



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

BR/GAT/11
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IV

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

**SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE MÚLTIPLOS ELOS CCAT
NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL COM O PROGRAMA ATP**

Antônio Ricardo C. D. Carvalho *

Leonardo P. Almeida

Mario Herdade

Fabício L. Lirio

Fabíola F. C. Veliz

CEPEL

PUC-RJ

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido, primeiramente, visando apresentar estudos que avaliam o comportamento do Sistema Interligado Nacional (SIN) com a operação conjunta dos elos de transmissão em corrente contínua (CCAT) previstos até o ano de 2020. São eles: os dois bipolos CCAT ± 600 kV conectados à UHE Itaipu; os dois troncos CC ± 600 kV associados ao escoamento da geração das usinas do rio Madeira; e os dois futuros bipolos ± 800 kV destinados à expansão da Interligação Norte-Sudeste e escoamento da geração da UHE Belo Monte, os quais terão terminais conversores instalados em dois pontos distintos do sistema SE.

Esta análise levará especialmente em conta o fato da distância elétrica entre os respectivos terminais inversores ser reduzida, configurando o que se denomina *Múltiplas Alimentações CC (DC Multi-infeed)*. Procura-se identificar os principais aspectos que precisam ser examinados e são apresentadas simulações com o programa ATP (*Alternative Transients Program*).

Adicionalmente, como um segundo objetivo do trabalho, será apresentada uma metodologia para a obtenção de equivalentes dinâmicos, procedimento este utilizado para a representação do sistema CA receptor dos elos CC. Serão apresentadas simulações com o programa de estabilidade eletromecânica ANATEM (desenvolvido pelo CEPEL), com o propósito de demonstrar a adequação do modelo equivalente dinâmico proposto.

PALAVRAS-CHAVE

Transmissão em Corrente Contínua, Múltiplas Alimentações CCAT, Equivalentes Dinâmicos, Transmissão CC no Brasil

1.0 - INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta alguns aspectos associados à operação conjunta de distintos elos de transmissão em corrente contínua, principalmente quando a distância elétrica entre os seus inversores não é muito grande.

No caso brasileiro, a principal motivação reside no fato do Sistema Interligado Nacional estar na iminência de iniciar a operação comercial de mais um tronco de transmissão em CCAT, composto por dois bipolos ± 600 kV de 3150 MW cada, e responsável pela integração do aproveitamento hidrelétrico das usinas do rio Madeira (UHE Jirau e UHE Santo Antônio). Considerando-se a existência dos dois bipolos em corrente contínua associados à UHE Itaipu, cujas estações inversoras localizam-se na SE Ibiúna 345 kV, e que os terminais inversores dos dois bipolos do elo CCAT do AHE Madeira estarão conectados à subestação de Araraquara 500 kV, isto resulta numa configuração com múltiplas alimentações CC situadas eletricamente próximas [1,2].

É verdade que este último elo CC por si só, já se traduz numa condição com múltiplos conversores CC, uma vez que envolve dois diferentes fabricantes, com suas filosofias de controle próprias. Quanto aos bipolos de Itaipu, ambos possuem o mesmo sistema de controle e, portanto, para fins do que se deseja analisar, comportam-se como um único elo.

(*) Avenida Horácio Macedo, 354 – sala 232 – CEP 21941-911 Cidade Universitária, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6230 – Fax: (+55 21) 2598-6451 – Email: aricardo@cepel.br

Em relação à expansão da Interligação Norte-Sudeste, e que inclui o escoamento da geração da usina de Belo Monte, a alternativa que se mostrou como a de melhor compromisso técnico-econômico contempla a chegada de dois elos CCAT ± 800 kV, de 4000 MW cada, na região Sudeste, mais especificamente nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Na medida em que nesta região, como observado anteriormente, à época da implantação destes dois novos troncos, os elos CCAT associados ao AHE Madeira já estarão em pleno funcionamento, é inevitável que se investigue as possíveis consequências desta operação conjunta.

No presente trabalho propõe-se a evolução das primeiras investigações realizadas [3,4,5], ainda durante a fase de escolha de alternativas. Uma primeira importante evolução foi o aperfeiçoamento da modelagem das filosofias dos sistemas de controle dos elos CCAT associados à transmissão das usinas do rio Madeira no programa ATP, o qual permite a representação detalhada das pontes conversoras e dos sistemas de controle associados. Destaca-se também a incorporação da representação dinâmica do sistema CA no retificador dos elos da Interligação N-SE.

Ainda naquelas primeiras investigações, a rede CA receptora foi modelada procurando-se preservar uma região de maior interesse (*Rede Interna*), incluindo as principais ligações entre os conversores CA/CC ou seja, preservando o acoplamento elétrico entre os mesmos, incluindo até uma segunda vizinhança das barras de comutação. A *Rede Externa* foi representada por meio de impedâncias de transferência entre as barras de fronteira, de sequência positiva e zero, calculadas na frequência fundamental, bem como pelas impedâncias próprias nas barras de fronteira. Presentemente procurou-se atualizar a sua topologia, contemplando também o processo de incorporação futura da dinâmica das máquinas do sistema CA receptor.

Adicionalmente a este novo equivalente estático, e como um segundo objetivo deste trabalho, apresenta-se o procedimento adotado para a obtenção de um modelo dinâmico equivalente do sistema CA, que permitirá a análise do comportamento do sistema sob esta ótica. A análise dinâmica com utilização do ATP introduz uma dificuldade a mais para sua modelagem, cuja complexidade normalmente conduz à necessidade de uma representação da rede a mais simplificada possível. Entretanto, como se deseja avaliar o comportamento dinâmico englobando todos os terminais inversores dos elos CC, faz-se necessária, além a manutenção das principais ligações entre os inversores, a preservação dos modos de oscilação que possuem maior influência sobre os elos CCAT. Simulações com o programa ANATEM procurarão demonstrar a adequação deste equivalente dinâmico.

