



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

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

#### **GRUPO IV**

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

#### **AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ELOS EM CORRENTE CONTÍNUA COM MÚLTIPLOS CONVERSORES CCAT PRÓXIMOS**

**Antônio Ricardo Carvalho \***

**Leonardo Pinto Almeida**

**Luciano Oliveira Daniel**

**Wo Wei Ping**

**CEPEL**

#### **RESUMO**

Este trabalho apresenta aspectos associados à operação conjunta de mais de um elo de transmissão CCAT, e a influência da distância elétrica entre seus conversores (Múltiplas Alimentações CCAT).

Serão apresentadas simulações focando este aspecto, algumas delas realizadas ainda durante a fase de planejamento da transmissão do AHE Madeira. Serão destacadas eventuais interações entre os elos CCAT dos sistemas de transmissão da UHE Itaipu e do AHE Madeira.

Será apresentado um índice que, como o *Short Circuit Ratio*, procura dar uma idéia da robustez do sistema CA frente à injeção de potência por troncos CC num arranjo com múltiplas alimentações.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Transmissão em Corrente Contínua, Múltiplas Alimentações em CCAT, Interações entre Controles.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A principal motivação deste trabalho reside na configuração futura do Sistema Interligado Nacional. O sistema de transmissão associado ao aproveitamento hidrelétrico (AHE) do rio Madeira (UHE Jirau e UHE Santo Antônio) incorpora um tronco em corrente contínua, composto por dois bipolos de 3150 MW cada, nas tensões de  $\pm 600$  kV, desde Porto Velho até o estado de São Paulo, em uma nova subestação de 500 kV em Araraquara. Considerando-se a existência dos dois bipolos CCAT associados à UHE Itaipu, cujas estações inversoras localizam-se em Ibiúna, esta topologia resulta numa configuração com múltiplas alimentações CC situadas eletricamente próximas (conhecida também como *DC Multi-infeed*).

Tendo em vista que esta é uma característica sistêmica não experimentada anteriormente no Brasil, decidiu-se estudar com mais detalhes as conseqüências de uma operação desta natureza, procurando-se identificar os fenômenos que poderão ser experimentados e suas causas. O sistema CC associado à UHE Itaipu não deixa de ser um caso de múltiplas alimentações, com os terminais inversores dos dois bipolos conectados no mesmo barramento CA. No entanto, como ambos são exatamente iguais, inclusive do ponto de vista do sistema de controle, comportam-se como um único elo.

Segundo esta ótica, o próprio tronco CC do AHE Madeira também poderia ser assim classificado. É importante salientar que quando da execução dos estudos aqui apresentados, não se considerou a hipótese de elos CCAT com diferentes fabricantes para o AHE Madeira, embora isto fosse uma hipótese viável em função das características do leilão do empreendimento. Adicionalmente, não se conhecia a priori as filosofias de controle a serem empregadas. Como conseqüência do resultado do leilão, possivelmente diferentes filosofias serão

utilizadas, realmente configurando neste caso, uma múltipla alimentação CC na qual a distância elétrica entre os dois inversores é nula. Portanto, os resultados do presente trabalho não podem ser considerados quantitativamente, mas somente do ponto de vista qualitativo.

Por outro lado, eventuais interações entre os dois bipolos do AHE Madeira, e entre eles e o Back-to-Back de Porto Velho, terão que ser tratadas no âmbito deste projeto. Restaria saber se interações entre este novo sistema de transmissão e o elo CC de Itaipu são passíveis de ocorrer, o que será preliminarmente avaliado neste artigo.

O SCR (*Short Circuit Ratio*) é um índice de cálculo bastante simples, e para um elo CCAT único, permite que previamente se obtenha uma valiosa informação quanto à robustez do sistema CA frente ao montante de potência injetada pelo tronco CC e, conseqüentemente, uma boa sensibilidade quanto à gama de problemas que se pode esperar quando de perturbações no sistema como um todo. Uma questão que sempre foi levantada diz respeito à eficácia da aplicação deste índice, como originalmente concebido, a sistemas com múltiplas alimentações CC, principalmente porque ele não incorpora o potencial de interação entre os conversores, quando localizados eletricamente próximos. O problema foi inicialmente levantado em um projeto conjunto CEPEL-Universidade de Wisconsin-EPRI [1], e mais recentemente, em Abril de 2008 o WG B4-41 (*Systems with Multiple DC Infeed*) da CIGRÉ [2], propôs um novo índice que procura considerar o mencionado efeito.

Serão apresentados os resultados dos primeiros cálculos deste novo índice, aplicado aos dois maiores elos CCAT do Brasil, bem como os resultados de simulações, onde se procurou identificar o potencial de interação de um elo sobre o outro, e a coerência com os novos índices então calculados.

