



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

BR/GAT/09
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IV

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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA OPERAÇÃO CONJUNTA DE MÚLTIPLOS CONVERSORES CCAT
CONSIDERANDO A EXPANSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO**

Fabricio Lucas Lirio(*)

**Antônio Ricardo C. D. Carvalho
Centro de Pesquisa de Energia Elétrica - CEPEL**

Leonardo Pinto de Almeida

RESUMO

Neste artigo serão discutidos aspectos relevantes no que se refere ao planejamento da operação do sistema elétrico nos quais ocorre a operação de elos de transmissão em corrente contínua com conversores eletricamente próximos. Procura-se neste trabalho identificar os principais aspectos relacionados aos índices preditivos de desempenho para operação de múltiplos conversores CCAT, de forma que esta operação ocorra de modo seguro.

PALAVRAS-CHAVE

Elos de corrente contínua, desempenho de elos CCAT, múltiplas alimentações CC

1.0 - INTRODUÇÃO

Como principal motivação, pode-se destacar o fato de que o Sistema Interligado Nacional está na iminência de iniciar a operação com mais um tronco de transmissão em CCAT, composto por dois bipolos de 3150 MW, e responsável pela integração do aproveitamento hidrelétrico do rio Madeira (UHE Jirau e UHE Santo Antônio).

Considerando-se a existência dos dois bipolos CCAT associados à UHE Itaipu, cujas estações inversoras localizam-se em 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.

Adicionalmente a este novo sistema, os estudos das alternativas de transmissão para a expansão da Interligação Norte-Sudeste, que inclui o escoamento da geração do CHE Belo Monte, definiu a chegada de mais dois elos CCAT na região Sudeste. Esta alternativa é composta por dois bipolos de 4000 MW cada, conectados a SE Xingu 500 kV localizada no estado do Pará, sendo que um polo se conectará a SE Estreito 500 kV em Minas Gerais e outro próximo a SE Nova Iguaçu 500 kV no estado do Rio de Janeiro.

No horizonte de implantação do segundo bipoło associado a CHE Belo Monte (2020) forma-se um cenário de uma região Sudeste com múltiplas alimentações CC, no qual é natural que surjam dúvidas relacionadas ao planejamento da expansão do sistema elétrico, quer seja pela inclusão de novas linhas CA que podem diminuir a distância elétrica entre os elos existentes, ou pela inclusão de novas alimentações CC.

O primeiro passo para se inferir o desempenho de elos CCAT é o cálculo das potências de curto-circuito e de índices preditivos de desempenho. O cálculo de um simples índice para um elo CCAT em operação isolada, o SCR (Short Circuit Ratio), provê uma significativa informação quanto à robustez do sistema CA frente ao montante de potência injetada pelo tronco CC e conseqüentemente, uma boa sensibilidade quanto à gama de problemas que se pode esperar quando de perturbações no sistema como um todo. Uma questão que sempre foi levantada é a eficácia da aplicação deste índice, como originalmente concebido, a sistemas com múltiplas alimentações CC, principalmente porque ele não incorpora o potencial de interação entre os conversores, quando próximos. O

(*) Av. Horácio Macedo, n° 354 – sala 236 - Bloco 1 – CEP 21.941-911 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6325 – Fax: (+55 21) 2598-6451 – Email: fabricio@cepel.br

problema foi inicialmente abordado em um trabalho conjunto do EPRI, CEPEL e University of Wisconsin (1), mais recentemente o WG B4-41 da CIGRÉ propôs um novo índice (2), denominado *MISCR* (Multi-Infeed Interaction Short Circuit Ratio), que procura considerar o mencionado efeito. Outro índice, denominado *MSCR* (Multi Infeed Short Circuit Ratio) baseado nos elementos da matriz de impedâncias de barra do sistema (*Zbarra*) também foi proposto na literatura técnica (3).

Neste trabalho serão apresentadas análises teóricas e casos exemplo abordando os índices *MISCR* e *MSCR*, buscando identificar em que condições estes dois índices apresentam resultados semelhantes.

No artigo será verificado como é o comportamento destes índices mediante a expansão do sistema elétrico, que provoca um maior acoplamento entre os conversores, mas por outro lado conduz a um aumento da potência de curto-circuito.

Por fim será apresentada uma verificação do sistema Sudeste com a presença de todos os elos previstos no horizonte 2017, buscando identificar possíveis problemas relacionados à operação conjunta e locais favoráveis a instalação de novos elos de corrente contínua.