2.0 - MODELAGEM DOS SISTEMAS CCAT E DAS REDES CA

No âmbito das análises com o programa ATP, de modo a identificar as formas de interação entre os elos CC, procura-se:

- Avaliar a possibilidade de um elo induzir falha(s) de comutação simultâneas no(s) outro(s) via tensão CA, durante a recuperação de defeitos;
- Investigar o comportamento dos sistemas de controle durante a operação conjunta e possíveis interações entre os elos CC;
- Identificar a necessidade de eventuais medidas mitigadoras, além daquelas provenientes de alterações nos sistemas de controle.

Face às dimensões das redes CA e CC a serem modeladas, os objetivos desta análise e as incertezas inerentes ao processo de planejamento, as seguintes considerações foram feitas:

- Observou-se apenas o cenário de importação simultânea de potência pelo sistema Sudeste, no qual todos os conversores dos seis bipolos, lá localizados, operariam como inversores;
- Especificamente em relação aos elos CCAT:
 - ✓ *Sistema CCAT de Itaipu*: os dois bipolos CCAT foram modelados por um único monopolo equivalente, favorecido pelo fato de que ambos são idênticos, e com a mesma filosofia de controle, a qual foi detalhadamente modelada.
 - ✓ *Tronco CCAT do Madeira*: cada bipolo foi modelado individualmente por um monopolo equivalente. Um dos bipolos possui uma filosofia de controle muito parecida com a do sistema de Itaipu. Quanto ao segundo, adotou-se um modelo baseado em controle de potência/corrente no retificador e controle de tensão CC no terminal inversor, o que ainda não havia sido implementado anteriormente em [3]. Adicionalmente, ainda em relação aos estudos realizados em [3], incorporou-se as curvas de saturação dos transformadores conversores e adotou-se a representação fidedigna dos filtros CA.
 - ✓ *Bipolos da expansão da Interligação Norte-Sudeste*: foram representados individualmente por monopolos equivalentes. Face seu caráter de planejamento, a representação dos seus sistemas de controle foi baseada na filosofia empregada no sistema de Itaipu, embora com ajustes próprios;
- Considerou-se os controles dos elos CCAT operando permanentemente em controle de potência, durante todas as simulações. Não foi introduzida nenhuma estratégia para comutá-los automaticamente para controle de corrente;

- Diferentemente do trabalho desenvolvido em [3], foi incluída uma rede equivalente para representação do sistema CA associado ao terminal retificador dos elos da Interligação Norte-Sudeste, na qual incluiu-se também uma modelagem dinâmica para as máquinas da UHE Belo Monte.
- A rede CA associada aos terminais inversores foi modelada procurando-se preservar uma região de maior interesse (*Rede Interna*), incluindo as principais ligações entre os conversores CA/CC, e até a segunda vizinhança em relação às barras de comutação. A *Rede Externa* foi representada por meio de impedâncias equivalentes de transferência entre as barras de fronteira, de sequência positiva e zero, calculadas na frequência fundamental, bem como através de impedâncias próprias, conforme utilizado em [3]. As impedâncias equivalentes foram calculadas com o programa ANAFAS do CEPEL, e o cálculo do fluxo de potência prévio foi feito com o programa ANAREDE. Adicionalmente, no presente trabalho, a configuração destas Redes foi atualizada com base nos resultados dos estudos que compuseram o Relatório R1 da Expansão da Interligação Norte-Sudeste, diferentemente do caráter inicial de [3]. Adotou-se também neste caso a filosofia descrita no item 3 para fins da incorporação da modelagem dinâmica futura neste equivalente.

3.0 - A PROPOSIÇÃO DE UM EQUIVALENTE DINÂMICO

3.1 A Metodologia de Cálculo

Entre outros aspectos, como já citados anteriormente, a evolução dos estudos realizados em [3,4,5] passa pela incorporação da dinâmica do sistema no equivalente da rede CA receptora. Desta forma, necessita-se aprimorar o equivalente estático até então empregado, incorporando-se adequadamente a dinâmica do sistema CA receptor dos troncos CCAT. Neste item será apresentada a metodologia adotada na sua obtenção.

Primeiramente, o conceito dos equivalentes estáticos empregados até a fase anterior deste trabalho, considerava a preservação da região elétrica próxima dos terminais inversores até, pelo menos, a sua segunda vizinhança, mantendo-se a representação detalhada de linhas de transmissão, transformadores, usinas, etc., configurando-se assim a *Rede Interna* (sistema retido). Visava-se desta forma manter a resposta em frequência vista destes terminais e o acoplamento elétrico entre eles.

Nas Barras de Fronteira o restante do Sistema era substituído por um equivalente, formado por impedâncias de transferência entre as mesmas, de sequência positiva e zero e calculadas na frequência fundamental, bem como impedâncias próprias, de modo a preservar as potências de curto-circuito originais. Este conjunto de impedâncias equivalentes forma a *Rede Externa*. A Figura 1 ilustra de modo simplificado a formação da rede equivalente, destacando as Barras de Fronteira.

No que se refere à obtenção do equivalente dinâmico, o procedimento idealizado constou de três etapas:

1) Definição da região de interesse:

A princípio, para a definição da *Rede Interna*, optou-se pela mesma estratégia adotada no cálculo dos equivalentes estáticos. Entretanto, a incorporação da dinâmica do sistema obriga a expansão deste conceito.

Como consequência, o passo seguinte consiste na determinação das usinas que são predominantes no comportamento dinâmico do sistema, frente defeitos nas barras de comutação dos elos CCAT. Algumas usinas são importantes por estarem próximas às conversoras mas, neste caso, já fazem parte da *Rede Interna*, como é o caso por exemplo, da usina destacada na Figura 1. A atenção volta-se então para as usinas que estão na *Rede Externa*, e que influenciam no comportamento dinâmico.