## 2.0 - ÍNDICES PREDITIVOS DE DESEMPENHO

### 2.1 As Relações de Curto Circuito (*Short Circuit Ratio* – SCR e *Effective Short Circuit Ratio* – ESCR)

A expectativa quanto ao desempenho dinâmico de um sistema de transmissão em corrente contínua pode ser previamente avaliada com base num índice denominado *Short Circuit Ratio* (SCR), cujo cálculo está indicado na Eq. (1). Este índice corresponde à divisão da potência de curto circuito na barra de comutação, onde o conversor está conectado, pela potência CC injetada na (ou drenada da) rede CA.

$$SCR_i = \frac{P_{cc_i}}{P_{dc_i}} \quad (1)$$

Sua principal vantagem é a simplicidade envolvida no seu cálculo e na razoável confiabilidade quanto à indicação da robustez do sistema CA. Em geral, considerando-se que estes montantes são aproximados, valores superiores a 3 indicam a expectativa de bom desempenho. Valores entre 2,5 e 3 indicam a possibilidade de dificuldades, durante a recuperação de defeitos, por exemplo, enquanto que se o SCR for inferior a 2,5 há uma probabilidade considerável de se experimentar problemas de maior magnitude.

Um outro índice também utilizado é o *Effective Short Circuit Ratio* (ESCR), cuja única diferença para o SCR é que se desconta o montante de filtros CA da potência de curto circuito.

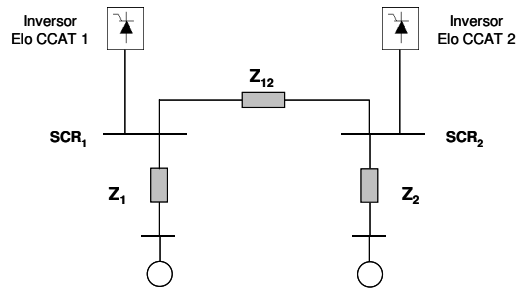
### 2.2 O Efeito do Acoplamento entre os Conversores

A Figura 1 ilustra um sistema composto por dois elos CCAT com os terminais inversores localizados eletricamente próximos. A impedância de transferência  $Z_{12}$  representa o acoplamento elétrico entre os conversores e, conjuntamente com as impedâncias próprias  $Z_1$  e  $Z_2$ , estabelecem as potências de curto circuito nos dois terminais e, conseqüentemente, os valores de SCR.

Por simplicidade, assumindo-se elos CC de tamanhos similares, é razoável imaginar que: se  $Z_{12}$  possuir um valor pequeno, a influência de um elo sobre o comportamento do outro tende ser significativa ou seja, pode-se esperar uma forte interação entre ambos; a princípio, se ambos os SCR são bastante elevados, a influência de cada elo CC no desempenho dinâmico do segundo tende ser menor (caso limite, com SCR infinito).

No caso dos elos CCAT associados à UHE Itaipu e ao futuro AHE Madeira, as relações de curto circuito máximas previstas para o ano 2014, com configuração de rede completa, estão destacadas na Tabela 1. Como se pode observar, estes valores são expressivos, porém não extremamente elevados.

Na primeira linha desta mesma Tabela são apresentadas as impedâncias equivalentes para o circuito da Figura 1, considerando-se o acoplamento elétrico previsto, que corresponde à impedância de uma linha de transmissão de 500 kV com 120 km de comprimento, aproximadamente. Duas alternativas foram geradas, alterando-se o acoplamento elétrico entre ambos os terminais, porém preservando-se os valores de SCR. Na Alternativa #1 este acoplamento foi extremamente reduzido, e na segunda, o mesmo foi bastante aumentado.



**Figura 1 – Configuração simplificada com Múltiplas Alimentações CCAT**

Como mencionado, as três situações resultam nos mesmos valores de SCR em cada terminal inversor. Entretanto, é razoável se esperar desempenhos dinâmicos diferentes para cada situação, apesar deste índice ter sido mantido inalterado. Na Alternativa #1 pode-se esperar uma interação bastante reduzida, em função da elevada impedância de transferência. Por outro lado, na Alternativa #2, os elos CCAT possivelmente experimentarão significativas interações. Em resumo, cada Alternativa apontada provavelmente possuirá desempenho diferente das demais, apesar de possuírem os mesmos valores de SCR em cada terminal.

**Tabela 1 – Alternativas de configurações com Múltiplas Alimentações CCAT**

	Elo CCAT – AHE Madeira SCR <sub>1</sub> = 4.63 (26,400 MVA)	Elo CCAT - UHE Itaipu SCR <sub>2</sub> = 3.95 (23,700 MVA)	
Acoplamento entre os inversores	Z <sub>1</sub> (%)	Z <sub>2</sub> (%)	Z <sub>12</sub> (%)
Como planejado	0.4558	0.5349	1.61
Alternativa #1 <i>Quase desacoplados</i>	0.3795	0.4231	161.0
Alternativa #2 <i>Altamente acoplados</i>	0.5550	1.0300	0.161

### 2.3 O Fator de Interação e a Relação Efetiva de Curto-circuito com Múltiplas Alimentações (Multi Infeed Interaction Factor – MIIF e Multi infeed Interactive ESCR – MIESCR)

A análise anterior sugere que o índice SCR não é uma medição adequada para sistemas com Múltiplas Alimentações CCAT, na medida em que não considera a influência do acoplamento elétrico entre os conversores. Este problema foi inicialmente levantado em um projeto conjunto CEPEL-Universidade de Wisconsin-EPRI [1], e mais recentemente, o WG B4-41 (*Systems with Multiple DC Infeed*) da CIGRÉ passou a estudar o assunto.

