

## **Estudo de caso da explosão do disjuntor de 500kV da Subestação da Margem Direita de Itaipu e consequente apagão do Sistema Elétrico Paraguayo – peculiaridades e comportamento do sistema de proteção**

**Alexandre Gonçalves Leite      Alfredo Javier Mezger Szostak      Andre Pagani Tochetto**  
**Evonyr Bordin Filho              Jose Benedito Mota Junior              Robson Almir de Oliveira**  
**Rui Jovita Godinho Correa da Silva**

**Itaipu Binacional**

**BRASIL/PARAGUAI**

### **RESUMO**

Nos últimos 20 meses, entraram em operação dois novos conjuntos autotransformadores/reguladores, T0X/R0X (26/12/2010) e T05/R05 (26.1.2012), na Subestação da Margem Direita de Itaipu (SE-MD), aumentando a sua capacidade de transformação de 1.500MVA para 2.345MVA, totalizando seis conjuntos. Consequentemente, entrou em operação os dois novos bays (disjuntor e meio), relacionados ao lado de alta tensão (500kV) e baixa tensão (220kV) dos conjuntos T0X/R0X e T05/R05.

No dia 29.1.2012 o setor de 50Hz da Usina de Itaipu operava com dois sistemas independentes (Figura 1):

- Sistema 1: Duas unidades geradoras de 700MW alimentado a ANDE através da barra A2 da SE-MD;
- Sistema 2: Sete unidades geradoras de 700MW alimentando o ELO de CC de Furnas 50Hz através das linhas IPU-FI e barra B2 da SE-MD.

Às 8h46min ocorreu o fechamento do paralelo entre estes dois sistemas através de um arco elétrico na câmara de SF6 da fase R de um disjuntor (84T05) do novo bay de 500kV da SE-MD. Tal fechamento gerou o deslocamento do centro elétrico para próximo das duas unidades do sistema eletricamente mais fraco e causou o desligamento das duas linhas de transmissão entre a Usina e a subestação SE-MD, passando a ANDE a ser alimentado durante 20 segundos pela fase R do disjuntor faltoso. Após este tempo, houve a explosão da fase R deste disjuntor seguido de um curto circuito monofásico que resultou na atuação da proteção de barra e consequente desenergização de toda a subestação. Este fato ocasionou um apagão no Sistema Elétrico Paraguayo - SIN-PY, rejeitando uma potência de 958MW, ou ainda, 86% de toda a demanda da ANDE no momento que antecede a perturbação.

Através de uma análise baseada em registros de 11 oscilógrafos, dois registradores dinâmicos, gráficos de pós-operação e registrador de eventos do sistema Scada, registros dos relés e IED e simulações no ASPEN e ATP, foi possível esclarecer a sequência de eventos e o comportamento da impedância e de outras grandezas elétricas durante o paralelismo, o que justificou a atuação do sistema de proteção por desbloqueio permissivo da linha de transmissão, até então dada como incorreta. A análise desta perturbação mostrou algumas peculiaridades interessantes que gerou recomendações para as equipes de campo e de estudo. Os detalhes desta análise serão descritos neste trabalho.

### **PALAVRAS CHAVES**

Paralelismo, explosão de disjuntor, apagão, centro elétrico, sistema de proteção, ANDE, SIN-PY.

## 1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI) é dividida em dois setores, de 50Hz e 60Hz, com 10 unidades geradoras em cada setor, totalizando uma potência instalada de 14.000MW. Atualmente, a UHI é responsável por suprir aproximadamente 17% da energia elétrica consumida no Brasil e 73% da energia elétrica consumida no Paraguai. A transmissão desta energia gerada é realizada através de quatro linhas de transmissão do setor de 60Hz que interligam a subestação blindada isolada à gás SF6 de Itaipu (SE-IPU) à subestação de Furnas (ST-FI 60Hz), situada na cidade de Foz do Iguaçu, e de seis linhas de transmissão do setor de 50Hz da UHI, sendo que duas estão interligadas diretamente com a subestação conversora de Furnas (ST-FI 50Hz), também em Foz do Iguaçu, e outras duas vão para a SE-MD, onde são seccionadas. Do barramento de 500kV da SE-MD saem mais duas linhas de interligação com a ST-FI 50Hz. Neste mesmo barramento estão conectados os seis conjuntos de autotransformadores/reguladores de 500kV/220kV que alimentam a ANDE. Estes seis conjuntos estão representados na Figura 1, por um equivalente.