2.0 - ÍNDICES PREDITIVOS DE DESEMPENHO PARA MÚLTIPLAS CONEXÕES CCAT

O primeiro passo para se inferir o desempenho de elos CCAT é o cálculo das potências de curto-circuito e de índices preditivos de desempenho. O cálculo de um simples índice para um elo CCAT em operação isolada, o *SCR* (Short Circuit Ratio), provê uma significativa informação quanto à robustez do sistema CA frente ao montante de potência injetada pelo tronco CC e consequentemente, uma boa sensibilidade quanto à gama de problemas que se pode esperar quando de perturbações no sistema como um todo.

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

Onde

S_{cc_i} é a potência de curto-circuito da barra de conexão do conversor i ;

P_{dc_i} é a potência do conversor i .

Uma questão que sempre foi levantada é a eficácia da aplicação deste índice, como originalmente concebido, a sistemas com múltiplas alimentações CC (elos CC em operação conjunta), principalmente porque ele não incorpora o potencial de interação entre os conversores, quando próximos. O problema foi inicialmente levantado em (1), e mais recentemente, em Abril de 2008, o WG B4-41 da CIGRÉ (2) propôs um novo índice que procura considerar o mencionado efeito.

Outro índice baseado nos elementos da matriz de impedâncias de barra do sistema (*Zbarra*) foi proposto em (3), sendo que resultados da aplicação deste índice a uma das configurações de planejamento do sistema Sudeste da China são apresentados em (4).

2.1 Relação de Curto-Circuito com o Efeito de Acoplamento (*Multi-Infeed Interaction Short Circuit Ratio*)

Em 2008 foi proposto pelo WG B4-41 da CIGRÉ (2), redefinir o significado de P_{dc_i} no cálculo do SCR_i de um sistema, levando em consideração o efeito de acoplamento entre os conversores CC. Assim, incorporou-se a esta grandeza, além da própria potência P_{dc_i} do conversor em questão, uma parcela referente à contribuição dos demais conversores eletricamente próximos, expressa pelas suas potências, mas ponderadas por um fator de acoplamento, resultando na Eq. (2).

$$P_{dc_i} + \sum_j (MIIF_{j,i} \cdot P_{dc_j}) \quad (2)$$

O índice j representa todos os elos próximos eletricamente do elo i e *MIIF* (*Multi Infeed Interaction Factor*) é um parâmetro de sensibilidade obtido através de simulações, e que procura estimar a distância elétrica entre os elos envolvidos no cálculo, através do influência de uma variação de tensão na barra de comutação do elo i e seu impacto na tensão da barra de comutação do elo j , e é definido como:

$$MIIF_{j,i} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} \quad (3)$$

ΔV_i e ΔV_j são as variações de tensão observadas nas barras inversoras i e j quando do chaveamento de um reator na barra i . ΔV_i deve ser próximo de 1% para que a resposta do sistema esteja na região da operação linear.

Definiu-se também que o potencial de interação entre os elos pode ser estimado pela combinação da proximidade elétrica e da relação das potências injetadas pelos elos, conforme apresentado na Eq. (4). Em outras palavras, se o acoplamento $MIIF_{ij}$ é elevado, e se P_{dc_j} representa um elo de pequena dimensão, sua influência sobre o elo P_{dc_i}

será pequena. Entretanto, se Pdc_j é alto, sua influência sobre Pdc_i poderá ser apreciável mesmo se $MIIF_{ij}$ for pequeno.

$$MIIF_{j,i} \frac{Pdc_j}{Pdc_i} \quad (4)$$

O WG B4-41 propõe ainda a seguinte classificação para os valores deste potencial de interação:

Tabela 1 – Classificação dos potenciais de interação

	Potencial de Interação
Valores menores que 15%	pequeno
Valores entre 15% e 40%	moderado
Valores maiores que 40%	alto

Por fim, o $MISCR_i$ (*Multi Infeed Interaction SCR*) é definido pelo WG B4-41 em função do $MIIF$ e das potências dos elos envolvidos como sugerido pela Eq. (4):

$$MISCR_i = \frac{Scc_i}{Pdc_i + \sum_j (MIIF_{j,i} Pdc_j)} \quad (5)$$

2.2 Multi-Infeed Short Circuit Ratio

Em sistemas alimentados por diversos elos CC pode-se utilizar o $MSCR$ (3),(4) para avaliar o impacto da interação entre as instalações conversoras existentes.

$$MSCR_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^k Pdc_j Z_{i,j}} \quad (6)$$

onde:

k corresponde ao número de elos cc;

i é o conversor considerado;

j varia do conversor um ao conversor k ;

Pdc_j é a potência do conversor j em p.u.;

$Z_{i,j}$ é o elemento da posição (i,j) elemento da matriz de impedâncias de barra Z_{barra} no sistema.

