



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

FI/GAT/25  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - IV**

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

**FENÔMENOS DE BAIXA FREQUÊNCIA DEVIDO À INTERAÇÃO DE  
MÚLTIPLOS ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA**

**Fernando Machado (\*)**  
ONS

**Zulmar S. Machado Júnior**  
UNIFEI

**André Bianco**  
ONS

**RESUMO**

Este trabalho refere-se às interações de baixa frequência em sistema de potência resultantes da presença de múltiplos elos de corrente contínua em alta tensão (CCAT). São apresentados sistemas de estudo com dois e três elos CCAT transmitindo energia para uma mesma região geoeletrica. Utiliza-se uma ferramenta de análise de pequenas perturbações para traçar o lugar das raízes parametrizando grandezas como a distância elétrica entre as estações inversoras, além de possibilitar a investigação da observabilidade dos modos de oscilação.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistemas CCAT, *Multi-Infeed*, Autovalores, Observabilidade modal

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Aproximadamente 30 anos após o comissionamento do sistema de corrente contínua em alta tensão (CCAT ou, simplesmente, CC) de Itaipu, essa tecnologia voltou a ser utilizada na transmissão a longas distâncias no Brasil. Em 2013, teve início a operação comercial do primeiro bipolo do elo CC para escoamento da geração das usinas do Rio Madeira (6.300 MW – 2300 km). Além disso, está prevista para o primeiro trimestre de 2018 a entrada em operação do primeiro bipolo do elo CC de Belo Monte, capaz de transmitir 4.000 MW a uma distância de 2.100 km. Apesar de completamente desconectados entre si nas estações conversoras de Foz do Iguaçu, Porto Velho e Xingu, esses três elos CC estarão conectados na mesma região geoeletrica sob a perspectiva das conversoras de Ibiúna, Araraquara-2 e Estreito tornando-se, portanto, altamente recomendável o estudo dos efeitos de múltiplas alimentações CC, ou seja, o efeito *multi-infeed* [1,2].

Existem vários potenciais problemas em regiões com múltiplas alimentações CC, tais como falhas de comutação induzidas, instabilidade eletromecânica e colapso de tensão. Todos esses fenômenos podem ser iniciados apenas pelas características dos sistemas de corrente alternada (CA) em que os elos CC estão inseridos. Este trabalho busca identificar os efeitos de baixa frequência que podem apresentar riscos à operação adequada de múltiplos elos de corrente contínua transmitindo potência para uma mesma região.

Por intermédio do mapeamento dos autovalores da matriz de estado linearizada será evidenciada a importância da avaliação das interações de baixa frequência, as quais podem estar relacionadas com a proximidade dos inversores. Quando existirem, essas interações apresentam vantagens e desvantagens que serão mostradas no artigo. Um exemplo de desvantagem da interação é saber que o defeito em um elo pode se propagar e afetar o desempenho do outro. Em contrapartida, apresenta-se uma vantagem que é a possibilidade em se adotar uma ação cooperativa entre os controles dos elos e assim aumentar a estabilidade do sistema.

O acoplamento elétrico entre os inversores dos elos CC, representado pela impedância de transferência que os interliga, provoca consequências tanto para o lado inversor quanto para o lado retificador. Portanto, a depender

dessa impedância, alguns fenômenos ocorridos no lado inversor podem ter seu efeito transferido via elo CC para a rede CA do terminal retificador. O artigo também abordará esse comportamento do sistema através da observabilidade dos modos de oscilação calculados. Para tanto, uma ferramenta de análise de sensibilidade modal será utilizada para caracterizar os modos de oscilação associados a cada um dos elos de corrente contínua. Em um modelo de ordem reduzida serão mostradas simulações realizadas (pequenas perturbações e domínio do tempo), a fim de avaliar a influência da impedância da rede CA, considerando também o efeito do nível de curto-circuito. Ressalta-se que alguns resultados apresentados na referência [3] serão utilizados nesse artigo, a fim de que se possa mostrar a observabilidade dos modos de oscilação dos elos com uma ferramenta de sensibilidade modal.

## 2.0 - MODELO DE TRANSMISSÃO COM DOIS ELOS CC

O modelo do sistema de potência utilizado neste artigo considera duas redes CA interconectadas por dois monopolos de corrente contínua. Quanto à modelagem dos elos CC, o monopolo 1 (elo 1) e monopolo 2 (elo 2) possuem as mesmas características, ou seja, mesmos sistemas de controle e parâmetros de linha de transmissão em corrente contínua. As redes CA são representadas por fontes ideais atrás de uma impedância Thevenin, designada impedância própria ( $X_P$ ). As barras onde estão conectados os retificadores e os inversores dos elos CC são interligadas entre si por meio de uma impedância de transferência ( $X_T$ ), conforme mostrado na Figura 1.