Como fruto deste trabalho, o WG propôs um novo índice que procura considerar o efeito do acoplamento elétrico entre os conversores, denominado MIIF (*Multi Infeed Interaction Factor*). Este índice baseia-se no fato de que a tensão na barra de comutação é o parâmetro da rede CA mais representativo da interação entre esta rede e o sistema CC. No caso extremo, se fosse possível manter esta tensão inalterada (barra infinita, SCR infinito), o sistema CC não seria afetado por qualquer mudança na rede CA.

Cabe destacar que não é propósito do presente trabalho fazer uma defesa explícita dos índices propostos, mas fornecer subsídios para contribuir na avaliação da sua real aplicabilidade. Como caso teste, será avaliada a futura configuração do sistema brasileiro com a presença dos elos CCAT da UHE Itaipu e do AHE Madeira, empregando-se os dados e informações então disponíveis na época da sua execução.

O MIIF é calculado na forma de um índice de sensibilidade, que relaciona variações de tensão nas barras de comutação de dois conversores. Em outras palavras, o MIIF estabelece uma relação entre a variação da tensão observada na barra de comutação de um conversor, frente à imposição de uma variação de 1% desta grandeza na barra CA do segundo, através do chaveamento de um elemento shunt, como apresentado na Eq. (2). Se dois conversores estão eletricamente desacoplados, nenhuma variação de tensão no terminal 2 será sentida em função de uma variação imposta no terminal 1 e, portanto, o MIIF será nulo. De forma similar, se os dois conversores estão conectados na mesma barra, o MIIF será igual a 1.

$$MIIF_{2,1} = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \quad (2)$$

Na medida em que o MIIF depende não somente da impedância de acoplamento entre os conversores, mas também da potência de curto circuito em cada barra de comutação, poderá existir um índice  $MIIF_{1,2}$ , relativo ao outro terminal conversor, com valor diferente daquele apresentado na Eq. (1).

Uma vez definido o Fator de Interação para um sistema com múltiplas alimentações, recorrendo-se à Figura 1, é razoável pensar-se que, variações de tensão originadas nas proximidades da barra CA de um conversor (#1, por exemplo), também causarão desvios de tensão na barra de comutação do conversor #2, as quais resultarão em uma reação do elo CC associado. Em função da potência deste conversor e do MIIF, poderá existir alguma interação no desempenho do primeiro. Assim, se o produto  $MIIF_{2,1} \times P_{dc2}$  for comparado com a potência  $P_{dc1}$  pode-se inferir a influência do conversor #2 sobre o primeiro. Com base nesta relação estabeleceu-se que:

- Para valores menores que 15%: a chance de interação é pequena;
- Para valores entre 15% e 40%: há um potencial moderado de interação;
- Valores maiores que 40% indicam um alto potencial de interação.

O WG B4-41, frente aos resultados desta comparação estabeleceu que:

*Um elo CCAT de tamanho razoável influencia um elo menor, mesmo que o primeiro não esteja muito próximo eletricamente deste último. Um elo CCAT pequeno tem pouco influência sobre um elo de elevada potência, mesmo que estejam proximamente localizados.*

Já foi visto anteriormente que o SCR, no caso de múltiplas alimentações, precisa ser considerado com reservas, conforme demonstrado nos exemplos da Tabela 1. Com isto, ficaria uma questão a ser elucidada: Se a potência de curto circuito nos terminais aumentar (e conseqüentemente, levando ao aumento dos SCRs individualizados também), a influência de um elo sobre o outro tenderia a diminuir ?

Para tentar responder esta pergunta, pode-se refazê-la da seguinte forma: Assumindo-se as mesmas potências CC, ao se reduzir  $Z_1$  (o que, de fato, promove o aumento da potência de curto circuito, e do SCR, em ambos os terminais), os índices  $MIIF_{ij}$  também se reduzem ?

Observando-se a definição do índice  $MIIF_{1,2}$ , verifica-se que para a mesma variação de tensão imposta à barra do conversor #2 ( $\Delta V_2$ ), o desvio  $\Delta V_1$  será menor, frente o aumento da potência de curto circuito na barra de comutação associada ao conversor #1 e, portanto,  $MIIF_{1,2}$  também será reduzido. Em outras palavras, impactos de mesma magnitude nas proximidades do conversor #2 levarão a uma influência menor do conversor #1 sobre o segundo, na medida em que o  $SCR_1$  aumenta.