A simples expansão da *Rede Interna* originalmente concebida, de modo a incluir estas usinas, poderia gerar um equivalente consideravelmente grande, o que dificultaria em muito a sua representação no programa ATP. Optou-se então por preservar inalterada a *Rede Interna* original, e passar a considerar as demais usinas de interesse, incluindo seus transformadores elevadores, como pertencentes a *Redes Internas Isoladas*, compostas apenas por estes equipamentos, e tendo a barra de alta dos transformadores como sua única Barra de Fronteira. A questão a ser avaliada passa a ser a conexão entre a *Rede Interna* original com estas *Redes Internas Isoladas*.

2) Cálculo das impedâncias:

O cálculo das impedâncias equivalentes (de transferência e próprias) dá-se da mesma maneira como descrito anteriormente, mas neste caso, agregando-se as *Redes Internas Isoladas*. Neste caso, durante o processo de cálculo, também surgirão impedâncias entre as novas Barras de Fronteira (isoladas), bem como entre estas e as originais, conforme ilustrado na Figura 2. Portanto, as novas *Barras de Fronteiras* (isoladas) se conectam com a Rede Interna original através das impedâncias criadas pelo processo de cálculo do equivalente.

Naturalmente, as novas Barras de Fronteira (isoladas) não possuem ligações com a *Rede Interna* original, a exceção das suas Barras de Fronteira, pois caso contrário, pertenceriam a ela.

3) Incorporação da dinâmica do Sistema:

Na medida em que as usinas que são determinantes para o comportamento dinâmico passam a ser retidas, bem como incluem-se as ligações elétricas entre elas, e as Barras de Fronteira da *Rede Interna* original, a representação adequada das respectivas máquinas e seus reguladores tenderá a preservar o comportamento dinâmico original.

Como os fenômenos de interesse, advindos deste equivalente dinâmico, situam-se na faixa de frequências eletromecânicas, a representação simplificada da malha que conecta as usinas então retidas à *Rede Interna* original, não deve causar influência relevante nos resultados. Quanto aos fenômenos de mais alta frequência, preservou-se o sistema próximo das conversoras, ou seja, a *Rede Interna*.

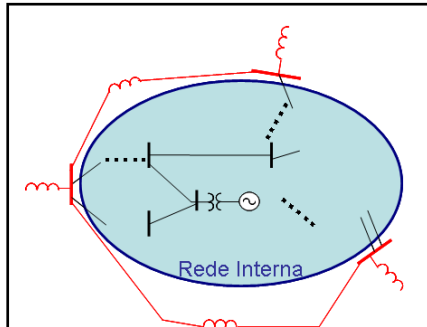


Figura 1 – Redes Interna e Externa de um equivalente estático

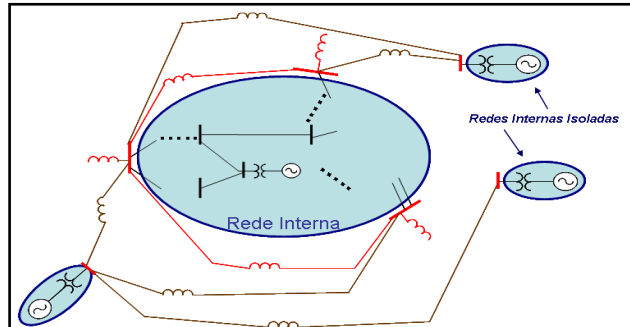


Figura 2 – Redes Internas e Externas com a incorporação da dinâmica do Sistema

3.2 O Equivalente Dinâmico obtido

Pela descrição feita do procedimento de obtenção do equivalente dinâmico, parece razoável supor-se que um passo extremamente relevante, e não detalhado anteriormente, é o da identificação das usinas que são determinantes para o comportamento dinâmico do sistema. Entre as possibilidades existentes para tal, principalmente quando não se conhece o sistema em estudo, pode-se recorrer ao emprego de programas de análise modal, como o PACDYN, desenvolvido pelo CEPEL, compreendendo a identificação dos principais modos de oscilação e as máquinas com maior contribuição para os mesmos (*mode-shape*). Uma outra forma, mas dependente da experiência do analista em relação ao sistema em estudo, é através de tentativa e erro.

No caso em questão adotou-se este último método, e constatou-se a necessidade de se reter as seguintes máquinas: UHEs Itumbiara, Marimbondo, Emborcação, São Simão, Nova Ponte, Jaguará, Luiz Carlos Barreto, Mascarenhas de Moraes e Furnas; UNEs Angra 1 e 2; Compensadores Síncronos de Ibiúna e Tijuco Preto. Adicionalmente, verificou-se também a necessidade de se incorporar a representação dinâmica das UHEs Itaipu 60 Hz, Ilha Solteira, Jupia, Três Irmãos e Água Vermelha. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre o porte do SIN e o do sistema equivalente concebido.

Tabela 1 – Dimensões do SIN e do Sistema Equivalente

Barras/Usinas	Sistema Completo	Sistema Equivalente
Nº Barras	7146	94
Nº Usinas	263	18

3.3 Simulações Dinâmicas

Neste item será feita uma comparação do comportamento dinâmico do sistema, considerando a sua configuração completa, com o do equivalente dinâmico então calculado segundo a proposta anteriormente descrita. Empregou-se para tanto o programa ANATEM.