No dia da perturbação, o setor de 50Hz de Itaipu operava com dois sistemas distintos, atendendo um serviço de manutenção, descritos abaixo e representados na Figura 1.

- Sistema 1: Duas unidades alimentando a ANDE através da barra A1 de 500kV da SE-IPU 50Hz, LT IPU-MD 1 e barra A2 de 500kV da SE-MD.
- Sistema 2: Sete unidades alimentando a ST-FI 50Hz através das barras A2 e B1/B2 da SE-IPU, LT IPU-MD 2, barra B2 da SE-MD e LI MD-FI 1 e 2, e pelas linhas LI IPU 50Hz FI 1 e 2.

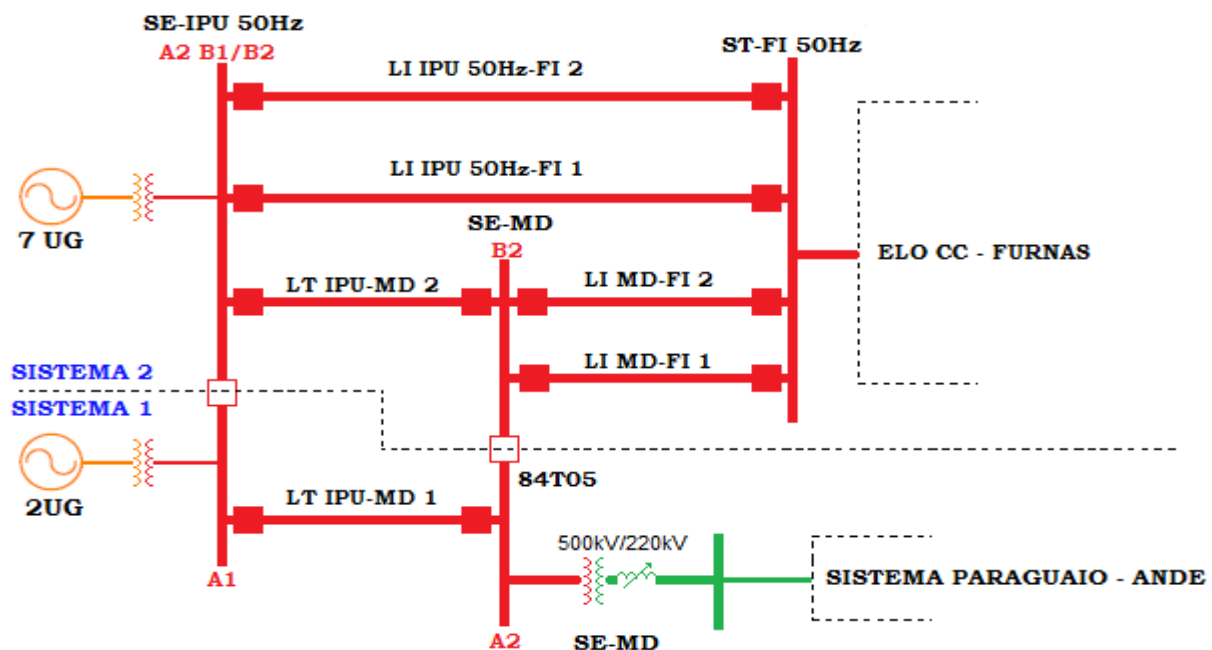


Figura 1 – Diagrama simplificado unifilar parcial do sistema de 50Hz de Itaipu – pré-perturbação.

## 2. PERTURBAÇÃO

Às 8h46min do dia 29.1.2012 ocorreu uma sequência de eventos que teve início com a abertura automática da linha LT IPU-MD 1 e terminou com a explosão do disjuntor 84T05, e consequente desenergização de toda a SE-MD.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Diante do arranjo em que se encontrava o sistema de 50Hz e da sequência de eventos mostrada nos registradores, pode-se traçar a seguinte ordem cronológica da perturbação:

- I. Desligamento da linha LT IPU-MD 1 com abertura dos disjuntores na SE-MD e na SE-IPU. Teoricamente, esse desligamento deveria implicar na interrupção do fornecimento para ANDE.
- II. Após 2,5s, aproximadamente, houve o desligamento da LT IPU-MD 2 com a abertura dos disjuntores na SE-MD e na SE-IPU.
- III. Aproximadamente 20 segundos depois, ocorreu a explosão do disjuntor 84T05 e o desligamento da barra B2 da SE-MD. Consequentemente desligaram os dois circuitos MD-FI.