Assim sendo, como as potências de curto circuito aumentaram em ambos os terminais, este mesmo raciocínio seria válido para impactos nas proximidades do conversor #1 e a influência do conversor #2 sobre ele. No entanto, pela definição de  $MIIF_{2,1}$ , como  $\Delta V_1$  continuaria sendo 1%, e  $Z_{1,2}$  e  $Z_2$  não se alteraram, este índice não se modificaria.

Resumindo, fazendo-se uso da Figura 1 pode-se dizer que para um caso extremo, como destacado abaixo:

- Se  $Z_1$  for muito pequeno:  $SCR_1$  será muito elevado  
 $SCR_2$  aumentará, mas depende dos valores de  $Z_{1,2}$  e  $Z_2$   
 $MIIF_{1,2}$  tenderá a zero  
 $MIIF_{2,1}$  ficará inalterado, pois  $\Delta V_1$  continuaria sendo 1%, e  $Z_{1,2}$ ,  $Z_2$  não se alteraram

Portanto, quanto à interação entre os elos CCAT:

- distúrbios nas proximidades da barra de comutação do elo 2:  
 $MIIF_{1,2} \times P_{dc1}$  tenderá a zero: qualquer que seja a potência do elo 1, este não influenciará o elo 2.
- distúrbios nas proximidades da barra de comutação do elo 1:  
 $MIIF_{2,1} \times P_{dc2}$  permanecerá inalterado: se  $P_{dc2}$  for pequeno frente  $P_{dc1}$ , a sua influência será pequena sobre o elo 1.  
 se  $P_{dc2}$  for comparável ou maior que  $P_{dc1}$ , o seu grau de influência será função de  $MIIF_{2,1}$ .

A discussão anterior tratou apenas da redução de  $Z_1$ , mas a diminuição de  $Z_{1,2}$  também aumentaria ambos os SCRs, e neste caso, claramente as interações tenderiam a ser mais acentuadas, pois os índices MIIFs aumentariam.

Portanto, por ser esta uma avaliação um tanto complexa, o WG B4-41 sugeriu que, na definição do ESCR (ou SCR), seria necessário incorporar-se uma parcela relativa à contribuição dos demais elos CCAT, no cálculo

associado a cada elo individualmente, quando de uma configuração com múltiplas alimentações. Assim, chegou-se à conclusão que um novo índice ESCR poderia ser obtido considerando-se a potência CC total dos elos envolvidos, mas assumindo-se uma ponderação com base nos indicadores MIIF, resultando no MIESCR (*Multi infeed Interactive ESCR*), conforme mostra a Eq. (3).

$$\text{MIESCR}_i = \frac{(\text{Pcc}_i - \text{Qf}_i)}{(\text{Pdc}_i + \text{MIIF}_{j,i} \times \text{Pdc}_j)} \quad (3)$$

### 3.0 - CÁLCULO DOS ÍNDICES PARA O SISTEMA BRASILEIRO

Os índices então definidos pelo WG B4-41 foram calculados para o sistema brasileiro, conforme planejado com a presença do elo CCAT do AHE Madeira. Considerou-se um despacho pleno, em torno de 6000 MW nos inversores, para fins do cálculo dos MIIFs. Os resultados encontrados são apresentados a seguir:

$$\text{MIIF}_{i,m} = \frac{\Delta V_{\text{itaipu}}}{\Delta V_{\text{madeira}}} = 0,446 \qquad \text{MIIF}_{m,i} = \frac{\Delta V_{\text{madeira}}}{\Delta V_{\text{itaipu}}} = 0,445$$

Como se pode observar, ambos os índices são muito próximos, podendo isto ser justificado pelo fato dos dois elos CC possuírem praticamente a mesma dimensão, e além disso, as potências de curto circuito nas barras de comutação de ambos os terminais inversores serem muito próximas. Conforme estabelecido pelo WG B4-41 e anteriormente apresentado, verifica-se que os MIIFs situam-se numa fronteira, podendo-se esperar algum grau de interação entre os elos CC.

A Tabela 2 apresenta o ECSR e o MIESCR para cada um dos dois elos CC. Pode-se verificar que, em comparação com o ESCR original, o índice MIESCR apresentou uma redução importante. Entretanto, ele continua num nível suficiente para se esperar uma performance dinâmica razoável durante a recuperação após defeitos.

Tabela 2 – ESCRs e MIESCRs

Sistema CCAT	P <sub>dc</sub>	ESCR	P <sub>dci</sub> + Σ MIIF <sub>j,i</sub> x Pdc <sub>j</sub>	MIESCR
Madeira	6000	3.90	6000 + (0.446 x 6000)	2.70
Itaipu	6000	3.45	6000 + (0.445 x 6000)	2.39

### 4.0 - SIMULAÇÕES CONSIDERANDO MÚLTIPLAS ALIMENTAÇÕES

De forma a ilustrar a eventual influência de cada elo CCAT no desempenho dinâmico do segundo, foram realizadas algumas simulações, onde se procurou explorar esta questão. O estudo foi feito com o programa de estabilidade eletromecânica ANATEM, do CEPEL, e de transitórios eletromagnéticos ATP. Em ambas ferramentas, os sistemas de controle dos dois bipolos do elo CC associado ao AHE Madeira foram detalhadamente representados, com base na mesma filosofia de controle do tronco CC associado à UHE Itaipu.