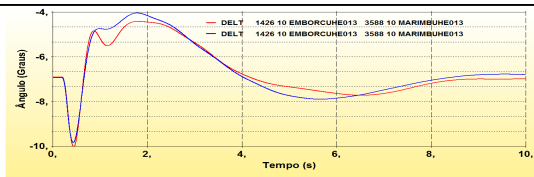
Visando a modelagem futura do equivalente dinâmico no programa ATP, do ponto de vista do intervalo de tempo de interesse e por simplificação, optou-se pela representação equivalente sem a presença dos respectivos Reguladores de Velocidade das máquinas retidas. Para fins da comparação presente, preservou-se os Reguladores de Tensão e Power System Stabilizers existentes.

Nos gráficos apresentados em sequência, as curvas na cor vermelha correspondem às simulações com o sistema completo, e na cor azul têm-se os resultados com o equivalente desenvolvido.

3.3.1 Aplicação de defeito monofásico na barra de Araraquara 500 kV

As Figuras 3 a 6 mostram a comparação de algumas grandezas para esta simulação. As Figuras 3 e 5 ilustram, respectivamente, a variação angular das máquinas da UHE Emborcação e da UHE Itaipu, em relação à UHE Marimbondo. A frequência na UHE Jaguará está apresentada na Figura 4 e o comportamento da tensão em Araraquara 500 kV na Figura 6.

Estas comparações mostram que o sistema equivalente tem comportamento dinâmico bastante similar ao do sistema completo.



**Figura 3 – Variação Angular
UHE Emborcação – UHE Marimbondo**

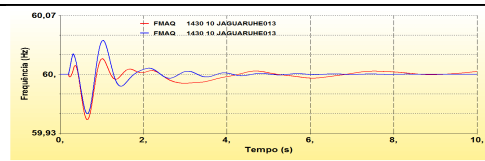
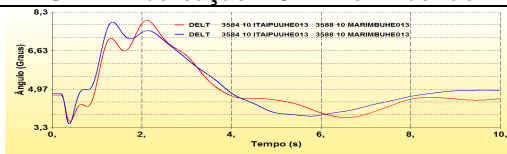


Figura 4 – Frequência na UHE Jaguará



**Figura 5 – Variação Angular
UHE Itaipu - UHE Marimbondo**

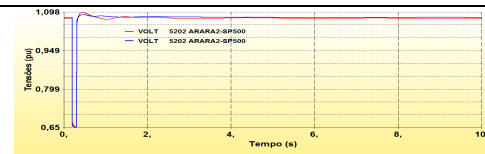
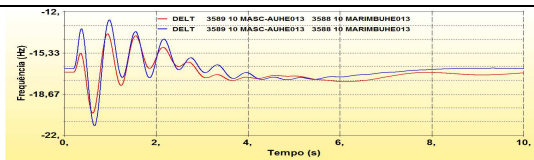


Figura 6 – Tensão em Araraquara 500 kV

3.3.2 Aplicação de defeito monofásico na barra de Estreito 500 kV

A Figura 7 ilustra a variação angular das máquinas da UHE Mascarenhas de Moraes em relação à UHE Marimbondo. A frequência na UHE Jaguará está apresentada na Figura 8. Estas comparações mostram mais uma vez que o sistema equivalente tem comportamento dinâmico muito similar ao do sistema completo.



**Figura 7 – Variação Angular
UHE Mascarenhas Moraes - UHE Marimbondo**

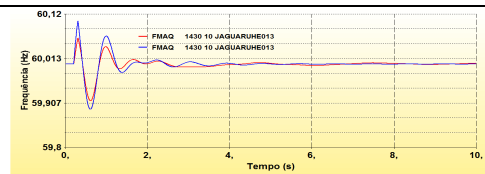
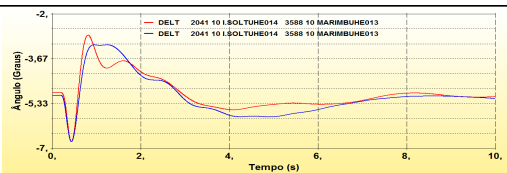


Figura 8 – Frequência na UHE Jaguará

3.3.3 Aplicação de defeito monofásico na barra de Ibiuna 345 kV

A Figura 9 ilustra a variação angular das máquinas da UHE Ilha Solteira em relação à UHE Marimbondo. A frequência na UHE Itaipu 60 Hz está apresentada na Figura 10. Pode-se afirmar que o comportamento dinâmico do sistema completo está bem representado no equivalente idealizado.



**Figura 9 – Variação Angular
UHE Ilha Solteira - UHE Marimbondo**

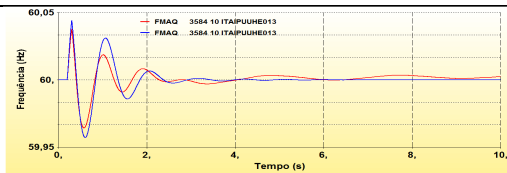
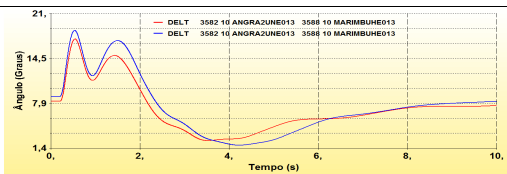


Figura 10 – Frequência na UHE Itaipu 60 Hz

3.3.4 Aplicação de defeito monofásico na barra de Terminal Rio 500 kV

A Figura 11 ilustra a variação angular das máquinas da UHE Angra 2 em relação à UHE Marimbondo. A frequência na UHE Jaguará está apresentada na Figura 12. Mais uma vez verifica-se a boa correlação entre o comportamento dinâmico obtido a partir da representação equivalente com aquele do sistema completo.