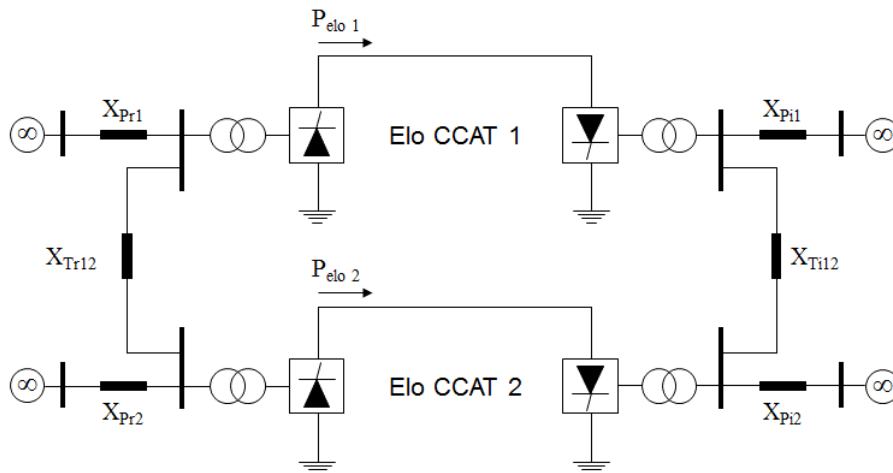


FIGURA 1 – Sistema em Corrente Contínua com 2 Monopolos

No lado retificador, as impedâncias próprias ( $X_{Pr1}$  e  $X_{Pr2}$ ) são consideravelmente menores do que a impedância de transferência ( $X_{Ti12}$ ) que interliga as barras dos retificadores. Portanto, as barras CA onde estão conectados os retificadores possuem elevadas relações de curto-circuito (*short-circuit ratio* - SCR), dada pela razão entre a potência de curto-circuito trifásico na barra e a potência despachada pelo elo CC ( $SCR = P_{cc} (3\phi) / P_{dc}$ ). Além disso, como  $X_T$  é elevado, os terminais retificadores de ambos os elos operam de forma desacoplada, condição considerada em todo o trabalho.

Por sua vez, no lado inversor serão feitas alterações nas impedâncias próprias ( $X_{Pi1}$  e  $X_{Pi2}$ ) e de transferência ( $X_{Ti12}$ ), a fim de que sejam avaliados os efeitos de tais mudanças no desempenho dinâmico dos elos CC.

Estruturas de controle típicas para retificadores e inversores são utilizadas para representar a mais usual das estratégias de controle dos conversores, ou seja, controle de corrente ou potência por meio do retificador e o controle do ângulo de extinção pelo inversor. A condição de regime permanente padrão adotada nesse trabalho para cada um dos elos CC consiste na potência despachada de 1.000 MW e o ângulo de extinção nos inversores especificados em  $17^\circ$ . O modelo de transmissão com três monopolos será uma extensão do modelo com dois monopolos que foi apresentado nessa seção.

## 3.0 - INTERAÇÕES DE CONTROLE PARA A REDE COM DOIS ELOS CC

Nessa seção serão apresentados aspectos das interações de baixa frequência para a rede com dois elos CC. Quanto à rede CA no lado inversor, a combinação de valores altos e baixos das impedâncias próprias ( $X_{Pi1}$  e  $X_{Pi2}$ ) e de transferência ( $X_{Ti12}$ ) resulta em quatro condições para estudo, as quais estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições da rede CA no lado inversor para a situação com dois elos CC

Condição	Descrição	SCR	ESCR
Ft-D	Forte e Desacoplada	21,8	21,3
Ft-A	Forte e Acoplada	40,0	39,5
Fr-D	Fraca e Desacoplada	3,0	2,5
Fr-A	Fraca e Acoplada	3,8	3,3

Dadas as características simétricas da rede, os valores de SCR e ESCR aplicam-se a ambos os inversores. A formulação do SCR já foi citada na seção 2. Quanto ao ESCR (*Effective Short Circuit Ratio*), essa grandeza simplesmente desconta o valor da filtragem ( $Q$  em Mvar) existente nas barras onde estão ligados os conversores do elo de corrente contínua ( $ESCR = [P_{cc} (3\phi) - Q(Mvar)] / P_{dc}$ ).

Os valores de SCR mostrados na Tabela 1 foram obtidos com a utilização do *software* ANAFAS [4] do Cepel. Por meio desse *software* foram calculados os valores de  $P_{cc}$  nas barras dos inversores e então obtidos os valores de SCR.

Sobre as condições (Ft-D e Ft-A) é possível afirmar algumas conclusões que estão explicitadas na referência [3], quais sejam:

- Se a rede CA é forte, então é previsto que exista pouca interação entre os elos CC. Essa conclusão é válida tanto para os inversores desacoplados (alto valor de  $X_{Ti}$ ) como para a condição em que estão acoplados (baixo valor de  $X_{Ti}$ );
- Se a rede CA é forte, então o sistema está menos suscetível à instabilidade transitória devido aos modos de oscilação dos elos;
- Valores de SCR acima de 20 são teóricos e foram importantes para validar conceitos.

Em vista do exposto acima, este artigo abordará apenas as condições com a rede inversora fraca (Fr-D e Fr-A), visto que são situações comumente observadas no SIN.

### 3.1 Dois elos CC: Rede Inversora Fraca e Desacoplada (Fr-D)

A representação do sistema mostrado na Figura 1 contendo a dinâmica básica dos elos CC em uma ferramenta de análise de pequenas perturbações [5] resulta em um modelo de décima quarta ( $14^{\text{a}}$ ) ordem no espaço de estados. Na condição Fr-D, os elos 1 e 2 têm os mesmos parâmetros de controle e estão ajustados com a estratégia de controle padrão anteriormente descrita. A influência dinâmica de um elo sobre o outro pode ser investigada a partir da variação de um determinado parâmetro de controle de um dos elos CC e obtendo o lugar das raízes correspondente. O parâmetro escolhido na presente análise foi o ganho proporcional do amplificador de corrente (CCA) do elo 2 ( $K_{p2}$ ), o qual estava inicialmente ajustado em 150 para ambos os elos. Portanto, reduzindo-se gradualmente o ganho  $K_{p2}$  é previsto que os autovalores associados ao elo 2 desloquem-se no sentido do semi-plano da direita do plano complexo, conforme mostrado na Figura 2.

