



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

### Amortecimento de oscilações eletromecânicas utilizando estabilizadores em elos HVDC considerando sistemas *Multi-Infeed*

VITOR ANTUNES (1); AGUINALDO SILVEIRA E SILVA(2);  
UFSC(1); UFSC(2);

## RESUMO

Neste artigo são analisadas as oscilações eletromecânicas existentes em SEP com característica *Multi-Infeed*. Projetos de controladores são propostos para aumentar o amortecimento dessas oscilações. São considerados requisitos de robustez para diferentes níveis de interações entre conversores. O nível de interação é quantificado pelo índice MIIF. As técnicas de análises e projeto propostas são aplicadas em um sistema teste proposto. Os controladores projetados são aplicados aos conversores visando o aumento de amortecimento, usando três técnicas de projeto que são avaliadas segundo diferentes níveis de interação entre os elos.

HVDC, *Multi-Infeed*, Oscilações eletromecânicas, Controle

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Elos HVDC (*High Voltage Direct Current*) são importantes alternativas para transmitir grandes quantidades de energia por longas distâncias. Eles apresentam vantagens econômicas e técnicas quando comparadas a transmissão em corrente alternada e podem servir como principal meio de escoamento de energia de grandes centrais geradoras, que geralmente encontram-se distantes dos principais centros de cargas.

O aumento do número de elos HVDC em operação cria cenários onde existam mais que um elo HVDC chegando em uma mesma área. Essa configuração de sistema é conhecida como *Multi-Infeed*. Sistemas que possuem essa característica são susceptíveis a sofrerem problemas em suas operações devido as interações entre estações conversoras. Essa interação dependerá principalmente da impedância entre as barras, potência de curto-circuito do sistema CA e potência CC transmitida por cada elo [1,2]. Índices como o MIIF (*Multi Infeed Interaction Factor*) são utilizados para avaliar a interação entre elos. O MIIF é um indicativo para avaliar se problemas operacionais podem ser amplificados pela interação existente.

A análise e controle de oscilações eletromecânicas são essenciais para a operação do sistema como um todo. Esse estudo pode ser realizado através de uma análise modal, na qual os autovalores do sistema, fatores de controlabilidade e observabilidade e respostas no domínio do tempo para aplicação de pequenas perturbações são avaliadas. Os elos HVDC podem ser usados para aumentar o amortecimento. Devido à alta controlabilidade desses equipamentos, pode-se modular a corrente/potência do elo para agregar amortecimento aos modos de interesse por meio de malhas de controle adicionais aos conversores. Em sistemas *Multi-Infeed*, projetos de controles

suplementares utilizando a modulação de ambos os elos para melhorar o amortecimento de oscilações críticas podem ser considerados.

Nesse artigo, métodos de análise e projeto que visam o amortecimento de oscilações eletromecânicas para sistemas *Multi-infeed* são propostos. Esses métodos são aplicados a um sistema teste que apresenta as características de sistemas desejadas.

## 2.0 - CONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS *MULTI-INFEED*

A operação de elos HVDC em sistemas *Multi-Infeed* é influenciada pela estrutura do sistema AC no qual estão conectados. Geralmente esses sistemas são altamente malhados e o acoplamento entre as barras AC nas quais os elos HVDC estão conectados não é de determinação direta. Uma estrutura geral e simplificada de sistemas *Multi-Infeed* é apresentada na Figura 1.

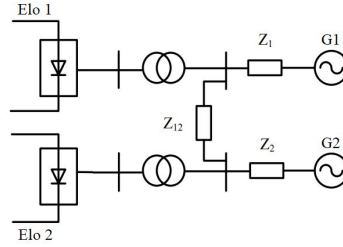


FIGURA 1 – Estrutura básica de sistemas *Multi-Infeed*

A impedância  $Z_{12}$  caracteriza o quão distante eletricamente estão os elos HVDC. Em sistemas *Multi-Infeed*, a operação de um elo é influenciada pela operação dos demais elos que estão eletricamente próximos. Assim, a interação entre os elos é dependente de  $Z_{12}$ . Uma forma de quantificar essa interação ocorre por meio do MIIF.

### 2.1 - Interação entre elos HVDC

O MIIF é um índice utilizado para relacionar a interação entre os elos HVDC com a impedância de acoplamento  $Z_{12}$ . O MIIF é descrito pela Equação (1), a qual relaciona a variação de tensão que ocorre em uma barra ocasionada pela variação da tensão em outra barra, ou seja,

$$MIIF = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} \quad (1)$$

a Equação 1 descreve a razão entre a variação da tensão na barra  $j$  causada pela variação de tensão na barra  $i$ .

Os valores possíveis para o MIIF estão no intervalo entre 0 e 1. Para um caso onde o MIIF for igual a 0, não existe interação entre elos, os quais estão totalmente desacoplados. Já com MIIF igual a 1, os elos estão conectados a mesma barra [3].