Verifica-se que no caso onde apenas um elo CC está presente o valor de $MSCR$ coincide com o valor do SCR convencional.

Os produtos $Pdc_j Z_{i,j}$ do somatório do denominador das equações do $MSCR$ são denominados fatores de participação e podem ser utilizados como uma medida da influência de um elo j na relação de curto circuito dos elos i próximos.

3.0 - COMPARAÇÃO ENTRE MISCR E MSCR

Comparando as equações (5) e (6), é possível notar que existe uma equivalência entre os índices $MISCR$ e $MSCR$.

$$\begin{aligned}
 MSCR_i &= \frac{1}{\sum_{j=1}^k Pdc_j Z_{i,j}} = \frac{1}{Pdc_i \cdot Z_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^k Pdc_j Z_{i,j}} = \frac{\frac{1}{Z_{ii}}}{Pdc_i + \sum_{j=1, j \neq i}^k Pdc_j \frac{Z_{i,j}}{Z_{ii}}} \\
 MSCR_i &= \frac{Scc_i}{Pdc_i + \sum_{j=1, j \neq i}^k Pdc_j \frac{Z_{i,j}}{Z_{ii}}} = MISCR_i
 \end{aligned} \quad (7)$$

A igualdade acima é válida desde que:

$$MIIF_{j,i} = \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \quad (8)$$

Como se mostrará a seguir, através de um sistema exemplo, o fator de interação pode ser escrito em função das impedância da rede elétrica, desde que não sejam considerados os efeitos não lineares da rede e a ação dos sistemas de controle, ou seja, considerando a rede elétrica formada apenas por impedância lineares.

Seja o sistema abaixo formado por dois elos de corrente contínua interligados por uma rede CA.

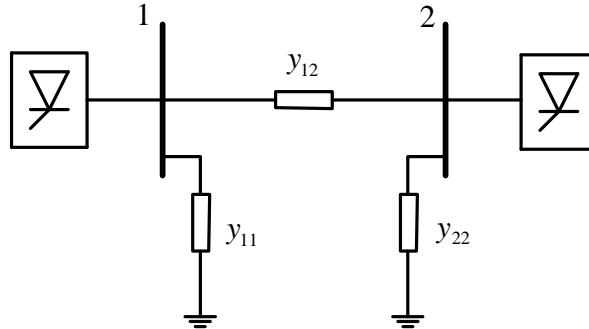


FIGURA 1 – Sistema Exemplo de Duas Barras

Aplicando-se um distúrbio ΔV_2 na tensão na barra 2, a variação na corrente ΔI_{21} resultante é:

$$\Delta I_{21} = \frac{y_{12} \cdot y_{11}}{y_{12} + y_{11}} \cdot \Delta V_2 \quad (9)$$

Portanto relação entre o distúrbio ΔV_2 aplicado e a variação de tensão ΔV_1 na barra 1 é:

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= \Delta I_{21} \cdot \frac{1}{y_{11}} = \frac{y_{12} \cdot y_{11}}{y_{12} + y_{11}} \cdot \Delta V_2 \cdot \frac{1}{y_{11}} \\ \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} &= \frac{y_{12}}{y_{12} + y_{11}} \end{aligned} \quad (10)$$

A razão entre a variação de tensão em uma barra e o distúrbio de tensão aplicado em outra barra é exatamente a definição do MIIF quando as não linearidades e a ação dos controles da rede não são consideradas. Logo podemos afirmar que o MIIF pode ser descrito como:

$$MIIF_{2,1} = \frac{y_{12}}{y_{12} + y_{11}} \quad (11)$$

Para o sistema exemplo, a matriz Y_{barra} é obtida facilmente, enquanto a matriz Z_{barra} , por sua vez, é obtida pela inversão desta.

$$\begin{aligned} Y_{barra} &= \begin{bmatrix} y_{11} + y_{12} & -y_{12} \\ -y_{12} & y_{22} + y_{12} \end{bmatrix} \\ Z_{barra} &= \frac{1}{(y_{11} + y_{12})(y_{22} + y_{12}) - y_{12}^2} \begin{bmatrix} y_{22} + y_{12} & y_{12} \\ y_{12} & y_{11} + y_{12} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

Logo o $MIIF$ da Eq. 11 pode ser escrito em função dos elementos das matrizes de admitâncias e impedância acima:

$$MIIF_{2,1} = \frac{y_{12}}{y_{12} + y_{22}} = -\frac{Y_{12}}{Y_{22}} = \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \quad (13)$$

Este resultado comprova a relação apresentada na (8) para justificar a igualdade entre os índices, mediante as premissas simplificadoras consideradas.

