foz do Iguaçu, PR – Brasil
Tel/Fax: (+55 45) 3520-2468 – Email: pagani@itaipu.gov.br

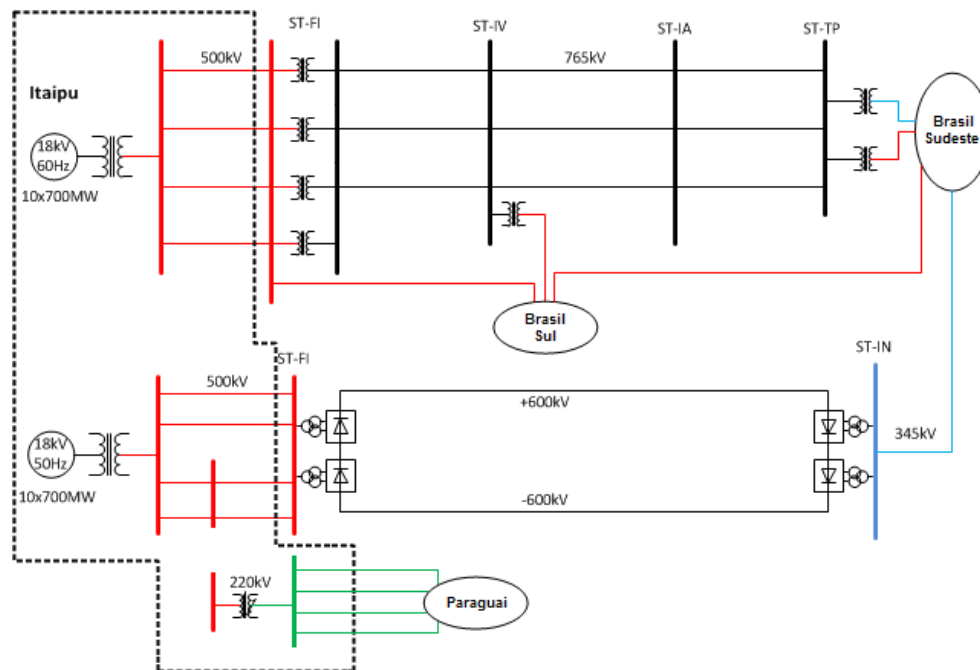


Figura 1 – Diagrama unifilar simplificado da UHE-Itaipu e sistemas de transmissão

O trabalho apresenta a análise da perturbação ocorrida em 18 de agosto de 2012, em que houve o desligamento de cinco unidades geradoras dos setores de 60Hz e 50Hz da UHE-Itaipu, com foco nas consequências desse tipo de desligamento para o SIN-BR. Analisando também possíveis soluções para o problema de estabilidade resultante da perda de geração.

2 - PERTURBAÇÃO DO DIA 18 DE AGOSTO DE 2012

Em 18 de agosto de 2012 Itaipu 60Hz operava com oito unidades geradoras sincronizadas e geração de 5.621MW e 1.034Mvar. O sistema de transmissão de 765kV operava em configuração completa e a LT 525kV CVO-FI estava desligada para trabalhos de manutenção. Itaipu 50Hz operava com dez unidades geradoras sincronizadas e geração de 6.730MW e 2.722Mvar, com fornecimento de 1.209MW para o Paraguai.

A partir das 19h36min ocorreu o desligamento acidental de cinco unidades geradoras da UHE-Itaipu, sendo duas no setor de 60Hz e três no setor de 50Hz. Os desligamentos ocorreram de forma aleatória e não simultânea, com intervalos variando de 20s a 5min e alternadamente entre os setores de 60Hz e 50Hz.

A causa do desligamento foi uma falha à terra nos circuitos de controle dessas unidades. Cabe destacar que não há conexão elétrica nem entre os circuitos de controle nem entre os serviços auxiliares dos setores de 60Hz e 50Hz. O que existe é uma proximidade física, já que todas as máquinas estão instaladas na mesma casa de força e há lugares em comum para passagem dos cabos dos circuitos de controle. A falha à terra nos circuitos ocorreu na bandeja dos cabos.

A Figura 2 mostra a geração de potência ativa e a frequência em Itaipu. É possível observar que no primeiro desligamento no 50Hz ainda havia reserva, que recuperou parte da geração, alcançando 6.550MW. Parte do déficit de geração do primeiro desligamento e os outros dois desligamentos no setor de 50Hz foram compensados pela atuação do STAB50, que reduziu o intercâmbio pelo Elo CC para controlar a frequência e evitar consequências adicionais para o Paraguai.

Houve redução de 1.317MW no setor de 60Hz e 1.602MW no setor de 50Hz, resultando na redução de 2.919MW na potência fornecida por Itaipu ao SIN-BR. Não houve consequências adicionais ao SIN-BR pois as demais usinas do sistema absorveram o impacto dos desligamentos.