## 3.0 - MODELAGEM DE COMPONENTES

Nessa seção serão apresentados os modelos para os componentes presentes no estudo em conjunto com os modelos matemáticos utilizados para desenvolver as análises.

### 3.1 - Elo HVDC

O modelo do elo HVDC é baseada no uso de conversores modelados através de pontes de 12 pulsos em ambas estações, no qual as equações que regem suas operações são:

$$V_{dc,ret} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_B V_{B,ret} \cos \alpha - R_C I_{dc,ret} \quad (2)$$

$$V_{dc,inv} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_B V_{B,inv} \cos \gamma - R_C I_{dc,inv} \quad (3)$$

onde  $V_{dc,ret}$ ,  $V_{dc,inv}$ ,  $I_{dc,ret}$  e  $I_{dc,inv}$  são as tensões e correntes DC em cada conversor,  $N_B$  é o número de pontes conversoras,  $V_B$  é a base de tensão do secundário do transformador ligado a cada conversor e  $\alpha$  e  $\gamma$  são respectivamente o ângulo de disparo do retificador e o de avanço de disparo do inversor [1, 3].

#### 3.1.1 - Controle do elo HVDC

O sistema de controle global de um elo HVDC envolve diferentes malhas de controle. Dessa forma necessita-se de uma hierarquia para sua coordenação. Tipicamente, uma estação conversora apresenta as seguintes malhas de controle: *Master Control*, controle de polo e controle de ponte. O *Master Control* determina a potência transmitida

através da definição de ordens de corrente  $I_{ord}$  para cada estação conversora. O controle de polo se encarrega em gerar o instante de disparo adequado para que a ordem de corrente seja alcançada [1]. Por fim, o controle das pontes gera o sinal responsável pelo disparo das válvulas.

Para o presente trabalho a configuração de controle adotada utiliza o retificador para controlar a corrente DC e o inversor para a tensão DC, sendo que em condições normais de operação o retificador opera sob corrente constante e o inversor sob ângulo de extinção constante. Para tanto, a filosofia adotada é baseada no método da margem de corrente  $\Delta I_d$ , o qual ajusta a ordem de corrente do inversor para um valor menor que o do retificador. Essa diferença é  $\Delta I_d$  e corresponde entre 10 e 15 % da corrente nominal do elo. As Figuras 2 e 3 apresentam as malhas de controles dos respectivos conversores.

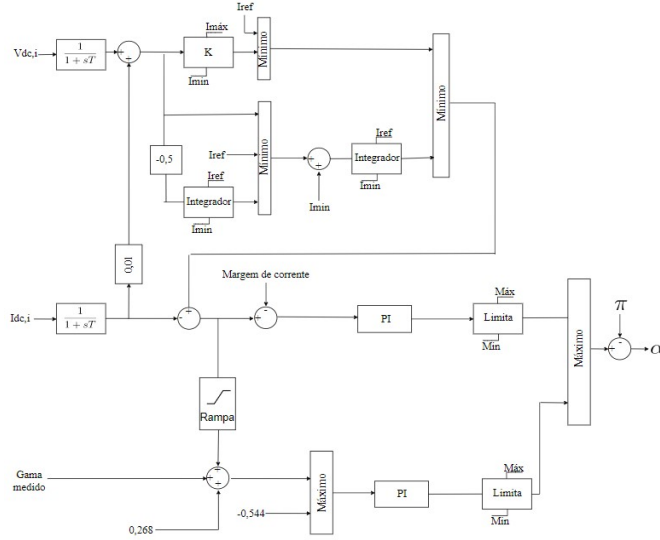


FIGURA 2 – Controle da estação inversora

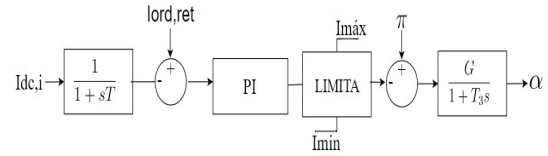


FIGURA 3 – Controle da estação retificadora

### 3.1.2 - Controle suplementar de oscilações eletromecânicas

Devido a controlabilidade do sistema de conversão, uma malha adicional pode ser introduzida no sistema de controle do elo, especificamente no *Master control*. Esse controle possui como enfoque a inserção de amortecimento para modos eletromecânicos críticos, melhorando a operação de sistemas [1].

A estrutura tradicional desse controle é apresentada na Figura 4 e conta com um filtro passa baixa, um *WashOut*, um bloco de avanço-atraso de ordem  $n$  e um ganho  $K$ .

