



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

CB/GAT/18

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - IV

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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO SISTEMA DA REGIÃO SUDESTE CONSIDERANDO AS
INTERAÇÕES ENTRE OS ELOS CCAT**

**Alexandre de Melo Silva (*)
ONS**

**Sylvia Beatriz de Oliveira Nunes
ONS**

**Alexandre Rodrigues Nunes
ONS**

**Maria Alzira Noli Silveira
ONS**

**Rodrigo Villela de Faria
ONS**

RESUMO

Com o início dos testes de comissionamento do elo CCAT de Xingu – Estreito previsto para fevereiro de 2018, espera-se uma injeção de potência na região Sudeste de 5.850 MW através das estações inversoras localizadas nas subestações Araraquara 2, Estreito e Ibiúna. Dessa forma, haverá cinco injeções de potência via corrente contínua em subestações eletricamente próximas (*Multi-Infeed*).

A interação entre os controles desses elos CCAT podem afetar o desempenho dinâmico do sistema de transmissão frente às contingências no sistema de transmissão da região Sudeste.

O intuito desse trabalho é determinar o número mínimo de máquinas sincronizadas na região Sudeste que possibilitem o atendimento ao critério N-1 no sistema de transmissão da região Sudeste em um despacho energético específico, no patamar de carga leve de um dia útil do mês fevereiro de 2018 e obter os tempos de falha de comutação provocados por curtos-circuitos trifásicos e monofásicos nas estações conversoras através de simulações no PSCAD.

PALAVRAS-CHAVE

Elo CCAT Xingu-Estreito, Equivalentes de Rede, *Multi-Infeed*, Falha de Comutação, Desempenho Dinâmico, Inércia Mínima

1.0 - INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Nacional brasileiro possui quatro bipolos de corrente contínua, dois bipolos que trazem energia da UHE Itaipu para a região Sudeste/Sul do Brasil e dois, que entregam a energia proveniente das usinas do Complexo Madeira (UHE Santo Antônio e Jirau) na região Sudeste. No início de 2018, está prevista a entrada em operação do elo CCAT de Xingu-Estreito, que permitirá o escoamento de energia de diversas usinas da região Norte e Nordeste (destacando-se a UHE Belo Monte – 11.000 MW) para à região Sudeste.

As estações inversoras desses elos CCAT localizam-se nas subestações Araraquara 2, Estreito e Ibiúna, resultando em múltiplas alimentações via corrente contínua em subestações eletricamente próximas (*Multi-Infeed*). A interação entre os controles desses elos CCAT podem afetar o desempenho dinâmico do sistema de transmissão frente às contingências no sistema de transmissão da região Sudeste.

Durante o primeiro semestre de 2018, no período úmido do Norte quando ocorre a máxima disponibilidade de geração, em especial, nas usinas de Santo Antônio, Jirau, Belo Monte e Tucuruí, sendo apenas a última usina com regularização, espera-se injeções de potência dos elos CCAT em direção ao Sudeste concomitantemente com elevados intercâmbios de energia entre os sistemas Norte e Nordeste também em direção ao Sudeste. O cenário em questão permitirá o armazenamento dessa energia na região Sudeste, porém trará consequências frente às perturbações no Sistema Interligado Nacional – SIN, em virtude da profunda redução do nível de curto-circuito devido à menor disponibilidade de máquinas sincronizadas na região Sudeste.

Destaca-se que, em um primeiro momento, as expansões planejadas das interligações Norte – Sudeste e Nordeste – Sudeste não estarão disponíveis para a operação em março de 2018, quando da entrada em operação do elo Xingu – Estreito. Portanto, um dos grandes desafios do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS será garantir os padrões de segurança no cenário energético mencionado.

Os estudos de *Multi-Infed* têm como uma das finalidades analisar a possibilidade de falha de comutação nas estações conversoras dada alguma emergência na rede transmissão, seja na rede de corrente contínua ou na rede de corrente alternada.

O intuito desse trabalho é determinar o número mínimo de máquinas sincronizadas na região Sudeste que possibilitem o atendimento ao critério N-1 no sistema de transmissão da região Sudeste em um despacho energético específico, no patamar de carga leve de um dia útil do mês fevereiro de 2018 e obter os tempos de falha de comutação provocados por curtos-circuitos trifásicos e monofásicos nas estações conversoras através de simulações no PSCAD.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

Para realizar as análises *Multi-Infed* foi definido um cenário de carga e geração que representasse um número reduzido de máquinas sincronizadas na região Sudeste. Assim, o cenário analisado considera uma elevada transferência de potência das regiões Norte e Nordeste para a região Sudeste e despacho reduzido das usinas hidrelétricas e térmicas da região Sudeste, no patamar de carga leve de um dia útil de fevereiro de 2018, caracterizado pelos níveis de curto-circuito apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de Curto-Circuito na Região Sudeste

SUBESTAÇÃO	3 θ [GVA]	1 θ [GVA]
Ibiúna 345 kV	21,6	24,9
Estreito 500 kV	16,1	13,6
Araraquara 2 500 kV	21,7	20,7

Destaca-se que as obras referentes às empresas Abengoa e Isolux (LT 500 kV Tucuruí – Itacaiúnas – Colinas) não foram consideradas nas análises. Além disso, também não foi contemplada a LT 500 kV Estreito–Fernão Dias, cuja a previsão de entrada em operação é final do primeiro semestre de 2018. A Figura 1 a seguir, apresenta a configuração do sistema Norte/Nordeste prevista para fevereiro de 2018, sem os empreendimentos citados anteriormente

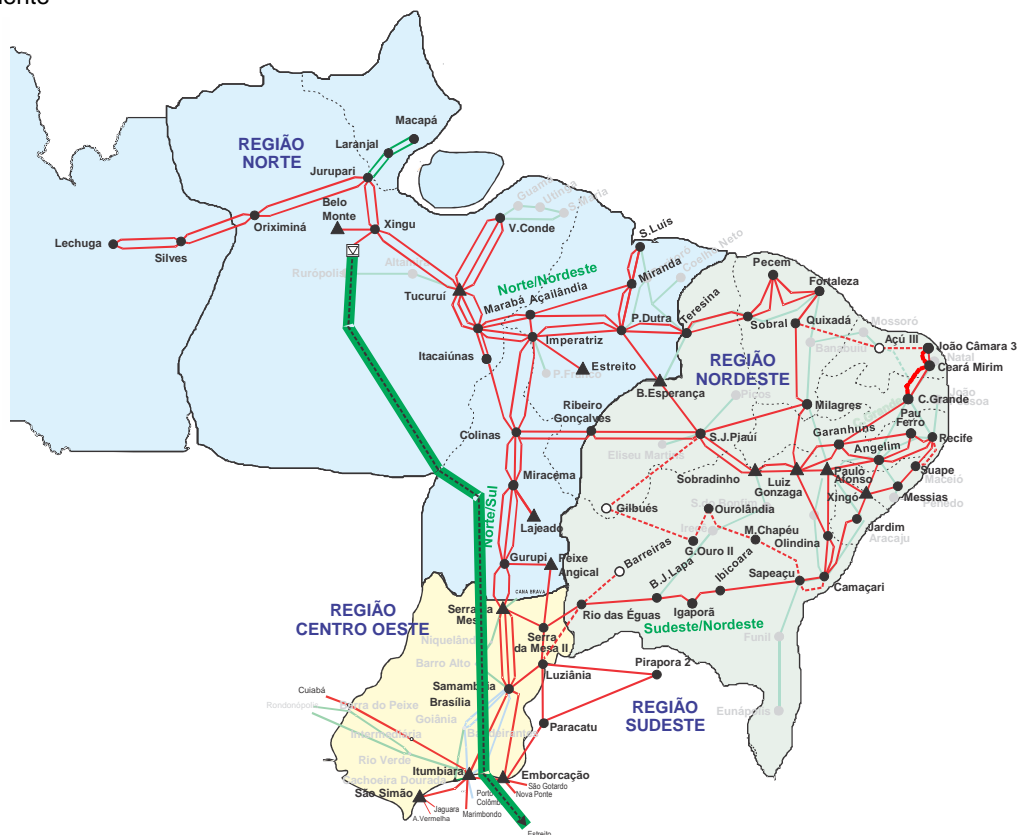


FIGURA 1 – Sistema de Transmissão em Fevereiro de 2018 - Região Norte/Nordeste.

O cenário de máxima exportação de energia das regiões Norte e Nordeste para região Sudeste está caracterizado na Figura 2 a seguir. Por meio dessa figura é possível identificar os principais valores que definem o respectivo cenário energético, destacando a potência injetada por cada um dos elos CCAT na região Sudeste, além da Exportação da Região Norte (EXPN), Fluxo na Norte Sul (FNS), Recebimento Sudeste/Centro-Oeste (RSECO) e Recebimento Sudeste (RSE). Também são informados os valores percentuais de despacho hidráulico, térmico e eólico de cada região, bem como o montante de carga.

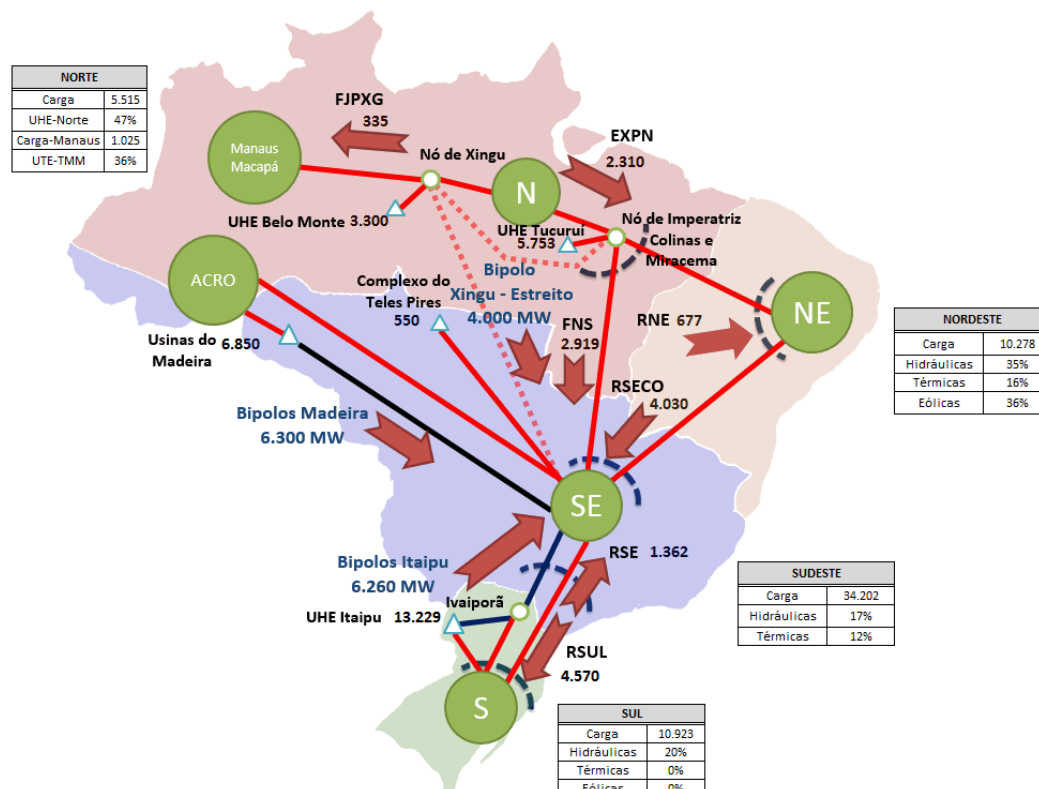


FIGURA 2 – Cenário Energético Analisado.

Em função da condição de carga utilizada nas análises (carga leve) e do próprio cenário energético (máximo recebimento de energia pela região Sudeste), foi necessário definir um conjunto de mínimo de máquinas, operando como compensadores síncronos, de forma atender as condições de controle de tensão na região Sudeste. Nesse sentido, a Tabela 2 a seguir, apresenta as unidades das principais usinas das regiões Sudeste e Sul.

Tabela 2 – Número de Unidades Sincronizadas: Usinas Hidrelétricas do Sul e Sudeste

USINAS	GER*	CS**	USINAS	GER*	CS**	USINAS	GER*	CS**
Belo Monte	8	3	Luis C. Barreto	1	2	Machadinho	1	1
Tucuruí 1 e 2	18	0	Furnas	2	1	P. Fundo	1	1
Emborcação	1	1	S. Mesa	1	1	S. Osório	2	2
Ilha Solteira	12	1	Nova Ponte	1	1	Campos Novos	1	1
Itumbiara	2	4	Três Marias	2	0	D. Francisca	1	1
Irapé	1	1	Volta Grande	1	1	Itaúba	1	1
G.P. Richa	1	1	G.B. Munhoz	1	1	Itá	1	2

*GER: Unidades sincronizadas e despachadas.

**CS: Unidades sincronizadas e operando como compensadores síncronos.

Com o intuito de avaliar o atendimento aos critérios mínimos de operação nesse cenário energético, foram simuladas diversas contingências nos sistemas de 345 kV, 440 kV e 500 kV da região Sudeste. As contingências simuladas atenderam os critérios dinâmicos mínimos estabelecidos, validando o cenário energético definido para análises estáticas e dinâmicas de Multi-Infeed.

2.1 Análise Estática

A partir do cenário eletroenergético acima estabelecido, verifica-se que a área elétrica do Sudeste, aqui designada como área *Multi-Infeed*, possui os seguintes valores de injeção de elos CCAT:

- Aproximadamente 5.850 MW fornecidos à rede em Araraquara 2;
- Aproximadamente 5.980 MW injetados na rede por Ibiúna;

- Aproximadamente 3.800 MW disponibilizados na rede por Estreito.

Nessa análise, foram avaliados índices estáticos para aferir as interações entre os elos de corrente contínua. Ressalta-se que os valores a seguir apresentados são essencialmente indicativos de potenciais interações entre os elos. Não devem ser considerados como um resultado final e definitivo, mas sim, como indicadores, a serem considerados, como elemento de “entrada” para os estudos de estabilidade. Os índices considerados nessa análise foram: *Multi-Infeed Interaction Factors (MIIFs)*, relações de curto-circuito (*SCRs*) vistas da barra de cada inversor e o *Multi-Infeed Short Circuit Ratios (MISCRs)* [4].

Na Tabela 3 a seguir, são apresentadas as matrizes de Multi-Infeed Interaction Factors (MIIFs), sendo que os elementos desta matriz foram calculados utilizando o programa ANATEM (T0+), a partir da energização de um reator de 500 Mvar no barramento e medindo-se as variações de tensão resultantes nas demais inversoras.

Tabela 3 – Índices *Multi-Infeed Interaction Factors (MIIFs)*

MIIF			
INVERSOR	Araraquara 2	Ibiúna	Estreito
Araraquara 2	1,0000	0,2715	0,2218
Ibiúna	0,4807	1,0000	0,3039
Estreito	0,3018	0,2310	1,0000

O grupo de trabalho do CIGRÉ (TB364 - *Systems with multiple DC Infeed*, 2008) publicou recentemente análises dos índices *MIIFs* para interações *Multi-Infeed*. As conclusões do grupo foram:

- *MIIF* até 0,15: baixa interação.
- *MIIF* de 0,15 a 0,40: interação moderada.
- *MIIF* acima de 0,40: forte interação.

Tendo como base os índices apresentados acima, percebe-se que para o cenário eletroenergético analisado, os inversores de Araraquara 2 e Ibiúna possuem uma forte interação, ou seja, uma falha de comutação em Ibiúna tem maior chance de provocar falha de comutação em Araraquara 2 do que em Estreito. Já na Tabela 4, a seguir, estão apresentadas as matrizes de *Multi-Infeed Short Circuit Ratios (MISCRs)* e *Short Circuito Ratios (SCRs)* calculados.

Tabela 4 – Índices *SCR* e *Multi-Infeed Short Circuit Ratios (MISCRs)*

SUBESTAÇÃO	MISCRs	SCRs
Araraquara 2 500 kV	2,80	3,98
Estreito 500 kV	2,59	4,73
Ibiúna 345 kV	2,46	4,09

De uma maneira geral, ao se examinar os resultados expostos na Tabela 4, percebe-se que as relações de curto-circuito (*SCRs*) individuais de cada inversor são elevadas, o que indicaria operação segura, de acordo com a referência [4].

Em relação aos índices *MISCRs*, os mesmos estão entre 2 e 3. Analisando os valores *MIIF* para a subestações Araraquara 2 e Ibiúna, pode-se inferir que um curto-circuito em Araraquara 2 provocará falhas de comutação em Ibiúna que possui o menor *MISCR*, sugerindo um risco de instabilidade de tensão para esse evento.

Adicionalmente, deve ser considerado que no sistema em análise, existe grande concentração de cargas nas proximidades dos inversores, o que significa que as potências injetadas não trafegam a longas distâncias pelas redes elétricas, ou seja, existem melhores condições de estabilidade de tensão que nos casos mais críticos com cargas distantes, o que não é bem refletido pelos tradicionais índices *SCR* e *MISCR*.

Além disso, deve ser considerado que estas condições são pessimistas, pois os níveis de curto-circuito considerados corresponderam a uma condição extrema, ou seja, operação com número mínimo de máquinas (mínima inércia), com todos os elos transmitindo a potência máxima simultaneamente.

Ressalta-se que a condição com todos os elos transmitindo a potência máxima simultaneamente tem baixa probabilidade de ocorrer, dado o regime hidrológico de cada uma das bacias hidráulicas associadas aos elos CCAT.

2.2 Análise Dinâmica à frequência fundamental

A configuração de rede considerada contempla todas as obras previstas para a entrar em operação até fevereiro de 2018, portanto, o circuito duplo em 500 kV entre Estreito e Fernão Dias não foi representado, conforme apresentado no Item 2, anterior. As análises dinâmicas consideraram a seguinte composição de filtros nas estações conversoras de Xingu e Estreito:

- Xingu: 3x180 Mvar, 3x200 Mvar;
- Estreito: 3x180 Mvar, 2x220 Mvar e 1x270 Mvar.

As contingências que serão analisadas bem como, o tempo de duração adotado para as falhas de comutação estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente.

Tabela 4 – Contingências Simuladas

Curto-circuito monofásico no barramento de 500 kV da SE Xingu por 100 ms. Abertura da LT 500 kV Xingu - Belo Monte
Curto-circuito monofásico no barramento de 500 kV da SE Estreito por 100 ms. Abertura da LT 500 kV Estreito - Jaguará
Curto-circuito monofásico no barramento de 500 kV da SE Araraquara 2 por 100 ms
Curto-circuito monofásico no barramento de 345 kV da SE Ibiúna por 100 ms
Curto-circuito monofásico em um pólo da LT em CC de 800 kV do elo Xingu – Estreito.
Curto-circuito monofásico em um pólo da LT em CC de 600 kV do elo Coletora Porto Velho – Araraquara 2.
Curto-circuito monofásico em um pólo da LT em CC de 600 kV do elo Foz do Iguaçu – Ibiúna.

Tabela 6 – Tempos Adotados para Falha de Comutação Coincidentes entre os elos CCAT

SUBESTAÇÃO EM FALTA (CC1Φ)	DURAÇÃO DA FALHA DE COMUTAÇÃO (MS)		
	Araraquara 2 500 kV	Ibiúna 345 kV	Estreito 500 kV
Araraquara 2 500 kV	100	48	48
Ibiúna 345 kV	48	100	48
Estreito 500 kV	48	48	100

Vale ressaltar que, como não são conhecidos os tempos de falha de comutação provocados por um curto-circuito monofásico em Estreito, foram adotados tempos conservadores para a avaliação do desempenho dinâmico do sistema frente a essa emergência.

Destaca-se que para todos os conversores, a recuperação é considerada completa a partir do instante, após a falta, que a potência CC do elo atinge 90% da potência CC anterior à falta. Ressalta-se que, uma vez atingido o valor de 90% da potência inicial, o mesmo não deve cair abaixo deste valor. Todos os elos apresentaram recuperações de potência inferiores a 200 ms, conforme requisitos dos últimos leilões de transmissão.

2.3 Análise Dinâmica (PSCAD)

No sentido de buscar a representação dinâmicas rápidas envolvidas no processo de interação de elos de correntes contínua com o sistema de corrente alternada são utilizados programas de transitórios eletromagnéticos, como por exemplo o PSCAD, programa utilizado nesse trabalho. Os estudos de transitórios eletromagnéticos permitem análises dos fenômenos no domínio do tempo ou pela reposta em frequência de seus componentes.

Os modelos dos controles dos elos CCAT entre as subestações Foz –Ibiúna, Coletora Porto Velho – Araraquara 2 e entre as subestações Xingu – Estreito estão descritos em na referência [1].

A representação da rede de transmissão analisada possui natural complexidade, devido ao nível de detalhamento dos equipamentos, que acabam refletindo em certo custo computacional, mesmo para os processadores atuais, por isso se faz necessária a utilização de equivalentes de rede.

Utilizando o cenário eletroenergético descrito anteriormente, foram definidos elementos que teriam seus parâmetros mantidos nos equivalentes de rede, considerando a proximidade elétrica das estações inversoras. Na análise em questão, considerou-se que as barras de fronteira estão a pelo menos duas subestações distantes da estação inversora mais próxima. Há casos nos quais optou-se por manter a representação de transformadores e linhas de transmissão consideradas importantes para o desempenho dinâmico e, a caracterização das impedâncias harmônicas vistas pelas estações inversoras. As Figuras 3, 4 e 5 a seguir, apresentam um esquemático da rede de transmissão a ser representada da região Norte/Nordeste, Sudeste e Sul, respectivamente.

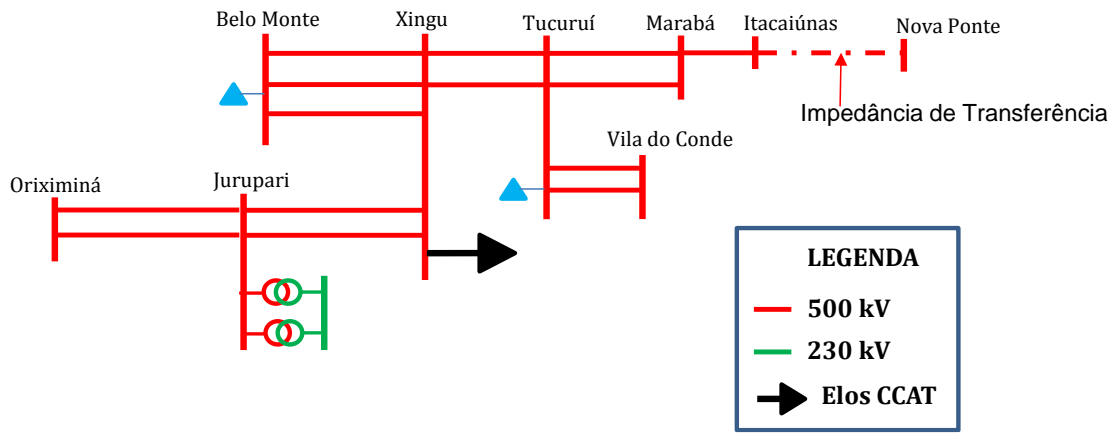


FIGURA 3 – Configuração do Equivalente Norte/Nordeste.

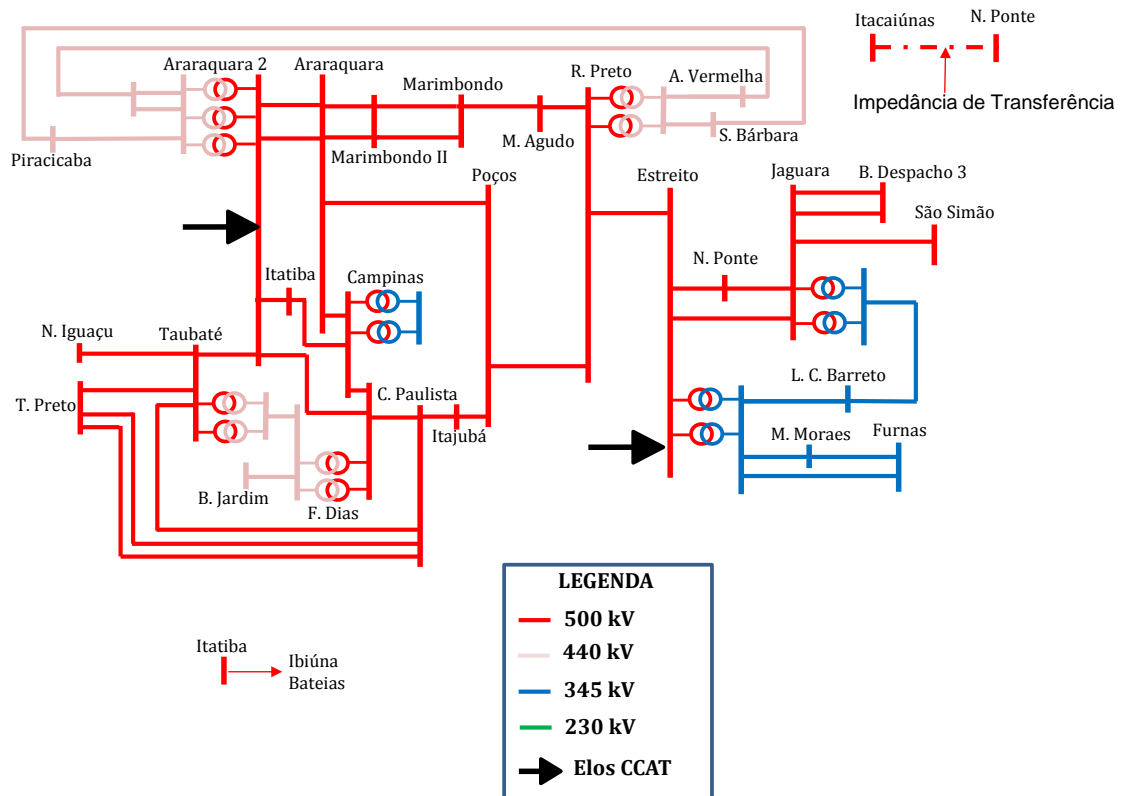


FIGURA 4 – Configuração do Equivalente Sudeste.

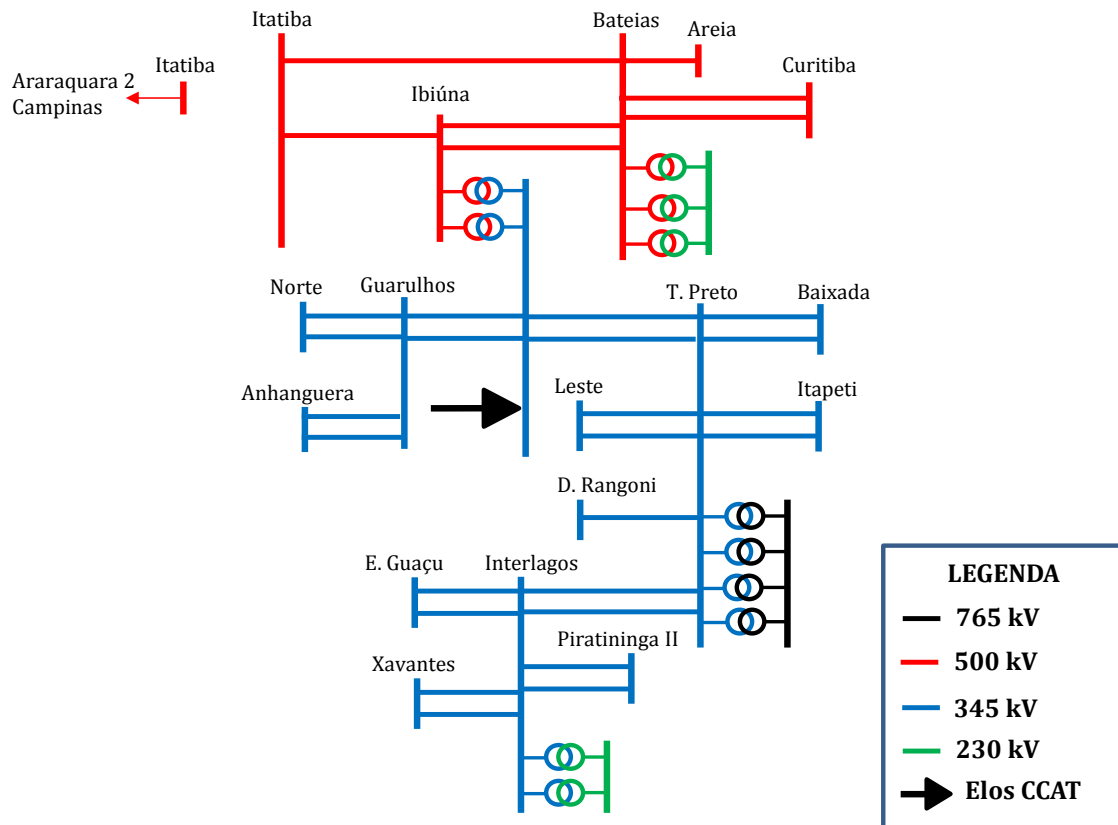


FIGURA 5 – Configuração do Equivalente Sul.

A validação dos equivalentes de curto-circuito no PSCAD foi feita através de curtos-circuitos francos monofásicos e trifásicos aplicados nas subestações Araraquara 2 (500 kV), Ibiúna (345 kV) e Estreito (500 kV), aceitando-se uma tolerância de 5% entre os níveis de curto-circuito nessas subestações para os sistemas completo e equivalente.

A determinação dos tempos de falhas de comutação no PSCAD foi feita através de curtos-circuitos francos monofásicos aplicados nas subestações Araraquara 2 (500 kV), Ibiúna (345 kV) e Estreito (500 kV) e através de curto-circuito da linha DC entre as subestações Xingu e Estreito.

A Tabela 7, a seguir, apresenta os tempos de falha de comutação para cada curto-circuito monofásico. Percebe-se que os tempos de falhas de comutação coincidentes (em mais de um elo no mesmo instante de tempo) foram inferiores aos adotados nas simulações dinâmicas a frequência fundamental.

Tabela 7– Tempos das Falhas de Comutação Coincidentes entre os elos CCAT

SUBESTAÇÃO EM FALTA	DURAÇÃO DA FALHA DE COMUTAÇÃO (MS)		
	Araraquara 2 500 kV	Ibiúna 345 kV	Estreito 500 kV
Araraquara 2 500 kV	100	32	Sem falha
Ibiúna 345 kV	32	100	Sem falha
Estreito 500 kV	Sem falha	Sem falha	100
LT Xingu – Estreito	Sem falha	Sem falha	Sem falha

Ressalta-se que para o curto-circuito monofásico em Araraquara 2, a falha de comutação em Ibiúna ocorre após o início da recuperação de potência CC dos bipolos de Araraquara 2. Destaca-se que não há falha de comutação nas estações conversoras na SE Estreito para curtos-circuitos monofásicos em Araraquara 2 e Ibiúna, esse comportamento pode ser verificado nas Figuras 6, 7 e 8 a seguir.

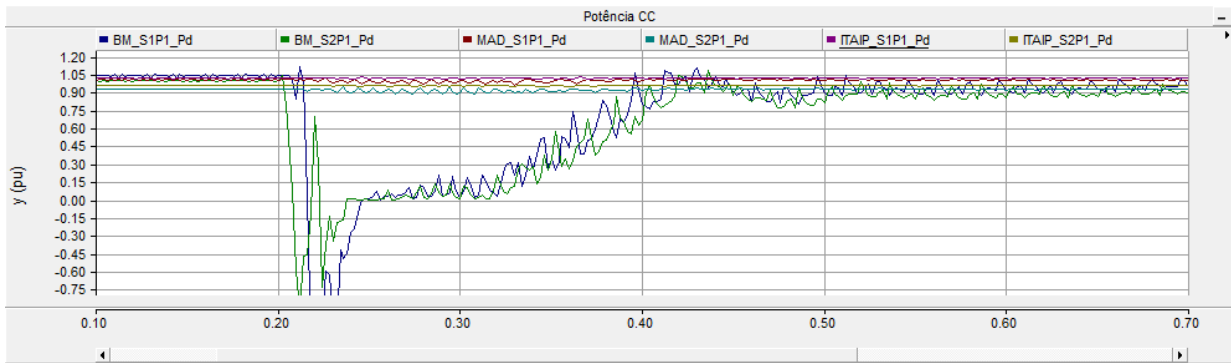


FIGURA 6 - CC1Φ Estreito. Potência elétrica nos Elos CCAT.

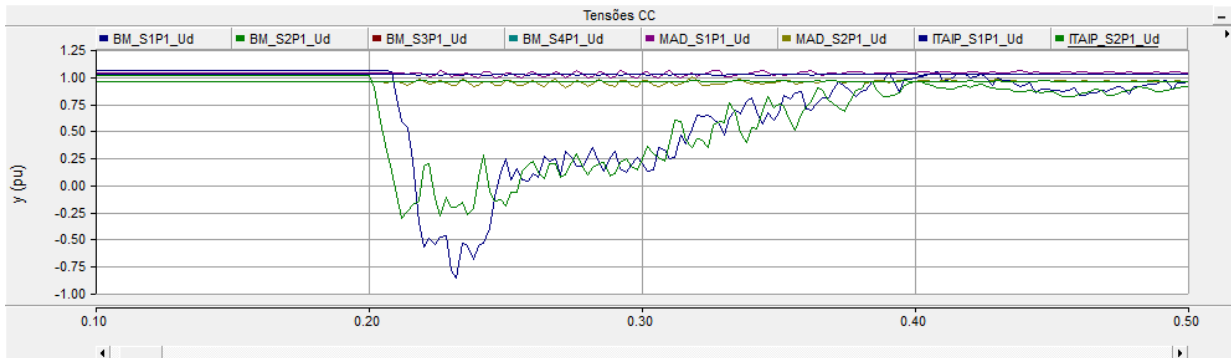


FIGURA 7 - CC1Φ Estreito. Tensão DC nos Elos CCAT.

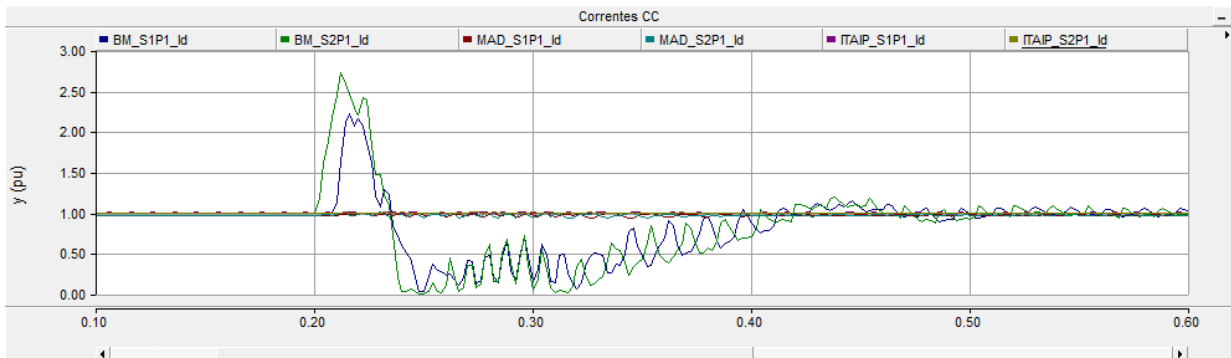


FIGURA 8 - CC1Φ Estreito. Corrente elétrica nos Elos CCAT.

Sugere-se que isso se deve pela ausência da LT 500 kV Estreito – Fernão Dias, circuitos 1 e 2 que aproximaria eletricamente essas subestações à SE Estreito e pelo número de máquinas consideradas na região Sudeste, no sentido de viabilizar o adequado controle de tensão dessa região.

3.0 - CONCLUSÃO

As avaliações do Desempenho Dinâmico da Região Sudeste considerando o *Multi-Infeed* desenvolvidas nesse trabalho para os elos CCAT de Ibiúna, Araraquara 2 e Estreito conduzem para as seguintes conclusões:

- O cálculo dos índices *Multi-Infeed Interaction Factors (MIIFs)* indicou que os elos de Ibiúna e Araraquara 2 possuem uma forte interação, enquanto que a relação entre os demais elos é moderada.
- Em relação aos índices *Short Circuit Ratios (SCRs)* e *Multi-Infeed Short Circuit Ratios (MISCRs)* os resultados indicam que tais valores são seguros para operação dos três elos de CCAT.
- As análises dinâmicas à frequência fundamental indicaram tempos de recuperação potência dos elos CC, inferiores à 200 ms, estando de acordo com os requisitos os últimos editais de transmissão. Os resultados também confirmaram os índices (*MIIFs*), indicando que um curto-circuito em Estreito não irá provocar afundamento de tensão acentuado em Araraquara 2 e Ibiúna, que leve a uma falha de comutação nessas subestações para este curto-circuito. Por outro lado, curto-circuito em Ibiúna deverá provocar falha de comutação em Araraquara 2.
- A ausência da LT 500 kV Estreito – Fernão Dias, circuitos 1 e 2 provoca uma redução na interação entre as conversoras das subestações Estreito, Araraquara 2 e Ibiúna, por outro lado reduz os níveis de curto-circuito da SE Estreito, o que provoca uma elevação no tempo de recuperação da potência elétrica do elo CCAT Xingu – Estreito para curtos-circuitos nesta subestação.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE-DEE-RE-136-2014-rev0, Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste - Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Xingu –Terminal Rio, Outubro de 2014, Brasil
- (2) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE-DEE-RE-062-2013-rev1, Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste - Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Xingu –Terminal Minas, Agosto de 2013, Brasil.
- (3) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. ONS RE-3-094/2016 – Plano da Operação elétrica 2017/2018 – PEL 2017 – Volume II – Interligações, Agosto de 2016, Brasil.
- (4) CIGRÉ TECHNICAL BROCHURE 364, *Systems with Multiple DC Infeed*, Working Group B4.41, Dezembro 2008, França.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alexandre de Melo Silva, nasceu em 21/10/1982 em Catalão, Goiás. Graduiu-se em Engenharia Elétrica e Física pela UFMG/UNICAMP em 2006. Especialização em Sistemas Elétricos de Potência pela UNIFEI (2011). Trabalhou na Eletronorte em 2007 na área de proteção de subestações. Trabalhou na EPE na Superintendência de Transmissão de Energia Elétrica entre 2007 e 2016. Trabalha no ONS como Engenheiro Eletricista desde 2007. Atualmente é Engenheiro Sênior I no ONS.



Sylvia Beatriz de Oliveira Nunes, nasceu em 12/12/1992 no Rio de Janeiro capital. Graduando-se em Engenharia Elétrica pelo CEFET/RJ com previsão de formatura em 2017. Atualmente é estagiária de Engenharia Elétrica no ONS.



Alexandre Rodrigues Nunes, nasceu em 19/10/1978 em São Gonçalo, Rio de Janeiro. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela UFF em 2006. Mestre em Engenharia Elétrica pela UFRJ (2010). Trabalha no ONS como Engenheiro Eletricista desde 2007. Atualmente é Engenheiro Sênior I no ONS.



Maria Alzira, nasceu em 08/09/1956 no Rio de Janeiro, RJ. Graduiu-se em engenharia elétrica em 1981 na PUC-RJ e obteve o grau de mestre em Engenharia Elétrica em 1998 pela Universidade Federal de Itajubá. Ingressou em Furnas em 1981 onde atuou nas áreas de operação e planejamento. Em 2005 entrou para EPE atuando no planejamento da expansão da transmissão. Desde 2012 está no ONS na área de planejamento da operação elétrica.



Rodrigo Villela de Faria, nasceu em 14/09/1984 no Rio de Janeiro, capital. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela UERJ em 2007. Trabalha no ONS como Engenheiro Eletricista desde 2008. Atualmente é Engenheiro Pleno II no ONS.