Embora esse tipo de evento seja raro, por envolver a perda de um grande montante de geração nos dois setores da usina de Itaipu, sua análise deve ser aprofundada, visto que as consequências para o SIN-BR resultantes do evento dependem das condições iniciais do sistema. Apesar de não ter ocorrido consequências adicionais na perturbação, o mesmo tipo de evento em outra condição poderia causar desligamentos em cascata por perda de estabilidade. O aprofundamento da análise visa identificar, principalmente, a necessidade de Sistemas Especiais de Proteção para proteção do SIN-BR.

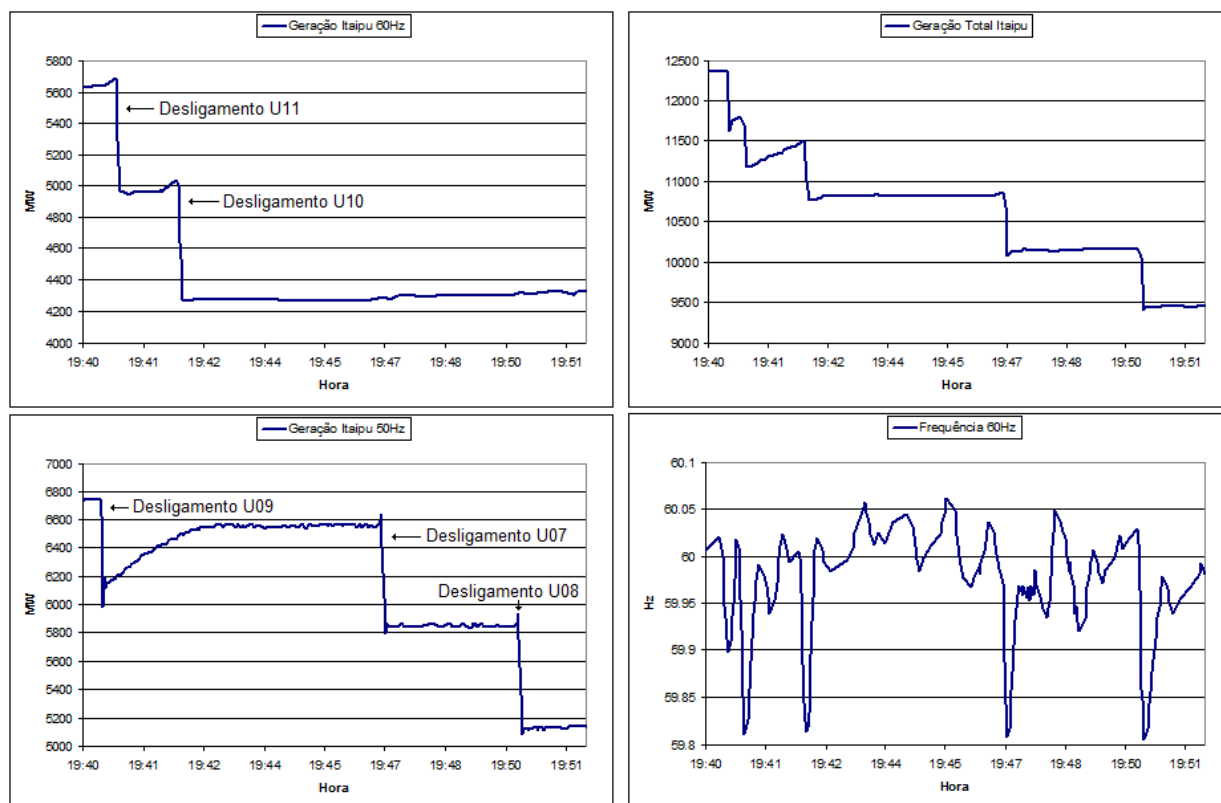


Figura 2 – Registros do sistema Scada de Itaipu

3 - SISTEMAS ESPECIAIS DE PROTEÇÃO NA UHE-ITAIPU

Com o objetivo de garantir o transporte da energia de Itaipu 60Hz para os sistemas Sul e Sudeste durante ocorrências em linhas e transmissão ou transformadores, o sistema de transmissão associado à Itaipu 60Hz é dotado de um Sistema Especial de Proteção (SEP). São 24 lógicas implantadas, em sua maioria controladas por CLP, e que visam principalmente evitar sobrecarga nos equipamentos e a perda de estabilidade no sistema. As lógicas atuam baseadas em eventos de desligamentos de linhas de transmissão ou transformadores e tem como principal ação comandar o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60Hz, podendo chegar a desligar seis unidades geradoras no caso de contingências triplas (1, 2, 3, 4).

Apesar de ser eficaz para eliminar sobrecargas e garantir a estabilidade do sistema, o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60Hz provoca um déficit de geração no SIN-BR, tanto maior quanto mais unidades forem desligadas. Como consequência, as outras usinas do sistema respondem de acordo com seus sistemas de regulação e fatores de sensibilidade, o que pode resultar em elevada solicitação de potência através da interligação Norte-Sudeste. No caso da condição operativa estar com valores elevados de fluxo no sentido Sudeste, essa solicitação pode acarretar em afundamento de tensão e até abertura total da interligação.