### 3. ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO

Embora a configuração do sistema levasse a crer que os eventos seriam independentes, uma análise do desempenho sistêmico indicou a relação entre eles. O registrador dinâmico de perturbações da SE-IPU partiu e seus registros estão mostrados na Figura 2.

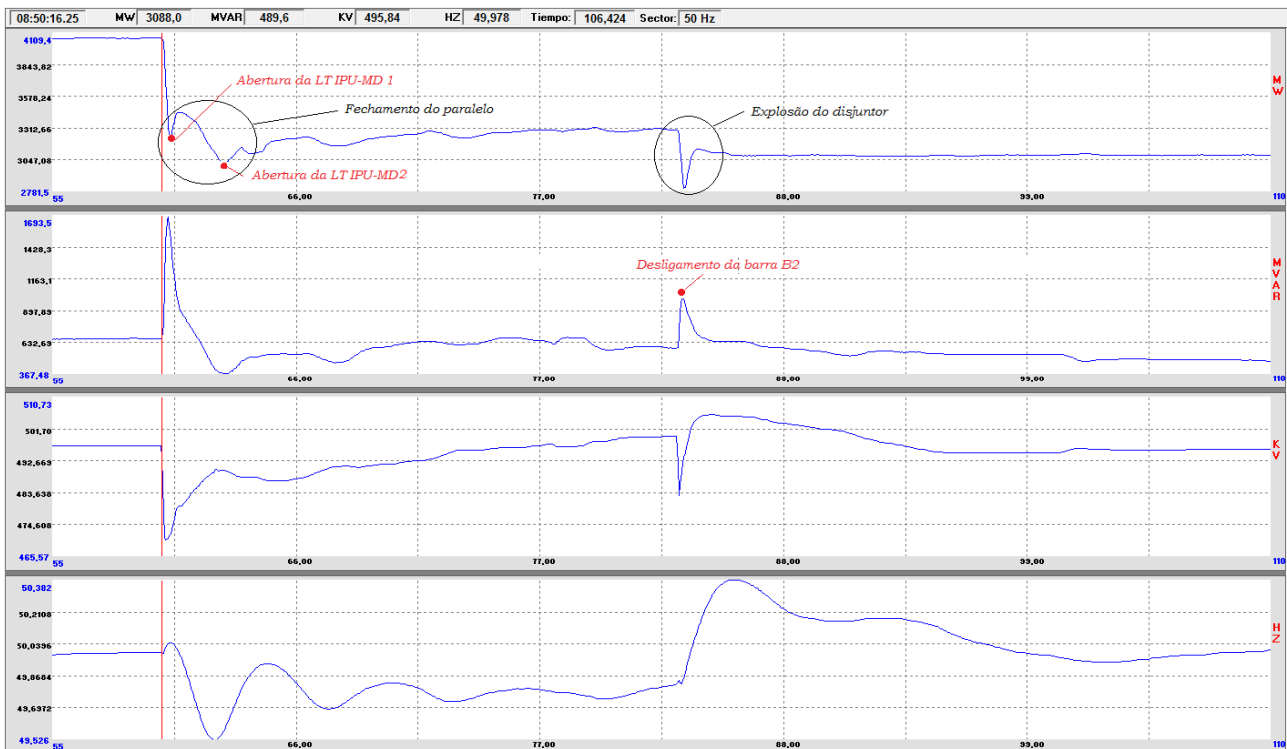


Figura 2 – Registrador Dinâmico de Perturbações da SE-IPU – setor de 50Hz.

Os registros mostram que o primeiro e o terceiro eventos descritos anteriormente apresentaram características de curto-circuito, enquanto que o segundo evento não resultou em variações significativas no sistema. A queda da frequência no primeiro evento representa o desligamento da LT IPU-MD 1 e consequente perda da geração das duas unidades que alimentavam o Sistema 1.

Além disso, foi possível identificar que as frequências medidas na SE-MD (Sistema 1) e na SE-IPU (Sistema 2), após o primeiro evento, tiveram o mesmo comportamento, o que sugere que houve o fechamento de paralelo entre os dois sistemas ou que os sistemas já estavam sincronizados antes da perturbação. No terceiro evento, em que ocorreu a explosão seguida de curto-circuito na fase R do disjuntor 84T05, ocorre o aumento da frequência relacionado à perda do intercâmbio com a ANDE. Houve afundamento momentâneo de tensão no primeiro evento.