Vale ressaltar que estes resultados de igualdade não desqualificam a utilização de nenhum dos dois índices, uma vez que a metodologias de cálculo dos dois índices são diferentes, e a igualdade apresentada só se verifica se as não linearidades e a ação dos controles da rede elétrica forem desconsideradas.

4.0 - ANÁLISE DO MISCR E MSCR QUANDO DA VARIAÇÃO DO ACOMPLAMENTO

Neste informe, para demonstrar o efeito sobre os índices preeditivos de desempenho da variação do acoplamento entre elos de corrente contínua conectados a uma rede CA, inicialmente, será utilizado o sistema exemplo de duas barras da Figura 1

Dado uma situação na qual os elos estão infinitamente afastados um do outro ($y_{12} \rightarrow 0$), o índice MSCR se reduz a o tradicional SCR. Os índices utilizando as impedâncias da Figura 1 nesta condição são dados por:

$$MSCR_1 = \frac{y_1}{P_{dc1}} \quad (14)$$

$$MSCR_2 = \frac{y_2}{P_{dc2}}$$

É intuitivo concluir que a medida em que os elos são aproximados ($y_{12} \rightarrow \infty$) os valores dos índices de desempenho tendem a um mesmo valor, que corresponde aos dois elos na mesma barra:

$$MSCR = \frac{y_1 + y_2}{P_{dc1} + P_{dc2}} \quad (15)$$

Através de uma simples manipulação algébrica das equações (14) e (15) pode-se determinar a relação entre o índice com os elos na mesma barra e aqueles obtidos quando os elos estão infinitamente afastados.

$$MSCR = \frac{P_{dc1}}{P_{dc1} + P_{dc2}} \cdot MSCR_1 + \frac{P_{dc2}}{P_{dc1} + P_{dc2}} \cdot MSCR_2 \quad (16)$$

Pela equação (15) podemos observar que o valor do índice de desempenho para máxima aproximação entre os elos é a soma dos índices para os elos infinitamente afastados ponderado pela potência. Logo podemos concluir que o valor do *MSCR* para máxima aproximação é sempre inferior ao maior e superior ao menor dos índice de desempenho para o máximo afastamento.

O gráfico abaixo ilustra a variação do *MSCR* para dois elos de potência P_{dc1} e P_{dc2} , que apresentam, respectivamente, valores de SCR 3.0 e 4.0 quando infinitamente distantes um do outro.

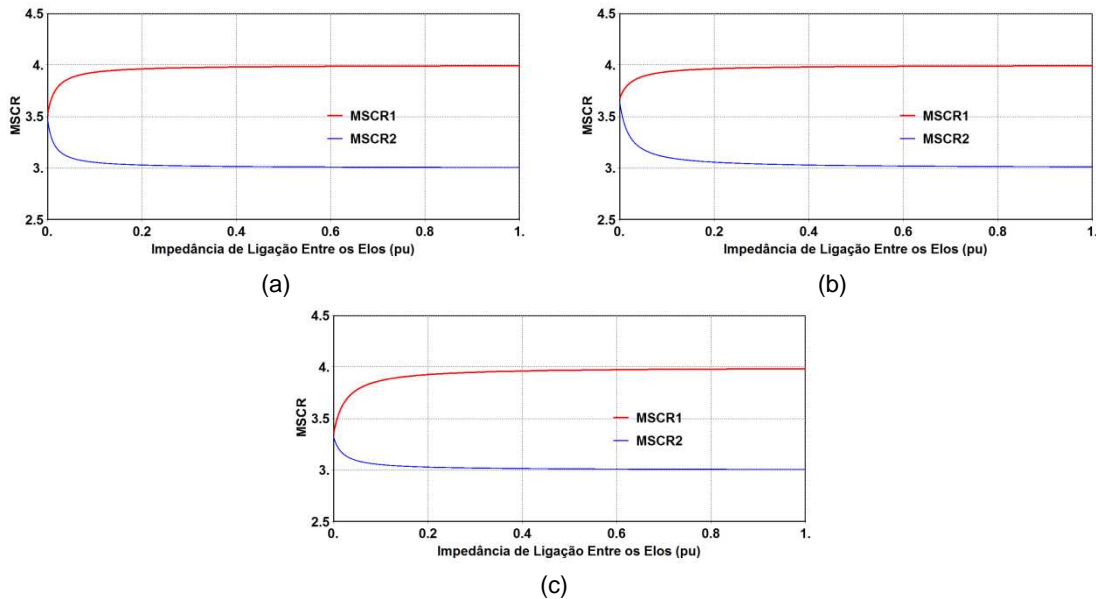
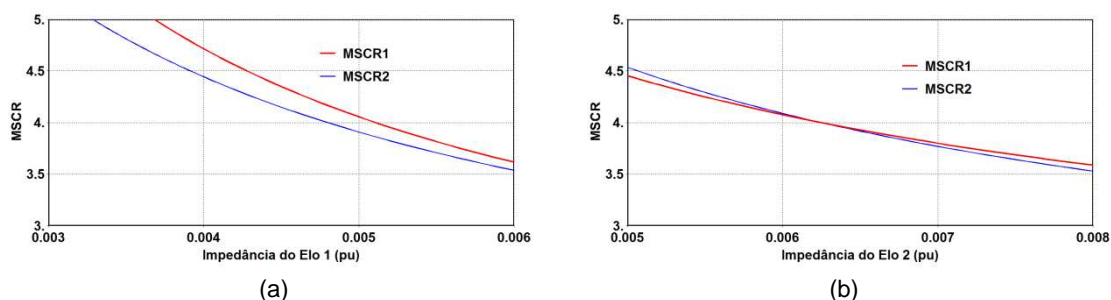