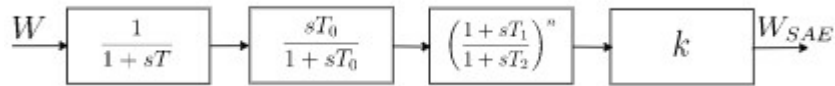


FIGURA 4 – Estrutura de controle suplementar

## 3.2 - Modelo geral do sistema

Sistemas elétricos de potência, podem ser descritos por um sistema não-linear de equações na forma:

$$\dot{x} = f(x, z, u) \quad (4)$$

$$0 = g(x, z, u) \quad (5)$$

$$y = h(x, z, u) \quad (6)$$

onde  $x \in \mathbb{R}^n$  e é o vetor contendo as variáveis de estado,  $z \in \mathbb{R}^m$  sendo o vetor de variáveis algébricas e  $u \in \mathbb{R}^p$  o vetor de variáveis de entrada do sistema.

Com o intuito de desenvolver uma análise modal, é necessário que se linearize as equações (4), (5) e (6) em torno de um ponto de operação. Dessa forma, a estabilidade do sistema pode ser avaliada para o ponto escolhido, bem como para sua região vizinha.

### 3.2.1 - Redução de ordem de sistemas lineares

A redução de ordem de modelos com ordem elevada facilita o projeto de sistemas controle [5].

Para esse trabalho, autovalores não controláveis e não observáveis são removidos do modelo. Dentro desse grupos, existem autovalores localizados na origem que são gerados no processo de linearização das equações. Esses são oriundos da modelagem em situações que não são tomadas máquinas síncronas como referência de ângulo e velocidade [5].

Os autovalores não controláveis ou não observáveis não contribuem para a resposta final do sistema e os autovalores redundantes podem representar características não realísticas. Nesse trabalho, os autovalores redundante e os não controláveis e não observáveis são removidos usando a decomposição de kalman [6].

#### 4.0 - PROJETO DE CONTROLADORES

Os controladores para elo HVDC *multi-infeed* devem ser robustos quanto variação da impedância de conexão. Assim, técnicas de controles que visam minimizar índices de desempenho e robustez são propostas e sua eficácia é comparada com controladores projetados com base em técnicas tradicionais. Para tanto, é proposto o uso de métodos de projetos baseados na minimização da norma  $H_\infty$  e da abscissa espectral, bem como de um projeto no domínio da frequência.

##### 4.1 - Domínio da frequência

Na literatura, diferentes técnicas são apresentadas para realização de projetos de controle no domínio da frequência. Ao basear-se no critério de estabilidade de Nyquist é desenvolvido um método no qual realiza-se um posicionamento de polos levando em consideração um requisito de amortecimento para o modo de oscilação de interesse.

Nesse método, o posicionamento dos polos é realizado através de uma realimentação do tipo avanço-atraso, proporcionando o deslocamento do polo de interesse para uma posição mais adequada. Com esse procedimento é possível adicionar amortecimento e deslocar os polos que causam instabilidade ou oscilações subamortecidas.

##### 4.2 - Minimização da abscissa espectral

A abscissa espectral é definida pela maior parte real de todos os autovalores de malha fechada. Para projetos de controladores, a parte real dos autovalores em malha fechada, está diretamente relacionada à estabilidade do sistema. Este índice de desempenho não considera critérios de amortecimento e robustez e assim não é condição suficiente para afirmar que um controle é robusto, apenas informa que para sistemas estáveis, os polos estão afastados o máximo possível do eixo imaginário. Assim um controlador que minimize a abscissa espectral tem como objetivo afastar os polos, para a esquerda, o máximo possível.

##### 4.3 - Minimização da norma $H_\infty$

A norma  $H_\infty$  representa a distância entre a origem e o ponto mais distante do diagrama de Nyquist, ou mesmo o maior valor de magnitude apresentado no diagrama de bode para uma determinada função SISO. Ou seja, a norma quantifica o ganho que um sinal de entrada pode ter na saída. A norma  $H_\infty$  é determinada com base na representação em espaço de estado do sistema, em malha fechada, apresentado na Figura 5, onde  $G(s)$  representa o sistema es espaço de estados e  $K(s)$  representa o controle a ser projetado. A representação de  $G(s)$  provem da representação em espaço de estado do sistema considerando que exista perturbações externas, assim:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix}$$

onde  $w$  é uma perturbação externa aplicada e  $z$  a saída controlada. Nessa representação, a matriz  $B_1$  tem função importante para a correta atuação do controle, ela é considerada a matriz de pesos sobre as variáveis de estado. Em sua definição deve-se levar em consideração a influência que cada estado sofre pela perturbação aplicada.

Para esse trabalho, utilizou-se como a matriz de pesos, a matriz de entradas  $B_2$  para uma condição operativa onde alterou-se o parâmetro para o qual queira garantir robustez à sua variação. Como deseja-se projetar controladores que sejam robustos a impedância de conexão entre os elos HVDC, utilizou-se como matriz  $B_2$  a matriz de entradas para o sistema operando com essa impedância dobrada.