**Figura 11 – Variação Angular
UHE Angra 2 - UHE Marimbondo**

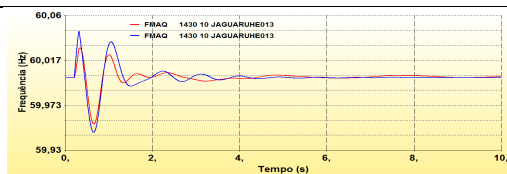


Figura 12 – Frequência na UHE Jaguará

4.0 - SIMULAÇÕES COM O PROGRAMA ATP

Conforme mencionado anteriormente, em relação aos estudos desenvolvidos e apresentados na referência [3], os seguintes aperfeiçoamentos foram incorporados na modelagem do sistema:

- *representação detalhada do elo CCAT da ALSTOM, associado à transmissão das usinas do rio Madeira*
- *Inclusão das curvas de saturação dos transformadores conversores dos dois bipolos do tronco CC do Madeira*
- *representação dos filtros CA dos dois bipolos do tronco CC do Madeira*
- *inclusão de uma rede CA equivalente no lado do retificador dos troncos CC da Interligação Norte-Sudeste, e de modelo dinâmico de máquina da UHE Belo Monte*
- *atualização da configuração da rede CA equivalente receptora, conforme delineado anteriormente.*

4.1 Descrição das Simulações e Metodologia Adotada

Em sequência será descrita a metodologia proposta para a avaliação do grau de interação entre os conversores dos elos CCAT. Primeiramente, o fluxo de potência prévio foi ajustado de forma que os elos CC estivessem transmitindo montantes de potência bem próximos de suas capacidades nominais. As diferentes perturbações estudadas, com o intuito de avaliar o grau de interação entre os elos CC em questão, estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Contingências e diferentes situações simuladas

Ocorrência de uma falha de comutação no inversor de cada elo CC individualmente
Aplicação de defeito interno CC por 100 ms próximo do terminal inversor de cada elo
Aplicação de curto-circuito monofásico nas barras de comutação dos terminais inversores, e eliminação após 100 ms
Análise de sensibilidade segundo a modificação da filosofia de controle de cada elo CC, através da representação simplificada dos conversores por uma fonte de corrente constante (parcelas ativa e reativa)

A primeira delas compreende a ocorrência de uma falha de comutação no terminal inversor de cada elo CC modelado. Esta simulação visa avaliar qual o potencial de interação entre os elos CC frente este fenômeno isolado e que na grande maioria dos casos não compromete o desempenho do sistema. Em outras palavras, verificar-se-á qual a possibilidade de um elo induzir falhas de comutação simultâneas nos demais.

Em relação à aplicação do defeito CC, seu objetivo foi avaliar o comportamento dos elos são frente a um defeito interno em cada um dos troncos. Deve-se destacar que, face à modelagem dos elos por monopolos equivalentes, esta simulação é, na verdade, bem mais severa que a aplicação de um defeito pólo-terra, uma vez que equivaleria a um defeito CC simultâneo em todos os pólos do tronco, o que é um evento de probabilidade bem mais baixa. Portanto, deve-se reconhecer o caráter conservativo desta avaliação.

Em ambos os casos, se os eventos simulados não conduzem a significativas interações com os demais elos (sãos), há uma grande probabilidade da interação entre eles não ser expressiva. Por outro lado, caso se observe um acoplamento relevante, simulações de estabilidade eletromecânica, com foco no desempenho dinâmico do sistema precisam avaliar este fenômeno, e confirmar as consequências sistêmicas desta interação.

No que se refere aos defeitos na rede CA receptora, considerou-se apenas sua aplicação e subsequente extinção após 100 ms, sem a abertura de qualquer elemento do sistema de transmissão. Evidentemente, ao se adotar esta hipótese, preservou-se as magnitudes das potências de curto-circuito, configurando uma situação otimista do ponto de vista do desempenho dos elos CCAT. Mesmo assim, um defeito desta natureza, tem potencial para afetar todos os troncos CC envolvidos, em função da proximidade entre eles e de suas relações de curto-circuito, e desta maneira, o objetivo da presente análise reside em como ocorre o processo de recuperação conjunta dos elos. Se o mesmo aponta dificuldades é possível que seja necessário adotar-se medidas mitigadoras futuras, em consonância com os estudos de desempenho dinâmico.

Quanto à análise de sensibilidade mencionada, a mesma se justifica principalmente frente à incerteza dos futuros sistemas de controle a serem empregados. No caso do sistema CCAT associado à UHE Itaipu e do elo CC da ABB do tronco das usinas do rio Madeira, as filosofias de controle são bastante similares às reais. Quanto ao elo CC da ALSTOM, como já citado, adotou-se um modelo típico, porém com a mesma filosofia de controle. Quanto aos elos CC da Interligação Norte-Sudeste empregou-se, por conveniência, a mesma filosofia de controle do elo de Itaipu. Procurou-se então avaliar a influência que um comportamento dinâmico bastante distinto, obtido pela substituição de cada elo por uma injeção de corrente constante, poderia ter no desempenho dos demais.

Procurou-se apreciar a operação do sistema durante a ocorrência de falhas de comutação simultâneas nos elos CC, a qual tem, inerentemente, um caráter probabilístico. Considerando a representação completa dos conversores em operação próxima, há uma probabilidade razoável da ocorrência deste fenômeno. Na medida em que se substituiu os conversores por uma fonte de corrente, elimina-se esta possibilidade no elo em questão.

Finalmente, deve-se destacar que, para fins do estabelecimento dos ajustes iniciais de controle dos elos CC buscou-se um desempenho minimamente adequado, mas não houve a intenção de se promover sua otimização, uma vez que para tal, isto implicaria na simulação de inúmeras emergências e cenários de operação, o que não faz parte dos objetivos da presente investigação.