Com a finalidade de evitar a abertura da interligação Norte-Sudeste quando estão sendo praticados elevados níveis de intercâmbio no sentido Sudeste e ocorre o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60Hz, o SEP do sistema de transmissão de 765kV possui implantada uma lógica que comanda o desligamento de duas unidades geradoras da UHE-Tucuruí quando ocorre o desligamento de três ou mais unidades geradoras de Itaipu 60Hz pela atuação de outras lógicas do SEP. Quando há desligamento em Itaipu 60Hz de três ou mais unidades sem comando do SEP, não há envio de sinal para a UHE-Tucuruí.

Em Itaipu 50Hz também estão instalados vários SEP (2, 3) que visam principalmente evitar sobrecarga e superação de limites de equipamentos e manter a integridade do SIN-PY diante de perturbações. Dentre as principais ações estão o corte de carga no SIN-PY, a separação ou abertura da interligação de Itaipu com o SIN-PY e o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 50Hz.

A ação de desligamento ocorre para até duas unidades geradoras de Itaipu 50Hz no caso de bloqueio de pólo ou bipolo do Elo CC e visa evitar a abertura da interligação de Itaipu com o SIN-PY. Nessa condição o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 50Hz não causa impacto adicional, já que a ação do SEP visa retirar o excesso de geração resultante da redução da capacidade de transmissão do Elo CC.

Na perturbação descrita no item 2, o fluxo na interligação Norte-Sudeste era baixo, no sentido do Sudeste para o Norte, o desligamento das unidades geradoras não foi causado pela atuação do SEP do 765kV e ocorreu desligamento de unidade também em Itaipu 50Hz. Desta forma, a lógica que envia sinal para a UHE-Tucuruí não atuou, e não haveria o desligamento de unidades geradoras na UHE-Tucuruí mesmo com valores elevados de fluxo na interligação Norte-Sudeste, no sentido Sudeste. Assim, a perda de unidades na UHE-Itaipu pode resultar em risco potencial ao SIN-BR.

4 - DESLIGAMENTO DE UNIDADES GERADORAS DA UHE-ITAIPU

Em Itaipu 60Hz o Controle Conjunto de Potência opera em modo Repartidor de Carga. Nesse modo, o controle conjunto faz apenas a distribuição da geração do setor entre as unidades geradoras sincronizadas, sem nenhuma ação de controle da frequência ou do intercâmbio. Quando há desligamento de unidade geradora de Itaipu 60Hz, a geração das demais é afetada apenas pela regulação primária e o déficit de frequência é compensado por todo o SIN-BR.

Já em Itaipu 50Hz, por ser responsável pelo controle de frequência do SIN-PY, o Controle Conjunto de Potência opera em modo Frequência Constante (FC). No caso de desligamento de unidade geradora, o controle conjunto, juntamente com a regulação primária de frequência, é responsável por elevar a geração das unidades geradoras remanescentes no sentido de recuperar a frequência. Adicionalmente, o Elo CC de Furnas possui o STAB50, controle responsável por reduzir a potência transmitida de forma a evitar que a frequência permaneça em valores inferiores a 49,8Hz. Essa ação é necessária para manter a integridade do sistema do Paraguai quando ocorre o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 50Hz.

A Figura 3 mostra o registro típico de desligamento de unidade geradora de Itaipu 50Hz quando há reserva para recuperar a geração. É possível observar a atuação do STAB50, que reduz a potência transmitida pelo Elo CC e mantém a frequência em aproximadamente 49,8Hz. Há uma recuperação da geração pela ação da regulação primária das unidades geradoras e do Controle Conjunto de Potência até atingir o valor pré-perturbação e a frequência retorna ao valor nominal. Quando a reserva girante das unidades geradoras remanescentes é inferior à geração desligada, o STAB50 se mantém no controle da frequência até que ocorra uma redução na referência da potência transmitida pelo Elo CC, o que faz com que a frequência retorne ao nominal. Um registro típico dessas atuações também é mostrada na Figura 3.