Para facilitar a análise da perturbação, os eventos serão analisados separadamente.

### 3.1 Desligamento da linha LT IPU-MD 1 com a abertura dos disjuntores em ambos terminais

Às 8h46min24s ocorreu o desligamento da LT IPU-MD 1 por atuação da proteção de distância (21) em 1º zona no terminal da SE-MD.

Inicialmente, diante da oscilografia do registrador digital (DRF), Figura 3, aparenta-se tratar de um curto-circuito monofásico, devido a corrente da fase R das linhas LT IPU-MD 1 e LT IPU-MD 2 ter alcançado oito vezes a corrente pré-falta (1,13kA). Entretanto, as duas linhas estavam eletricamente separadas.

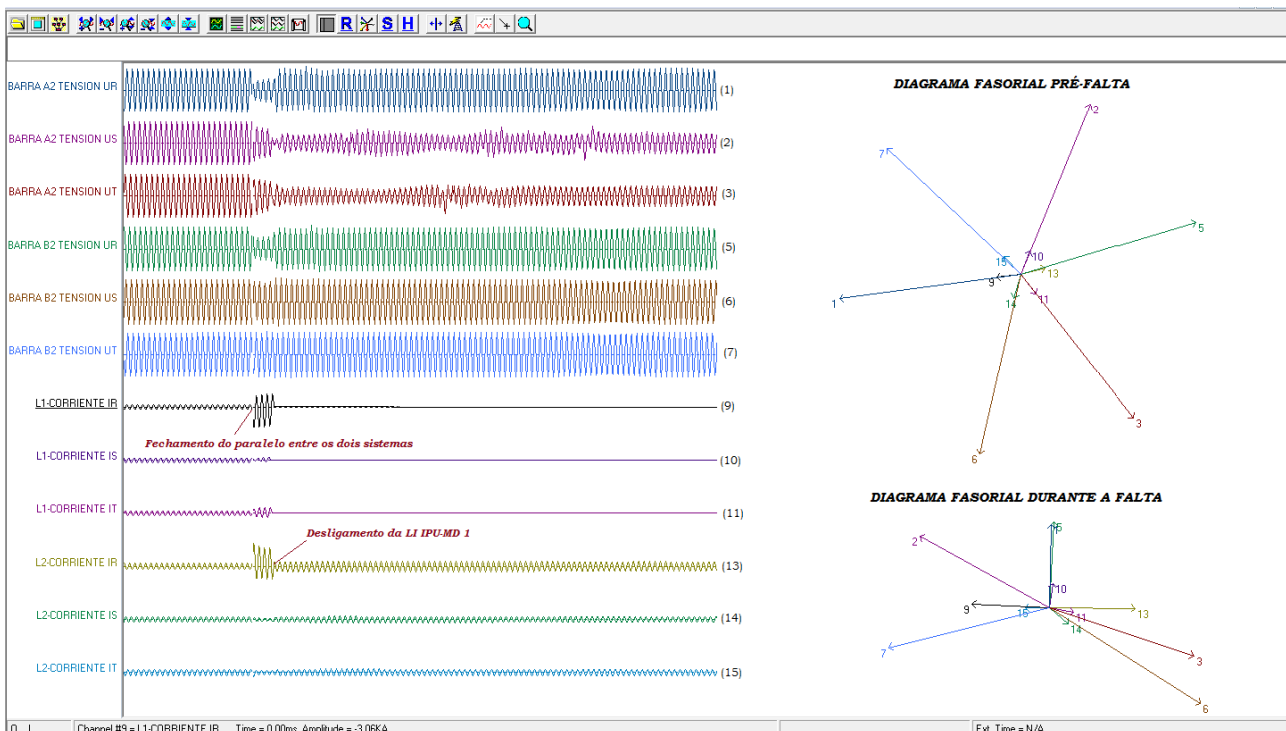


Figura 3 – Oscilografia do DFR.