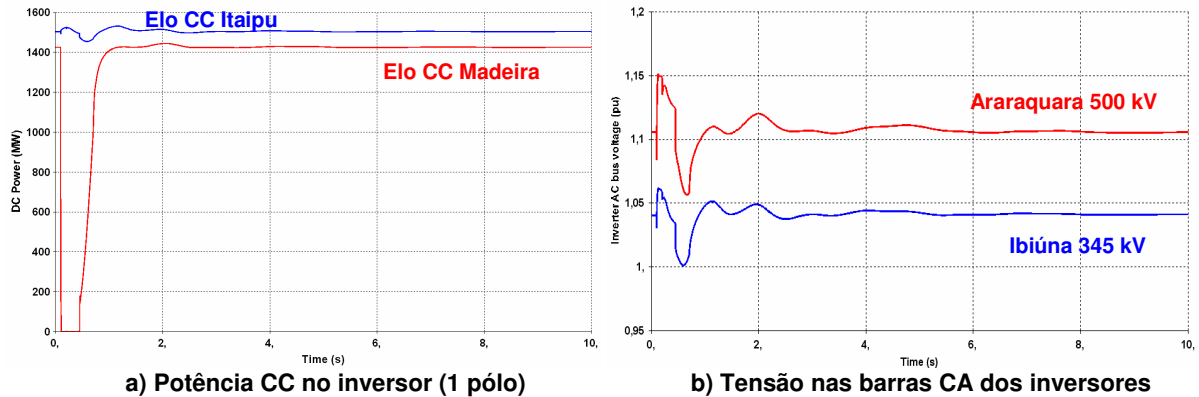
#### 4.1 Simulações com o programa ANATEM

As avaliações de estabilidade eletromecânica foram realizadas considerando um cenário de carga pesada, com condição hidrológica favorável nas usinas do AHE Madeira. Portanto, os níveis de curto-circuito se aproximam daqueles apontados anteriormente.

Como uma primeira etapa de investigações, procurou-se analisar o comportamento de cada elo frente defeitos internos no outro. Para tanto, foram aplicados defeitos pólo-terra em cada tronco, bem como avaliado o efeito do bloqueio de um pólo. Na Figura 2 estão apresentados os resultados para o defeito no elo CC do AHE Madeira, e na Figura 3 os resultados para o defeito CC no tronco da UHE Itaipu. Estas primeiras simulações mostram que distúrbios internos a cada elo não causam impactos significativos no outro elo, como pode ser verificado pela potência CC transmitida. As tensões CA nas barras de comutação apresentam um comportamento similar, tanto qualitativa como quantitativamente, indicando que realmente existe uma proximidade elétrica que não pode ser desprezada, confirmando a informação derivada dos índices MIIF.

Em seqüência procurou-se explorar um pouco mais a possibilidade de interação entre os dois elos CCAT, à luz de defeitos na rede CA que interliga seus terminais inversores. Aplicou-se um defeito monofásico por 100 ms na barra de Campinas 500 kV, a qual estaria localizada aproximadamente a meio caminho dos inversores. Escolheu-se esta contingência, pois a mesma afeta sensivelmente ambos os elos CC, alterando sobremaneira o fluxo de potência pelos bipolos, impondo um processo de recuperação conjunto até a potência plena, após a extinção do defeito. A Figura 4 ilustra a potência CC transmitida por cada elo, e as tensões nas respectivas barras de comutação nos terminais inversores. Observa-se que ambos os elos recuperam-se sem maiores problemas, e

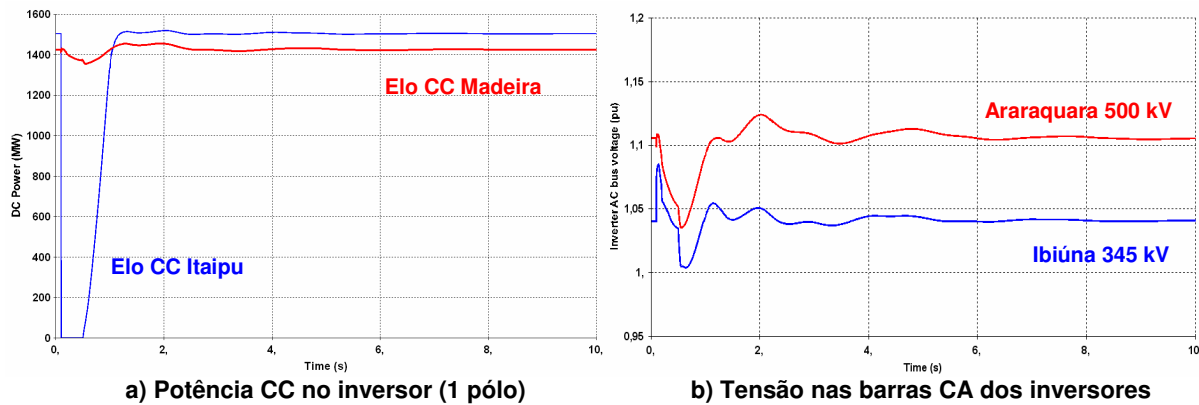
apesar da sensível redução da potência CC, o Sistema Interligado mantém sua integridade. Mais uma vez, as tensões nas barras de comutação apresentam comportamento bastante similar.