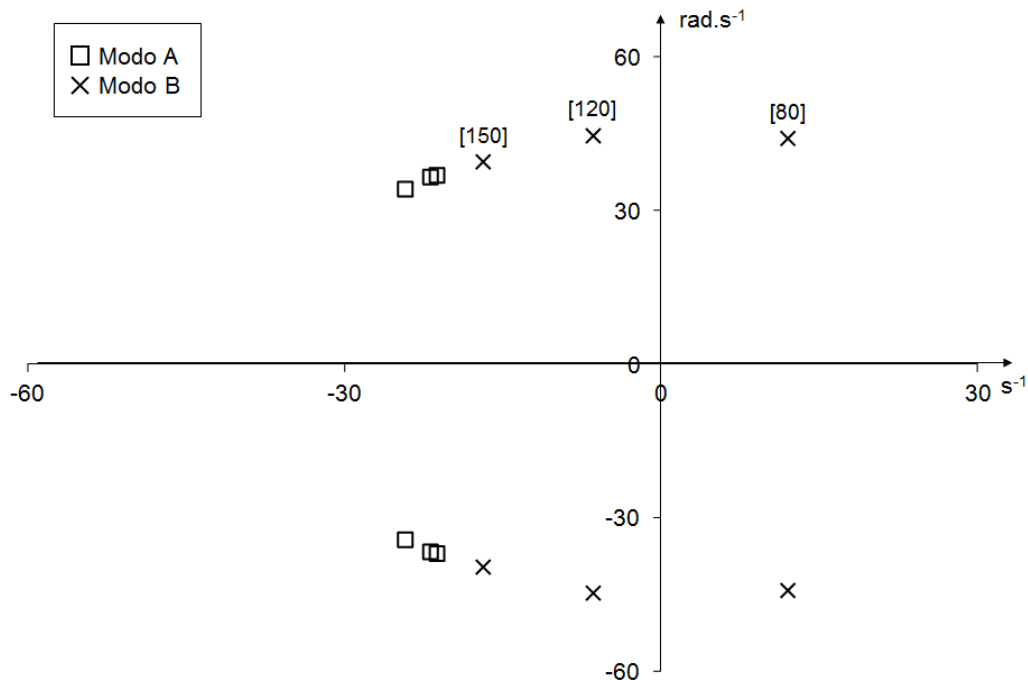


Figura 2: Fr-D, Lugar das Raízes para a redução do ganho proporcional de corrente do elo 2

A Figura 2 permite concluir que a redução de  $K_{p2}$  leva o sistema de uma condição estável quando o valor do ganho era de 150 até a sua instabilidade quando esse ganho atinge valores inferiores a 100. Por exemplo, quando  $K_{p2}$  é igual a 80, a solução matriz jacobiana através do método QR mostra os modos menos amortecidos, conforme a Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Condição Fr-D – Modos menos amortecidos para  $K_{p1}=150$  e  $K_{p2}=80$

	Real	Imaginária	Módulo	Freq. (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação Predominante	Modo
1	12,051	44,146	45,762	7,0261	-26,334	Retificador do Elo 2	B
2	12,051	-44,146	45,762	-7,0261	-26,334		
3	-21,210	36,951	42,606	5,8810	49,782	Retificador do Elo 1	A
4	-21,210	-36,951	42,606	-5,8810	49,782		

A análise modal mostrada na Figura 2 também permite concluir que a variação do ganho proporcional do CCA do elo 2 provoca grande excursão na posição do Modo B com pouca influência sobre o Modo A. Isso sugere que uma análise de sensibilidade do Modo B mostrará forte correlação com o elo 2 e fraca correlação com o elo 1. Para comprovar essa sensibilidade do Modo B, foi utilizada a ferramenta de observabilidade modal do *software* PacDyn, do Cepel. A grandeza escolhida para quantificar a observabilidade modal foi o fluxo de potência nos circuitos do lado CA. A Figura 3 e a Tabela 3 mostram o resultado dessa análise.