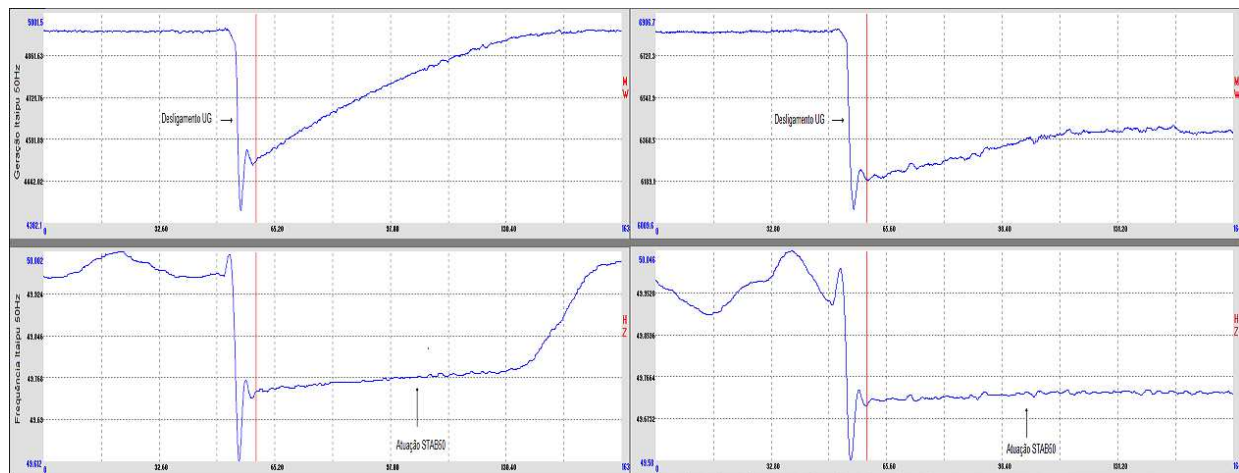


Figura 3 – Registro típico de desligamento de UG de Itaipu 50Hz

Como o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 50Hz se reflete em redução na potência transmitida pelo Elo CC, seu efeito também é percebido no SIN-BR. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 4, que apresenta registros cedidos pelo projeto MedFasee (5). Esses registros referem-se a ensaios de rejeição de carga em unidades geradoras de Itaipu 60Hz e 50Hz realizados com a mesma potência rejeitada e no mesmo dia. É possível observar o comportamento similar da frequência e da diferença angular em vários pontos do SIN-BR. A queda da frequência no SIN-BR é ligeiramente maior para a perda de unidade geradora no 60Hz, mas a diferença não alcança 0,1Hz em relação a perda de unidade geradora no 50Hz. Observa-se, entretanto, que a excursão angular foi maior para a perda de unidade geradora no 50Hz.

A similaridade das perdas de unidades geradoras de Itaipu 60Hz e 50Hz para o SIN-BR também pode ser observada em simulações no ANATEM (6). A Figura 5 mostra o resultado de simulações feitas com o ANATEM do desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60Hz e 50Hz. A comparação das figuras 4 e 5 comprova mais uma vez (7, 8, 9) que os modelos utilizados no ANATEM reproduzem com boa fidelidade o desempenho do SIN-BR. O ANATEM será utilizado na análise dos efeitos da perda simultânea de unidades geradoras no 50Hz e 60Hz.