FIGURA 2 – Variação do MSCR (a) $P_{dc1}=P_{dc2}=4000\text{MW}$, (b) $P_{dc1}=4000\text{MW}$ e $P_{dc2}=2000\text{MW}$ e (c) $P_{dc1}=2000\text{MW}$ e $P_{dc2}=4000\text{MW}$.

O aumento dos valores de *MSCR* ocorre em ambos os elos se os reforços para expansão do sistema elétrico são feitos na direção das fontes geradoras e não na direção do aumento do acoplamentos entre os elos, conforme ilustrado na Figura 3. Embora o aumento do *MSCR* ocorra simultaneamente nos dois elos, é obvio que o elo que foi reforçado em direção as fontes geradoras (impedância diminuída) tem maior aumento de *MSCR*, podendo ocorrer uma inversão na ordem dos valores de *MSCR* conforme verifica-se na Figura 3(b).



(a)
FIGURA 3 – Variação do MSCR para (a) diminuição da impedância do elo 1 e
(b) diminuição da impedância do elo 2.

As conclusões obtidas para o sistema exemplo de duas barras podem ser expandidas para um sistema com três elos de corrente contínua, como o SIN no horizonte 2017 com a inclusão dos elos de corrente contínua associados a transmissão das usinas do Rio Madeira em Araraquara e da primeira fase do reforço da transmissão Norte – Sudeste de Belo Monte em Estreito (Terminal Minas).

Na Figura 4 é mostrado o diagrama unifilar do sistema equivalente considerando as barras de conexão dos elos de corrente contínua do subsistema Sudeste no horizonte 2017.

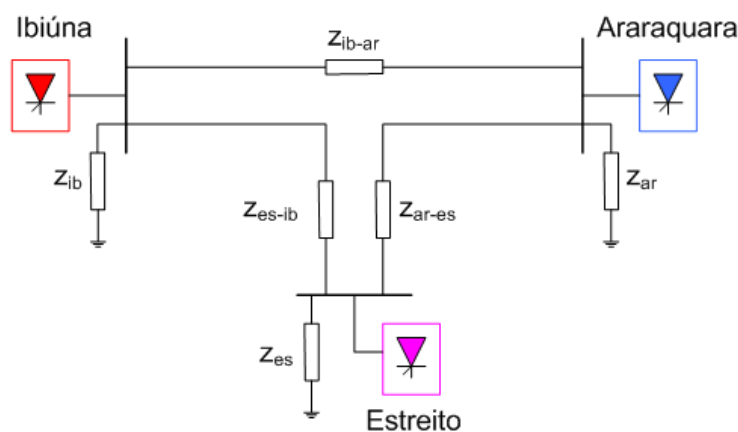


FIGURA 4 – Diagrama do Sistema Equivalente.

Os dados da tabela abaixo resumem os valores de potência injetada e impedâncias da rede equivalente da Figura 4, para a Configuração 2017, carga leve no cenário de máxima importação pelo Sudeste.