Analisando os diagramas fasoriais do DFR neste primeiro evento, nota-se que no momento pré-falta as tensões dos dois sistemas – Sistema 1 e Sistema 2 - estavam defasadas de 180°, e as correntes das linhas LT IPU-MD 1 e LT IPU-MD 2 em fase com as tensões dos respectivos sistemas, ou seja, os dois sistemas não estavam sincronizados, conforme esperado. Durante a falta, as tensões das fases R das barras A2 e B2 ficam em fase e as correntes das fases R das linhas LT IPU-MD 1 e LT IPU-MD 2 defasadas de 180° entre si. Este comportamento caracteriza que o evento tido inicialmente como um curto-circuito foi na verdade um paralelismo entre as fases R dos dois sistemas. Foram realizadas simulações no ATP para o fechamento do paralelo na configuração em que o sistema se encontrava durante a perturbação e os valores encontrados foram próximos aos medidos pelos DFR, inerentes aos eventos.

Portanto, a primeira conclusão da análise foi que a origem da perturbação foi o fechamento acidental através de arco elétrico da fase R do disjuntor 84T05, causado por defeito naquele equipamento, originando o paralelismo entre os dois sistemas elétricos, já citados.

Fato relevante é que a proteção de check de sincronismo, inerente aos disjuntores, não atua para o fechamento do paralelo através de arco elétrico, como ocorreu nesta perturbação. Além disso, não existe qualquer outra proteção específica para o paralelismo sem sincronismo. No caso da perturbação analisada,

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

como não houve curto-circuito no primeiro evento, não existe a sensibilização da proteção diferencial da barra que cobre o disjuntor e nem de qualquer outra função rápida da proteção dos transformadores e linhas – teoricamente.

Entretanto, a linha LT IPU-MD 1 foi desligada em 80ms (quatro ciclos), em ambos terminais. Analisando a lógica da proteção, os registros do SOE do Scada e as proteções atuadas, pode-se assim descrever cronologicamente a atuação do sistema de proteção da LT IPU-MD 1:

- Abertura do disjuntor da SE-MD através da atuação do relé de distância em 1° e 2° zona, sendo esta última acelerada pela recepção de sinal de desbloqueio do terminal de SE-IPU, por meio da lógica de desbloqueio permissivo por sobrealcançe. Apesar de fisicamente o fechamento de paralelismo ter ocorrido “nas costas” do relé de distância na SE-MD, a sua atuação é justificada pelo comportamento da impedância durante a perturbação, que foi calculada a partir dos valores de tensão e corrente, medidos pelo DFR (Figura 4). Devido à inversão da tensão no fechamento do paralelismo, a impedância migra da zona reversa para o primeiro quadrante, provavelmente dentro da zona de atuação da função de distância, o que explicaria a atuação correta da proteção da linha no terminal da SE-MD;

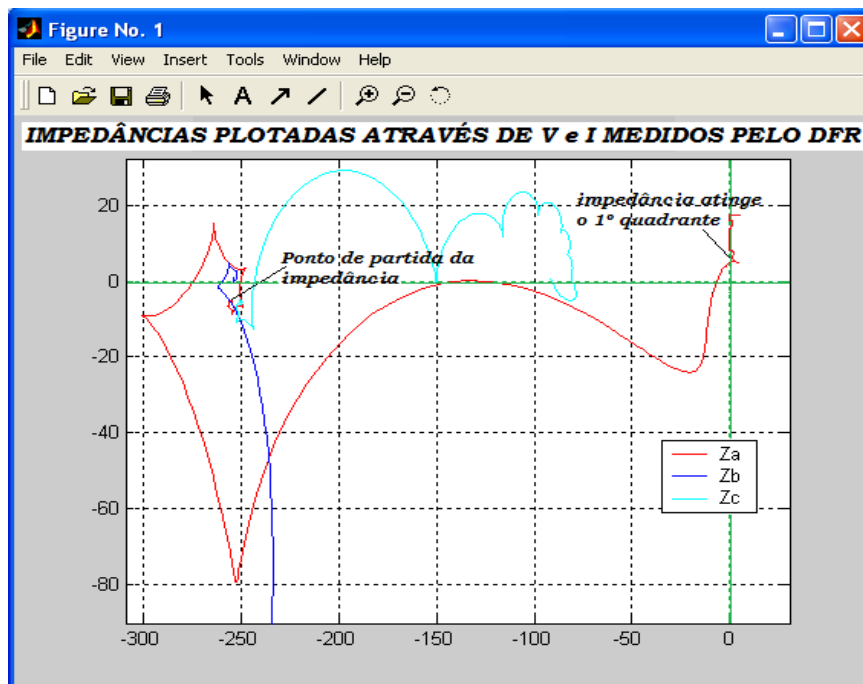


Figura 4 – Impedâncias plotadas através da V e I medidas pelo DFR.