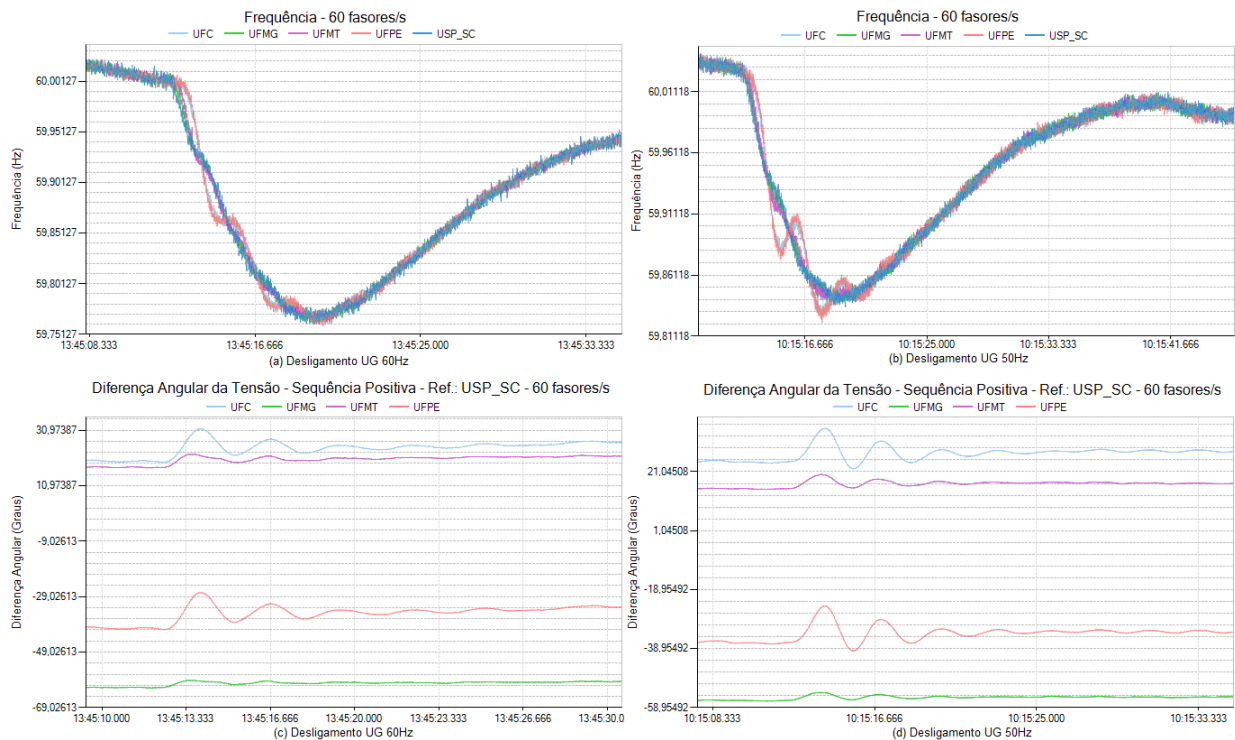


Figura 4 – Registros de PMU do SIN cedidos pelo projeto MedFasee

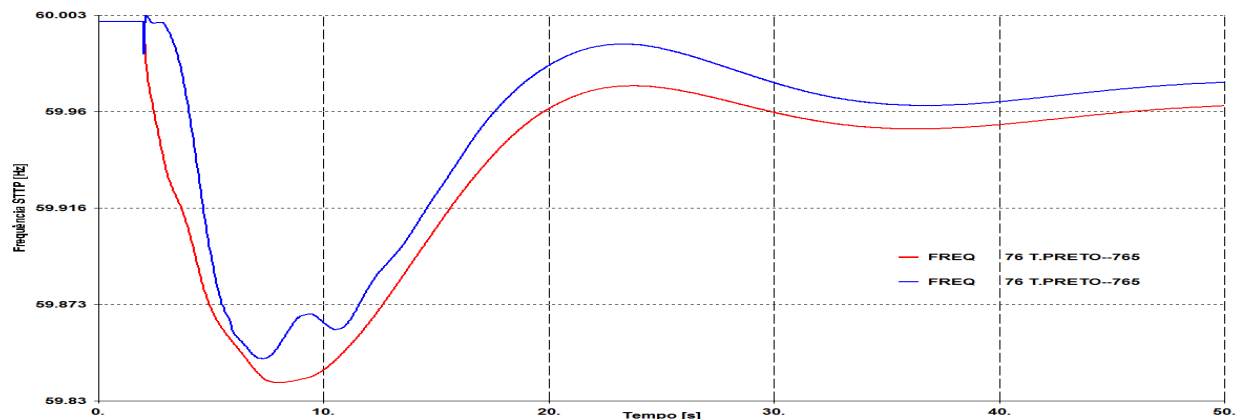


Figura 5 – Simulações de desligamento de UG de 60Hz e 50Hz

5 - ANÁLISE DA PERDA SIMULTÂNEA NO 50Hz E 60Hz

A perturbação do dia 18.8.2012 foi simulada com o ANATEM considerando intervalos de tempo menores entre os desligamentos das unidades geradoras, de forma a poder reproduzir todos os desligamentos na mesma simulação. Esse fato torna a simulação mais pessimista com relação ao evento real, mas é aceitável já que o evento que causou os desligamentos foi aleatório e o intervalo de tempo entre os desligamentos variou bastante. Além disso, a perda da unidade seguinte só foi simulada após o estabelecimento de um regime permanente após a perda da unidade anterior.

A Figura 6 mostra a potência ativa gerada pela UHE-Itaipu e o fluxo na interligação Norte-Sudeste. É possível observar que o desligamento das unidades geradoras da UHE-Itaipu provocou uma redução na potência transmitida pela interligação Norte-Sudeste, no sentido Norte.

Também foram realizadas simulações considerando outro cenário no SIN-BR, com fluxo elevado na interligação Norte-Sudeste, de 3.900MW no sentido Sudeste. A Figura 7 mostra o fluxo na interligação e a tensão na SE-Serra da Mesa. É possível observar que após o desligamento da quarta unidade geradora ocorre um afundamento da tensão, que resulta na abertura da interligação pela atuação das PPS e o consequente *blackout* no SIN-BR.