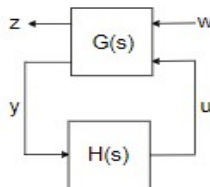


FIGURA 5 – Sistema realimentado

##### 4.4 - Abscissa pseudo-espectral

Segundo [7], o pseudo-espectro é uma medida da variação dos autovalores quando o sistema é perturbado. Através de sua análise é possível capturar o comportamento durante transitórios. Com esse índice consegue-se

determinar uma perturbação máxima  $\varepsilon$ , sob a matriz de estados, para a qual se garantirá que o sistema tenha a capacidade de absorção, sem instabilização.

## 5.0 - RESULTADOS

Os métodos propostos são aplicados a um sistema teste *multi-infeed*. O desempenho e a robustez dos controles projetados são avaliados para diferentes níveis de interação entre os elos. Quantifica-se as interações pelo índice MIIF. Para modelar o sistema, foram usados as versões acadêmicas dos *softwares* desenvolvidos pelo CEPEL (ANAREDE, ANATEM e PACDYN). Já para elaboração dos projetos, utilizou-se o pacote HIFOO, desenvolvido em MATLAB. Essa ferramenta possui a finalidade de projetar controladores que visam minimizar índices de desempenho. O processo de otimização desses índices levam a problemas não convexos e não suaves. Assim o HIFOO utiliza uma abordagem por meio de algoritmos híbridos que combinam os métodos Quase-Newton (BFGS) e o método do gradiente amostrado. Já para avaliar a abscissa pseudo-espectral utilizou-se o pacote computacional EigTol, desenvolvido em MATLAB.

### 5.1 - Sistema teste proposto

O sistema teste está apresentado na Figura 6. Uma ligação entre as estações inversoras de cada elo realizada por apenas uma impedância, facilita a análise da interação entre os elos. Os elos foram modelados com base em [8], o qual consiste em um monopolo equivalente de um *link* LCC-HVDC (*Line Commutated Converter*). Ambos os elos possuem valores nominais de potência, tensão e corrente sendo 1000 MW, 500 kV e 2000 A respectivamente. O sistema tem 16 barras AC, 04 centros de cargas, 04 máquinas síncronas e dois elos HVDC. As unidades geradoras conectadas a cada estação retificadora são modeladas como barras infinitas, pois o interesse está nas oscilações eletromecânicas no sistema conectadas as estações inversoras.

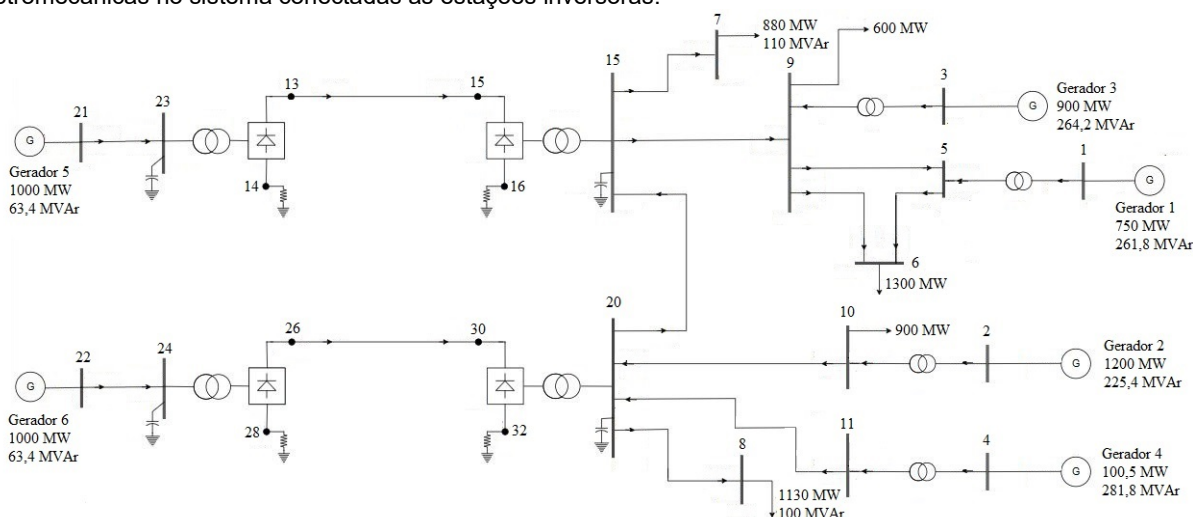


FIGURA 6 – Sistema teste utilizado

O sistema linearizado possui 46 estados. Usando a redução de Kalman o modelo é reduzido para 37 estados. Os autovalores com menores amortecimentos estão apresentados na Tabela 1. Os fatores de participação predominantes indicam que os autovalores estão associados a oscilações eletromecânicas e apresentam baixos amortecimento.