- Desligamento da LT IPU-MD 1 na SE-IPU através da abertura do disjuntor por atuação correta da proteção por recepção de transferência de disparo (TDD).

Diante dos fatos, conclui-se que, devido ao comportamento das grandezas elétricas durante o fechamento do paralelo, a atuação da proteção da LT IPU-MD 1 foi correta em ambos terminais. Com o desligamento da LT IPU-MD 1, os dois sistemas ficaram alimentados pelas sete unidades do Sistema 2.

Portanto, para um evento com as características desta perturbação, caso não houvesse o deslocamento característico da impedância e consequente desligamento da linha LT IPU-MD 1, provavelmente haveria a atuação temporizada em dois segundos da proteção de sobrecorrente controlada por subtensão - função 21/50V – de todas as unidades, o que ocasionaria a perda de todo o setor de 50Hz da UHI, e provocaria o bloqueio do ELO de Furnas, com consequências severas para o SIN-BR. Diante da relevância dos fatos e

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

prováveis consequências, a Operação de Itaipu reavaliou as instruções e propôs que, sempre que houver necessidade de operar com unidade separada para a ANDE, recomenda-se um arranjo com as duas barras de 500kV da SE-MD, e com as duas linhas MD-FI desligadas em ambos terminais, no intuito de zerar a probabilidade de fechamento acidental de paralelo similar ao analisado.

### 3.2 Desligamento da linha LT IPU-MD 2 com a abertura dos disjuntores em ambos terminais

Às 8h46min27s ocorreu o desligamento da LT IPU-MD 2 por atuação da proteção direcional de neutro direto (67N) no terminal de Itaipu, após seu desbloqueio pelo recebimento do sinal do canal 1 da SE-MD, que ocorreu 2s491ms depois do fechamento do paralelo. Consequentemente, houve o envio de sinal de TDD para o terminal da SE-MD, acarretando na abertura do disjuntor.

Não houve atuação das proteções de distância (21) ou direcional de neutro direto (67N) na SE-MD que justificasse o envio de sinal de desbloqueio para o terminal de Itaipu. Portanto, é fato que a atuação da proteção da LT IPU-MD 2 foi incorreta. O sistema de proteção desta linha está sendo substituída por IED.

Após o desligamento das linhas LT IPU-MD 1 e LT IPU-MD 2, a barra B2 de 500kV da SE-MD ficou alimentada via SE-FI pelas linhas LI 500kV MD-FI 1 e LI 500kV MD-FI 2. Como a fase R do disjuntor 84T05 estava fechada, a ANDE ficou alimentada por esta fase através da barra A2 de 500kV da SE-MD.

### 3.3 Desligamento dos dois circuitos MD-FI com a abertura dos disjuntores na SE-MD e na SE-FI

Às 8h46min47s houve a explosão, seguido de curto-circuito (Figura 5), na fase R do disjuntor 84T05. Proveniente deste curto, houve a atuação correta da função diferencial da proteção da barra B2 de 500kV da SE-MD, que comandou a abertura de todos os disjuntores de alimentação da barra e determinou o desligamento das linhas LI 500kV MD-FI 1 e LI 500kV MD-FI 2, devido a configuração operacional naquele momento, desenergizando por completo o setor de 500kV da subestação. A abertura dos disjuntores referentes às linhas LI 500kV MD-FI 1 e LI 500kV MD-FI 2, na SE-FI, ocorreu provavelmente pelo esquema de ECO.