a) Potência CC no inversor (1 pólo)

b) Tensão nas barras CA dos inversores

Figura 2 – Aplicação de defeito pólo-terra no elo CC do AHE Madeira

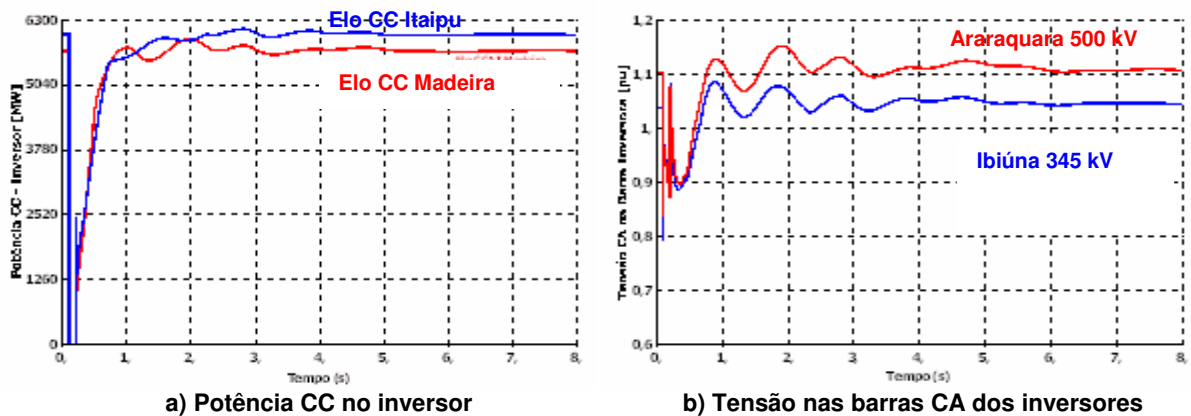


a) Potência CC no inversor (1 pólo)

b) Tensão nas barras CA dos inversores

Figura 3 – Aplicação de defeito pólo-terra no elo CC da UHE Itaipu

Esta simulação mostra claramente que existem distúrbios que poderão afetar significativamente ambos os elos. Um outro ponto importante a se destacar é que, como o comportamento das tensões nas barras de comutação são bastante parecidos, é razoável imaginar que há uma probabilidade considerável de ocorrer falhas de comutação simultâneas em ambos os elos CC. De fato, considerando-se o modelo empírico de falha de comutação presente no programa ANATEM, verificou-se que isto ocorreria para o defeito simulado. Do ponto de vista de desempenho dinâmico, como também pode ser verificado, isto não trouxe maiores conseqüências para o sistema como um todo, uma vez que tais falhas não foram repetitivas.



a) Potência CC no inversor

b) Tensão nas barras CA dos inversores

Figura 4 – Aplicação de defeito monofásico na barra Campinas 500 kV

Entretanto, a possibilidade de ocorrência de falhas de comutação simultâneas deverá ser objeto de avaliação mais detalhada em ferramentas de transitórios eletromagnéticos, mais adequadas para este tipo de verificação. As avaliações de estabilidade visaram verificar a capacidade de absorção pelo sistema da falta simultânea de injeção de potência pelos dois elos CC, durante este evento.

## 4.2 Simulações com o programa ATP

Uma vez que o interesse maior das avaliações está voltado para a possibilidade de interação entre os elos CC, foi feita uma análise comparativa do desempenho de cada tronco, para diferentes modelagens do elo CC remoto. Inicialmente assumiu-se os modelos completos para ambos os troncos CC e foram realizadas simulações de defeitos na rede CA receptora. Substituiu-se o modelo detalhado de um dos elos CCAT por uma representação através de uma injeção de corrente constante, tanto para a parte ativa como para a reativa, promovendo-se desta forma uma alteração no seu comportamento dinâmico. O objetivo deste procedimento foi verificar se a imposição de um desempenho dinâmico diferente para este elo, frente a mesma contingência na rede CA, seria capaz de modificar sensivelmente a recuperação do elo que continuamente representado pelo seu modelo detalhado, inferindo-se assim o grau de influência de um elo sobre o outro. Se o acoplamento elétrico entre eles fosse reduzido, seria razoável esperar que este procedimento não conduzisse a alterações significativas de desempenho.