Tabela 1 – Autovalores com menores amortecimentos

	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)	Fat. Part.
1	$-0.09887 \pm 6.6503$	1.0584	1.4865	$WW_1$
2	$-0.5878 \pm 8.4696$	1.348	6.9239	$WW_2$
3	$-0.9584 \pm 13.373$	2.1284	7.1483	$WW_3$

### 5.2 - Cenários analisados

A fim de analisar o desempenho e a robustez dos controles projetados, será avaliado o impacto ocasionado sobre os modos menos amortecidos apresentados na Tabela 1. Para tanto, três cenários operativos serão analisados com relação a impedância de conexão. Esses estando apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Cenários analisados

Cenário	Impedância (%)
1 – Nominal	$0.9 + j2.6$
2 – Alta impedância	$1.8 + j5.2$
3 – Baixa impedância	$0.45 + j1.3$

Partindo desses três cenários será avaliado a interação existente entre elos em função da distância elétrica envolvida e principalmente a robustez dos controladores projetados para inserir amortecimento ao sistema.

### 5.3 - Avaliação da interação dinâmica entre elos HVDC

Através do uso do MIIF, a interação entre os elos é quantificada. Sua análise é desenvolvida para os três cenários apresentados na Tabela 2. Para essa avaliação, obtém os seguintes valores para o MIIF para cada cenário analisado.

Tabela 3 – MIIF para o Cenário 1 - Nominal

Barra em que o reator é chaveado	Barra em que o impacto é avaliado		
		Barra 15 (inversor 1)	Barra 20 (inversor 2)
	Barra 15 (inversor 1)	1.0	0.425
	Barra 20 (inversor 2)	0.731	1.0

Tabela 4 – MIIF para o Cenário 2 – Alta Impedância

Barra em que o reator é chaveado	Barra em que o impacto é avaliado		
		Barra 15 (inversor 1)	Barra 20 (inversor 2)
	Barra 15 (inversor 1)	1.0	0.265
	Barra 20 (inversor 2)	0.575	1.0

Tabela 5 – MIIF para o Cenário 3 – Baixa Impedância

Barra em que o reator é chaveado	Barra em que o impacto é avaliado		
		Barra 15 (inversor 1)	Barra 20 (inversor 2)
	Barra 15 (inversor 1)	1.0	0.599
	Barra 20 (inversor 2)	0.844	1.0

Verifica-se que ao reduzir-se a impedância de acoplamento, a interação existente entre os elos torna-se maior. Além disso consegue-se visualizar a diferença de interação entre os elos. Nota-se que em todos os cenários, o valor do MIIF, e consequentemente a interação, para o inversor 2 é maior que no inversor 1, ou seja, a operação do inversor 2 impacta mais a operação do 1 do que o oposto.

### 5.4 - Melhoria da estabilidade para pequenas perturbações

Conhecendo a operação de sistemas *Multi-Infeed* e sabendo que existe a interação mutua na operação dos elos, torna-se necessário avaliar o impacto dessa interação na ação de controladores que visam inserir amortecimento em modos eletromecânicos de sistemas com essa característica. Esses controladores devem ser robustos a variações do ponto operativo, principalmente por estarem sujeitos a sofrerem com interações entre os elos.

Projetos são realizados utilizando a condição nominal de operação, apresentado na Tabela 2. Já os outros cenários são utilizados para avaliar o desempenho e robustez dos projetos desenvolvidos.

Cada projeto em estudo, contará com a presença de controladores em cada elos do sistema teste e a avaliação ocorrerá para o sistema com os dois controladores adicionados.

#### 5.4.1 - Sinais de entradas utilizados

Para realização dos projetos, uma análise a ser realizada preliminarmente é em relação ao sinal utilizado como entrada dos controladores. Uma análise de sensibilidade baseada nos fatores de observabilidade para os modos de interesse indica os sinais mais recomendados para serem utilizados. Observando esses fatores para os modos de interesse, a velocidade da máquina síncrona<sup>1</sup> é o estado mais adequado para uso como entrada dos controladores.

Uma análise semelhante pode ser utilizada para definir o local (conversor) a ser inserido o controlador, porém utilizando os fatores de controlabilidade. Porém como, para esse ponto, deseja-se seguir o desenvolvido por [9], os controladores serão adicionados nas estações retificadoras.

#### 5.4.2 - Controladores projetados

Dessa forma os seguintes controladores foram desenvolvidos com uso das respectivas técnicas de projeto.