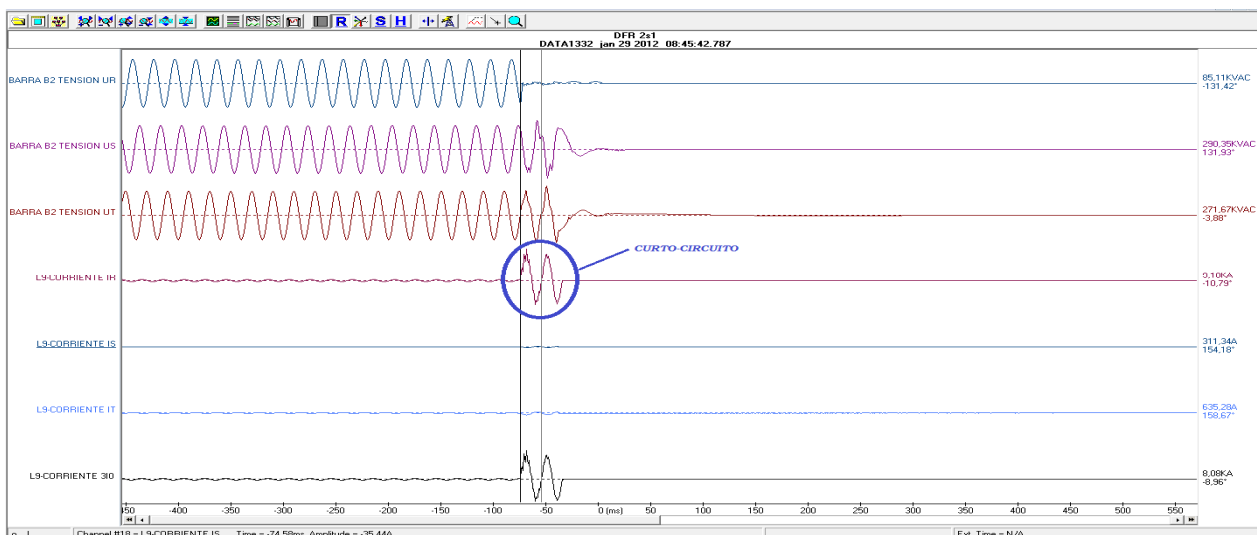


Figura 5 – Oscilografia do DFR.

### 3.4 Causa do defeito no disjuntor 84T05

O disjuntor 84T05 é formado por dois conjuntos em série, cada um deles composto de câmara de extinção, capacitor de equalização e resistor de pré-inserção (Figura 6). O fechamento do disjuntor é inicialmente

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

realizado pelos resistores de pré-inserção, sendo que decorridos 10ms, ocorre o fechamento das câmaras de extinção, por onde permanece o fluxo de corrente. A abertura do disjuntor descerra-se simultaneamente os contatos principais nas câmaras de extinção e os contatos dos resistores de pré-inserção.

Segundo o fabricante [2], as investigações da falha mostraram que durante a abertura do disjuntor, horas antes do evento, não houve o descerramento do contato de um dos resistores de pré-inserção, mantendo a diferença de tensão entre os terminais de apenas uma câmara de extinção. De acordo com as informações de placa, o disjuntor seria capaz de suportar uma diferença de potencial (ddp) de 860kV entre os terminais das duas câmaras (bi-câmara), ou seja, aproximadamente 3pu na base de 500kV. Entretanto, a tensão no momento anterior ao fechamento do arco chegou a 572kV, ou ainda, 2pu. Acontece que como o resistor permaneceu fechado, esta ddp estava entre os terminais de apenas uma câmara de extinção, que suportaria até 1,5pu. Neste momento sucedeu o arco elétrico, dando início ao fechamento do paralelo através da passagem de corrente pelo resistor de pré-inserção e a câmara de extinção, representado pela linha vermelha na Figura 6.