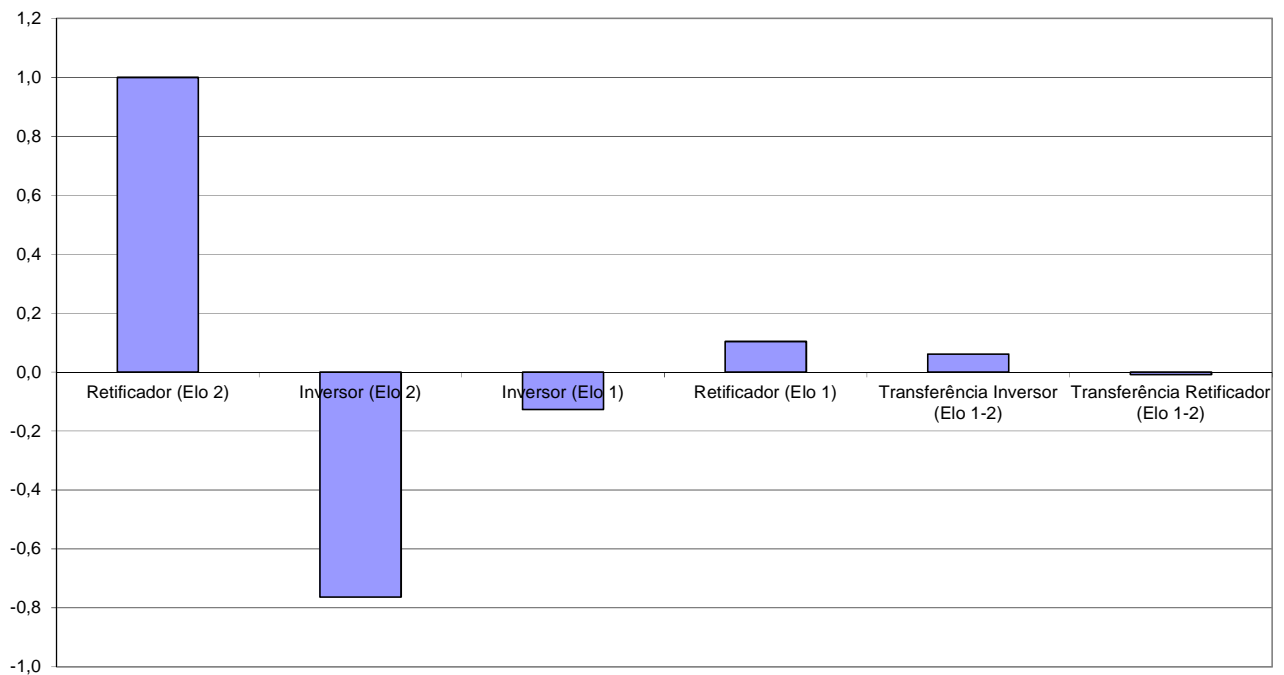


Figura 3: Condição Fr-D – Observabilidade Modal para o autovalor (12,051+j44,146)

Tabela 3: Condição Fr-D - Participação percentual do Modo B nos elos 1 e 2

Módulo	Fase	Local	Observabilidade do Modo B
1,0000	0,0	Retificador do elo 2.	100%
0,7636	167,7	Inversor do elo 2.	76%
0,1274	166,5	Inversor do elo 1.	13%
0,1035	37,4	Retificador do elo 1.	10%
0,0604	-14,0	Impedância de transferência no lado inversor.	6%
0,0090	179,5	Impedância de transferência no lado retificador.	1%

A Figura 3 e a Tabela 3 permitem concluir que a observabilidade do Modo B nos elementos ligados ao elo 2 é consideravelmente maior do que nos elementos ligados ao elo 1. Portanto, a análise de sensibilidade com a ferramenta de observabilidade modal do PacDyn comprova a forte correlação do Modo B com o elo 2 e fraca correlação com o elo 1. Ou seja, os recursos de análise modal aqui utilizados (lugar das raízes e observabilidade modal) sustentam que o desacoplamento da rede inversora é determinante para isolar um elo em relação ao outro [1]. Essa característica da rede CA confere importante vantagem operativa, pois distúrbios em um elo não afetam o desempenho do outro, como mostrado na Figura 4, com a aplicação de um degrau de 10 MW (1%) na ordem de potência do elo 2 na condição em que o  $K_{p2}$  é igual a 120 (condição estável conforme Figura 2).

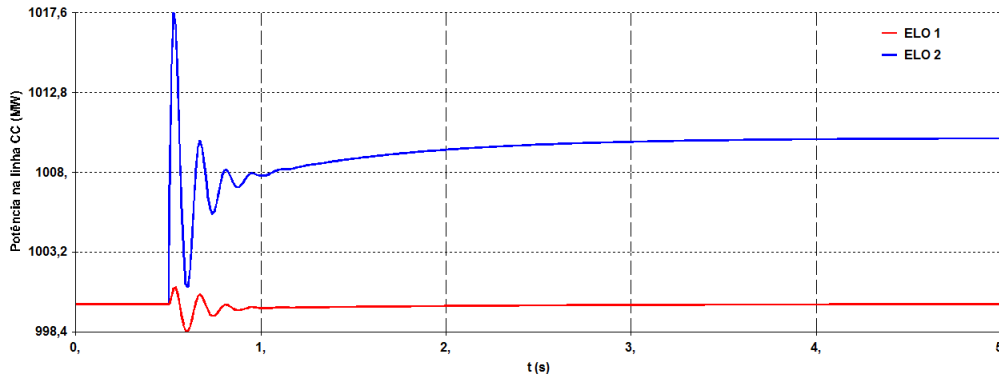


Figura 4: Condição Fr-D - Resposta ao degrau de 10 MW (1%) na ordem de potência do elo 2

Antes da aplicação do degrau, a potência despachada em ambos os elos era de 1.000 MW. Após a aplicação do degrau, o elo 2 apresenta intensa resposta transitória com estabilização na nova condição de regime permanente em 1.010 MW. Quanto ao elo 1, observa-se um transitório de amplitude quase desprezível e retorno à condição anterior de fluxo igual a 1.000 MW na linha CC do elo 1. Portanto, a resposta no tempo comprova o desacoplamento entre os elos 1 e 2 mostrado anteriormente pela análise modal.

### 3.2 Dois elos CC: Rede Inversora Fraca e Acoplada (Fr-A)

Analogamente à condição anterior (Fr-D), procedeu-se a variação do ganho proporcional do controle de corrente do elo 2 ( $K_{p2}$ ), o qual estava inicialmente ajustado em 150 para ambos os elos. Tal redução promoveu mudanças nas posições originais dos autovalores, conforme pode ser comprovado através do lugar das raízes (Figura 5).