- Projeto utilizando o domínio da frequência:

Foram desenvolvidos de forma não coordenada, ou seja, sendo desenvolvidos dois projetos SISOs sequenciais. Projetou-se um controlador e inseriu-se no sistema, assim realizou-se o segundo projeto. Sendo:

$$K_{11} = 22.6246 \left( \frac{1 + 1.1156s}{1 + 0.9143s} \right)^2 \quad K_{12} = 31.8381 \left( \frac{1 + 0.7071s}{1 + 0.6177s} \right)^2$$

- Projeto baseado na minimização da abscissa espectral

Foi realizado com um método coordenado, ou seja, os dois controladores foram projetados de forma conjunta, em um projeto MIMO. Dessa forma os parâmetros são ajustados simultaneamente e interações entre controladores são consideradas. Assim:

$$K_{21} = 9.768 \frac{s^2 + 7.3434s + 4.320}{s^2 + 1.872s + 0.7474}$$

$$K_{22} = 54.24 \frac{s^2 + 3.3778s + 2.216}{s^2 + 2.961s + 2.468}$$

- Projeto baseado na minimização da norma  $H_\infty$

Analogamente, utilizou-se a mesma estratégia, apenas alterando o índice no qual leva-se em consideração durante o projeto. Nesse projeto, obteve-se:

$$K_{31} = 6.031 \frac{s^2 + 7.4931s + 5.3597}{s^2 + 1.872s + 8.4828}$$

$$K_{32} = 12.09 \frac{s^2 + 0.5479s + 3.079}{s^2 + 1.043s + 1.065}$$

## 5.5 - Análise modal

Aplicando os controladores projetados na seção anterior para os três cenários apresentados na Tabela 2 obtemos o comportamento dos autovalores menos amortecidos do sistema. Nas Tabelas 6, 7, 8 e 9 são apresentados as variações dos autovalores perante os cenários gerados para as situações sem controle adicional e com controle utilizando os três métodos propostos

Tabela 6 – Autovalores para sistema sem inclusão de controle

Sem Controle adicional			
	Modos	Freq (Hz)	Amort. (%)
Cenário 1	$-0.099 \pm j6.650$	1.058	1.4865
	$-0.5878 \pm j8.4696$	1.348	6.92
	$-0.9584 \pm j13.373$	2.120	7.14
Cenário 2	$-0.0188 \pm j5.9156$	0.8415	0.3178
	$-0.2873 \pm j8.2107$	1.307	3.4967
	$-0.2435 \pm j12.57$	2.00	1.9371
Cenário 3	$-0.0598 \pm j7.0508$	1.122	0.8485
	$-0.0598 \pm j7.0508$	1.333	3.4613
	$-0.2379 \pm j12.77$	2.03	1.8629

Tabela 7 – Autovalores para sistema com controle com projeto pelo domínio da frequência

Domínio da Frequência			
	Modos	Freq (Hz)	Amort. (%)
Cenário 1	$-0.8623 \pm j7.21$	1.14	11.87
	$-0.8082 \pm j8.64$	1.37	9.01
	$-0.8273 \pm j13.22$	2.10	6.24
Cenário 2	$-0.3128 \pm j6.69$	0.95	4.67
	$-0.5935 \pm j8.41$	1.34	7.04
	$-0.3645 \pm j12.31$	2.1026	2.96
Cenário 3	$-0.3250 \pm j7.38$	1.13	4.40
	$-0.5196 \pm j8.04$	1.31	6.41
	$-0.4024 \pm j12.49$	2.03	3.22

Tabela 8 – Autovalores para sistema com controle baseado na minimização da abscissa espectral

Abscissa espectral			
	Modos	Freq (Hz)	Amort. (%)
Cenário 1	$-0.5316 \pm j6.9449$	1.10	7.633
	$-1.09 \pm j8.3678$	1.33	12.92
	$-0.8493 \pm j13.351$	2.12	6.34
Cenário 2	$-0.552 \pm j6.308$	1.01	7.982
	$-0.833 \pm j8.177$	1.30	10.137
	$-0.1137 \pm j12.528$	1.99	0.907
Cenário 3	$-0.3808 \pm j7.102$	1.13	5.3537
	$-0.6612 \pm j8.282$	1.31	7.9585
	$-0.1935 \pm j12.78$	2.03	1.5143

Tabela 9 – Autovalores para sistema com controle baseado na minimização norma  $H_\infty$

$H_\infty$			
	Modos	Freq (Hz)	Amort. (%)
Cenário 1	$-0.5166 \pm j6.222$	1.05	7.77
	$-0.5863 \pm j8.474$	1.3487	6.9028
	$-0.8298 \pm j13.397$	2.132	6.1821
	$-0.6209 \pm j5.91$	0.9406	10.448

Cenário 2	$-0.5874 \pm j8.406$	1.33	6.971
	$-0.7410 \pm j13.277$	2.113	5.5723
Cenário 3	$-0.4549 \pm j7.102$	1.13	6.3925
	$-0.573 \pm j8.568$	1.3636	6.6728
	$-0.909 \pm j13.535$	2.154	6.701

Nota-se que para o ponto de operação utilizado para projeto, ao utilizar a metodologia que utiliza técnicas no domínio da frequência, encontram-se os maiores amortecimentos. Porém ao modificar-se o ponto de operação, esse controle não apresenta mesma eficácia, assim não apresentando robustez à variação da impedância de conexão. O mesmo comportamento é apresentado para o uso do controlador baseado na minimização da abscissa espectral.