Para efeito da representação da rede CA receptora, utilizou-se um equivalente bastante elaborado, compreendendo 170 barras, empregado num projeto de pesquisa realizado para a Eletrobrás, posteriormente aos trabalhos da CPTA (*Comissão de Planejamento da Transmissão da Amazônia*). Este projeto visava avaliar o efeito da chegada de um elo CC proveniente da região Amazônica no Sistema Sudeste, em diferentes pontos da rede. Preservou-se diversos barramentos e linhas de transmissão, configurando uma região de interesse (rede interna), e inseriu-se equivalentes calculados na frequência fundamental em barras mais distantes (fronteira).

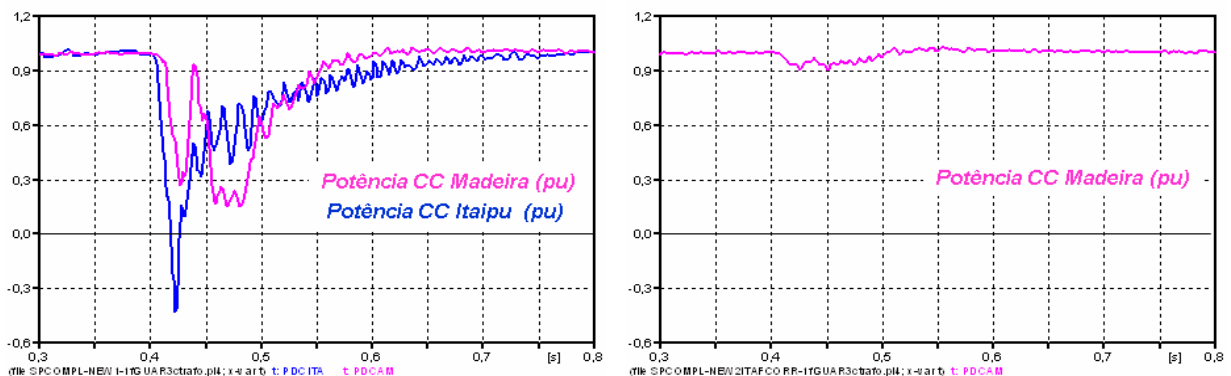
A alternativa de localização escolhida, para fins das avaliações seguintes, considerou a barra de Santo Ângelo 440 kV como a subestação receptora. Como a configuração desta rede possuía algumas diferenças em relação a atualmente planejada para quando da operação do elo CC do AHE Madeira, foi feita uma comparação dos principais parâmetros de interesse. Na Tabela 3 estão indicadas as Relações de Curto-circuito (SCR) e o acoplamento entre os inversores para este equivalente, os quais podem ser comparados com os da Tabela 1.

**Tabela 3 – SCR e Acoplamento Elétrico para a Rede Equivalente 170 barras (ATP)**

Elo CCAT em Santo Ângelo 440 kV	Elo CCAT Itaipu	Acoplamento Elétrico Inversores
<b>SCR = 3.97</b>	<b>SCR = 2.73</b>	<b>42 Ω</b>

O SCR na barra CA do inversor do “elo CC do AHE Madeira” (conectado em Santo Ângelo 440 kV) manteve-se em torno de 4. Quanto ao elo CC da UHE Itaipu, verificou-se uma razoável redução do SCR, o que poderia significar uma condição de rede alterada ou carga leve, por exemplo, tornando as simulações aqui realizadas, conservativas. O acoplamento elétrico, por outro lado, possui exatamente o mesmo valor que o anteriormente identificado para a rede planejada, podendo ser retratado como a impedância de uma linha de transmissão de 500 kV com 120 km de comprimento aproximadamente. Frente este diagnóstico, apesar da diferença no SCR associado ao inversor do elo CC de Itaipu, decidiu-se realizar análises preliminares empregando esta rede equivalente, as quais serão apresentadas em seqüência.

Inicialmente, simulou-se um defeito monofásico na barra de Guarulhos 345 kV, considerando-se uma representação detalhada para ambos os elos CCAT. Esta mesma simulação foi refeita, substituindo-se o elo CCAT de Itaipu por uma fonte de corrente. A Figura 5 ilustra a potência CC em cada elo, considerando as diferentes modelagens empregadas. Verifica-se claramente que o desempenho do elo CCAT do AHE Madeira foi significativamente alterado, em função da mudança de representação do elo CC de Itaipu. Ou seja, existe um acoplamento elétrico, capaz de provocar interações entre ambos os elos.