4.2 Principais Resultados

Em seguida serão apresentados os principais resultados encontrados a partir das simulações com o programa ATP, considerando a metodologia descrita anteriormente. Para facilitar a visualização dos resultados, recorreu-se à seguinte convenção de cores para os cinco elos CC modelados: **Itaipu**, **Madeira/bipolo 1**, **Madeira/bipolo 2**, elo CC conectado ao **Terminal Minas (Estreito)** e elo CC conectado ao **Terminal Rio (Nova Iguaçu)**.

Procedeu-se a simulação da ocorrência de falha de comutação em cada um dos elos CC. Estas simulações estão apresentadas na Figura 13, e pode-se perceber que todos os elos são afetados para cada falha de comutação considerada, indicando que há um acoplamento elétrico entre eles. A Figura 13(a) indica, através das correntes CC medidas nos terminais retificadores, que durante a incidência de uma falha de comutação no elo CC de Itaipu é possível esperar-se alguma repercussão nos demais. Comportamento similar foi obtido para a ocorrência de falha de comutação nos demais elos. Já para defeitos internos nos elos CC ficou evidente que os elos são bem menos afetados que no caso com a incidência de falha de comutação, como ilustrado na Figura 14.

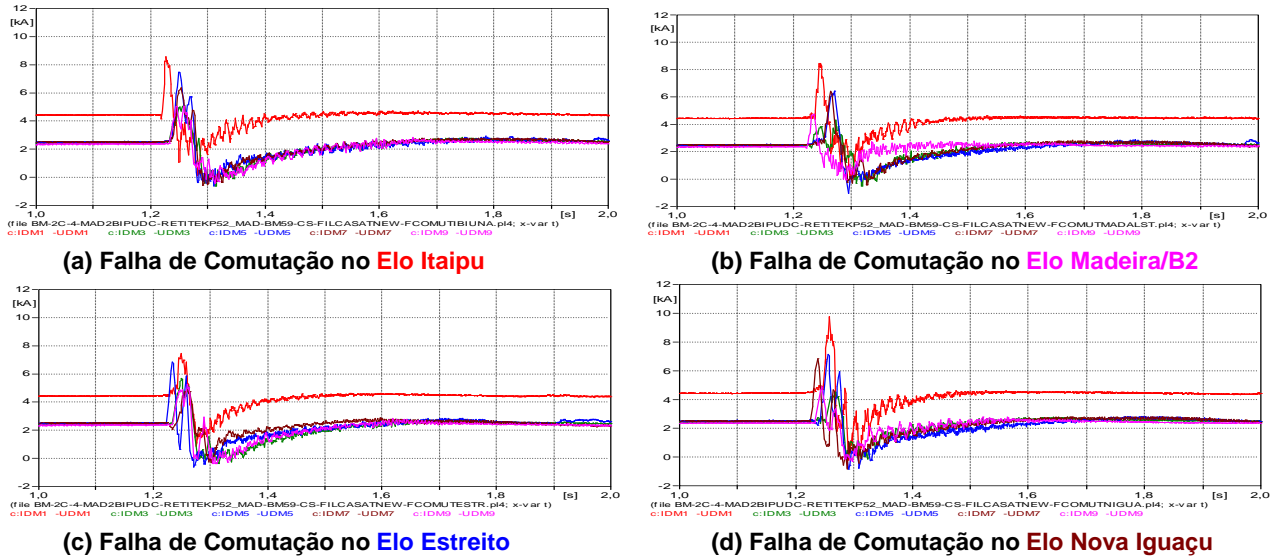


Figura 13 – Correntes CC (kA) no terminal retificador – Ocorrência da Falha de Comutação

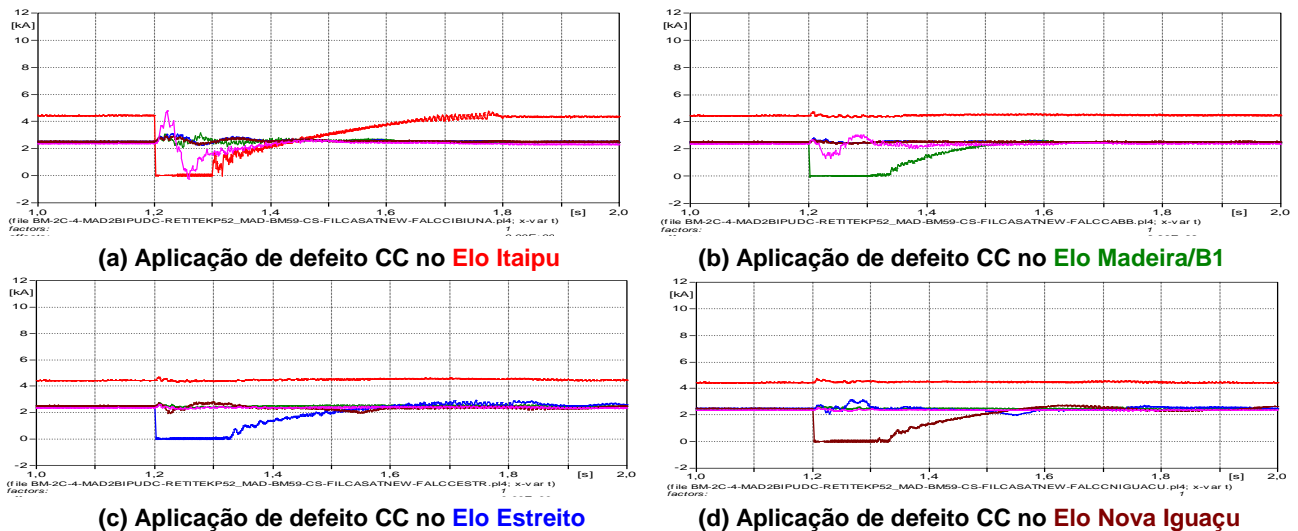


Figura 14 – Correntes CC (kA) no terminal inversor - Aplicação de defeito CC no monopolo

Estes comportamentos aparentemente dispares, frente as duas distintas perturbações, fez com que se avaliasse o impacto dos mesmos na tensão CA na barra de comutação do elo CC sob defeito. Como exemplo, ilustra-se na Figura 15, a tensão CA na barra de Ibiúna 345 kV para cada uma das duas simulações envolvendo diretamente o elo CC de Itaipu. Percebe-se que no caso da incidência da falha de comutação no inversor deste elo, sua repercussão na tensão CA é bem mais significativa que no caso da aplicação do defeito CC, o que explica a diferença de comportamento apontada anteriormente, referente ao impacto nos elos sãos. Diferenças desta natureza são também verificadas em relação aos defeitos quando aplicados aos outros elos CC.