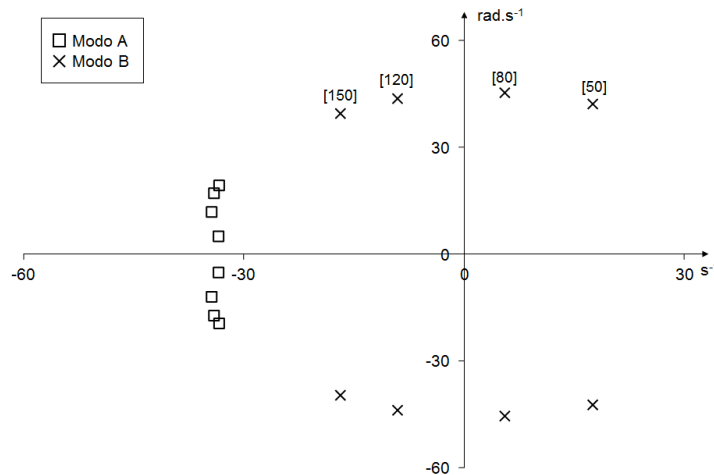


Figura 5: Fr-A, Lugar das Raízes para a redução do ganho proporcional de corrente do elo 2

A situação mostrada na Figura 5 é caracterizada pela redução progressiva do ganho  $K_{p2}$  (desde 150 até 50), ao passo que o ganho do retificador do elo 1 foi mantido constante e igual a 150. Ao comparar a Figura 5 com a Figura 2, conclui-se que o acoplamento dos inversores faz com que o Modo A seja mais sensível às mudanças no valor do ganho proporcional do elo 2, pois houve uma alteração mais significativa nas posições desse modo. Quando  $K_{p2}$  é igual a 80, conclui-se que o sistema é instável e pela solução da matriz jacobiana através do método QR são obtidos os modos menos amortecidos:

Tabela 4: Condição Fr-A – Modos menos amortecidos para  $K_{p1}=150$  e  $K_{p2}=80$

	Real	Imaginária	Módulo	Freq. (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação Predominante	Modo
1	5,571	45,415	45,756	7,228	-12,175	Retificador do Elo 2	B
2	5,571	-45,415	45,756	-7,228	-12,175		
3	-34,065	17,182	38,153	2,735	89,285	Retificador do Elo 1	A
4	-34,065	-17,182	38,153	-2,735	89,285		

O histograma abaixo mostra os fatores de observabilidade associados ao Modo B nos dois elos.

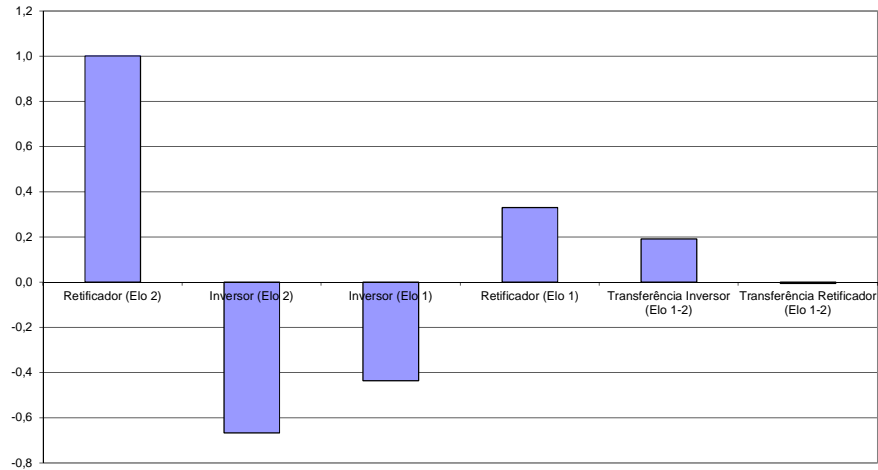


Figura 6: Condição Fr-A – Observabilidade Modal para o autovalor (5,571+j45,415)

Tabela 5: Condição Fr-A – Participação percentual do Modo B nos elos 1 e 2

Módulo	Fase	Local	Observabilidade do Modo B
1,0000	0,0	Retificador do elo 2.	100%
0,6679	167,6	Inversor do elo 2.	67%
0,4372	167,6	Inversor do elo 1.	44%
0,3299	5,2	Retificador do elo 1.	33%
0,1909	347,0	Impedância de transferência no lado inversor.	19%
0,0067	177,4	Impedância de transferência no lado retificador.	1%

Conforme esperado, o acoplamento no lado inversor promove um aumento na observabilidade do Modo B no elo 1. Comparando os dados da Tabela 5 com a Tabela 3, conclui-se que:

- Houve aumento relativo de 31 p.p. (pontos percentuais) na observabilidade do Modo B no circuito ligado ao inversor do elo 1;
- Houve aumento relativo de 23 p.p. (pontos percentuais) na observabilidade do Modo B no circuito ligado ao retificador do elo 1.

Indica-se, portanto, que o acoplamento da rede CA no lado inversor promove um efeito de participação cruzada entre os elos, de forma que eventos associados a um elo afetam o desempenho do outro elo. Esta característica pode significar uma vantagem operativa, pois em casos de instabilidade transitória existe a possibilidade de um controle cooperativo entre os elos. Para ilustrar esse controle cooperativo, pode-se utilizar a condição supracitada em que o ganho  $K_{p2}$  é igual a 80 e ambos os elos operam com controle padrão. Nessa condição, o lugar das raízes mostrado na Figura 5 mostra que o Modo B (mais fortemente observável no elo 2) leva o sistema para uma situação instável. Para reforçar a estabilidade do sistema, pode-se usar o efeito de participação cruzada dos elos ao implementar uma mudança na estratégia de controle do inversor do elo 1, a qual passa de controle de gama para controle de tensão. Ao fazer isso, o modo menos amortecido fica localizado na posição  $(-4,11 \pm j47,5)$  do plano complexo. Logo, o sistema sai de uma condição instável para estável com amortecimento de aproximadamente 9%. A Figura 7 mostra a resposta no tempo após a aplicação de um degrau de 10 MW (1%) na ordem de potência do elo 2.

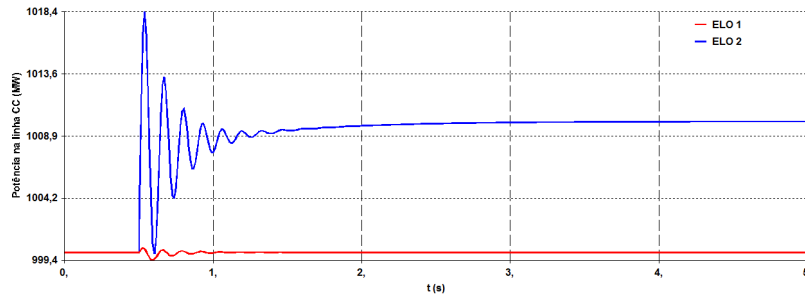


Figura 7: Condição Fr-A – Resposta ao degrau de 10 MW (1%) na ordem de potência do elo 2 com inversor do elo 1 em controle de tensão

A Figura 7 ratifica que a mudança na estratégia de controle do elo 1 é suficientemente robusta para estabilizar o sistema. Na nova condição de regime permanente, o fluxo na linha CC do elo 2 resulta em 1.010 MW e o elo 1 retorna à situação inicial de fluxo igual a 1.000 MW na linha CC.

#### 4.0 - INTERAÇÕES DE CONTROLE PARA A REDE COM TRÊS ELOS CC

Intuitivamente, o sistema com três elos de corrente contínua pode ser entendido como uma extensão da rede com dois elos CC apresentada na seção anterior. Os inversores deste sistema exemplo estão inseridos em uma rede CA com ESCR que varia de 2,4 a 2,6 dependendo da impedância de transferência ( $X_T$ ) que interliga os inversores. Na condição de desacoplamento tem-se que o ESCR é igual a 2,4, ao passo que na condição acoplada esse valor é 2,6. A simetria entre os elos também é utilizada nesse modelo, logo os elos 1, 2 e 3 foram ajustados com a estratégia de controle padrão (controle de potência para os retificadores e controle de gama para os inversores). A figura abaixo ilustra o sistema com os três elos de corrente contínua.

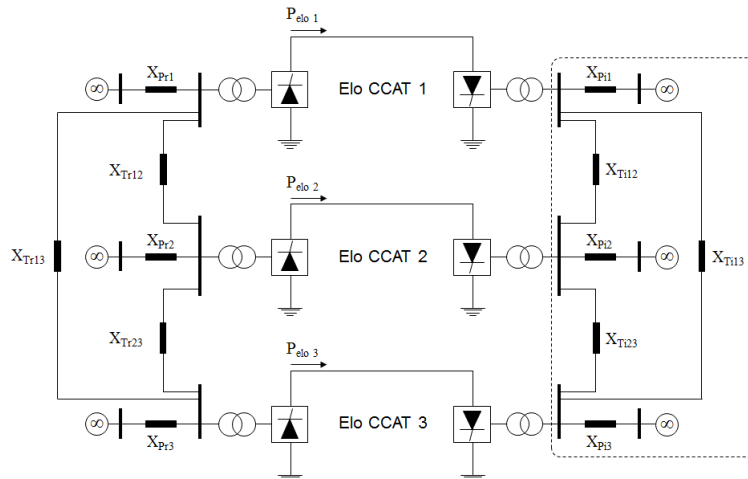


Figura 8: Modelo com três elos de corrente contínua

##### 4.1 Três elos CC: Rede Inversora Fraca e Desacoplada (Fr-D)

O método utilizado para estudar o comportamento dinâmico do sistema com três elos CC é análogo à situação com os dois elos. Logo, inicialmente o valor do ganho proporcional  $K_p$  dos três elos é igual a 150. Assim sendo, ao proceder a redução do ganho proporcional do elo 2, somente o Modo B move-se no sentido do semi-plano da direita. Ou seja, os demais autovalores da matriz Jacobiana pouco se movem. Caso a redução do ganho ocorra na malha de controle do retificador dos elos 1 ou 3, somente haverá movimentação nos Modos A ou C respectivamente. Esse comportamento sugere que os Modos A, B e C estão respectivamente associados aos elos 1, 2 e 3. Além disso, como somente um autovalor muda sua posição sem alteração nos demais, então existe indicativo de que não há efeito de participação cruzada nos modos de oscilação dos elos. O lugar das raízes abaixo mostra a movimentação dos pólos em função da sucessiva redução no ganho  $K_p$  do elo 2.

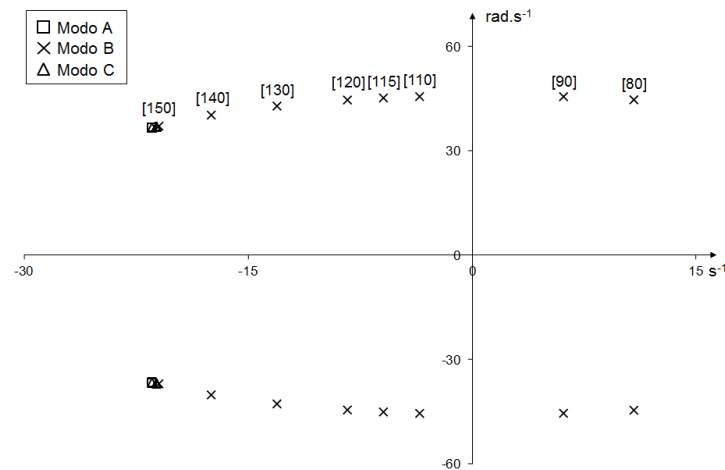


Figura 9: Condição Desacoplada - Lugar das Raízes para a redução do ganho proporcional de corrente do elo 2

Para comprovar a relação entre os modos de oscilação e os elos de corrente contínua procedeu-se uma análise de sensibilidade, na qual foram feitos os seguintes ajustes nos ganhos dos retificadores:

- $K_{p1} = 140$  – Ganho na malha do retificador do elo 1;
- $K_{p2} = 110$  – Ganho na malha do retificador do elo 2;
- $K_{p3} = 150$  – Ganho na malha do retificador do elo 3.