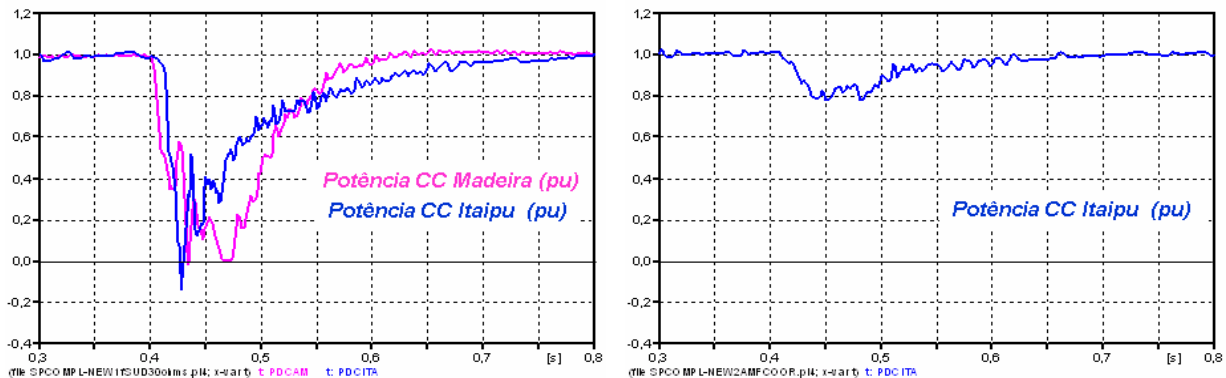
a) Ambos os elos CCAT com modelo detalhado

b) Elo CC da UHE Itaipu como fonte de corrente

**Figura 5 – Aplicação de defeito monofásico na barra Guarulhos 345 kV**

Na Figura 6 uma outra comparação foi feita, para avaliação do desempenho dinâmico do elo CC da UHE Itaipu, frente diferentes formas de representação do elo CC do AHE Madeira. O modelo detalhado do elo CCAT do AHE Madeira foi substituído por uma fonte de corrente. Desta feita, o desempenho do elo CCAT da UHE Itaipu foi significativamente alterado, em função da mudança de representação do elo CC do AHE Madeira. Com base nos resultados destas simulações, verifica-se que a recuperação de cada elo é dependente do desempenho dinâmico do outro.

Deve-se destacar que, estas simulações compreenderam algumas das quais conduziram às maiores diferenças de comportamento. Para outras contingências simuladas as diferenças encontradas foram menos significativas. Neste âmbito, ou eram menos severas, não levando à ocorrência de falhas de comutação ou, em função da sua severidade, provocavam falhas de comutação no elo com modelo completo, independentemente do modelo do elo CC remoto. Na medida em que estas simulações possuem um caráter preliminar, esse resultados devem ser encarados apenas do ponto de vista indicativo do potencial de interação entre os dois elos CCAT.



a) Ambos os elos CCAT com modelo detalhado

b) Elo CC do AHE Madeira como fonte de corrente

Figura 6 – Aplicação de defeito monofásico na barra Santo Ângelo 440 kV

## 5.0 - CONCLUSÕES

As simulações com o programa ANATEM mostram que distúrbios internos em um pólo de cada elo não causam impactos significativos no outro elo. As tensões CA nas barras de comutação apresentam um comportamento bastante similar, indicando que realmente existe uma proximidade elétrica que não pode ser desprezada, confirmando a informação derivada dos índices MIIF. É razoável, portanto, imaginar que há uma probabilidade considerável de ocorrer falhas de comutação simultâneas em ambos os elos CC. De fato, considerando-se o modelo empírico de falha de comutação presente no programa ANATEM, verificou-se que isto ocorria durante a simulação de um defeito na rede CA. Do ponto de vista da estabilidade eletromecânica, como também pode ser verificado, tal evento não trouxe maiores consequências para o sistema como um todo. No entanto, considerando-se que apenas um cenário de carga-geração foi utilizado, evidentemente, este aspecto deverá ser avaliado com maior profundidade em simulações adicionais, envolvendo outras condições operativas mais críticas.

A possibilidade de ocorrência de falhas de comutação simultâneas deve ser objeto de avaliação mais rigorosa em ferramentas de transitórios eletromagnéticos, mais adequadas para este tipo de verificação. As simulações em ATP mostram que efetivamente isto pode ocorrer. Investigações considerando condições sistêmicas com valores reduzidos de SCR (carga leve, por exemplo) precisam ser avaliadas.

Finalmente, na medida em que existe uma interação entre os elos CC, conforme as simulações com o programa ATP demonstraram, os ajustes dos sistemas de controle dos dois bipolos do AHE Madeira deverão ser feitos de forma conjunta com a operação do elo CCAT da UHE Itaipu.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *DC Multi-Infeed Study* - EPRI, CEPEL, University of Wisconsin Project Final Report, RP2675-04-05, Palo Alto CA, USA, December 1994.
- [2] *Systems with Multiple DC Infeed* – Working Group B4-41, April 2008
- [3] *Direct Current Transmission - Volume 1*; Edward W. Kimbark; Wiley-Interscience
- [5] *Power System Stability and Control*; Prabha Kundur; McGraw-Hill, Inc.
- [6] *Power Transmission by Direct Current*; Erich Uhlmann