Já nas situações onde projetou-se um controlador que minimize a norma  $H_{\infty}$ , o amortecimento dos modos apresentou menor variação, indicando maior robustez. Essa avaliação era esperada, pois técnicas tradicionais de projeto bem como o afastamento dos polos do sistema compensado da origem, não necessariamente traz robustez para o sistema

#### 5.6 - Avaliação da robustez usando a abscissa pseudo-espectral

Uma alternativa para mensurar a robustez dos controladores projetados é a análise do pseudo-espectro do sistema compensado. Essa análise é feita pelo uso do pacote computacional EigTool, com o qual é possível traçar curvas com diferentes valores de perturbações  $\varepsilon$ . Essas perturbações representam deslocamentos dos autovalores no plano complexo. A maior perturbação admitida que pode ser aplicada sem que exista instabilização será a que possua maior  $\varepsilon$  sem que haja transposição para o semiplano direito. Dessa forma quanto maior o valor de  $\varepsilon$  mais robusto será o sistema. Assim, as Figuras 7, 8 e 9 apresentam os pseudo-espectros para o sistema em malha fechada. Os valores apresentados para  $\varepsilon$  estão em escala logarítmica.

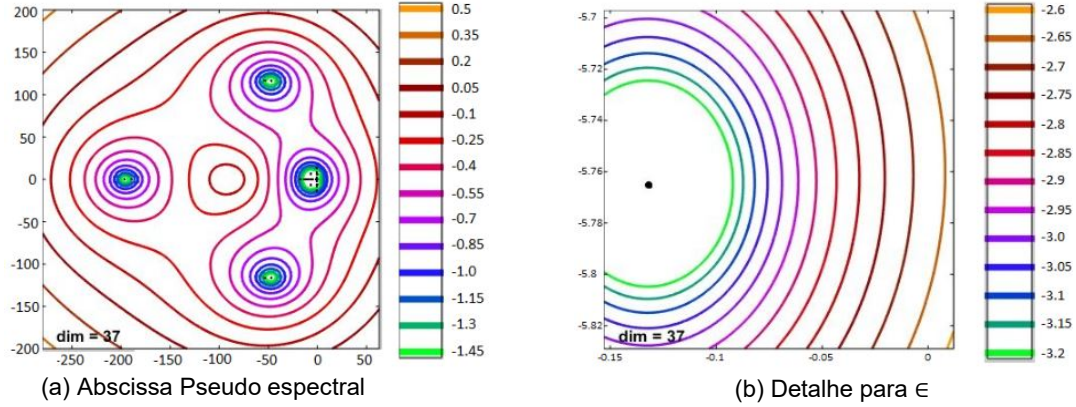


FIGURA 7 – Pseudo-Espectro para sistema em malha fechada com controladores  $K_{11}$  e  $K_{12}$

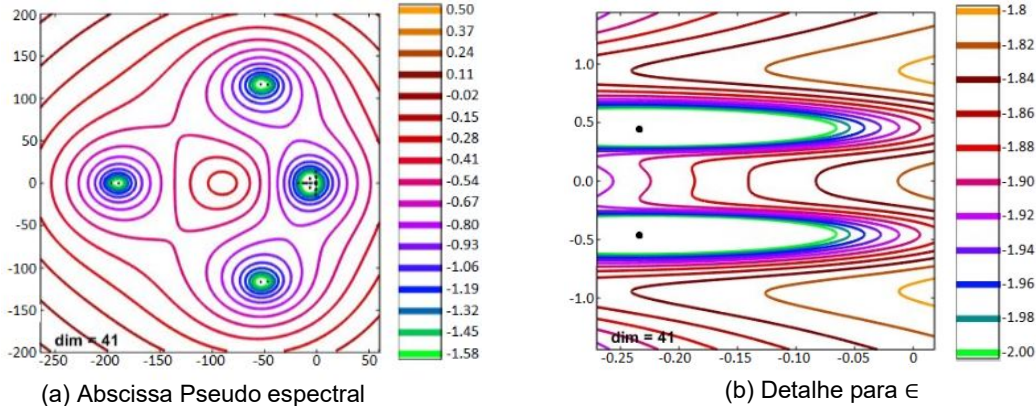


FIGURA 8 – Pseudo-Espectro para sistema em malha fechada com controladores  $K_{21}$  e  $K_{22}$

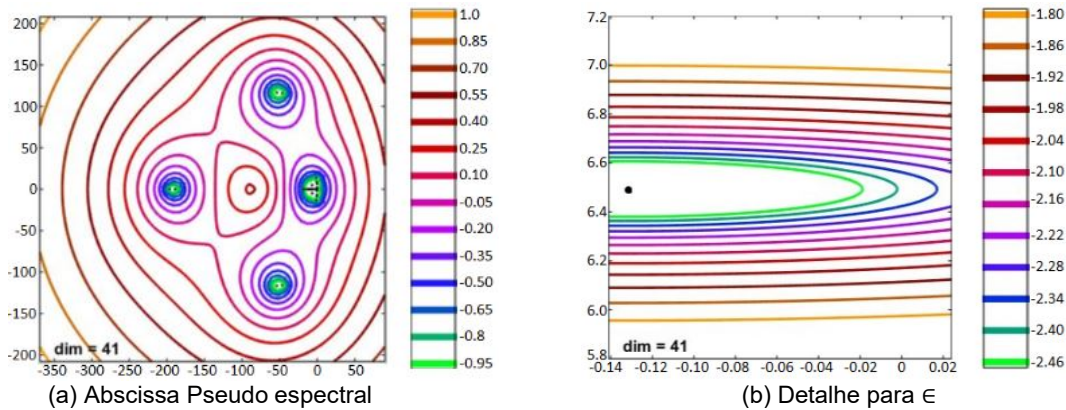


FIGURA 9 – Pseudo-Espectro para sistema em malha fechada com controladores  $K_{31}$  e  $K_{32}$

Avaliando o pseudo-espectro nota-se que para o sistema com adição do controlador projetado pelo domínio da frequência, obteve-se o valor de  $\varepsilon = 0.0022$ , já o que visou a minimização da abscissa espectral, obteve-se um valor de  $\varepsilon = 0.0123$  e o que visou a minimização da norma  $H_\infty$  apresenta  $\varepsilon = 0.0398$ . Dessa forma, o projeto de minimização da norma  $H_\infty$  é o mais robusto, pois sua matriz de estados suporta maiores perturbações  $\varepsilon$ . O que comprova a avaliação dos autovalores do sistema para os diferentes cenários apresentados.

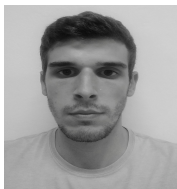
## 6.0 - CONCLUSOES

Através do trabalho desenvolvido, abordou-se a problemática envolvendo sistemas HVDC *multi-Infeed*, principalmente em relação a interação entre elos HVDC. Para tanto, foi proposto um sistema teste com o qual foi possível desenvolver a análise pretendida. Para esse sistema, avaliou-se a interação na operação entre elos por meio do índice MIIF. Através da elaboração de 3 cenários, comprovou-se que existe uma relação da interação com a impedância de acoplamento de elos HVDC. Ao aumentar-se essa impedância, reduz-se a interação. Além disso, foi possível visualizar um possível efeito da interação entre os elos HVDC na ação dos controladores que não apresentaram robustez. Para o cenário 3, o qual apresentou maiores interações, os controladores projetados com base no domínio da frequência e na abscissa espectral, tiveram maiores reduções nos amortecimentos dos modos eletromecânicos de interesse. Apenas o projeto baseado na norma  $H_\infty$  manteve-se com resultados adequados.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SOOD, v. K. HVDC and FACTS controllers: applications of static converters in power systems, 2004
- (2) Sousa, Y. R. Análise da interação entre elos de corrente contínua em redes eletricamente próximas; COPPE, 2014.
- (3) KARAWITA, C. Multi-infeed hvdc interaction studies using small-signal stability assessment. Ieee Transactions, 2009.
- (4) KUNDUR, P. Power System Stability and Control, 1994.
- (5) PAL, B.; CHAUDHURI, B. Robust Control in Power Systems, 2005.
- (6) CHEN, C. T. linear system theory and design, 1999.
- (7) TREFETHEN, L. N.; EMBREE, M. Spectra and Pseudospectra: The Behavior of Nonnormal Matrices and Operators., 2005
- (8) SZECHTMAN, T. W. M.; THIO, C. First benchmark model for hvdc control studies, 1991.
- (9) MACEDO, N. Análise e controle da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência com elos de corrente contínua e compensadores estáticos de reativos, 1992.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Vitor Antunes, graduado em Engenharia de Energia pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente é mestrando em Engenharia Elétrica pela mesma instituição. Tem experiência em estudos dinâmicos de sistemas elétricos de potência, controle e modelagem de sistemas HVDC *Multi-Infeed*.

Aguinaldo Silveira e Silva: Graduado em Engenharia elétrica pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Engenharia elétrica pela UFSC e Doutor pela *University of Manchester Institute of Science and Technology*. Atualmente atua como professor da UFSC. Sua principal área de interesse está em aplicações de controle e dinâmica de sistemas elétricos de potência.