Tabela 2 – Impedâncias de Rede em % na Configuração 2017 do SIN

	Potência DC (MW)	Ibiúna	Araraquara	Estreito	MSCR
Ibiúna 345 kV	5920.5	0.65	1.40	3.99	2.61
Araraquara II 500 kV	5844.9	1.40	0.70	1.90	2.56
Estreito II 500 kV	3822.1	3.99	1.90	0.84	2.88

O comportamento do MSCR, supondo que a expansão do sistema conduza a uma aproximação entre os elos existentes no sistema, é ilustrado na Figura 5.

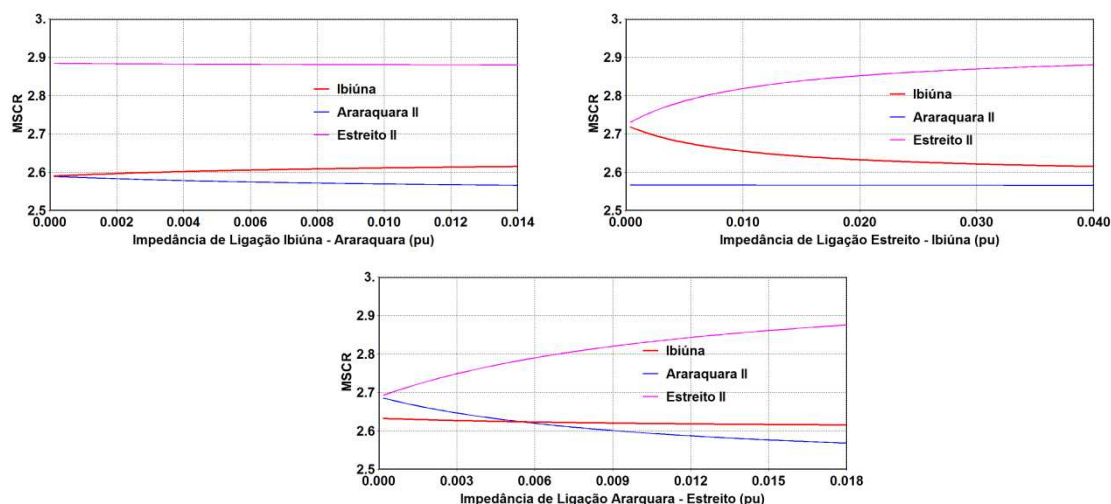


FIGURA 5 – Variação do MSCR para o Reforço da Rede Entre os Elos de Ibiúna, Araraquara e Estreito

Quando reforços são inseridos entre Ibiúna e Araraquara, diminuindo a distância elétrica entre estas subestações, o *MSCR* de Araraquara tende a aumentar, enquanto o *MSCR* de Ibiúna diminui. Nesta situação o *MSCR* de Estreito praticamente não é afetado.

Supondo que a expansão do sistema conduza a uma aproximação das subestações de Estreito e Ibiúna, neste caso o *MSCR* de Estreito diminui e o de Ibiúna aumenta, enquanto o *MSCR* de Araraquara não é afetado.

Na situação de reforço na ligação entre Araraquara e Estreito, o *MSCR* de Estreito diminui, enquanto o *MSCR* de Araraquara aumenta, podendo em uma situação extrema ultrapassar o valor do *MSCR* de Ibiúna, cujo valor praticamente não é afetado pela diminuição da distância elétrica entre Araraquara e Estreito.

5.0 - DETERMINAÇÃO DE NOVOS PONTOS DE CONEXÃO DE ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA

O cálculo dos índices preditivos de desempenho são realizados em uma etapa inicial de avaliação de alternativas para escolha de um novo ponto de conexão de elos de corrente contínua, particularmente os índices *MISCR* e *MSCR* foram utilizados na avaliação das alternativas para reforço da transmissão Norte-Sudeste para escoamento da usina de Belo Monte (5) e (6). No entanto nestes estudos, os índices foram calculados considerando cada uma das alternativas de conexão com seu respectivos reforços no sistema de transmissão receptor.

Nesta seção será apresentado um exemplo de determinação de um novo ponto de conexão, considerando um sistema de transmissão único, anterior a inserção dos reforços associado ao ponto de conexão escolhido. A escolha de um novo ponto da rede CA para conexão de elos de corrente contínua é uma tarefa que leva em conta fatores técnicos, econômicos e políticos.

No que se refere aos fatores técnicos, o novo ponto de conexão deve apresentar potência de curto elevada e pouca interação com os elos já existentes, visando a obtenção de um bom desempenho dinâmico sem a necessidade de implementações complexas e onerosas nos equipamentos e sistema de controle que formam o elo de corrente contínua.