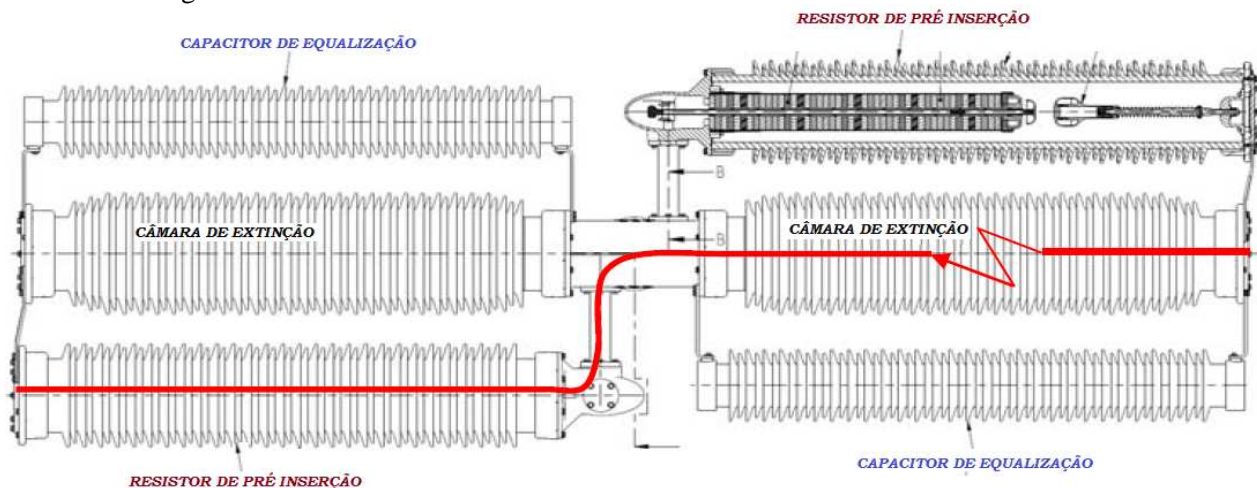


Figura 6 – Diagrama ilustrativo do disjuntor 84T05 [2].

O arco persistiu por 20 segundos e devido a ionização e aumento de temperatura e pressão, acarretou na explosão da câmara de extinção. Como consequência houve as explosões secundárias dos capacitores de equalização e dos resistores de pré-inserção, conforme mostra a foto retirada da fase R do disjuntor 84T05 logo após a sua explosão, ilustrada na Figura 7.



Figura 7 – Foto da fase R do disjuntor 84T05 após explosão.

**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

---

Ao cair, o condutor da fase tocou no sistema de aterramento do pórtico, fechando o curto-circuito fase-terra. Ainda segundo o fabricante, o problema na haste do resistor de pré-inserção foi causado por uma falha humana durante o processo de fabricação do equipamento.

#### 4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

- A perturbação teve início com o fechamento acidental do paralelo entre os sistemas ANDE e Furnas 50Hz, através da fase R do disjuntor 84T05 que resultou na sua explosão seguido de um curto-circuito e consequente blackout no sistema da ANDE atendido por Itaipu. Esse fechamento acidental aconteceu por defeito no resistor de inserção do próprio disjuntor, causado por uma falha humana durante a sua fabricação.
- Apesar da elevada corrente no momento do fechamento do paralelo, não houve curto-circuito e, portanto, não houve sensibilização da proteção diferencial da barra e nem de qualquer outra função rápida da proteção dos transformadores e linhas. A elevada corrente associada ao aparecimento do centro elétrico (tensão baixa) levou a impedância a comportar-se como se tivesse havido um curto-circuito, levando ao desligamento da linha LT IPU-MD 1. Caso isto não ocorresse, o paralelismo só seria desfeito, provavelmente, pela atuação temporizada em dois segundos da proteção de sobrecorrente controlada por subtensão - função 21/50V - das unidades geradoras, o que acarretaria na perda de todo o setor de 50Hz da UHI e consequente bloqueio do ELO de Furnas. Diante deste fato, a Operação da UHI providenciou mudanças nas Instruções de Operação, no intuito de se evitar a reincidência desse evento.
- As grandes perturbações são fontes de peculiaridades às vezes não previstas nas simulações e nos estudos de ajustes das proteções. As grandezas elétricas durante os transitórios nem sempre seguem um padrão e apresentam comportamentos inesperados. Portanto, a análise minuciosa destes eventos tem se mostrado uma ferramenta importante na identificação de pontos de melhorias, e em Itaipu tem gerado inúmeras solicitações que agregam valores aos procedimentos e equipamentos. Somente no relatório que analisou esta perturbação (RAP) foram oito providências requeridas e/ou tomadas, num contínuo processo de conservação e melhoramento.
- A usina de Itaipu deixou de gerar 618MWh em função desta perturbação, o que corresponderia ficar 2min39s com toda a Usina (14.000MW) desligada, classificando-a como sendo de Grau 1 (Não grave), de acordo com o Sistema Minuto. Para efeito de comparação, se fosse tomada a capacidade nominal da transformação 500/220kV da SE-MD, 2.345MVA, esta perturbação corresponderia a uma interrupção total do intercâmbio Itaipu/ANDE durante 15min49s, o que a classificaria portanto como Grau 2 (Grave).

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] - ASEA, Distance relay type RAZFE, Info nº RK 613-300 E, BR, 5º edição, julho de 1981.
- [2] - ABB, Analysis of information regarding failure with circuit-breaker HPL 550TB2 in Margin Direita substation, Itaipu. 2012.
- [3] - Dommel, Hermann W.. Electromagnetic Transients Program, Reference Manual, USA, August 1986.
- [4] - Advanced Systems for Power Engineering, INC. ASPEN OneLiner Version 9, User's Manual.