A solução da matriz jacobiana mostra que o sistema é estável e a tabela abaixo mostra os modos menos amortecidos calculados pelo método QR.

Tabela 6: Condição Desacoplada – Modos menos amortecidos para  $K_{p1}=140$ ,  $K_{p2}=110$  e  $K_{p3}=150$

	Real	Imaginária	Módulo	Freq. (Hz)	Amortecimento (%)	Fator de Participação Predominante	Modo
1	-3,5129	45,5220	45,6570	7,2450	7,6942	Retificador do Elo 2	B
2	-3,5129	-45,5220	45,6570	-7,2450	7,6942		
3	-17,4920	40,1980	43,8390	6,3976	39,9010	Retificador do Elo 1	A
4	-17,4920	-40,1980	43,8390	-6,3976	39,9010		
5	-21,2930	36,7790	42,4980	5,8535	50,1030	Retificador do Elo 3	C
6	-21,2930	-36,7790	42,4980	-5,8535	50,1030		

A análise de sensibilidade por meio da ferramenta de observabilidade modal do PacDyn ratifica a elevada observabilidade dos Modos A, B e C respectivamente com os elos 1, 2 e 3. Essa análise também mostra o efeito quase nulo de participação cruzada entre os elos, conforme podia se inferir através do lugar das raízes mostrado na Figura 9. A Figura 10 mostra a resposta da observabilidade modal para os três modos em formato de histograma.

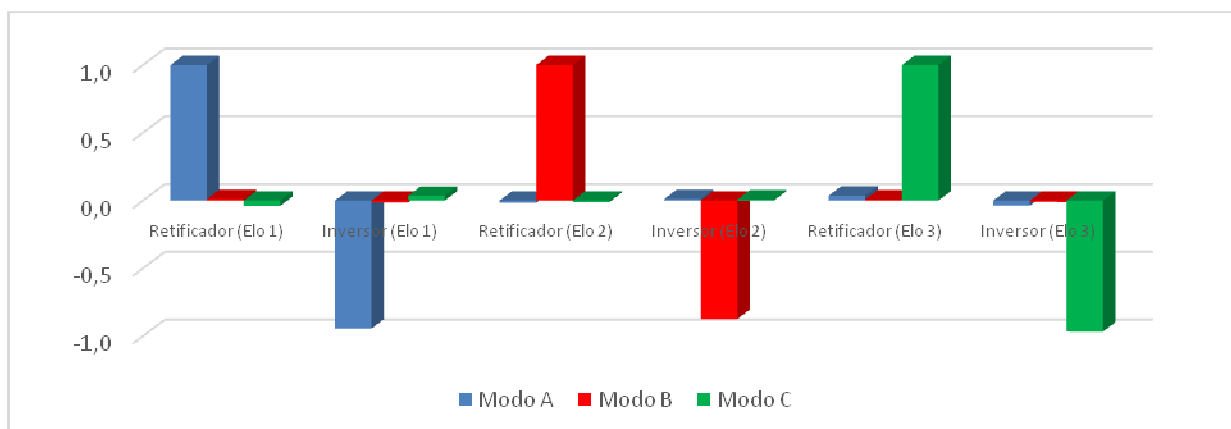


Figura 10: Condição Desacoplada – Observabilidade dos Modos A, B e C nos elos 1, 2 e 3



#### 4.2 Três elos CC: Rede Inversora Fraca e Acoplada

No modelo com dois elos CC foi possível mostrar que o acoplamento entre os inversores promoveu o aumento da observabilidade do Modo B no elo 1. Na condição com três elos, observa-se comportamento bastante similar. Ou seja, o acoplamento entre os inversores favorece o aparecimento de um modo de oscilação comum entre os três elos. Para confirmar o aparecimento desse modo é novamente necessário recorrer à ferramenta de observabilidade modal do PacDyn. Serão utilizadas as condições padrão do caso base, ou seja, ganho proporcional igual a 150 para os retificadores e estratégia de controle padrão. A análise da observabilidade modal para o modo menos amortecido é mostrada na figura abaixo.

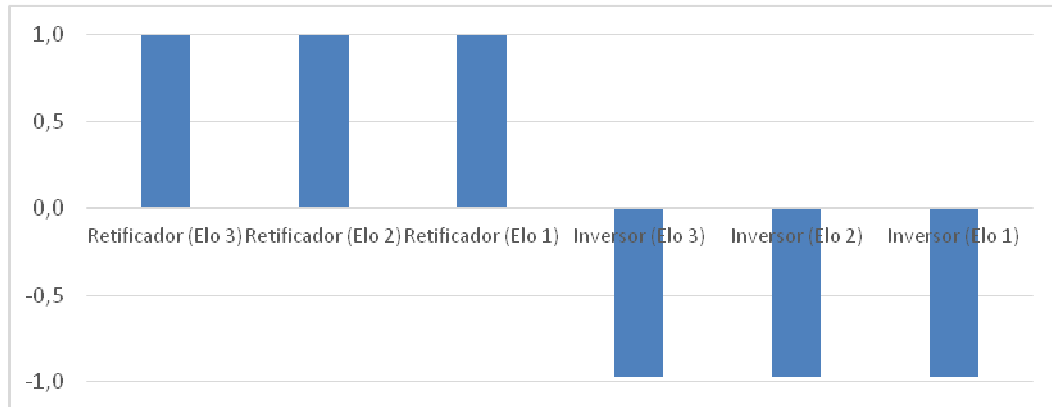


Figura 11: Condição Acoplada – Observabilidade do modo menos amortecido nos elos 1, 2 e 3

A Figura 11 confirma que o par de autovalores correspondentes ao modo menos amortecido ( $-20,973 \pm j37,015$ ) é o modo comum que está presente no desempenho dinâmico dos três elos de corrente contínua.