Entre os fatores econômicos, a transmissão em corrente contínua tem o objetivo de fazer a ligação ponto a ponto entre geração e carga. Portanto é desejável que o novo ponto de conexão para subestação inversora esteja próximo aos centros de carga que se deseja atender. A proximidade com o centros de carga permite o escoamento da potência do elo com menores investimento em reforços na rede CA receptora.

Os índices preditivos de desempenho, como *SCR*, sempre foram utilizados nas primeiras etapas do planejamento de um novo elo de corrente contínua. Particularmente em uma rede CA com outras alimentações em corrente contínua, o *MISCR* e o *MSCR* podem ser utilizados.

No entanto nos estudos de planejamento, existe uma dúvida sobre como seria o comportamento destes índices após a inserção dos reforços na rede receptora, que podem diminuir a distância elétrica entre o elo planejado e os demais elos do sistema. Neste artigo verificou-se, que quando somente a dinâmica da rede é considerada, o efeito da inserção de reforços na rede CA entre os elos tende a aumentar o valor do índice para os elos que apresentam menor valor de índice na rede original sem reforços, por outro lado, os elos que apresentam maior valor de índice na rede original tendem a ter ser índice diminuído pela inserção dos reforços.

Esta conclusão permite fazer a avaliação de novos pontos para conexão de elos de corrente contínua utilizando a rede CA sem os reforços associados ao novo elo. Pode-se estabelecer um valor mínimo para os novos índices após a inserção da nova alimentação CC e uma relação de compromisso com a distância aos centros de carga que se deseja atender. Sendo assim, pode-se afirmar que o ponto da rede CA que resultar em valores de MSCR adequados e estiver mais próximo dos centros de carga, necessitaria de menos reforços na rede CA receptora tanto para escoar a potência injetada, como para melhorar seu desempenho dinâmico.

Neste artigo será apresentado, a título de exemplo, uma avaliação de novo ponto de conexão para elo de corrente contínua utilizando a configuração 2017, carga leve no cenário de máxima importação pelo Sudeste abordada na seção anterior. Esta configuração de sistema apresenta originalmente três elos de corrente contínua em Ibiúna 345 kV, Araraquara II 500 kV e Estreito II 500 kV, com valores de MSCR superiores a 2.5 conforme apresentado na Tabela 2.

Neste exemplo considerou-se a inserção de um novo elo de corrente contínua no valor de 4000 MW, utilizando-se esta mesma rede sem a inserção de novos reforços. Nesta análise foram avaliadas como candidatas a receber o novo elo as barras do sistema Sudeste nas tensões de 500, 440 e 345 kV. Na Tabela 3 são apresentados alguns dos principais valores de MSCR obtidos neste exemplo.

Tabela 3 – Valores de MSCR Após a Inserção do Novo Elo

Novo Elo	MSCR do Novo Elo	MSCR em Ibiúna	MSCR em Araraquara	MSCR em Estreito
Neves 500 kV	1.77	2.45	2.36	2.24
Estreito II 500 kV	1.76	2.37	2.25	1.76
Júpia 440 kV	2.57	2.46	2.34	2.73
Bauru 440 kV	2.27	2.30	2.17	2.60
Oeste 440 kV	1.62	2.16	2.19	2.58
Nova Iguaçu 500 kV	2.53	2.38	2.31	2.61
Serra da Mesa 500 kV	3.92	2.56	2.49	2.70

A SE Neves 500 kV apresenta vantagem para conexão do novo elo por ser próxima ao centro consumidor de Belo Horizonte, no entanto o MSCR neste ponto é inferior a 2.0 e novos reforços seriam necessários para melhorar seu desempenho, além disso a interação com Estreito 500 kV é significativa. A SE Estreito II 500 kV poderia receber mais um elo além do previsto na primeira etapa de Belo Monte, mas novos investimentos teriam de ser feitos para garantir um aumento do MSCR neste ponto. Considerando os valores de MSCR a SE Júpia 440 kV apresenta bons resultados, mas esta encontra-se muito distante dos grandes centros consumidores de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte. A SE Bauru 440 kV foi considerada como uma possível alternativa nos estudos da transmissão de Belo Monte, no entanto esta alternativa tem como principal problema a forte interação com o elo de Araraquara II. Na SE Oeste 440 kV a principal vantagem é a proximidade com o centro consumidor de São Paulo, mas o MSCR no local é muito baixo o que provocaria um maior investimento em reforços para garantir um bom desempenho deste ponto. A SE Nova Iguaçu 500 kV fica próxima ao centro consumidor do Rio de Janeiro, por outro lado o valor de MSCR no local é bastante razoável, sendo que o MSCR em Araraquara II é o principal problema desta alternativa. A alternativa da SE Serra da Mesa 500 kV apresenta a distância aos grandes centros consumidores como um dos principais problemas, além disto a proximidade com um ponto crítico do SIN como a interligação Norte-Sul acarreta dificuldades a escolha deste ponto para chegada de mais um elo de corrente contínua ao sistema Sudeste.

6.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma breve descrição dos índices preditivos de desempenho MISCRA e MSCR, muito utilizados na avaliação inicial do potencial de interação entre elos de corrente contínua operando em uma mesma rede CA.

Uma análise mais detalhada destes índices, considerando apenas a dinâmica da rede CA, revelou que estes dois índices apesar de utilizarem metodologias diferentes resultam em um mesmo valor quando a dinâmica dos sistemas de controle não é considerada e a rede CA que conecta os elos é considerada linear, ou seja, formada apenas por elementos RLC.

Considerando esta simplificação na rede CA, verificou-se neste trabalho qual o comportamento dos referidos índices quando os elementos da rede CA são variados. Esta variação de parâmetros da rede CA tem o objetivo de simular o que ocorre quando da expansão do sistema elétrico, que ao mesmo tempo que diminui a distância elétrica entre os elos, também aumenta a potência de curto-circuito dos pontos de conexão dos referidos elos.

Utilizando-se um sistema exemplo foi possível demonstrar que a diminuição da distância elétrica entre os elos, provocado por um reforço da expansão do sistema, acarreta no aumento do valor do índice para o elo que apresenta menor valor de índice na rede sem reforço, por outro lado, o elo que apresenta maior valor de índice na rede original tendem a ter seu índice diminuído pela inserção dos reforços.

Este comportamento dos índices preditivos mediante a expansão do sistema elétrico, revelou-se verdadeiro também na avaliação da configuração 2017 do SIN apresentada neste artigo.

Por fim este artigo apresentou um exemplo que tem o objetivo de ilustrar uma metodologia que permita indicar, de maneira preliminar e considerando apenas os aspectos relacionados aos índices de desempenho, novos pontos para conexão de elos de corrente contínua em uma rede CA que já apresenta outras alimentações CC.

7.0 - 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) P. Toledo, B. Bergdahl, G. Asplund, “Multiple infeed short circuit ratio – aspects related to multiple HVDC into one AC network”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia and Pacific, IEEE/PES, 2005.
- (4) Paulo Fischer, Jiuping Pan, Kailash Srivastava, Wilbur Wang, Chao Hong; “Case Study of a Multi-Infeed HVDC System”; Power System Technology and IEEE Power System Conference, 2008
- (5) Antônio R.C.D. Carvalho, Leonardo P. Almeida, Fabricio L. Lirio, Fabiola F.C. Véliz; “Estudo de múltiplas alimentações CCAT para alternativas em corrente contínua da expansão da interligação Norte – Sudeste”, XXI SNPTEE, Florianópolis, Outubro 2011.
- (6) Fabricio L. Lirio, Fabiola F.C. Véliz, Antônio R.C.D. Carvalho, Leonardo P. Almeida; “Cálculo de Índices Preditivos de Desempenho para a Operação Conjunta de Múltiplos Conversores CCAT Considerando Alternativas da Expansão de Interligação Norte-Sudeste”, XII SEPOPE, Rio de Janeiro, Maio 2012.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Fabricio Lucas Lirio

Fabricio Lucas Lirio graduou-se em Engenharia Elétrica em 1998 na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Em 2000 obteve o título de Mestre na área de Eletrônica de Potência na UFJF e em 2008 obteve o título de doutor também na área de eletrônica de potência na COPPE/UFRJ apresentando dissertação sobre a Modelagem de SVC e TCSC no Domínio s para Análise Linear de Transitórios Eletromagnéticos e Harmônicos.

Trabalha atualmente no CEPEL, atuando em diversos trabalhos envolvendo transmissão CCAT e equipamentos FACTS e nos estudos da alternativa CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira e expansão da Interligação Norte-Sudeste e Norte-Nordeste visando a integração da usina de Belo Monte. É membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil.

Seus campos de interesse são: Modelagem de equipamentos de transmissão CCAT e FACTS, controle aplicado a sistemas de potência, bem como estudos de transitórios eletromagnéticos e harmônicos.