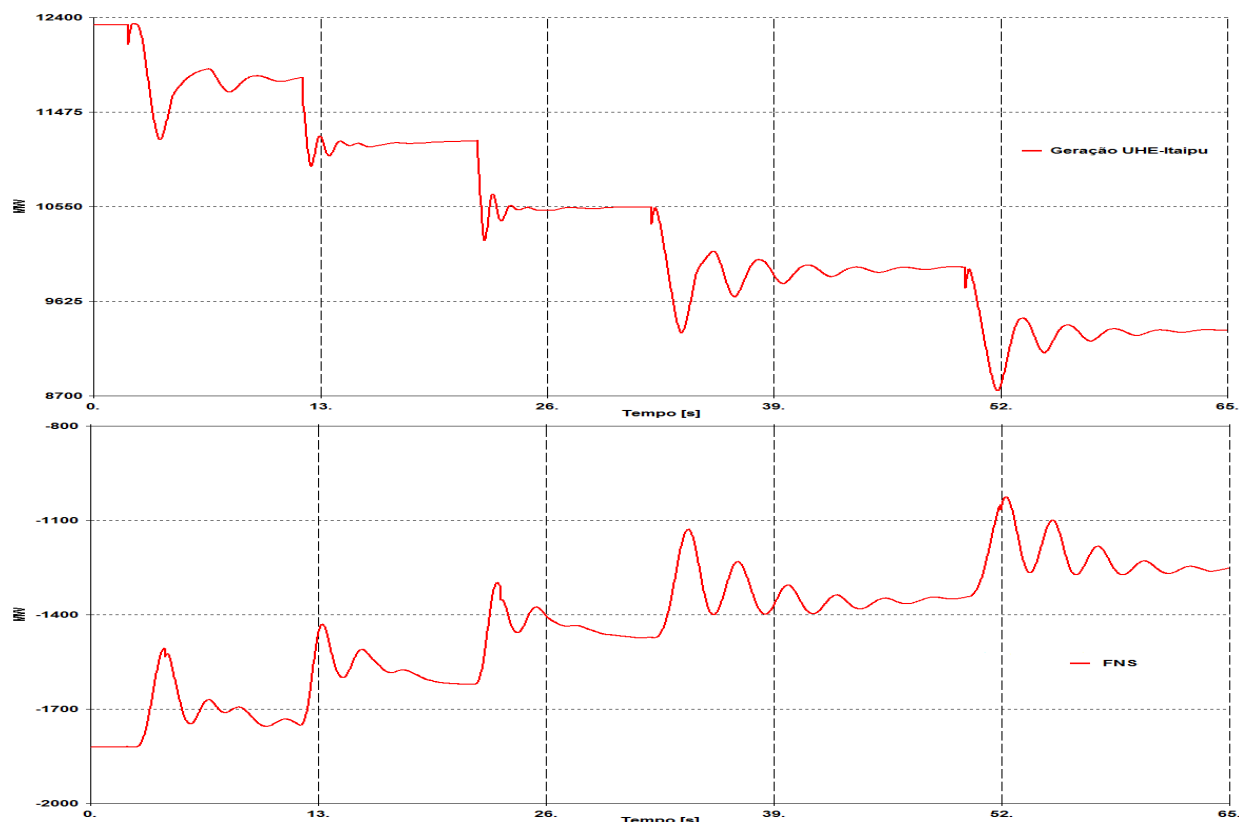


Figura 6 – Geração na UHE-Itaipu e FNS

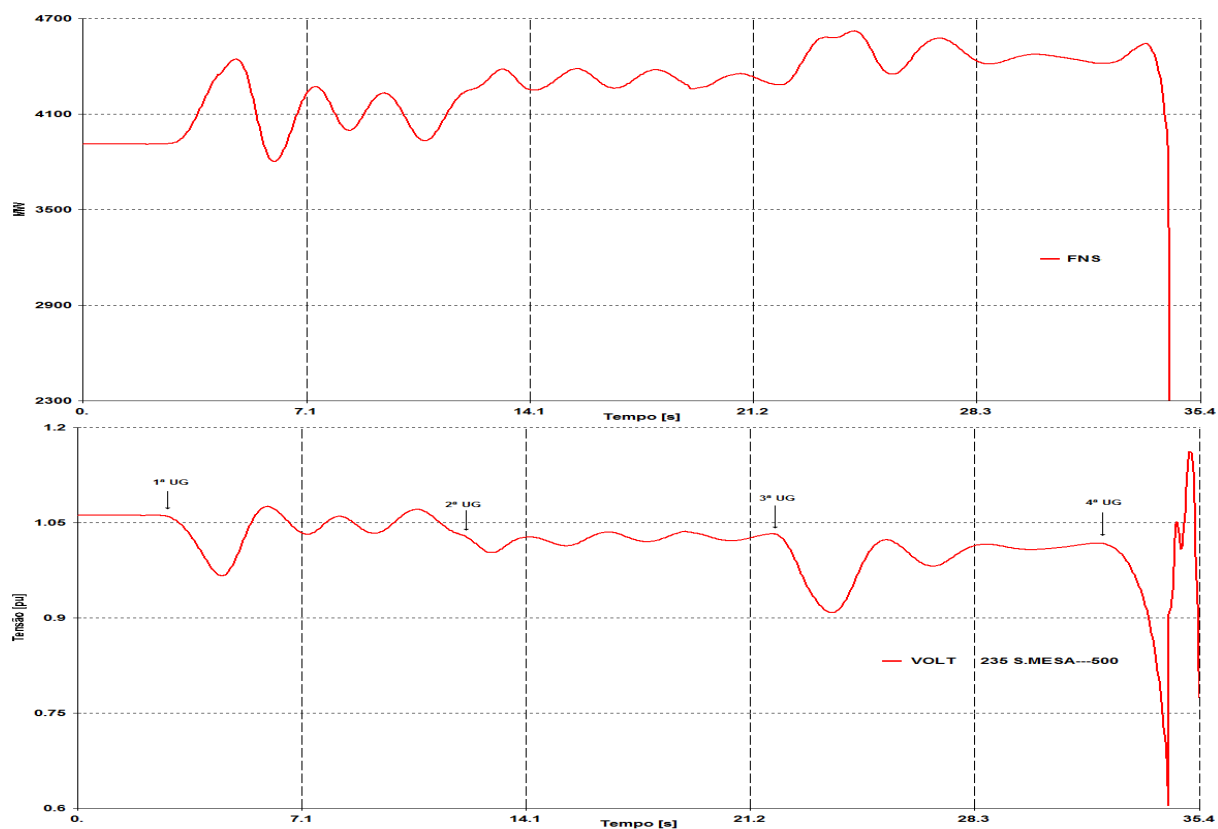


Figura 7 – FNS e tensão na SE-Serra da Mesa para perda de unidades de 50Hz e de 60Hz

Dependendo das condições do SIN-BR, em especial da potência gerada pela UHE-Itaipu e do carregamento da interligação Norte-Sudeste, o desligamento de três unidades geradoras da UHE-Itaipu já é suficiente para causar a abertura da interligação Norte-Sudeste. Esse fato também ocorre se for considerado o desligamento apenas de unidades geradoras de Itaipu 50Hz, como mostra a Figura 8.