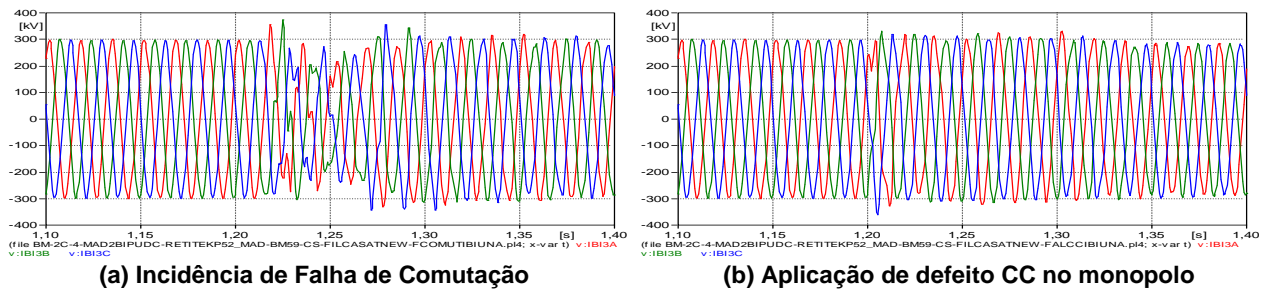


Figura 15 – Tensão CA (kV) em Ibiúna 345 kV

Comparou-se em sequência os comportamentos dos elos CC durante a aplicação de defeitos monofásicos na rede CA receptora, mais especificamente nas barras de comutação. Destaca-se o comportamento dos elos de Itaçu e os do Madeira, considerando duas diferentes modelagens para os elos CC da Interligação Norte-Sudeste, a saber, com o modelo completo e detalhado, ou com a representação por uma injeção de corrente constante. Esta análise de sensibilidade se justifica face às incertezas inerentes em relação aos troncos CC em fase de planejamento, mais especificamente neste caso, em relação à sua filosofia de controle. As Figuras 16 e 17 reproduzem os comportamentos dos elos CC (por meio das correntes CC medidas nos terminais retificadores), respectivamente durante a aplicação de um defeito monofásico nas barras de Estreito 500 kV e Ibiúna 345 kV.

Para cada uma das perturbações, ao se comparar os comportamentos do elo CC de Itaçu e dos dois bipolos associados ao Madeira, frente às duas modelagens estudadas para os elos CC da Interligação N-SE, não se verifica grande alteração nos mesmos. Ou seja, mesmo em se alterando a dinâmica inerente destes dois últimos elos CCAT, os comportamentos dos elos CC de Itaçu e Madeira apresentaram-se quase inalterados. Destaca-se que os bipolos que mantiveram suas representações completas apresentaram falhas de comutação simultâneas.

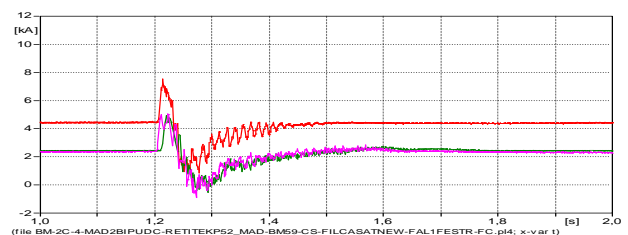
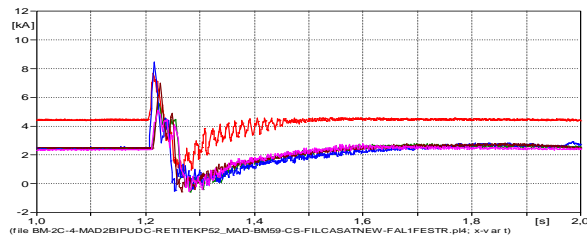


Figura 16 – Correntes CC retificador (kA) - Aplicação de defeito monofásico na barra de **Estreito 500 kV**

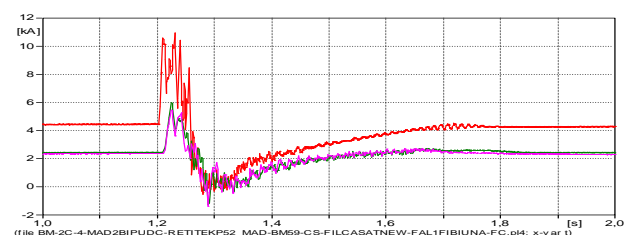
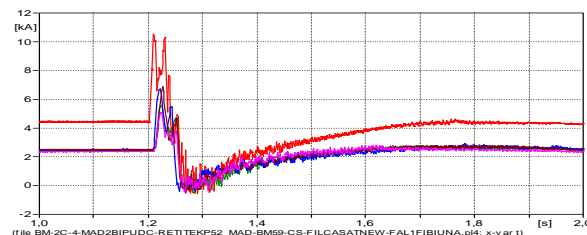


Figura 17 – Correntes CC retificador (kA) - Aplicação de defeito monofásico na barra de **Ibiúna 345 kV**

De forma a exemplificar a diferença de desempenho, quando da substituição da representação completa dos elos CC por uma injeção de corrente constante, apresenta-se na Figura 18 a potência CC nos dois elos da Interligação Norte-Sudeste, para estas duas diferentes modelagens, quando da aplicação do defeito monofásico em Ibiúna.