#### 5.0 - CONCLUSÃO

Em dois modelos de ordem reduzida, foram apresentadas simulações no domínio da frequência e no domínio do tempo que retrataram os tipos de interações passíveis de ocorrer com múltiplos elos CC transmitindo potência para a mesma região geoeletrica. Assim sendo, foi possível demonstrar o alto grau de relevância quanto ao estudo da rede CA inversora em que um elo CC se insere. Tal relevância, deve-se não somente ao nível de curto-circuito da rede inversora, como também em relação à impedância da rede CA que interliga esses inversores.

Foi caracterizado que o desacoplamento e o acoplamento da rede inversora apresenta vantagens e desvantagens. Quando os inversores estão desacoplados, a influência dinâmica de um elo no desempenho do outro é reduzida. Portanto, distúrbios em um elo pouco afetam o desempenho dos demais. Uma desvantagem da rede desacoplada é a reduzida eficácia do controle cooperativo entre os elos. O acoplamento entre as estações inversoras favorece que o modo de oscilação de um elo seja altamente observável nos demais, conforme comprovado com a análise da observabilidade modal. No modelo com três elos, ficou caracterizado um modo de oscilação comum igualmente observável nos elos 1, 2 e 3. Essa forte participação cruzada observada nas redes acopladas favorece o controle cooperativo entre os elos, de maneira a poder aumentar as condições de estabilidade dinâmica do sistema. A desvantagem das redes acopladas deve-se ao fato de que, em redes fracas, defeitos em um elo podem facilmente ter seu efeito propagado para os demais.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Szechtman, M.; Pilotto, L.A.S.; Ping, W.W.; Salgado E.; Carvalho, A.R.; Wey, A.; Long, W.F.; Alvarado, F.L.; Demarco, C.L.; Nilsson, S.L.; "The behaviour of several HVDC links terminating in the same load area," in Proc. 34th Session CIGRE, Int. Conf. Large High Voltage Electric Systems, Paris, France, Aug. 30/Sep. 5, 1992, vol. 1, pp. 14–201.
- (2) Fischer, P.; Pan, J.; Srivastava, K.; Wang, W., Hong, C.; "Case Study of a Multi-Infeed HVDC System", PowerCon 2008, New Dehli, India, October 12-15, 2008
- (3) Machado, F.; Bianco, A.; "Assessment of Low Frequency Interactions in HVDC Multi-Infeed Systems"; Colloquium HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance, Outubro de 2013, Brasília, Brasil.
- (4) CEPEL, "ANAFAS Versão 6.3 – Manual do Usuário"

(5) CEPEL, "PacDyn Version 9.6.0 – User's Manual"

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Fernando Machado** nasceu em Niterói, RJ, Brasil, em 1980. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2003. Em agosto de 2004, ingressou como Engenheiro Elétrico no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) na Gerência de Acesso à Rede Básica de Transmissão, onde atuou nos estudos para integração de usinas e consumidores livres ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Desde agosto de 2006, trabalha na Gerência de Ampliações e Reforços das Instalações de Transmissão do ONS, na qual atua nos estudos que determinam anualmente os limites elétricos das interligações regionais do SIN.

**Zulmar Soares Machado Junior** nasceu em Governador Valadares, MG, Brasil, em 1974, sendo formado em Engenharia Elétrica (EE) pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1997). Fez mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação (2000), e doutorado em EE (2005), ambos pela COPPE-UFRJ. De 2006 a 2007, trabalhou como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobrás-CEPEL). De 2007 a 2010, trabalhou como Engenheiro Sênior no Operador Nacional do Sistema (ONS). Desde 2010, é professor Adjunto do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia na Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI. Suas áreas de interesse são: Análise, Estabilidade e Simulação aplicadas a Sistemas de Elétricos de Potência.

**André Bianco** graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Gama Filho em 1990 e obteve o título de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 1994. Iniciou sua carreira profissional no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, onde foi pesquisador no Departamento de Sistemas Elétricos até 2004. Participou de projetos de pesquisa de âmbito nacional e internacional envolvendo temas como estabilidade de tensão, transmissão CCAT e sistemas de transmissão flexíveis FACTS, além de atuar em estudos elétricos para interligação de sistemas e integração de usinas hidro e termoeletricas. De março de 2004 a julho de 2005 ocupou a Coordenação do Núcleo de Estudos Elétricos e Energéticos Andrade & Canellas Consultoria e Engenharia Ltda.. Desde agosto de 2005 é colaborador no Operador Nacional do Sistema Elétrico, atualmente no cargo de Especialista, vinculado à Gerência de Administração da Transmissão. É co-autor de mais de 50 artigos técnicos nacionais e internacionais, membro sênior do IEEE desde 2007, ex-Tesoureiro e ex-Secretário do IEEE Seção Rio de Janeiro.