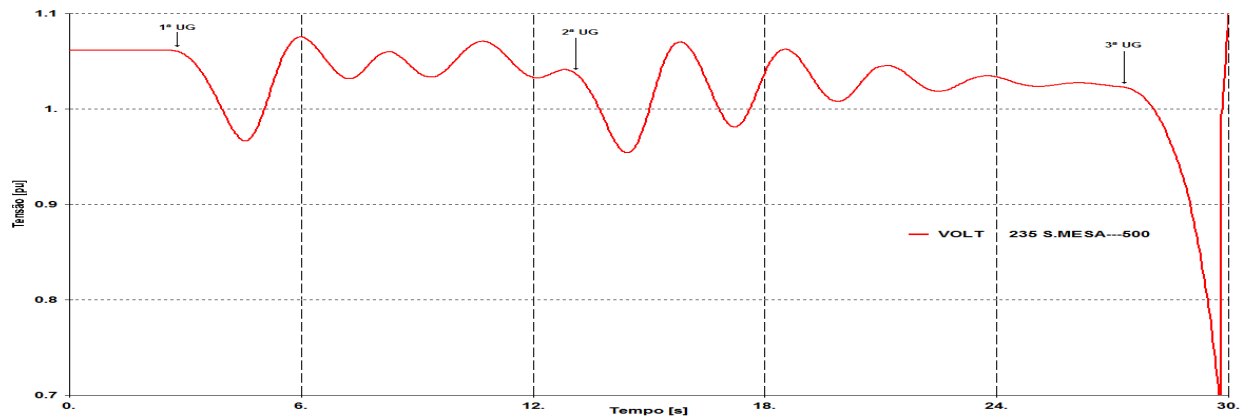


Figura 8 – Tensão na SE-Serra da Mesa para perda de unidades de 50Hz

A Figura 8 mostra que a perda de três unidades geradoras de 50Hz causa colapso de tensão na Interligação Norte/Sudeste, tal como a perda de três unidades geradoras de 60Hz. A diferença é que para a perda de três unidades geradoras de 60Hz existe uma lógica do SEP do 765kV que comanda o corte de geração em Tucuruí, desde que a perda das unidades de Itaipu também tenha sido originada por lógica do SEP de 765kV.

Dessa forma, o risco ao SIN-BR associado a perda de unidade geradora de Itaipu é superior ao que se imaginava, visto que esse risco inicialmente era relacionado com a perda de unidades geradoras no setor de 60Hz, risco que foi mitigado apenas para o caso em que a perda é devida a atuação de lógica do SEP de 765kV. Por ser de difícil implementação, não existe um SEP prevenindo o colapso na Interligação Norte/Sudeste para perdas oriundas de outros defeitos no setor de 60Hz.

Esse trabalho mostrou que o risco existe também para perda de unidades geradoras no 50Hz, condição que torna muito mais difícil a implementação de um SEP para prevenir o colapso na Interligação Norte/Sudeste. A situação complica-se ainda mais ao considerar-se a possibilidade de perdas de unidades nos dois setores da Usina de Itaipu. Cuidados especiais podem ser adotados com procedimentos operativos em casos de operação com configuração incompleta de barras nas subestações elevadoras dos setores de 50Hz e 60Hz da usina.

6 - CONCLUSÕES

O trabalho apresentou a análise do desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60Hz e 50Hz e sua influência sobre a interligação Norte-Sudeste. Como o desligamento de unidades geradoras de Itaipu 50Hz se reflete em redução na potência transmitida pelo Elo CC, seu efeito é similar ao desligamento de unidades geradoras de Itaipu 60Hz quando se refere ao déficit de energia no SIN-BR.

Atualmente existe um SEP que comanda o desligamento de unidades geradoras da UHE-Tucuruí quando ocorre o desligamento de três ou mais unidades de Itaipu 60Hz pela atuação do SEP do sistema de 765kV. Esse SEP não atua se as unidades geradoras de Itaipu 60Hz não forem desligadas pelo SEP do sistema de 765kV nem se o desligamento for de unidades geradoras de Itaipu 50Hz.

A perturbação do dia 18.8.2012 envolveu o desligamento de unidades geradoras dos dois setores da UHE-Itaipu e sem ação do SEP do sistema de 765kV, e portanto não houve envio de sinal para desligamento de unidades geradoras da UHE-Tucuruí. Não houve maiores consequências para o SIN-BR porque o intercâmbio na interligação Norte-Sudeste era no sentido Sudeste e as demais unidades geradoras do sistema conseguiram absorver o impacto dos desligamentos. Simulações mostram que caso a interligação Norte-Sudeste estivesse com elevado intercâmbio no sentido Sudeste haveria um *blackout* no SIN-BR.

Eventos como a perturbação do dia 18.8.2012 são raros, com baixas possibilidades de ocorrer. Além disso, devido a sua aleatoriedade e espaçamento no tempo, é um evento muito difícil de ser detectado, o que acaba por tornar complexa a implantação de qualquer tipo de SEP.

Mesmo considerando que o SIN-BR é robusto, possui uma série de SEP instalados e opera preparado para suportar contingências simples, duplas e algumas vezes múltiplas, sempre há a possibilidade de ocorrência de perturbações não previstas e risco para o sistema, visto que muitas vezes é difícil a implementação de SEP para prevenir desligamentos em cascata. Um exemplo é a perturbação descrita no trabalho.

Esse trabalho mostrou que existe risco para o SIN-BR no caso de perdas de três ou mais unidades geradoras no setor de 50Hz da Usina de Itaipu, no setor de 60Hz ou em ambos setores, condição que torna muito mais difícil a implementação de um SEP para prevenir o colapso na Interligação Norte/Sudeste. Esses riscos podem ser

mitigados com procedimentos operativos em casos de operação com configuração incompleta de barras nas subestações elevadores dos setores de 50Hz e 60Hz da usina.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. L. Farias e R. J. G. C. Silva, "Esquema de Controle de Emergências na Configuração Final do Sistema de Transmissão de 750kV", XVI SNPTEE, 2001;
- (2) Rui Jovita G. C. da Silva et al. Special Protection Schemes in Operation at Itaipu Power Plant, Cigré Session 2006;
- (3) Rui Jovita G. C. da Silva et al. Esquemas Especiais de Proteção Existentes na Usina Hidrelétrica de Itaipu, VII SESEP, Assunção, Paraguai, 2006;
- (4) P. Neis, R. J. G. C. Silva e A. A. Bastos, "Esquema de Redução de Geração para Eliminação de Sobrecarga nos Autotransformadores 525kV/765kV da Subestação de Foz do Iguaçu Através do CAG de Itaipu" XI STPC, 2012;
- (5) Projeto MedFasee. Registros de PMU – www.medfasee.ufsc.br.
- (6) Manual do ANATEM, Cepel.
- (7) Ildemar C. Decker et al, System Wide Model Validation of the Brazilian Interconnected Power System, IEEE PES General Meeting 2010;
- (8) T. H. S. BOSSA, R. J. G. C. SILVA, N. MARTINS, P. C. PELLANDA, "Novo Teste de Campo para Sinais Estabilizadores e sua Aplicação na Usina de Itaipu" XXI SNPTEE, 2011.
- (9) G. A. Gavioli, J. M. M. Capano Jr, I. C. Decker, A. D. R. Medeiros, A. S. Silva e V. Zimmer, "Utilização de Medição Fasorial Sincronizada na Validação de Modelos do Sistema Interligado Nacional" XII SEPOPE, 2012.

8 - DADOS BIOGRÁFICOS



André Pagani Tochetto (pagani@itaipu.gov.br). Nasceu em 1983 na cidade de Francisco Beltrão, estado do Paraná. Recebeu diploma de graduação em engenharia elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná em 2005 e diploma de pós-graduação pela Universidade Federal de Itajubá em 2011, sendo que atualmente cursa o mestrado em engenharia elétrica também pela Universidade Federal de Itajubá. Trabalha na Itaipu Binacional desde 2006, inicialmente na área de operação do sistema em tempo real. Em 2009 passou a trabalhar na área de estudos elétricos e normas, envolvido com análise de perturbações, realização estudos elétricos e elaboração de procedimentos operativos.

Rui Jovita Godinho Corrêa da Silva (ruijgcs@itaipu.gov.br). Nasceu em Belém-PA em 1962, graduou-se em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Pará (1983), sendo mestre (1990) e doutor (2007) pela Universidade Federal de Itajubá, também em engenharia elétrica. Trabalha na Itaipu Binacional desde 1989 envolvido com a elaboração de procedimentos operativos e com a realização de estudos elétricos voltados para o horizonte de operação de médio e curto prazo, incluindo a análise de sistemas elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle.

José Benedito Mota Júnior (mota@itaipu.gov.br). Nasceu em 1966 na cidade de Cristina, sul do estado de Minas Gerais. Recebeu seu diploma de graduação e de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá - Minas Gerais em 1988 e 2002, respectivamente. Trabalha na Itaipu Binacional desde 1989, inicialmente na área de manutenção eletroeletrônica - proteção e controle. Em 1997 passou a trabalhar no Departamento de Operação do Sistema da Itaipu na área de Estudos Elétricos e Normas, atuando em análise de perturbações, cálculos de ajustes de proteção, estudos de RTDS e modelagem de equipamentos para estudos transitórios. Ele é membro do Comitê de Estudos B5 brasileiro Cigré (Proteção e Automação).