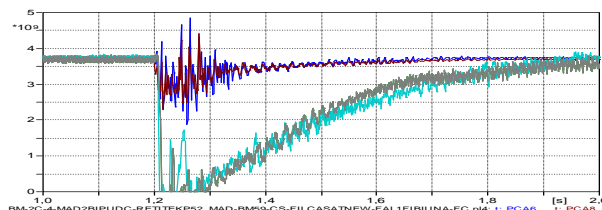


Figura 18 – Potência CC inversores dos Elos CCAT N-SE (W) – Defeito monofásico na barra de **Ibiúna 345 kV**
(modelo completo: cinza e azul claro - injeção de corrente constante: marrom e azul escuro)

5.0 - CONCLUSÕES

O primeiro dos dois objetivos deste trabalho foi apresentar resultados de simulações com o programa ATP, que avaliaram o comportamento do Sistema Interligado Nacional (SIN) com a operação dos elos de transmissão em corrente contínua previstos até o ano de 2020. Destacou-se o potencial de interação entre eles, especialmente em função da proximidade entre os seus terminais inversores, configurando o que se denomina por *Múltiplas Alimentações CC*. Como segundo objetivo foi apresentada uma proposta para a obtenção de equivalentes dinâmicos, procedimento este utilizado para a representação do sistema CA receptor dos elos CC em avaliação, visando o próximo passo das investigações, com a futura incorporação dos modelos de máquina ao equivalente.

Como conclusão das simulações, do ponto de vista da operação conjunta dos elos CCAT, de fato se verifica uma interação entre estes. Entretanto, esta interação não possui características que não possam ser controladas, e as simulações até agora realizadas sugerem que há um conjunto de ajustes capaz de promover a recuperação adequada dos mesmos durante perturbações no sistema.

Frente os resultados, destaca-se a possibilidade da ocorrência de falhas de comutação simultâneas durante defeitos na rede CA receptora. Este fato resulta nas seguintes recomendações para fins da Análise Dinâmica:

- Avaliar as conseqüências deste tipo de ocorrência, do ponto de vista do desempenho dinâmico do sistema como um todo.
- Verificar a conveniência da inclusão de medidas que promovam a elevação da potência de curto-circuito nas barras de comutação, e conseqüentemente o SCR, de forma a mitigar aquele risco, assim como reduzir as interações mútuas entre os conversores através de um melhor suporte de tensão nas barras de comutação.

Como resultado do potencial de interação, especialmente quando a recuperação de algum dos elos acontece com a incidência de oscilações mais acentuadas ou falhas de comutação sucessivas, deve-se destacar também a demanda por ações de controle para evitar estas ocorrências.

Em relação ao procedimento proposto para cálculo de um Equivalente Dinâmico, as comparações efetuadas com o programa ANATEM, considerando o comportamento do sistema com sua representação completa e aquele derivado da modelagem por meio do equivalente então calculado, mostraram que tal metodologia é plenamente aplicável, permitindo uma simplificação bastante acentuada da rede. Sua principal vantagem reside no fato de que, uma vez identificadas as usinas que contribuem para os modos de oscilação de interesse, os modelos de máquinas e reguladores a serem empregados no equivalente também passam a estar definidos.

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] Carvalho, A.R.; Lirio, F.L.; Almeida, L.P.; Véliz, F.F.C.; “Simulações com o Programa ATP da Operação Conjunta de Múltiplos Conversores CCAT considerando Alternativas da Expansão da Interligação Norte-Sudeste” - XII SEPOPE, Rio de Janeiro, 2012
- [4] Carvalho, A.R.; Almeida, L.P.; Daniel, L.O.; Ping, W.W.; Veliz, F.F.C.; Herdade, M.; Cunha, O.A.; Silveira, M.A.N.; “Estudo de Múltiplas Alimentações CCAT para Alternativas em Corrente Contínua da Expansão da Interligação Norte-Sudeste”; XXI SNPTTE, Florianópolis, 2011.
- [5] Carvalho, A.R.; Almeida, L.P.; Daniel, L.O.; Ping, W.W.; “Avaliação da Operação de Elos em Corrente Contínua com Múltiplos Conversores CCAT Próximos”; XX SNPTTE, Recife, 2009

7.0 - DADOS BIográficos



Antônio Ricardo Cavalcanti Dias de Carvalho

Nasceu no Rio de Janeiro em 16/09/1959 e graduou-se em Engenharia Elétrica em 1981 na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Em 1987 obteve o título de Mestre na área de Sistemas de Potência na COPPE/UFRJ, apresentando dissertação sobre a *Modelagem de Sistemas de Controle de Elos CCAT em Programas de Transitórios Eletromagnéticos* (EMTP).

Até 1986 trabalhou em Furnas, no Departamento de Estudos Elétricos da Operação, onde se dedicou principalmente aos estudos associados ao início da operação dos bipolos CCAT do Sistema da UHE Itaipu. No CEPEL, atuou em diversos trabalhos sobre transmissão CCAT e equipamentos FACTS, tais como: desenvolvimento de modelos de elos CCAT, SVC e TCSC no programa ATP; Projeto “HVDC Multinfeed”, em conjunto com o EPRI (USA); estudos elétricos do Projeto CCAT/CCC de Garabi; da alternativa CCAT para o aproveitamento das usinas do rio Madeira e expansão da Interligação Norte-Sudeste. É membro dos Comitês de Estudos B4, C1 e C2 do Cigré-Brasil. Seus campos de interesse são: Transmissão CCAT, Equipamentos FACTS, Controle aplicado a Sistemas de Potência, bem como Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos.