



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

METODOLOGIA PARA ESTUDO DE SISTEMAS HVDC MULTI-INFEED

ANTÔNIO RICARDO C. DIAS DE CARVALHO(1); FABIOLA FERREIRA CLEMENT VELIZ(1); LEONARDO PINTO DE ALMEIDA(1); ROGERIO MAGALHAES DE AZEVEDO(1); WO WEI PING(1); ANDRÉ BIANCO(2); BRUNO DA CRUZ SESSA(2); DALTON O.C. BRASIL(3); FERNANDO MACHADO SILVA(2); MARIA JOSÉ C. XIMENES(2); SIMONE BEZERRA CHAVES GARCIA(2); CEPEL(1); ONS(2); Consultor(3)

RESUMO

A presença de diversos elos CCAT no Sistema Interligado Nacional (SIN) exige a necessidade da correta avaliação do comportamento dinâmico do sistema elétrico, no sentido de preservar a segurança de sua operação. A denominada configuração *DC Multi-infeed*, que compreende a operação conjunta de elos CCAT e ganha importância quando há uma proximidade elétrica entre os conversores, ocorre atualmente no SIN com a presença de 5 elos CCAT, sendo que para breve entrará em operação o sexto (bipolo Xingu-Terminal Rio), elevando ainda mais a relevância da adequada avaliação do desempenho para uma operação segura deste sistema.

Um importante aspecto a ser analisado num sistema com múltiplas alimentações CCAT é a possibilidade de ocorrência de falhas de comutação simultâneas em diversos destes conversores, ocasionando uma interrupção momentânea da injeção de potência, o que poder incorrer em graves consequências para a estabilidade eletromecânica do sistema, ainda mais considerando, no caso brasileiro, que o montante transportado para a região Sudeste por esse conjunto de elos chegará na casa dos 20 GW.

Uma das dificuldades nesta análise é a correta detecção do fenômeno da falha de comutação, que tem natureza trifásica, ligada à dinâmica dos elementos semicondutores presentes nos conversores, numa abordagem de avaliação de estabilidade eletromecânica, cuja ferramenta computacional se utiliza de um modelo fasorial e monofásico. O presente artigo apresenta uma metodologia para estudo da estabilidade de sistemas *DC Multi-infeed*, através do uso combinado de programa de transitórios eletromagnéticos com programa de estabilidade eletromecânica.

PALAVRAS-CHAVE

HVDC, *DC Multi-infeed*, Metodologia de estudo, Análise de estabilidade, Anatem.

1.0 - INTRODUÇÃO

Com o aumento das instalações de sistemas em corrente contínua em alta tensão (CCAT) no Brasil, torna-se inevitável a ocorrência de fenômenos relacionados à configuração *DC Multi-infeed*, que consiste na convergência de mais de um elo CCAT para uma mesma região da malha CA, tornando-se mais relevante na medida da maior proximidade elétrica entre estes conversores. Estas configurações ocorrem também em outras partes do mundo, como no Canadá, Noruega, China e Índia. Neste artigo são utilizados os termos "elo CCAT" ou "bipolo CCAT" com o mesmo sentido, para denotar um tronco de transmissão em CCAT, já que no Brasil todos os elos são de configuração bipolar.

Atualmente no Sistema Interligado Nacional (SIN) estão em operação 5 elos CCAT, compostos pelos 2 bipolos de

(*) Av. Horácio de Macedo 354 – CEP 21941-911 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6230 – Email: aricardo@cepel.br

± 600 kV de 3150 MW cada, associados à UHE Itaipu, mais 2 bipolos ± 600 kV de 3150 MW associados ao escoamento da geração das usinas do rio Madeira, e o mais recente de ± 800 kV de 4000 MW que interliga a UHE de Belo Monte a subestação de Estreito (MG). Em breve entrará o sexto bipolo, criando mais um caminho da UHE de Belo Monte para a região Sudeste, conectando-se na subestação de 500kV de Terminal Rio (RJ). Todas as estações inversoras encontram-se na região sudeste do Brasil, caracterizando uma configuração *DC Multi-infeed* com 6 inversores, injetando nesta região um montante significativo da ordem de 20 GW (Figura 1).

O aspecto associado à configuração *DC Multi-infeed* mais preocupante no caso do SIN está relacionado à ocorrência de falhas de comutação (FC) simultâneas (em vários conversores ao mesmo tempo) e/ou consecutivas (nova falha de comutação durante o processo de recuperação do bipolo). Durante estes períodos, os conversores experimentarão a interrupção da transmissão de potência (MW) que impactará, em maior ou menor grau dependendo da abrangência destas falhas, a estabilidade eletromecânica do SIN, seja angular ou de frequência, ou até mesmo a possibilidade de colapso de tensão.

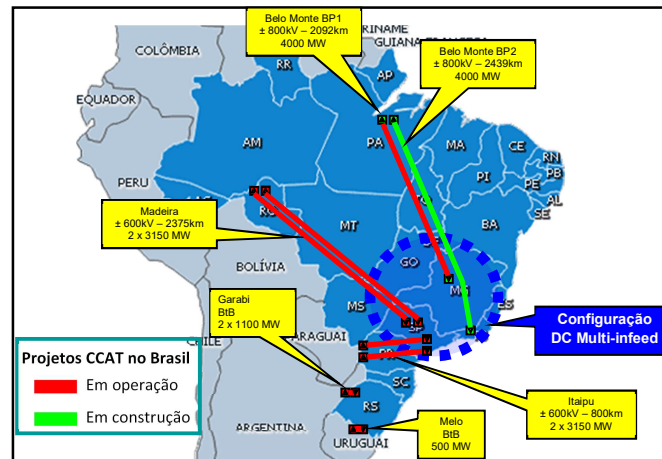


Figura 1 - Sistema DC Multi-infeed no SIN em 2020

Uma das dificuldades do estudo de estabilidade eletromecânica reside na correta detecção das FCs, por estas serem fenômenos de natureza trifásica e vinculados intrinsecamente à física dos tiristores e às condições sistêmicas. Como em programas de estabilidade a dinâmica das pontes conversoras é simplesmente representada pela equação de conversão CA/CC, a detecção da ocorrência de FCs não pode estar associada aos tiristores diretamente, sendo porém acessadas em modelos para simulação de transitórios eletromagnéticos (EMT).

Para avaliar este fenômeno com os recursos atualmente disponíveis foi inicialmente proposta pelo ONS uma metodologia de estudo [1] em que são realizadas simulações com o uso combinado de uma ferramenta para transitórios eletromagnéticos (EMT), no caso o PSCAD, juntamente com uma ferramenta para avaliação de transitórios eletromecânicos (TSA), no caso o Anatem.

Para fins de avaliação e teste desta metodologia, o ONS contratou um Projeto junto ao CEPEL, no qual utilizou-se um sistema piloto do SIN como exemplo. Observa-se que, embora se tenha feito avaliações dinâmicas, elas não podem configurar um estudo de desempenho real do sistema, face as premissas adotadas, como detalhado à frente.

2.0 - METODOLOGIA PROPOSTA PARA ESTUDO DE SISTEMAS DC MULTI-INFEED

O conceito central da metodologia [1] consiste no uso combinado do programa de transitórios eletromagnéticos (no caso, escolheu-se o PSCAD) juntamente com um programa de estabilidade eletromecânica (no caso adotou-se o Anatem), como mostrado na Figura 2. Os transitórios eletromecânicos, fenômenos de baixa frequência, são simulados em software como o Anatem, em que o modelo do sistema descreve a dinâmica dos inúmeros geradores e seus controladores, interconectados pela rede elétrica que é representada por cerca de milhares de barras (no caso do SIN) mas apenas através da rede de sequência positiva à frequência fundamental. Além disso, o sistema de disparo das válvulas e os conversores dos elos CCAT são representados de forma simplificada no programa Anatem, adequado para estudos de transitórios eletromecânicos, contudo inadequado para a detecção de falhas de comutação. Por outro lado, as simulações realizadas no PSCAD, destinado ao estudo de fenômenos de alta frequência, são de elevado custo computacional, sendo a natureza trifásica da rede de transmissão adequadamente modelada, mas restrita, no máximo, a poucas centenas de barras e desprezando-se a dinâmica dos geradores e seus controladores. Para fins da metodologia empregada, os conversores CCAT e seus controles são detalhadamente representados no PSCAD, visto que o objetivo é identificar as eventuais falhas de comutação nos múltiplos terminais conversores, caracterizando o número de ocorrências e seu tempo de duração. No Anatem, então, se analisa o impacto dinâmico no SIN, representado pelas suas milhares de barras, das falhas de comutação dos múltiplos elos CCAT (previamente detectadas através das simulações do PSCAD e modeladas no

Anatem pela interrupção da injeção de potência dos elos durante o período estimado da falha de comutação). Faz-se desta forma o uso combinado dos recursos de cada ferramenta.

Resumidamente, a metodologia pode ser dividida nas seguintes macro etapas:

- 1) Preparatória (verde), em que o resultado é a escolha do caso mais crítico para estudo.
- 2) Fase do PSCAD (azul), quando se realiza a montagem dos equivalentes da rede para PSCAD, e posterior processamento de contingências (em diferentes pontos da rede) para determinação da ocorrência ou não de FCs, e respectivos tempos de falha de comutação.
- 3) Fase do Anatem (vermelho), quando ocorre a simulação do SIN com modelagem completa de toda a rede e geradores (e respectivos controladores). São aplicados os resultados oriundos do PSCAD quanto às FCs.

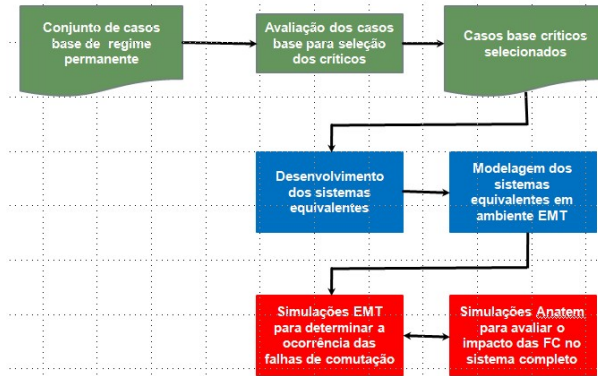


Figura 2 – Metodologia para estudo dinâmico de sistemas *DC Multi-infeed*

3.0 - ÍNDICES PREDITIVOS DE SISTEMAS HVDC

Nesta seção são apresentados os índices preditivos de desempenho comumente empregados em estudo de sistemas de potência com elos CCAT.

3.1 Índices usados em sistemas *single-infeed*: SCR e ESCR

SCR (<i>Short Circuit Ratio</i>)	ESCR (<i>Effective Short Circuit Ratio</i>)
$SCR_i = \frac{S_{cc_i}}{P_{dc_i}}$	$ESCR_i = \frac{S_{cc_i} - Q_i}{P_{dc_i}}$
Onde S_{cc_i} é a potência de curto circuito trifásica da barra inversora do conversor "i", e P_{dc_i} é a potência injetada pelo conversor "i".	Onde Q_i é o montante total de potência da compensação reativa e dos filtros CA do conversor "i".

3.2 Índices usados em sistemas *DC Multi-infeed*: MISCR e MIESCR

Na brochura técnica do Cigré [2] é proposto o cálculo do índice denominado MIIF (*Multi-infeed Interaction Factor*), a partir de uma ferramenta de transitórios eletromecânicos, que procura mensurar a interação entre duas barras inversoras de um sistema CA. Este índice é obtido através da relação entre a variação de tensão observada em uma barra inversora j causada por uma pequena variação de tensão em outra barra inversora i, através do chaveamento de um pequeno reator, definido matematicamente pela equação seguinte, sendo ΔV_i aproximadamente 1% para que a resposta do sistema esteja na região de operação linear.

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i}$$

Dessa forma, barras inversoras eletricamente distantes terão valores de MIIF muito próximos a zero, enquanto elos que possuam a mesma barra inversora terão valores de MIIF iguais a um. Para análise da interação de elos CCAT em sistemas com configuração *DC multi-infeed*, é bastante comum a construção de uma matriz de fatores MIIF na qual é possível observar de forma direta o quanto um elo CCAT interage com outro.

A extensão do conceito do SCR e ESCR (aplicado para *single-infeed*) para sistemas *multi-infeed* é mostrada pelas expressões a seguir:

MISCR (Multi-infeed Interaction SCR) $MISCR_i = \frac{Scc_i}{Pdc_i + \sum_j (MIIF_{j,i} Pdc_j)}$	MIESCR (Multi-infeed Interaction ESCR) $MIESCR_i = \frac{Scc_i - Qf_i}{Pdc_i + \sum_j (MIIF_{j,i} Pdc_j)}$
--	--

O MISCR (*Multi Infeed Interaction SCR*) é definido, conforme a referência [2], em função do MIIF e das potências dos elos envolvidos segundo expressão acima apresentada. Analogamente à evolução do SCR para ESCR, pode-se definir MIESCR (*Multi Infeed Interaction ESCR*), onde os valores dos filtros (Qf) são considerados.

4.0 - CASO BASE ADOTADO

Foi adotado um caso base (Figura 3), para exemplificar a aplicação desta metodologia, retirado do estudo do PAR 2016-2018/19 do ONS, referente ao ano de 2019, em carga leve, no cenário energético do Norte exportador para o Sudeste. Este caso, em que se supõe com todos os 6 bipolos CCAT do SIN em operação, foi escolhido por apresentar características mais desfavoráveis no aspecto do *DC Multi-infeed* (baixos valores de MIESCR).

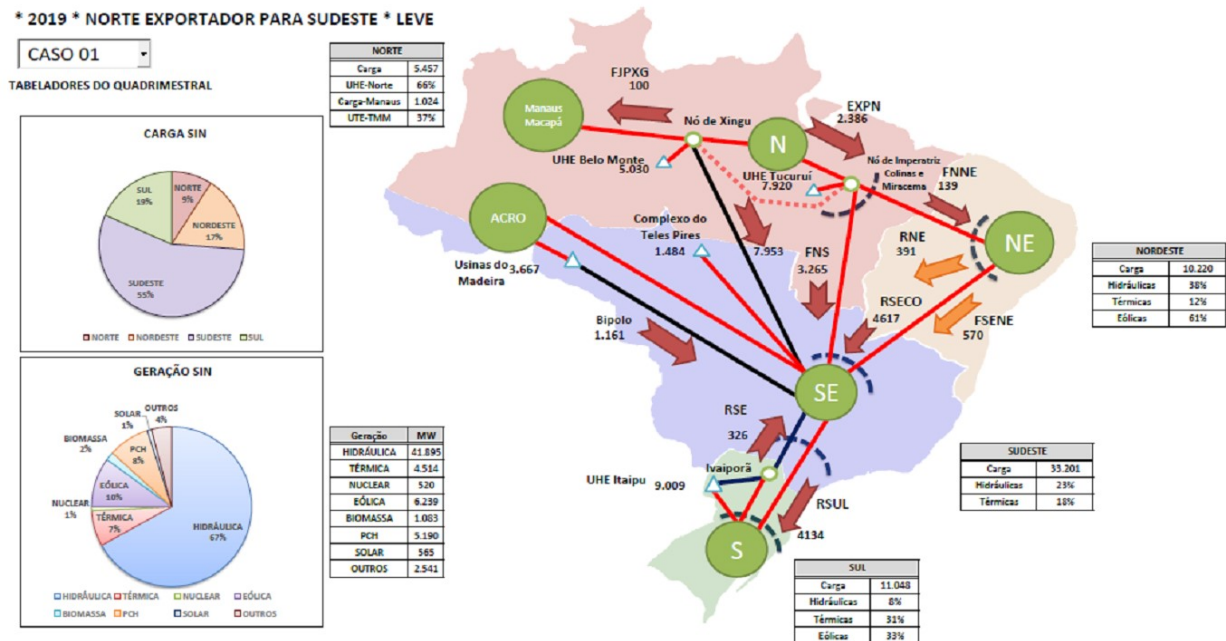


Figura 3 – Caso base adotado: referente ao ano de 2019, em carga leve, no cenário energético do Norte exportador para o Sudeste.

Apesar de existirem 6 bipolos, e por conseguinte 6 estações inversoras, há no entanto 4 barras de comutação pois os elos de Itaipu e de escoamento da geração das usinas do rio Madeira são constituídos por bipolos paralelos, que compartilham as mesmas barras de comutação CA. Foram calculados os índices MIIF entre as barras de comutação dos 6 elos HVDC, conforme mostrado abaixo (tabela à esquerda). A tabela à direita apresenta os demais parâmetros de relevância associados a estas 4 barras de comutação: Ibiúna 345kV, Araraquara 500kV, Estreito 500kV e Terminal Rio 500kV.

Tabela 1 – Valores de MIIF (esquerda) e MIESCR (direita)

Valores de MIIF entre as barras das conversoras					Valores de Pd, Nível de curto, ESCR e MIESCR				
MIIF(j,i)	IBIU	ARAR	ESTR	TRIO	2019-Leve	Pdc[MW]	Scc-Qf [MVA]	ESCR	MIESCR
IBIU	1,000	0,477	0,391	0,407	IBIU	3525	18293	5,19	2,28
ARAR	0,472	1,000	0,514	0,467	ARAR	2897	18750	6,47	2,22
ESTR	0,324	0,429	1,000	0,367	ESTR	3822	15893	4,16	2,05
TRIO	0,296	0,344	0,323	1,000	TRIO	3797	13754	3,62	1,93

Nota: **IBIU** = Ibiúna 345kV; **ARAR** = Araraquara 500kV; **ESTR** = Estreito 500kV; **TRIO** = Terminal Rio 500kV

Inicialmente, ao se analisar a tabela com os valores de MIIF, é possível notar que, de forma geral, os maiores fatores são os da linha relacionada à SE Araraquara, o que significa dizer que esta é a conversora de maior interação no cenário estudado. Ou seja, dentre todos os conversores analisados, uma perturbação na SE Araraquara é a mais propensa a ser percebida pelos demais conversores. Isso revela, por exemplo, que a maior

probabilidade de uma falha de comutação em uma estação inversora provocar falha de comutação em estações próximas está associada a distúrbios na SE Araraquara. Já na segunda tabela, é interessante notar que apesar dos índices **ESCR** serem relativamente elevados, os índices **MIESCR** estão numa faixa de valores que, a princípio, se mantido o mesmo critério de avaliação para *DC single-infeeds*, indicariam sistemas fracos e que merecem a devida atenção quanto aos aspectos da interação entre os elos CCAT.

5.0 - PREPARAÇÃO DE DADOS PARA A SIMULAÇÃO EMT

Segundo a metodologia proposta, a ferramenta de transitórios eletromagnéticos (EMT) é utilizada para a determinação dos tempos de falha de comutação em cada inversor na ocorrência de perturbações no sistema. A duração das eventuais falhas de comutação detectadas na ferramenta EMT é utilizada nas simulações no programa de estabilidade (TSA) para avaliar seu efeito na estabilidade eletromecânica do sistema.

Foram produzidos dois equivalentes, para fins de comparação dos resultados em função da modelagem da rede, em níveis distintos de detalhamento, sendo o mais simples identificado como **Eqv0**, e compreende a representação de todo o sistema CA por meio de equivalentes de rede calculados na frequência fundamental, conectados nas barras das estações conversoras e entre estas. O mais complexo (maior número de barras representadas), identificado por **Eqv2**, foi elaborado segundo os requisitos do Procedimento de Rede do ONS, com representação dos equipamentos até a segunda vizinhança das subestações de interesse (rede interna) e equivalentes de rede na frequência fundamental conectados nas barras de fronteira (rede externa).

5.1 Conceito básico

O procedimento para construção da rede equivalente no PSCAD está apresentado na Figura 4.

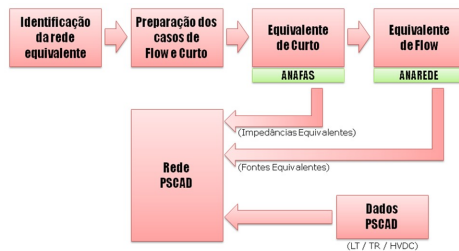


Figura 4 – Processo para construção do sistema equivalente no PSCAD

A “Rede PSCAD” é construída a partir de dados da rede “Equivalente de Curto” (proveniente do programa de curto circuito Anafas), de dados da rede “Equivalente de Flow” (proveniente do programa de fluxo de potência Anarede), e “Dados PSCAD”, que, essencialmente, são aqueles voltados para estudos de transitórios eletromagnéticos, tais como os parâmetros distribuídos de linhas de transmissão e dados de saturação de transformadores, entre outros. Os elementos do sistema elétrico que estão no entorno das barras CA conversoras formam a região de interesse do sistema a ser analisada, e devem ser naturalmente representados.

5.2 Rede equivalente EMT mais reduzida (Eqv0)

Esta rede equivalente é constituída pelas barras CA conversoras (ou de comutação) e as respectivas impedâncias próprias e de transferência, em sequência positiva e sequência zero, além de uma conexão equivalente representando o tronco CA Norte-Sul em 500 kV, preservado por se tratar de um tronco paralelo ao Sistema CCAT associado à UHE Belo Monte. A comparação de grandezas elétricas dos elos CCAT da Rede Eqv0 (PSCAD) com as do “Equivalente de Fluxo de Potência”, mostra que há uma concordância adequada dos seus valores, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação das principais variáveis dos elos CCAT Anarede e no equivalente do PSCAD (Eqv0)

		ANAREDE				PSCAD				Erro(%)			
		Itaipu	Madeira	Estreito	T.Rio	Itaipu	Madeira	Estreito	T.Rio	Itaipu	Madeira	Estreito	T.Rio
R E T	Vac(pu)	1,039	1,064	1,051	1,051	1,035	1,060	1,050	1,050	0,40	0,40	0,06	0,06
	Vdc(pu)	1	1	1	1	0,995	0,996	0,996	0,996	0,51	0,44	0,38	0,40
	Idc(pu)	0,578	0,476	1	1	0,578	0,476	1,000	1,000	0,01	0,01	0,00	0,00
	Pdc(pu)	0,578	0,476	1	1	0,575	0,474	0,996	0,996	0,52	0,44	0,38	0,40
	Pac(MW)	3620	3000	4000	4000	3605	2991	3999	3998	0,41	0,28	0,02	0,05
	Qfilt(Mvar)	1663	1786,8	1546,5	1988,4	1648	1771	1546	1987	0,88	0,89	0,06	0,07
	Alfa(graus)	15	15	15	15	14,78	15,04	16,04	16,15	1,43	-0,29	-6,95	-7,67
I N V	Vac(pu)	1,015	1,092	1,079	1,075	1,012	1,089	1,078	1,074	0,34	0,29	0,13	0,09
	Vdc(pu)	0,974	0,964	0,956	0,949	0,967	0,958	0,952	0,946	0,76	0,57	0,39	0,33
	Idc(pu)	0,578	0,476	1	1	0,577	0,475	1,000	1,000	0,09	0,15	0,01	0,01
	Pdc(pu)	0,562972	0,458864	0,956	0,949	0,558	0,456	0,952	0,946	0,85	0,72	0,40	0,34
	Pac(MW)	3524,8	2893,2	3822,2	3797,2	3487	2860	3793	3769	1,07	1,15	0,76	0,74
	Qfilt(Mvar)	1780,7	2182,4	2037	2079,7	1768	2170	2028	2074	0,72	0,59	0,43	0,25
		Gama(graus)	17	17	17	17	17,76	18,00	17,45	17,55	-4,46	-5,90	-2,63

5.3 Rede equivalente EMT estendida (Eqv2)

A rede equivalente Eqv2 consiste em uma rede mais complexa que a apresentada anteriormente, abrangendo, no mínimo, até a segunda vizinhança das barras conversoras e incluindo o tronco de transmissão Norte-Sul em 500 kV, conforme esquematicamente destacado nas regiões em amarelo na Figura 5. A rede equivalente Eqv2 tem 107 subestações, 179 linhas de transmissão e 37 transformadores.

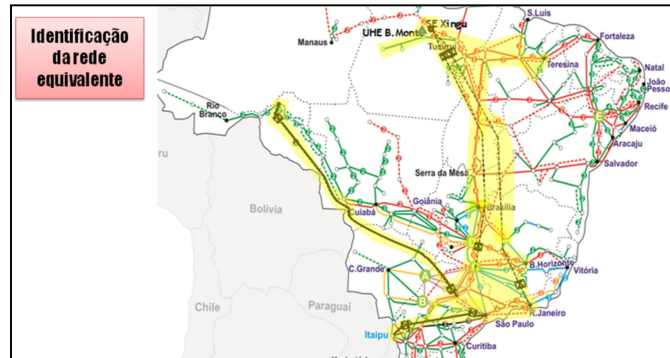


Figura 5 – Identificação das barras do Eqv2 no SIN (região retida - destacada em amarelo).

Os níveis de curto circuito das barras da rede Eqv2 e da rede completa foram comparados, e constatou-se existência de pequenas diferenças nos dois modelos que podem ser atribuídas a diferenças de topologia e valores dos parâmetros existente nos dois modelos (de fluxo de potência e de curto-circuito), muito embora tenham sido envidados esforços na tentativa de equalização dessas diferenças.

A validação da rede Eqv2 quanto ao ajuste de fluxo de potência demandou um esforço adicional devido às possíveis diferenças mencionadas, porém chegou-se a um equivalente (Eqv2) final com a grande maioria das barras apresentando diferenças de tensão menores que 1%.

5.4 Falha de comutação (FC) x Tempo de interrupção de potência (TIP)

A metodologia inicialmente proposta baseia-se na utilização dos tempos de duração das falhas de comutação, obtidos nas simulações em PSCAD, como dados de entrada no modelo de falha de comutação do Anatem. Contudo, a duração de uma falha de comutação em um elo CCAT é menor que o período de interrupção da potência transmitida, devido ao tempo necessário para a resincronização de seu respectivo circuito de disparo. Para simulação no Anatem, torna-se mais importante a utilização do período de tempo efetivamente sem a transmissão de potência, pelo seu impacto no balanço de potência do sistema. Desta forma, ao invés do período de falha de comutação, como originalmente proposto, adotou-se o conceito do Tempo de Interrupção de Potência – TIP – também obtido a partir das simulações no PSCAD, ou em outra ferramenta EMT.

A Figura 6 exemplifica o período da ocorrência de falhas de comutação, através dos indicadores CF6 (falha em uma das pontes de 6 pulsos, pulsos em azul) e CF12 (falha simultânea em ambas as pontes de 6 pulsos, pulsos em vermelho), presentes nos modelos dos elos CCAT utilizados (no PSCAD), após uma simulação de curto circuito monofásico no barramento de Araraquara 500 kV. No mesmo gráfico é mostrada a potência CC injetada pelo correspondente inversor do sistema do rio Madeira (curva em verde), onde se observa que enquanto a falha de comutação permaneceu por cerca de 50 ms, a interrupção de potência apresentou uma duração de cerca de 120 ms. Considerou-se como critério para fins de medição do TIP o instante de tempo a partir do qual a potência CC não mais se anula durante o período de recuperação. Adotando-se este conceito, foram medidos os valores de TIP nos diversos casos de curto circuito monofásico simulados no PSCAD, para serem posteriormente utilizados como dados de entrada nas simulações no Anatem.

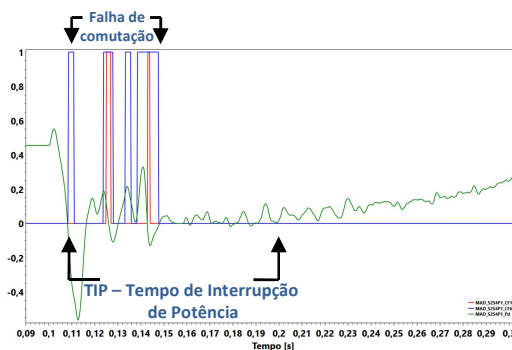


Figura 6 – Curto monofásico em Araraquara 500kV simulado no PSCAD com a rede Eqv0 – falha de comutação por 50 ms e TIP de 120 ms

Outra informação que é obtida na simulação EMT, a ser utilizada na posterior simulação no Anatem, refere-se a possível latência envolvida. Entende-se como latência o período de tempo entre o início do defeito (ex.: curto circuito em barra) e a efetiva ocorrência de falha de comutação do inversor. O ONS tem adotado em suas simulações no Anatem a aplicação de uma latência de 20 ms, após a ocorrência de defeitos remotos na rede. Pela experiência acumulada na análise de simulações com os programas ATP e PSCAD, considera-se adequado este tempo de latência quando da simples ocorrência de falha de comutação em algum inversor, mas sem defeitos na rede. Quando ocorrem defeitos na rede, os tempos de latência são mais reduzidos, como comprovado nas simulações realizadas no PSCAD.

6.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EMT

Foram realizadas simulações com aplicação de defeito (monofásico) em todas as barras conversoras, além de outras barras na região Sudeste (Eqv2), visando simular defeitos remotos. Tomando-se o exemplo do defeito na barra CA da conversora de Estreito 500 kV (barra de comutação da inversora do elo de 800kV Xingu-Estreito), os gráficos obtidos do PSCAD com o uso de ambos equivalentes (Eqv0 e Eqv2) são mostrados na Figura 7.

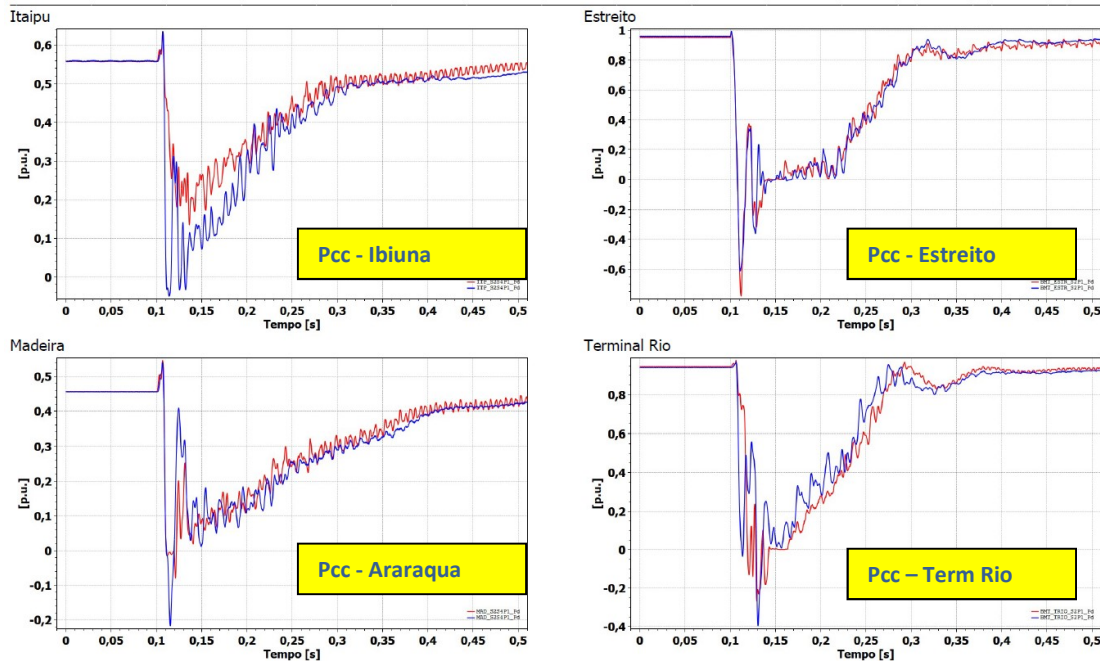


Figura 7 – Resultados do PSCAD para simulação de curto em Estreito 500 kV Potência CC nas barras de comutação (vermelho: Eqv0, azul:Eqv2)

Destes gráficos são medidos os TIPs ocorridos em todas as estações inversoras. É interessante observar a semelhança dos comportamentos das Potências CC obtidos com os dois equivalentes (Eqv0 e Eqv2). Ao se comparar os valores de TIP, observa-se que os mesmos não diferem em mais de 20 ms de um equivalente para o outro, conforme mostrado na Tabela 3, mostrando a princípio, que a representação da rede na ferramenta EMT não é mandatória, embora se recomende uma avaliação mais detalhada sobre esta afirmação.

Tabela 3 – Valores de TIP nos diversos inversores quando da simulação no PSCAD de defeito monofásico (na barra indicada na coluna à esquerda)

		TIP usando Eqv0				TIP usando Eqv2			
		TIP - Tempo de interrupção de potência - Eqv0 - Caso 1				TIP - Tempo de interrupção de potência - Eqv2 - Caso 1			
		Itaipu	Madeira	Estreito	T.Rio	Itaipu	Madeira	Estreito	T.Rio
C C 1 F	IBIUNA	110 ms	45 ms	50 ms	70 ms	110 ms	60 ms	50 ms	50 ms
	ARARAQUARA	35 ms	120 ms	50 ms	65 ms	35 ms	130 ms	65 ms	65 ms
	ESTREITO	16 ms	40 ms	115 ms	65 ms	35 ms	50 ms	115 ms	60 ms
	TERMINAL RIO	35 ms	45 ms	55 ms	110 ms	30 ms	55 ms	55 ms	130 ms

7.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO ANATEM

Uma vez obtidos os valores de TIP na ferramenta EMT, no âmbito do Anatem, ao invés de se usar o modelo aproximado de ocorrência de FC disponibilizado no programa, e identificado pelo código de execução DFCM, o

qual opera conforme o nível de tensão da barra CA e/ou o ângulo de extinção, passa-se a utilizar a informação então obtida, que em essência indica se houve a ocorrência da FC, e o respectivo tempo de duração, para todos os inversores do sistema.

Tomando novamente o exemplo da simulação de um defeito monofásico na barra de Estreito 500kV, obtém-se como resultado do Anatem gráficos mostrados na Figura 8.

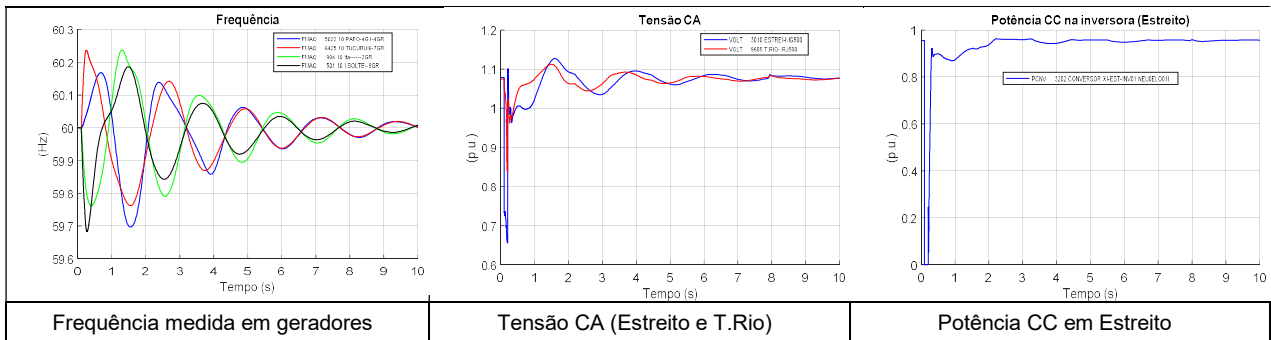


Figura 8 – Resultados do Anatem para simulação de curto em Estreito 500 kV

Foi observado que a medição dos valores de TIP a partir dos resultados do PSCAD, utilizando os gráficos de potência (MW) injetada pelos elos CCAT, envolve alguma imprecisão diante das variações e oscilações apresentadas por esta variável em função do comportamento transitório do sistema após uma perturbação, mesmo considerando o critério de potência não nula durante a recuperação, como já citado. Ao se aplicar a metodologia na forma originalmente proposta, isto resultaria em uma única simulação no Anatem.

Entretanto, deve-se ter em mente, além da imprecisão da definição do TIP, que o fenômeno da falha de comutação numa inversora de um elo CCAT possui uma natureza probabilística, dependendo, por exemplo, do ponto em que a onda de tensão se encontra quando ocorre o defeito e, também, da presença de harmônicos que a distorcem e deslocam seu ponto de cruzamento por zero, além da própria natureza dos tiristores. Por estas razões, sugeriu-se e acrescentou-se à metodologia a adoção de uma análise de sensibilidade nas avaliações dos estudos dinâmicos, com o intuito de agregar uma margem de segurança e assim mitigar as incertezas envolvidas.

Neste sentido, a análise de estabilidade no Anatem passou a ser realizada mediante a aplicação de uma sensibilidade nos valores de TIP medidos no PSCAD. Uma proposta seria, por exemplo, a aplicação de ± 20 ms no TIP, como mostrado a seguir.

A título de exemplo, a segunda linha (em destaque) da Tabela 4 mostra os valores de TIP extraídos do caso de curto circuito monofásico no barramento de 500 kV da SE Estreito, simulado no PSCAD, usando o Eqv2. Nesta simulação, há FC simultânea em todos os inversores, após a aplicação do defeito, com TIPs de 35 ms em Ibiúna, 50 ms em Araraquara, 115 ms em Estreito e 60 ms em Terminal Rio.

A mesma simulação no Anatem, usando estes valores de TIP, resulta em um caso estável do ponto de vista eletromecânico. Fez-se, então, uma análise de sensibilidade simulando-se dois casos adicionais, como mostrado na Tabela 4, um mais favorável, reduzindo-se os TIPs em 20 ms, e outro desfavorável, aumentando-se em 20 ms. Adotou-se como critério para esta avaliação, manter um valor mínimo de TIP igual a 110 ms quando o inversor está conectado na barra em defeito.

Tabela 4 – Valores de TIP nos diversos inversores quando da simulação no PSCAD de defeito monofásico em Estreito 500 kV

TIP (ms)	Ibiúna	Araraquara	Estreito	Terminal Rio	Simulação Anatem
Curto circuito monofásico em Estreito 500 kV	20	30	110	40	- 20 ms
	35	50	115	60	Pscad base
	55	70	135	80	+ 20 ms

Cabe ressaltar que a análise de sensibilidade apresentada neste caso, alterando-se o TIP na mesma proporção em todos os conversores, é apenas um exemplo de critério para tal, podendo-se adotar outras alternativas. Considera-se que caso as três simulações em questão não apresentem problema dinâmico, o risco de instabilidade a que o sistema ficaria exposto, para esta perturbação, é baixo. Caso alguma delas apresente comprometimento da integridade do sistema, sugere-se que se procure investigar com mais detalhes os valores de TIP, conversor a conversor, aprofundando-se a análise para uma definição ainda mais embasada, ou se adote uma postura mais conservativa, assumindo-se este resultado como esperado e então, de imediato, demandando medidas corretivas.

8.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresenta uma metodologia para estudo de sistemas, visando a análise de estabilidade eletromecânica, contendo elos de transmissão em CCAT que configurem *DC Multi-infeed*, como é o caso do SIN, em que convergem, em boa parte do tempo, para a região Sudeste 6 bipolos CCAT, que totalizam cerca de 20 GW de potência transmitida.

A abordagem proposta considera o uso combinado de duas ferramentas complementares, sendo uma para simulação de transitórios eletromagnéticos (EMT) e a outra para análise de estabilidade eletromecânica (TSA). Os resultados foram obtidos através de dois programas amplamente difundidos no setor elétrico brasileiro, respectivamente o PSCAD, e o Anatem.

O uso de ferramentas EMT reside na necessidade de se determinar com mais precisão o fenômeno das falhas de comutação que ocorrem nas válvulas das conversoras CA/CC, que necessitam de uma ferramenta de representação trifásica e de valores simultâneos. A detecção da ocorrência deste fenômeno, juntamente com a informação da sua duração, são alimentados no Programa de estabilidade eletromecânica para a correta simulação do comportamento dinâmico dos sistemas CCAT visando a avaliação da estabilidade eletromecânica do sistema de potência como um todo. Foram mostrados todos os passos para execução de tal estudo, exemplificado com um caso base do SIN.

Destaca-se que uma importante recomendação, resultante das avaliações, é a adoção de uma análise de sensibilidade nas simulações dinâmicas, para contemplar a natureza probabilística da ocorrência e duração do fenômeno das falhas de comutação.

No desenvolvimento deste trabalho foi também verificado que os resultados obtidos, para o propósito deste estudo, com equivalentes de diferentes níveis de detalhamento (Eqv0 e Eqv2) foram muito semelhantes. Tanto os valores de TIP (Tempo de interrupção de potência) obtidos com os dois equivalentes, quanto as próprias respostas resultantes das simulações guardam boa correspondência. Entretanto, uma avaliação mais detalhada sobre esta questão é recomendável em trabalhos futuros, de modo a identificar se isto foi um caso particular do sistema estudado.

Foi observado que, no caso do SIN, apesar dos índices ESCR (*Effective Short Circuit Ratio*) serem relativamente elevados (variando de 3 a 6), significando um quadro confortável, os índices MIESCR (*Multi-infeed Interaction ESCR*) estão numa faixa de valores (em torno de 2), que indica sistemas que merecem a atenção nos aspectos relacionados às interações em *DC Multi-infeed*.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Nota Técnica 0161/2016, intitulada "Proposta de Metodologia e Critérios para Estudo de Interações entre Múltiplos Elos em CC", emitida em Dez 2016 pelo ONS.
- (2) Systems with Multiple DC Infeed, Cigre TB 364, Working Group B4-41, April 2008.
- (3) Relatórios da "Investigação dos efeitos do *DC Multi-infeed* no SIN", Cepel, DRE, produzidos em 2017.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



ANTÔNIO RICARDO CAVALCANTI DIAS DE CARVALHO

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.

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 e da alternativa CCAT para o aproveitamento das usinas do rio Madeira. Atualmente encontra-se como Assistente da Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Cepel. É membro do Comitê de Estudos B4 (HVDC e FACTS) do Cigré-Brasil.

Co-autores (Cepel): **FABIOLA FERREIRA CLEMENT VELIZ; LEONARDO PINTO DE ALMEIDA; ROGERIO MAGALHAES DE AZEVEDO; WO WEI PING;**

Co-autores (ONS): **ANDRÉ BIANCO, BRUNO DA CRUZ SESSA, FERNANDO MACHADO SILVA; MARIA JOSÉ C. XIMENES e SIMONE BEZERRA CHAVES GARCIA; DALTON O.C. BRASIL** (quando do desenvolvimento do trabalho ocupava o cargo de Assessor da Diretoria de Administração da transmissão do ONS, e atualmente é consultor independente).